

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри споруд

спеціального призначення

СКОЧКО ВОЛОДИМИРА ІГОРОВИЧА

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 зумовлена низкою нагальних викликів сучасності, що стосуються якості внутрішнього повітря, енергоефективності будівель та сталого розвитку. Зростаюче антропогенне забруднення атмосферного повітря, а також поширення респіраторних захворювань та вірусів, загострюють проблему забезпечення безпечного та комфортного мікроклімату в житлових, офісних та інших громадських приміщеннях. Водночас, значна частка енергоресурсів у будівлях витрачається на системи вентиляції та опалення, що в умовах зростання цін на енергоносії та потреби у зменшенні вуглецевого сліду вимагає розробки та впровадження енергоефективних рішень. Таким чином, дослідження, спрямовані на створення комплексних систем, які поєднують вискоелефективну фільтрацію повітря з раціональним використанням теплової енергії, є критично важливими для покращення здоров'я населення, зниження експлуатаційних витрат та досягнення цілей сталого розвитку в галузі архітектури та будівництва.

Крім того, питання очищення повітря від комплексних забруднювачів – фізичних (наприклад, $PM_{2.5}$), хімічних та біологічних – стає дедалі актуальнішим для підтримки здоров'я та комфорту мешканців. Дисертаційна робота Макаренко Любові, що присвячена розробці енергоефективних систем вентилявання з комбінованим очищенням, є надзвичайно актуальною та своєчасною. Вона спрямована на вирішення ключових проблем, пов'язаних з якістю повітря та енергозбереженням у будівлях, що повністю відповідає сучасним викликам будівельної галузі.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки та результати дисертаційної роботи мають високий ступінь обґрунтованості, що досягається завдяки розробці фізико-математичної моделі процесу тепловіддачі, яка дозволяє кількісно описувати функціонування системи. Ця теоретична база підкріплена ретельними експериментальними дослідженнями, включаючи метод повного факторного експерименту для визначення часу очищення повітря та отримання критеріальної залежності тепловіддачі, що забезпечує надійність одержаних даних, базуючись на реальних вимірах аеродинамічного опору та коефіцієнта тепловіддачі. Практична цінність роботи, яка полягає у розробці інженерного розрахунку для приладів типу "фільтр-теплообмінник" та створенні функціонуючої експериментальної моделі, здатна забезпечити очищення повітря у приміщеннях площею до 150 м² з високою ефективністю, а також відповідність удосконалених рекомендацій ДБН В.2.2-10:2022, свідчить про безпосередню готовність результатів до впровадження. Таким чином, комплексне поєднання теоретичних розробок, емпіричного підтвердження та практичної спрямованості забезпечує переконливу обґрунтованість усіх представлених наукових положень та висновків.

3. Наукова новизна одержаних результатів.

У дисертації одержані наступні 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 свіже повітря для підвищення енергетичної ефективності фільтра-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 свіже 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 фільтра- 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 фільтра-теплообмінника в умовах контрольованого процесу тепломасообміну як енергоефективної системи очищення повітря від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів з одночасним нагрівом об'єкту 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 полягає в розробці інженерного розрахунку для побудови приладів типу «фільтр-теплообмінник».

В роботі одержані практично важливі результати:

- 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 - теплообмінника», 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 в 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, очевидно її меншу вартість і нульве споживання енергії на нагрів зовнішнього повітря;
- побудована експериментальна модель приладу «фільтр-теплообмінник», що може забезпечити очищення повітря в кімнаті площею до 150m^2 з ефективністю очищення від $\text{PM}_{2.5}$ 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 150m^2 ;
- визначено кількості холодного теплоносія, як повітря для розбавлення надходжень CO_2 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.

Для України, яка прагне енергетичної незалежності та сталого розвитку, ця робота є надзвичайно актуальною. Запропонована система фільтрації та рекуперації тепла дозволяє заощаджувати значні обсяги електроенергії. Це прямий внесок у зменшення енергоємності економіки та підвищення енергетичної безпеки країни. Крім того, розробка відповідає сучасним українським стандартам будівництва з майже нульовим споживанням енергії

(nZEB), що робить її цінною для нового будівництва та термомодернізації існуючих споруд.

Водночас, покращення якості повітря в приміщеннях є критично важливим для здоров'я та продуктивності українців. Забезпечення санітарної норми свіжого повітря з компенсацією CO₂ та очищення повітря до 95% від частинок PM_{2.5} сприятиме зниженню захворюваності на респіраторні хвороби, покращенню самопочуття та підвищенню якості життя, особливо в умовах зростаючого забруднення атмосферного повітря та поширення вірусів. Економічне обґрунтування, яке демонструє нижчі капітальні та експлуатаційні витрати розробленої системи порівняно з існуючими аналогами, робить її привабливою для широкого впровадження як у приватному, так і у державному секторах.

