

АНОТАЦІЯ

Макаренко Л.І. Енергоефективне вентилявання повітря з комбінованим очищенням від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». - Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2025.

Якість атмосферного повітря є критично важливим детермінантом здоров'я людини, оскільки воно безпосередньо зазнає впливу контамінації різноманітними забруднювачами. Ці забруднювачі, що надходять внаслідок антропогенних емісій або утворюються в навколишньому середовищі за рахунок перевищення гранично допустимих концентрацій природних компонентів, включають характерні фізичні агенти, хімічні сполуки та біологічні об'єкти (мікроорганізми).

Кількість забруднювачів в повітрі у зваженому стані може змінюватися протягом доби від безпечного до небезпечного рівнів концентрацій. Деякі види і рівні концентрацій забруднювачів при тривалому їх впливі на людину, можуть вагомо не впливати на здоров'я, але деякі вже через найкоротший проміжок часу суттєво шкодять. Повітряне середовище України протягом 2014-2024 років додатково перебуває під впливом забруднювачів, які виникають у результаті військових дій (фізичних чинників та хімічних речовин у результаті вибухів та горіння промислових об'єктів, нафтогазових сховищ, складів, житлових та соціальних будівель) та які несуть небезпеку здоров'ю людини. Наслідками повномасштабного вторгнення є понад 6689 випадків шкоди довкіллю в розмірі 2,779 трильйонів гривень – з них шкода спричинена викидами в атмосферу – 784,16 трильйонів за даними офіційного ресурсу Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України «Екозагроза» станом на листопад 2024 року (<https://ecozagroza.gov.ua/>). До

небезпечних речовин під час воєнних дій періодично додаються і наслідки забруднення повітряного середовища через переміщення пилових мас з пустелі Сахара, які у березні-квітні 2024 року були сталими. Поширення пилу у повітряному просторі України в квітні 2024 спричинило погіршення якості повітря через підвищення концентрації дрібнодисперсних часток – так званого “пилу” з Сахари. Такий пил представляє собою мікроскопічні тверді часточки (англ. Particulate matter, PM) з мінеральних сполук, більшість з яких силікати (мусковіт, кварц, каолін та інші) та карбонати (кальцит, доломіт). Самі по собі ці сполуки не шкідливі для людини, але у вигляді дрібнодисперсних частинок, що знаходяться в зваженому стані в повітрі, $PM_{2.5}$ та PM_{10} (фракції в діаметрі менше 2,5 та 10 мікрон відповідно) і є найбільш небезпечними за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ). Через невеликий розмір часточок PM, деякі з них через систему дихання можуть потрапляти в кров і з нею транспортуватися по усьому тілу, осідаючи в серці, мозку та інших органах.

Дрібнодисперсні часточки $PM_{2.5}$ та PM_{10} в великих концентраціях значно погіршують якість повітря, яка оцінюється індексом якості повітря (англ. Air quality index, AQI). Всесвітня організація охорони здоров'я змінила рекомендації щодо якості повітря 22 вересня 2021 року, що стало першим великим оновленням стандартів встановлених з 2005 року. Зміни покращують стандарти якості повітря за основними забруднювачами: $PM_{2.5}$ - озоном, PM_{10} - діоксидом азоту, сірчистим газом та монооксидом вуглецю.

В Україні рівень $PM_{2.5}$ не шкідливий для здоров'я якщо він не перевищує 5 мкг/м^3 . У березні 2024 року, під час поширення пилових мас з Сахари, були зафіксовані значення $PM_{2.5}$ до 1000 мкг/м^3 . Населенню рекомендували обмежити перебування ззовні та не відкривати вікна для провітрювання. Загальні проблеми зі здоров'ям та захворювання, що викликаються $PM_{2.5}$ та PM_{10} , включають хвороби серця та легень, бронхіт, емфізема, астма та більш інтенсивні загострення, передчасна смерть.

Усі ці події, на додачу до досвіду боротьби з пандемією COVID, формують нові вимоги до організації безпечного повітряного середовища в місцях тимчасового або постійного перебування людей. Основними забруднювачами повітря в приміщенні є леткі органічні сполуки і тверді часточки. Джерелами твердих часточок є також явища куріння, приготування їжі, опалення, паління свічок та використання інсектицидів, домашні тварини, хатня робота та, навіть, пересування по приміщенню людей. Очікується, що через постійне економічне зростання та збільшення населення в багатьох регіонах світу, рівень забруднення атмосферного повітря зросте, що призведе до збільшення кількості респіраторних захворювань.

