

РЕЦЕНЗІЯ

офіційної рецензентки

кандидатки технічних наук, доцентки кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури

КОНОВАЛЮК ВІКТОРІЇ АНАТОЛІЇВНИ

на дисертаційну роботу **Макаренко Любові Ігорівни**

**«ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ВЕНТИЛЮВАННЯ ПОВІТРЯ З
КОМБІНОВАНИМ ОЧИЩЕННЯМ ВІД ФІЗИЧНИХ, ХІМІЧНИХ ТА
БІОЛОГІЧНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ»**

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.

Актуальність обраної теми дослідження зумовлена комплексом взаємопов'язаних викликів, що стоять перед сучасним суспільством. Погіршення якості атмосферного повітря та поширення вірусних захворювань створюють гостру потребу в забезпеченні безпечного та комфортного повітряного середовища всередині приміщень, де людина проводить значну частину свого часу. Ефективна фільтрація від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів є критично важливою для збереження здоров'я та добробуту. В умовах зростання вартості енергоресурсів та глобальних вимог до енергоефективності та сталого розвитку виникає нагальна потреба в розробленні інженерних рішень, які дозволяють мінімізувати енергоспоживання систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Ця дисертація безпосередньо відповідає на ці виклики, пропонуючи інноваційний підхід до інтегрування вискоєфективної механічної фільтрації (за допомогою НЕРА-фільтрів) з раціональною рекуперацією теплоти. Розроблення фільтр-теплообмінника зі створенням удосконаленої методики розрахунку та доведення його економічної доцільності, а також здатність

забезпечувати санітарні норми зовнішнього повітря зі зменшенням енерговитрат на його нагрівання, робить тему винятково актуальною як для житлового, так і для комерційного сектору. Результати роботи мають значний потенціал для модернізації систем вентиляції, скорочення експлуатаційних витрат та створення більш здорового внутрішнього середовища, що є важливим для подальшого розвитку галузі архітектури та будівництва.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Розроблена фізико-математична модель процесу тепловіддачі базується на апробованих практикою залежностях, що дозволяє кількісно та достовірно описувати функціонування запропонованої системи. Теоретичні результати підтверджено експериментально на підставі сучасних методів планування, виконання та оброблення результатів експерименту. Достовірність результатів експериментальних досліджень ефективності очищення повітря, аеродинамічного опору та коефіцієнтів теплопередачі обумовлена відповідним плануванням, застосуванням сучасних дослідних методик і засобів вимірювальної техніки та використанням апробованих статистичних методів оброблення експериментальних результатів. Результати представлено в критеріальній формі задля можливості їхнього повторного застосування для інших задач в аналогічних діапазонах визначальних критеріїв подібності.

Комплексний підхід, що інтегрує глибоке теоретичне моделювання, ретельні експериментальні дослідження та підтверджену практичну значущість забезпечує переконливу та всебічну обґрунтованість усіх сформульованих висновків дисертації.

3. Наукова новизна одержаних результатів.

У дисертації одержано такі наукові результати.

вперше:

- розроблена фізико-математична модель процесу тепловіддачі конвекцією від потоку теплого відпрацьованого повітря до зовнішньої поверхні пучка

циліндричних трубок, в середині яких рухається холодне зовнішнє повітря для підвищення енергетичної ефективності фільтр-теплообмінника;

- методом повного факторного експерименту отримано рівняння для визначення часу очищення повітря із зниженням концентрації забруднювачів з 200 до 20 мкг/м³ (початкове значення рівня забруднення РМ_{2.5}), зміни витрат повітря з 300 до 800 м³/год та зміни відносної вологості повітря від 35 до 55%;
- в результаті експериментальних досліджень отримано залежність у критеріальному вигляді $Nu=0,3284 \cdot Re^{0,629}$, що описує задачу тепловіддачі конвекцією від переважаючого об'єму теплого відпрацьованого повітря, при його поперечному русі, до зовнішньої поверхні коридорного пучка труб, в середині яких рухається холодне зовнішнє повітря (визначальна температура-середня температура теплого відпрацьованого повітря по усьому об'єму камери теплообмінника, яка змінюється в діапазоні 18-22 °С, визначальний геометричний розмір - довжина трубочки, при співвідношенні об'єму пучка трубочок до об'єму теплообмінної секції 0,001;
- встановлено аеродинамічний опір 10-25 Па запропонованої конструкції фільтр-теплообмінника в залежності від зміни витрат повітря від 300 до 800 м³/год;

