

ВІДГУК

офіційної опонентки

кандидатки технічних наук, доцентки кафедри теплової та
альтернативної енергетики Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУХОДУБ ІРИНИ ОЛЕГІВНИ

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 дисертаційного дослідження зумовлена комплексом назрілих екологічних, медичних та енергетичних викликів сучасності, що вимагають негайних інженерних рішень. Якість атмосферного повітря, що безпосередньо впливає на здоров'я людини, постійно знижується через зростаючу концентрацію антропогенних та природних забруднювачів, таких як дрібнодисперсні частки ($PM_{2.5}$, PM_{10}), леткі органічні сполуки та біологічні об'єкти. Особливо гостро ця проблема постає в Україні, де військові дії з 2014 року та повномасштабне вторгнення призвели до колосальних збитків довкіллю, включаючи масштабні викиди в атмосферу, що значно погіршують якість повітря, про що свідчать дані Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Додатковим фактором є періодичні надходження природних аномалій, як-от пилові маси з Сахари, що спричиняють критичні рівні забруднення $PM_{2.5}$, значно перевищуючи рекомендації ВООЗ та несучи пряму загрозу серцево-легеневій системі людини.

Таким чином, постає нагальне завдання щодо розробки та вдосконалення вискоєфективних, компактних та економічних пристроїв для очищення повітря, які б поєднували якісну фільтрацію з раціональним споживанням енергії. Ця дисертація безпосередньо вирішує це завдання, пропонуючи конструкцію фільтра-теплообмінника з НЕРА H11 фільтром та рекуперативним повітро-повітряним теплообмінником. Вона дозволяє забезпечити санітарну норму свіжого повітря, компенсацію CO₂ та високу ефективність очищення без додаткових енерговитрат на підігрів, що є ключовим для здоров'я населення, зниження експлуатаційних витрат та сприяння енергетичній незалежності України.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Теоретична база представлена розробленою фізико-математичною моделлю процесу тепловіддачі. Ця модель не лише кількісно та достовірно описує роботу системи, а й дозволяє прогнозувати її поведінку за різних експлуатаційних умов. Висновки дисертаційної роботи є глибоко обґрунтованими та всебічними, що досягається завдяки збалансованому поєднанню та взаємному підтвердженню теоретичних положень, емпіричних даних та практичної апробації.

Експериментальне підтвердження відіграло ключову роль у валідації цих теоретичних викладок. Проведення повного факторного експерименту для оцінки ефективності очищення повітря, отримання критеріальних залежностей для тепловіддачі, а також вимірювання аеродинамічного опору та коефіцієнтів теплопередачі, ґрунтувалися на реальних даних, що суттєво підвищило достовірність і надійність усіх сформульованих висновків. Практична цінність роботи додатково посилює їхню обґрунтованість, адже включає розробку інженерного розрахунку для пристроїв типу "фільтр-теплообмінник" та створення функціонуючої експериментальної моделі. Важливо, що отримані результати та рекомендації відповідають оновленим

будівельним нормам, підкреслюючи їхню готовність до негайного впровадження.

Комплексний підхід, що об'єднує глибоке теоретичне моделювання, ретельні експериментальні дослідження та підтверджену практичну значимість, забезпечує переконливу та всебічну обґрунтованість усіх висновків дисертації.

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 90^0);
- 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 м^2 ;

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'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 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 150 м^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 150 м^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.

Ця дисертаційна робота має вагомe загальнонаціональне та світове значення, оскільки пропонує інноваційне рішення для одночасного вирішення критичних проблем якості повітря та енергоефективності будівель. В умовах України, що прагне до енергетичної незалежності та відбудови, розроблений фільтр-теплообмінник забезпечує очищення повітря та значну економію енергії без додаткового підігріву, сприяючи зниженню енергосмності економіки та покращенню здоров'я населення. У світовому масштабі, де забруднення повітря та споживання енергії є глобальними викликами, запропонована система є універсальним та масштабованим інженерним підходом до створення стійких, комфортних та енергоефективних життєвих просторів, демонструючи інтегроване рішення для комплексних екологічних, економічних та соціальних проблем.

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 загальноновизнаної 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 високоефективних 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 площу 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 20 хвилин 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 опаловальний 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. Доцільним є проведення дослідження щодо оптимізації енергоспоживання вентиляторів пристрою, особливо в контексті забезпечення низького загального аеродинамічного опору системи.

2. Для аналізу характеристик пристроїв, які включають теплообмінні та аеродинамічні процеси, доцільно застосовувати ексергетичний аналіз.

3. Проаналізовано вплив вологості повітря на ефективність роботи фільтраційної частини системи при відносній вологості 35–55%. Водночас аналіз впливу вологості на теплообмінну частину не проводився, зокрема з точки зору можливості конденсації водяної пари та утворення інею.

4. Вплив температурних зон України на розрахункові та фактичні показники енергоефективності фільтра-теплообмінника в умовах опалювального та неопалювального періодів не було проаналізовано.

5. Доцільно провести дослідження щодо можливості інтеграції джерел відновлюваної енергії для компенсації електроспоживання пристрою.

6. Рекомендовано провести дослідження оптимізації енергоспоживання пристрою з фільтром-теплообмінником за рахунок впровадження системи управління з допомогою датчиків якості повітря та контролерів.

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

ВИСНОВОК

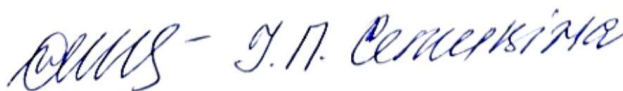
Дисертація Макаренко Любові Ігорівни на тему «Енергоефективне вентилування повітря з комбінованим очищенням від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів» є самостійною завершеною науковою роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати. Зміст дисертації повною мірою відповідає вимогам 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 опонентка
кандидатка технічних наук, доцентка
кафедри теплової та альтернативної
енергетики Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Ірина СУХОДУБ





«21» 08 2025 року