У зв'язку із цим зростають технологічні вимоги до систем вентиляції з фільтруванням повітря і підвищенням ефективності очищення та надійності забезпечення технологічних вимог протягом заданого часу експлуатації та перебування людини у приміщенні різного призначення. Важливим етапом наукових досліджень є техніко-економічне обґрунтування доцільності облаштування таких систем.

В даний час для очищення повітря, що подається в приміщення за допомогою вентиляційних систем використовуються, в більшості випадків, фільтри грубої очистки G4-F9, що мають низьку ефективність фільтрації. Найвищу ефективність очищення повітря до якості, рекомендованої ВООЗ показали компонування методу механічної фільтрації за допомогою високоефективних фільтрів (англ. High Efficiency Particulate Air, HEPA). Високоефективні фільтри типу HEPA H11-H14, мають високу ефективність очищення від дрібнодисперсних часточок РМ та використовуються для кінцевого очищення повітря в системах припливної вентиляції до рівня стерильності в чистих зонах мікроелектронної, мікробіологічної, фармацевтичної, медичної, харчової галузей. Але, зазвичай не використовуються в житлових чи офісних приміщеннях. Такі фільтри характеризуються значним аеродинамічним опором, що компенсується застосуванням вентиляторів із значним енергоспоживанням.

Враховуючи вищевказане і ситуацію всесвітньої пандемії, пов'язаної з поширенням вірусів та постійне дорожчання енергетичних ресурсів, постає завдання щодо вдосконалення існуючих та створення нових високоефективних компактних та економічних апаратів для очищення повітряного середовища від забруднень, а також зручне управління ними в залежності від аналізу факторів зовнішнього середовища та параметрів мікроклімату перебування людини з метою створення необхідних умов на робочих місцях та підтримки безпечного середовища в побуті.

Дисертаційне дослідження присвячене розробленню конструкції пристрою для забезпечення необхідної якості повітря на основі взаємопов'язаних раціональних значень трьох параметрів: кратність повітрообміну; якість фільтрації внутрішнього повітря від мікроскопічних твердих часточок із забезпеченням санітарної норми кількості свіжого повітря для дихання людини; ефективне споживання енергії для підігріву цього повітря.

Розроблена конструкція повітроочисника (фільтр-теплообмінник) з фільтруючою вставкою HEPA H11 та додатковою рециркуляційною секцією із рекуперативним теплообмінником "повітря-повітря" в ній для підігріву зовнішнього повітря за рахунок теплоти відпрацьованого повітря. Дане дослідження присвячене встановленню практичної цінності запропонованої конструкції фільтра-теплообмінника на основі фільтруючої вставки HEPA H11 з додатковою секцією підігріву зовнішнього повітря до досягнення відповідності санітарним нормам якості загальної кількості повітря у приміщенні. Додаткова секція підігріву зовнішнього повітря розміщена в середині конструкції рециркуляційної частини очищувача повітря. На основі аналізу літературних джерел та попередніх досліджень встановлено що 20 частин відпрацьованого, рециркуляційного, повітря спроможні через теплообмінник підігріти одну частину свіжого холодного повітря і після їх змішування загальна кількість вентиляваного повітря здатна задовольнити нормовані показники чистоти та температури, без додаткового використання

любого із видів енергії. При цьому температура гарячого теплоносія (відпрацьованого повітря) може знизитись до 2°C. Таким чином, розроблена конструкція повітроочисника з додатковою рециркуляційною секцією із рекуперативним теплообмінником “повітря-повітря” в ній для підігріву зовнішнього повітря за рахунок теплоти відпрацьованого повітря дозволить зекономити близько 50 Вт електроенергії на один метр кубічний повітря на годину для повітря, яке вентилюється. При цьому забезпечується санітарна норма подачі кількості свіжого повітря для дихання однієї людини з компенсацією рівнів викидів нею кількості CO₂. В даному випадку, використання фільтрувальної вставки типу HEPA H11 в поєднанні з високою кратністю повітрообміну, дозволяє отримати максимальну ефективність очищення повітря в приміщення до 95% від початкового забруднення часточками. Визначено необхідні теплотехнічні параметри фільтра-теплообмінника та геометричні розміри. Робота приладу розрахована на періодичну дію: при знаходженні людини в кімнати, при необхідності провітрювання чи компенсації витяжного повітря від роботи інших витяжних систем невеликої потужності. Всі теоретичні розрахунки пройшли перевірку в натурних умовах.