удосконалено :

- методику інженерного розрахунку теплообмінника “повітря-повітря” вбудованого в повітроочисник з використанням низькопотенційної теплоти відпрацьованого забрудненого повітря для підігріву свіжого холодного повітря, яке рухається всередині трубок у коридорному їх розташуванні при перехресному русі теплоносіїв (кут атаки 90°);
- удосконалено та набули подальшого розвитку рекомендації для ДБН В.2.2-10:2022 “Заклади охорони здоров'я” щодо кратності повітрообміну отримання повітря необхідної якості при різних рівнях його початкового забруднення для побутових приміщень площею до 150 м²;

набули подальшого розвитку

- науково обґрунтоване застосування фільтр-теплообмінника в умовах контрольованого процесу тепломасообміну як енергоефективної системи очищення повітря від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів з одночасним нагрівом об'єму повітря для дихання;
- конструкція теплообмінника для підігріву зовнішнього (свіжого) повітря за рахунок теплового потенціалу внутрішнього (рециркуляційного) повітря.

Дисертація містить наукові положення, нові науково обґрунтовані теоретичні результати проведених досліджень, які мають істотне значення для галузі знань 19 – Архітектура та будівництво.

Практична цінність роботи

- теоретично доведено та експериментально підтверджено енергоефективність теплообмінної частини очисника повітря для нагріву зовнішнього повітря;
- теоретично отримані та експериментально підтверджено рівняння прогнозування процесу очищення при різних рівнях забруднення;
- визначено експериментально дійсний коефіцієнт тепловіддачі для теплообмінника «фільтр-теплообмінник», отримані нові дані, які характеризують закономірності теплообміну до зовнішньої поверхні коридорного пучка труб в середині яких рухається холодне свіже повітря при швидкості повітряного потоку перед коридорним пучком що змінювалась в діапазоні 1...3,5 м/с в діапазоні числа Рейнольдса $700 < Re < 3500$ і $Pr = 0,73$;
- експериментально отримано критеріальну залежність для процесу тепловіддачі конвекцією від потоку повітря до труб, що ним омивається;
- методика експериментального дослідження повітрообміну при різних рівнях забруднення може бути використана для визначення необхідних кратностей повітрообмінів для приміщень різного призначення;
- методика експериментального дослідження тепловіддачі у теплообміннику «повітря-повітря» може бути використана для визначення шляхів

інтенсифікації процесу теплообміну, зменшення габаритів очисника та збільшення ефективності очищення;

- за результатами порівняння техніко-економічних показників повітроочисника з інженерними системами, що виконують такі ж функції, очевидна його менша вартість і нульове споживання енергії на нагрів зовнішнього повітря;
- побудована експериментальна модель приладу «фільтр-теплообмінник», що може забезпечити очищення повітря у кімнаті площею до 150 м² з ефективністю очищення від РМ_{2.5} мінімум 95% з одночасним процесом передачі теплового потоку від гарячого теплоносія до холодного;
- удосконалено та набули подальшого розвитку рекомендації ДБН В.2.2-10:2022 «Заклади охорони здоров'я» щодо кратності повітрообміну для отримання необхідної якості повітря при різних рівнях початкового забруднення повітря для побутових приміщень площею до 150 м²;
- визначено кількості холодного теплоносія, як повітря для розбавлення надходжень СО₂, для забезпечення умови нагріву цієї кількості повітря гарячим теплоносієм без надходження додаткових енергоресурсів;
- виявлено вплив вологості в приміщенні на процес очищення в фільтр-теплообміннику;
- визначена частка природного осадження в CADR фільтр-теплообмінника.