У глобальному масштабі, де забруднення повітря є однією з головних загроз для здоров'я, а будівлі споживають величезну кількість енергії, ця дисертація пропонує універсальне та інноваційне рішення. За даними ВООЗ, мільйони людей щорічно помирають через забруднення повітря, причому значна частина цього відбувається у приміщеннях. Запропонована технологія ефективної фільтрації повітря в поєднанні з рециркуляцією тепла вирішує цю подвійну проблему. Цей інтегрований підхід до вирішення взаємопов'язаних проблем якості повітря, енергоефективності та комфорту може слугувати цінним прикладом для міжнародної спільноти, пропонуючи міцну наукову та інженерну основу для подальших досліджень та впровадження екологічно чистих та енергозберігаючих технологій по всьому світу.

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

Не встановлено фактів порушення академічної доброчесності у дисертаційній роботі, зокрема проявів плагіату, спотворення або вигадкування результатів дослідження. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело. Дисертація характеризується єдністю змісту та відповідає вимогам щодо її оформлення.

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.

8. Аналіз основного змісту роботи.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, предмет і об'єкт дослідження. Вказані положення, що визначають наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача і надано інформацію про апробацію результатів дослідження.

В першому розділі проаналізовано літературні джерела способів забезпечення безпечного повітряного простору перебування людини. Описані основні забруднювачі атмосферного повітря та наслідки забруднення для людини. Наведені заходи щодо запобігання та зниження забруднення повітря на основі вітчизняної та міжнародної нормативної та технічної документації. Описано методи та способи очищення повітря від забруднень: процеси, класифікації фільтрів та існуючі установки для очищення повітря. Проаналізовано системи фільтрації повітря різної конструкції та видів, параметри підбору очисного обладнання та їх ефективність для очищення від

різних видів забруднення та способи підвищення їх ефективності. Встановлено, що найдієвішим способом очищення повітря від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів є фізичне видалення забрудника, а найефективнішим засобом є витяжна вентиляція та механічна фільтрація повітря з комбінацією фільтрів. Розглянуто приклади використання індивідуальних повітроочисних систем як шляхи модернізації систем вентиляції з метою скорочення споживання енергії. Визначено найкращі параметри повітряного середовища для постійного перебування людей в приміщеннях обладнаних повітроочисними інженерними мережами. Означені варіанти використання вбудованих елементів в повітроочисні установки, що в більшості випадків мають низьку ефективність. Проаналізовано методи та методики визначено оптимальні умови для очищення повітря: оптимізацію кратності повітрообміну шляхом використання децентралізованих систем очищення повітря, використання вискоефективних фільтрів HEPA або їх комбінації, а також надання в приміщення санітарної норми повітря.

В другому розділі розраховано конструктив фільтр-теплообмінника.

Представлено фізико-математичну модель процесу тепловіддачі через конструкцію плоскої стінки від потоку, що її омиває. Викладено методику теоретичного дослідження з використанням методів теоретичної теплотехніки, аналітичної математики, методів моделювання процесів і технічних систем. В розділі вирішено такі наукові задачі: визначено кількість рециркуляційного повітря з розрахунку теплового потенціалу для підігріву зовнішнього (свіжого) повітря – гарячий теплоносій; визначено необхідну кількість повітря для подавання санітарної норми повітря для дихання людини в приміщення – холодний теплоносій; складено рівняння теплового балансу теплообмінника «повітря-повітря»; визначено температурний тиск між теплоносіями та дійсну швидкість руху теплоносіїв; визначено коефіцієнт тепловіддачі та теплопередачі; визначити необхідну площа поверхні нагріву теплообмінника. На основі отриманих даних змодельовано конструкцію фільтр-теплообмінника з теплообмінною частиною вбудованою в повітроочисник.

В третьому розділі проведені експериментальні дослідження в фільтр-теплообміннику. Наведено опис експериментального стенду та методи проведення експериментальних досліджень. Визначені оптимальні умови використання фільтрувальних елементів та параметрів самого очисника. Доведено експериментально теоретичні дані щодо кратності повітрообміну для забезпечення ефективного очищення повітря. Визначено очисну потужність фільтр-калорифера 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 CADR повітроочищувача для прогнозованої тривалості очищення не більше 1 години. Менша величина CADR призведе до поступового накопичення забруднювачів, що нівелює роботу повітроочищувача. Даних які отримали в досліді, доводять, що процес природнього осадження та величина зовнішнього забруднення не дозволяють очистити повітря без використання механічної фільтрації при будь якому з вказаних в дослідженні забруднень. Термін очищення в повітроочищувачі даного типу буде зменшуватися на 20хвилин при підвищенні кратності повітрообміну на 1 крат при низьких рівнях забруднення , та на 1 годину при значних. Але кратність повітрообміну для очищення не може бути менше двох. Визначено рівняння за яким буде визначено час очищення при відомих вхідних даних (рівні забруднення, відносна вологість, потужність повітроочищення). Одночасно досліджувалися процеси тепломасообміну в теплообмінній секції фільтр-калорифера. Визначено критеріального рівняння Nu для даного конкретного випадку.