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 вискоелективних 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 повітрочищувачі 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 порівнянні капітальних та експлуатаційних витрат варіантів компонування обладнання, що виконує умову забезпечення приміщення свіжим повітрям в об'ємі 41м³/год, та можливістю очищення 800м³/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 CO₂ та не використовувати будь які джерела енергії на нагрів цього повітря.

Ключові слова: очищувач повітря, фільтр-теплообмінник, рекуперативний теплообмінник, рекуперація тепла, очисник рециркуляційного повітря персоналізована вентиляція, якість повітря в приміщенні (IAQ), енергоефективність, ефективність вентиляції, енергоресурсозбереження, вентиляційний контроль повітряно-крапельної інфекції, очисники повітря в приміщенні, системи очищення повітря, повітряні фільтри, фільтр НЕРА, механічна фільтрація повітря, очищення повітря, оброблення повітря, портативний очищувач повітря; видалення часток PM_{2.5}; повітрообмін; рециркуляційна установка; очищувач повітря,

відповідальне обладнання, коефіцієнт теплопередачі, теплообмін , тепломасообмін, чисельний метод, математичне моделювання, чисельний метод дослідження, рівняння регресії.

Список публікацій здобувача

Публікації наукових статей .

1. Макаренко, Л. І. ., & Приймак, О. В. . (2023). Забезпечення рекомендованої ВООЗ якості повітря в офісних приміщеннях з існуючою системою вентиляції . Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 44, 17–22. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.17-22>
2. Макаренко, Л., & Приймак, О. (2024). Кратність повітрообміну як засіб забезпечення вимог до чистоти повітря на основі високоефективних фільтрів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 46, 18–27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.18-27>
3. Макаренко, Л. (2024). Модель повітроочисника з фільтрувальними вставками НЕРА 11 та теплообмінником нагріву зовнішнього повітря в рециркуляційній секції. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 3(2), 67–77. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240302.05>
4. Макаренко, Л., & Приймак, О. (2024). Ефективність рециркуляційного повітроочищувача в реальних умовах при варіації продуктивності та вмісту $PM_{2.5}$. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 48, 21–31. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.21-31>
5. Makarenko, L. (2024). Experimental determination of the heat transfer coefficient by a simplified method for the stationary heat exchange mode in the air cleaner. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 3(5), 18–29. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240305.03> (*Index Copernicus; Crossref*)
6. Oleksandr Pryimak, Liubov Makarenko (2024). Reducing the cleaning time of $PM_{2.5}$ pollution to WHO-recommended air quality levels with a recirculation

filter unit. Construction of optimized energy potential . Vol. 13, 2024, 143-151. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2024.13.14> (*Index Copernicus*)

7. Макаренко, Л. (2025). Ефективне вентилявання приміщень з комбінованим очищенням від забруднювачів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 51, 74–89. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.51.74-89>

Публікації тез.

1. Тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, м. Київ, 10 лютого IV Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, м. Київ, 10 лютого 2022 року/ редкол. О.С.Волошкіна та ін. – К.: ІТТА, 2022. – 180с.

Теза Макаренко Л.І. Якість повітря в сучасних містах і створення безпечного повітряного середовища в житлових та офісних приміщеннях за допомогою очищувачів повітря. - 36-38 с.

2. Матеріали конференції «Енергоощадні машини і технології», Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 17-19 травня 2022 р. – К.: КНУБА, 2022. – 209 с. Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури (протокол №51 від 27.06.2022 р.)

Теза Любов Макаренко, Олександр Приймак. Повітрообмін для безпечного повітряного середовища в житлових приміщеннях за допомогою енергоефективних очищувачів повітря. – 122- 126 с. Сертифікат ID:2022-128.

3. Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «ERE-2022» м. Київ, 23-25 листопад 2022 року. – К.: ІТТА, 2022. – 87 с.