4. Загальнонаціональне та світове значення роботи

У світовому масштабі, де проблеми забруднення повітря та надмірного енергоспоживання є глобальними, ця робота представляє універсальне та масштабоване рішення. Здатність ефективно очищувати повітря та рекуперувати теплоту зі зменшенням енерговитрат є значним кроком до створення «розумних» та «зелених» будівель. Дослідження показує, як інтегрований інженерний підхід може вирішувати комплексні виклики, пов'язані з кліматичними змінами, енергетичною безпекою та громадським здоров'ям. Це надає цінний досвід та науково-технічну базу для подальших міжнародних досліджень та розробок у галузі будівництва та екологічної

безпеки, сприяючи формуванню стійкого та комфортного життєвого середовища для майбутніх поколінь.

Для України, яка активно прагне до енергетичної незалежності та сталого розвитку, ця праця є надзвичайно актуальною. Розроблений фільтр-теплообмінник здатен очищати повітря на 95% від мікроскопічних частинок, одночасно забезпечуючи економію теплової та електричної енергії. Це прямо сприяє зниженню загального енергоспоживання країни, що вкрай важливо для модернізації інфраструктури та відповідності європейським стандартам енергоефективності. Крім того, прямий вплив на здоров'я та добробут населення через забезпечення санітарних норм зовнішнього повітря та зниження забруднень є фундаментальним внеском у підвищення якості життя українців. Економічна вигода, підтверджена зниженням капітальних та експлуатаційних витрат, робить цю технологію привабливою для широкого впровадження як на державному, так і на приватному рівнях.

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 Q4, три статті в закордонних виданнях держав, яка входить до ОЕСР та ЄС, 4 статі у наукових фахових виданнях України категорії «Б»; 14 тез наукових доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій, які додатково відображають наукові результати дисертації.

6. Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

У дисертаційній роботі не встановлено фактів порушення академічної доброчесності, зокрема проявів плагіату, спотворення або синтезування результатів дослідження. Використані ідеї, результати й тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

7. Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.

Дисертаційне дослідження оформлено коректною українською мовою із застосуванням загальновизнаної наукової термінології. Стиль подання теоретичних узагальнень, результатів експериментів, формулювання висновків і рекомендацій відзначається послідовністю та доступністю для розуміння. Структура та оформлення роботи повністю відповідають вимогам, визначеним нормативними документами Міністерства освіти і науки України та вимогами освітньо-наукової програми.

8. Аналіз основного змісту роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, визначено мету та завдання для її досягнення, предмет і об'єкт дослідження. Наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячений аналізу сучасного стану проблеми забезпечення нормованих концентрацій шкідливих речовин у повітрі приміщень, містить аналітичний огляд заходів щодо зниження забруднення повітря та ефективних способів його очищення. Проведений аналіз сучасних систем фільтрування повітря та способів підвищення їх ефективності. Визначені основні напрямки підвищення ефективності очищення повітря в приміщеннях.

У **другому розділі** проведено теоретичне обґрунтування конструкції фільтра-теплообмінника. Визначено кількість повітря, що проходить очищення, витрату зовнішнього повітря для розбавлення концентрацій CO₂ до ГДК, температурний напір між теплоносіями та дійсну швидкість руху теплоносіїв. Розраховано площу теплообміну для забезпечення необхідної величини теплового потоку. На основі проведених розрахунків визначено конструктивні параметри теплообмінної частини фільтр-теплообмінника. Розроблена модель повітроочищувача з інтегрованим теплообмінником «повітря-повітря», яка узагальнює отримані дані та відображає поєднання теплообмінних процесів з функціями очищення повітря.

У третьому розділі наведено опис експериментального стенду та методи проведення експериментальних досліджень. Досліджений вплив відносної вологості на процес очищення в фільтр-теплообміннику; продуктивність за очищенням повітрям фільтр-теплообмінника з фільтром H11 з визначенням впливу природного осадження.