В четвертому розділі наведено техніко-економічне обґрунтування вибору системи фільтр-теплообмінник як системи очищення повітря з додатковим економічним ефектом. Визначена економічна доцільність впровадження фільтр-теплообмінника в порівнянні з іншими інженерними системами, що виконують схожі функції при порівняння капітальних та експлуатаційних витрат варіантів компонування обладнання, що виконує

умову забезпечення приміщення свіжим повітрям в об'ємі $41\text{ м}^3/\text{год}$, та можливістю очищення $800\text{ м}^3/\text{год}$ повітря до рівні якості повітря рекомендованих ВООЗ. Наведена методологія визначення економічної ефективності та методика оцінки економічної ефективності фільтр-теплообмінника. Вартість фільтр-теплообмінника має нижчі капітальні та експлуатаційні витрати. І може заощадити від 0,42 до 0,582 кВт теплової енергії за годину необхідної для нагріву зовнішнього повітря в зимовий період (згідно Таблиці 10897,92грн за опалювальний період). Дохід створений економією витрат в перший же рік дозволить перекрити експлуатаційні витрати на функціонування фільтр-теплообмінника.

У дисертаційному дослідженні теоретично і експериментально обґрунтовано використання повітроочисників повітря для приміщень побутового призначення, доведення їх ефективності при очищенні повітря від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів та можливості удосконалення їх енергоефективності при використанні в рециркуляційній частині теплообмінника типу «повітря-повітря» , що дозволить отримати санітарну норму повітря для дихання людини з розрахунку розбавлення рівнів CO_2 та не використовувати будь які джерела енергії на нагрів цього повітря.

9. Зауваження та дискусійні питання .

1. Не проаналізовано динаміку зміни ефективності тепловіддачі та аеродинамічного опору трубчастого теплообмінника в умовах тривалої експлуатації та поступового накопичення забруднень (наприклад, пилу, жирових аерозолів, біоплівки) на його поверхнях та фільтрувальних елементах. Це є важливим для прогнозування експлуатаційних витрат та графіка обслуговування.

2. Бажано б було провести дослідження щодо впливу специфічного хімічного складу частинок (наприклад, твердих продуктів горіння, промислових викидів) та наявності летких органічних сполук (ЛОС) на ефективність фільтрації НЕРА H11 фільтром, а також на потенційне поглинання цих речовин фільтруючим матеріалом.

3. Бажано б було провести дослідження акустичної ефективності запропонованої конструкції фільтра-теплообмінника, особливо при високих кратностях повітрообміну, оскільки рівень шуму є важливим фактором комфорту в приміщеннях.

4. Не проаналізовано вплив додаткових факторів на тепловіддачу, окрім зазначених у критеріальній залежності Nu , зокрема, вплив конденсації вологи та потенційного обмерзання на поверхнях труб теплообмінника при низьких температурах зовнішнього повітря, що є актуальним для кліматичних умов України.

5. Бажано б було провести дослідження оптимальних режимів роботи фільтра-теплообмінника в умовах надзвичайної забрудненості повітря, спричиненої, наприклад, лісовими пожежами або промисловими викидами, для оцінки його здатності до швидкого відновлення нормативних показників якості повітря.

6. Не проаналізовано вплив сезонних коливань зовнішнього повітря (значних перепадів температури та вологості) на стабільність енергетичної ефективності та ефективності фільтрації системи протягом усього року, що дозволило б оптимізувати її застосування у різних кліматичних зонах.

7. Бажано б було провести дослідження щодо інтеграції розробленого фільтра-теплообмінника в існуючі централізовані системи вентиляції та кондиціонування будівель, оцінюючи технічні складності монтажу та можливі додаткові витрати.

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

ВИСНОВОК

Дисертація Макаренко Любові Ігорівни на тему «Енергоефективне вентилявання 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».

Офіційний рецензент
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри споруд спеціального
призначення Київського національного
університету будівництва і архітектури



Володимир СКОЧКО

Підпис професора
Володимира Скочко
ЗАСВІДЧУЮ

Секретар Вченої ради Київського
національного університету
будівництва і архітектури



Микола КЛИМЕНКО