Теза Макаренко Л.І. Кратність повітрообміну як засіб забезпечення вимог до чистоти повітря на основі високоефективних фільтрів .54-55 .
https://www.researchgate.net/publication/372779809_ERE-2022_Roboca_programa_ta_tezi_dopovidej_III-i_miznarodnoi_naukovo-prakticnoi_konferencii_Ekologia_Resursi_Energia_Bagatofunkcionalni_eko_-

ta_energoefektivni_reursozberigauci_tehnologii_v_arhitektur

<https://www.knuba.edu.ua/faculties/fise/ere-2/>

4. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2023, 607 с..

Теза за доповіддю . Макаренко Л.І., Приймак О.В. Забезпечення рекомендованої ВООЗ якості повітря в офісних приміщеннях з існуючою системою вентиляції - 149-155 с. https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/materialy-konferencziyi_zelene-budivnycztvo_2023.pdf

5. Матеріали конференції «Енергоощадні машини і технології», Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 травня 2023 р. – К.: КНУБА, 2023. – 180 с. Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури (протокол №9 від 26.06.2023 р.)

Теза Любов Макаренко. Моніторинг мікроклімату приміщень при використанні переносного пристрою фіксації фізичних величин та реєстрації вимірів. – 115-119 с. http://esmt.knuba.edu.ua/?page_id=82

6. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «BUILD MASTER CLASS 2023. Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2023, 514с .

Теза за доповіддю . Порівняння тривалості очищення повітря при зміні відносної вологості використовуючи рециркуляційної установки з комбінованими фільтрами – 225 - 226с. Сертифікат ВМС №2023-4-1 <https://drive.google.com/file/d/18Hg2JA7eP4qkqhJbW4szjTBIwela-9bW/view>

7. Матеріали конференції International scientific and practical conference «Modern Trends in the Development of Scientific Space» (February 14-16, 2024) .Dresden. Germany. International Scientific Unity. 2024. 286 p.

Теза Любов Макаренко. Кратність повітрообміну та відносна вологість як фактор впливу на тривалість очищення часток PM_{2.5} до рекомендованих

ВООЗ рівнів. – 277-281с. [https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Modern trends in the development of scientific space Feb 14 16 2024.pdf](https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Modern_trends_in_the_development_of_scientific_space_Feb_14_16_2024.pdf)

8. Матеріали конференції The 10th International scientific and practical conference “Problems and prospects of modern science and education” (March 12 – 15, 2024) Stockholm, Sweden. International Science Group. 2024. 381 p. ISBN 979-8-89292-740-6 . DOI 10.46299/ISG.2024.1.10.

Теза Любов Макаренко. Природне осадження як складова механічної фільтрації PM_{2.5} в реальних умовах. – 363-365с. <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/03/PROBLEMS-AND-PROSPECTS-OF-MODERN-SCIENCE-AND-EDUCATION.pdf>

9. Матеріали Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Scientific Exploration: Bridging Theory and Practice» (December 9-11, 2024. Berlin, Germany). European Open Science Space, [2024. 265 p.](#)

Теза за доповіддю. Забезпечення безпечного повітряного простору перебування людини: повітроочишувачі . [257-259с.](#) <https://www.eoss-conf.com/arkhiv/scientific-exploration-bridging-theory-and-practice-9-12-24/>

10. Матеріали XVI International scientific and practical conference “New ways of improving outdated methods and technologies” (December 17 – 20, 2024) Copenhagen, Denmark. International Science Group. 2024. 385 p. ISBN – 979-8-89619-785-0. DOI – 10.46299/ISG.2024.2.16.

Теза за доповіддю . Повітряні потоки як складова забезпечення якості повітря. 344-346с. <https://isg-konf.com/uk/new-ways-of-improving-outdated-methods-and-technologies/> . Сертифікат.

11. Матеріали конференції Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «New Horizons in Scientific Research: Challenges and Solutions» (December 16-18, 2024. Marseille, France). European Open Science Space, 2024. 231 p.

Теза Любов Макаренко. Повітроочишувачі : необхідність сучасного життя.— 216-218с. <https://www.eoss-conf.com/arkhiv/new-horizons-in-scientific-research-challenges-and-solutions-16-12-24/>

12. Матеріали конференції Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Innovative Solutions in Science: Balancing Theory and Practice» (December 23-25, 2024. San Francisco, USA). European Open Science Space, 2024. 297 p.