Коефіцієнти тепловіддачі фільтр-теплообмінника визначені непрямим методом з використанням повного факторного експерименту (ПФЕ) для дворівневих співвідношень факторів з подальшим статистичним обробленням результатів. Отримано математичну модель, яка встановлює зв'язок між вхідними факторами експерименту та вихідними параметрами, що характеризують роботу рециркуляційного агрегату. Доведено експериментально теоретичні дані щодо кратності повітрообміну для забезпечення ефективного очищення повітря. Визначено очисну потужність фільтр-теплообмінника для видалення різних рівнів забруднення $PM_{2.5}$ при зміні деяких параметрів внутрішнього повітряного середовища (відносна вологість, кратність повітрообміну) за одиницю часу. Визначена експериментально величина продуктивності за очищенням повітрям повітроочищувача для прогнозованої тривалості очищення не більше 1 години.

У четвертому розділі наведено техніко-економічне обґрунтування вибору системи «фільтр-теплообмінник» як системи очищення повітря з додатковим економічним ефектом. Визначена економічна доцільність впровадження фільтр-теплообмінника порівняно з іншими варіантами інженерних систем. Фільтр-теплообмінник має нижчі капітальні та експлуатаційні витрати, зокрема може заощадити від 420 до 582 Вт теплової енергії на покриття вентиляційних тепловтрат. Строк окупності не перевищує один рік.

У загальних висновках узагальнено основні наукові результати дослідження відповідно до поставлених завдань.

9. Зауваження та дискусійні питання.

1. Бажано б було провести дослідження щодо впливу розташування фільтр-теплообмінника у приміщенні на ефективність розподілу чистого повітря та загальну якість мікроклімату.

2. Не проаналізовано можливості прогнозування строку служби фільтрів HEPA H11 в умовах різних рівнів забруднення та інтенсивності експлуатації, що важливо для планування технічного обслуговування.

3. Не проаналізовано можливості модульної конструкції фільтр-теплообмінника, яка б дозволила масштабувати систему для приміщень різної площі та призначення, зберігаючи оптимальні показники ефективності.

4. Не проаналізовано оптимальні стратегії вентиляції для гібридних систем, що поєднують природну та механічну вентиляцію з використанням фільтр-теплообмінника, з метою максимізації енергозбереження та якості повітря.

5. Бажано б було провести дослідження щодо економічної доцільності впровадження системи в будинках з різним рівнем теплоізоляції та герметичності, оскільки ці фактори суттєво впливають на загальне енергоспоживання.

6. Не проаналізовано соціальні та екологічні вигоди від широкомасштабного впровадження фільтр-теплообмінника, такі як зниження показників захворюваності, підвищення продуктивності праці та зменшення вуглецевого сліду будівельного сектору.

7. Бажано б було провести дослідження щодо стандартизації та сертифікації розробленої системи для її подальшого комерційного виробництва та широкого впровадження на ринку, враховуючи національні та міжнародні нормативи.

Зроблені зауваження не є принциповими і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертація Макаренко Любові Ігорівни на тему «Енергоефективне вентилювання повітря з комбінованим очищенням від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів» є самостійною завершеною науковою роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати. Зміст дисертації повною мірою відповідає вимогам освітньо-наукової програми підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво». Робота також узгоджується з вимогами, встановленими Міністерством освіти і науки України до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії (наказ МОН України від 12.01.2017 № 40 зі змінами від 31.05.2019 № 759), а також пунктами 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. На підставі викладеного Макаренко Любов Ігорівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво».

Офіційна рецензентка
кандидатка технічних наук, доцентка
кафедри теплогазопостачання і
вентиляції Київського національного
університету будівництва і архітектури



Вікторія КОНОВАЛЮК

Підпис доцентки
Вікторії Коновалюк
ЗАСВІДЧУЮ

Секретар Вченої ради Київського
національного університету
будівництва і архітектури



Микола КЛИМЕНКО