Теза Любов Макаренко. Як створити острів чистого повітря в забрудненому світі. – 291-293с. https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2024/12/San_Francisco_USA_23.12.2024.pdf

13. Матеріали конференції LI International scientific and practical conference «Evolution and Improvement of Traditional Approaches to Scientific Research» (December 11-13, 2024) Ljubljana, Slovenia. International Scientific Unity, 2024. 269 p. ISBN 978-617-8427-41-2. DOI 10.70286/ISU-11.12.2024.

Теза Любов Макаренко. Загальна картина впливу забруднення повітря та системи очищення. – 263-266с. https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/12/Evolution_and_improvement_of_traditional_approaches_to_scientific_research_December_11-13_2024_Ljubljana_Slovenia.pdf

14. Матеріали конференції LII International scientific and practical conference «Scientific Research in the Age of Virtual Reality: Exploring New Frontiers» (December 18-20, 2024) Montreal, Canada. International Scientific Unity, 2024. 305 p. ISBN 978-617-8427-42-9. DOI 10.70286/ISU-18.12.2024

Теза Любов Макаренко. Розумне керування системами очищення повітря. – 281-283с. https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/12/Scientific_research_in_the_age_of_virtual_reality_exploring_new_frontiers_December_18-20_2024_Montreal_Canada.pdf

SUMMARY

Makarenko L.I. Energy-efficient air ventilation with combined cleaning of physical, chemical and biological pollutants. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 "Construction and Civil Engineering." - Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2025.

Air quality is a critical determinant of human health because it is directly exposed to contamination by a variety of pollutants. These pollutants, coming from anthropogenic emissions or formed in the environment due to exceeding the maximum permissible concentrations of natural components, include characteristic physical agents, chemical compounds and biological objects (microorganisms).

The amount of pollutants in the air in a suspended state can change during the day from safe to dangerous levels of concentrations. Some types and levels of concentrations of pollutants with their prolonged exposure to humans may not significantly affect health, but some after the shortest period of time significantly harm. The air environment of Ukraine during 2014-2024 is additionally under the influence of pollutants that arise as a result of military operations (physical factors and chemicals as a result of explosions and burning of industrial facilities, oil and gas storage facilities, warehouses, residential and social buildings) and which pose a danger to human health. The consequences of the full-scale invasion are more than 6,689 cases of environmental damage in the amount of 2.779 trillion hryvnias - of which the damage is caused by emissions into the atmosphere - 784.16 trillion hryvnias, according to the official resource of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine "Ecozagroza" as of November 2024 (<https://ecozagroza.gov.ua/>). Hazardous substances that enter the air during the hostilities of 2022-2024 were also added to the consequences of air pollution due to

the movement of dust masses from the Sahara, which in March-April 2024 became permanent. In April 2024 in Kyiv and the Kyiv region there was a deterioration in air quality due to an increase in the concentration of fine particles - the so-called "dust" from the Sahara. This dust consists of mineral compounds, most of which are silicates (muscovite, quartz, kaolin, etc.) and carbonates (calcite, dolomite). By themselves, these compounds are not harmful to humans, but in the form of fine particles that are suspended in the air, such as PM_{2.5} and PM₁₀ (fractions in diameter less than 2.5 and 10 microns, respectively) - they are the most dangerous, according to the World Health Organization (WHO). Because of their tiny size, they can penetrate the lungs when breathing, enter the circulation and damage internal organs.

Fine PM_{2.5} and PM₁₀ particles in large concentrations significantly worsen air quality (AQI). The World Health Organization (WHO) changed its air quality guidelines on September 22, 2021, the first major update to the standards established in 2005. The changes improve air quality standards for the main pollutants: PM_{2.5}, ozone, PM₁₀, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.

In Ukraine, the level of PM_{2.5} is not harmful to health if it does not exceed 5µg/m³. In March 2024, during the spread of dust masses from the Sahara, values up to 1000µg/m³ were recorded. The local population was advised to limit their time outside and not to open windows for ventilation, as the dust could be harmful to people with respiratory diseases, the elderly, pregnant women and children. Common health problems and diseases caused by PM_{2.5} and PM₁₀ include: heart and lung disease, bronchitis, emphysema, asthma and more severe exacerbations, premature death.

All these events, in addition to the experience of fighting the COVID pandemic, form new requirements for the organization of a safe air environment in places where people stay, or places with their permanent presence. The main indoor air pollutants are volatile organic compounds and solid particles. Sources of particulate matter include smoking, cooking, heating, candles and insecticides, pets, housework, and even the movement of people indoors. It is expected that due to the continuous economic growth and population increase in many regions of the world,

the level of atmospheric air pollution will increase, which will lead to an increase in the number of respiratory diseases.

In this regard, the requirements for air purification systems are increasing, which must be reliable and efficient, at the same time mobile and universal, contribute to the improvement of sanitary and hygienic conditions and recreation, and provide a comfortable and safe air environment in places where people stay. Also, it is important to take into account the costs of raw materials and energy resources, which are necessary for the creation and operation of such systems.

Currently, in most cases, coarse filters G4-F9, which have a low filtration efficiency, are used to clean the air supplied to the room by means of ventilation systems. The highest efficiency of air purification to the quality recommended by the WHO was shown by the layout of the mechanical filtration method with the help of highly efficient filters of the NEPA type and ensuring the multiplicity of air exchange above two. Highly efficient filters of the HEPA H11-H14 type are highly effective for cleaning PM particles and are used for final air purification in supply ventilation systems to the level of sterility in clean areas of the microelectronics, microbiological, pharmaceutical, medical, and food industries. But, they are usually not used in residential or office premises. Such filters are characterized by significant aerodynamic resistance, which is compensated by the use of fans with significant energy consumption.

Taking into account all of the above, and the situation of a global pandemic associated with the spread of viruses and the constant increase in the cost of energy resources, the task of improving existing and creating new highly efficient compact and economical devices for cleaning the air environment from pollution, as well as their convenient management depending on the analysis, arises factors of the external environment and the parameters of the people's environment in order to create the necessary conditions at workplaces and maintain a safe environment in every home.

The research proposes a device for consideration that will ensure the necessary air quality by combining three components: a high air exchange rate,

mechanical filtration and ensuring the necessary sanitary standards of fresh air for human breathing, at the same time, no additional energy will be used to heat this air.

The design of the air cleaner (filter-heat exchanger) with filtering insert HEPA H11 and additional recirculation section with recuperative heat exchanger "air-air" in it for heating the outside air due to the heat of the exhaust air has been developed. This study is devoted to establishing the practical value of the proposed design of the filter-heat exchanger based on the filter insert HEPA H11 with an additional section of outdoor air heating to achieve compliance with the sanitary standards for the quality of the total amount of air in the room. An additional outdoor air heating section is located in the middle of the recirculation part of the air purifier. On the basis of the analysis of literature sources and previous studies, it was found that 20 parts of spent, recirculating, air are capable of heating one part of fresh cold air through a heat exchanger, and, after mixing them, the total amount of ventilated air is able to satisfy the standardized indicators of purity and temperature, without additional use of any of the types of energy. In this case, the temperature of the hot coolant (exhaust air) can drop to 2 ° C. Thus, the design of the air cleaner with an additional recirculation section with a recuperative air-to-air heat exchanger in it for heating the outside air due to the heat of the exhaust air will save about 50 watts of electricity per one meter of cubic air per hour for the air that is ventilated. At the same time, the sanitary norm of providing the amount of fresh air for breathing of one person with compensation of the level of its CO₂ emissions is ensured. In this case, the use of a HEPA H11 type filtration unit in combination with a high air exchange rate made it possible to achieve maximum efficiency of indoor air purification up to 95% of the initial pollution by frequencies. The provision of thermal parameters of the filter-heat exchanger and geometric dimensions has been determined. The operation of the device is calculated for the duration of operation: when a person is in the room, when ventilation is necessary or exhaust air compensation from the operation of other low-power exhaust systems. All theoretical calculations have been verified in natural conditions.

The **introduction** of the dissertation justifies the relevance of the topic, formulates the goal, objectives, subject and object of the research. The provisions that determine the scientific novelty and practical value of the obtained results, the personal contribution of the applicant are indicated, and information on the testing of the research results is provided.

The first section analyzes literary sources on ways to ensure a safe air space for humans. The main pollutants of atmospheric air and the consequences of pollution for humans are described. Measures to prevent and reduce air pollution are presented based on domestic and international regulatory and technical documentation. Methods and means of cleaning air from pollutants are described: processes, filter classifications and existing air purification installations. Air filtration systems of various designs and types, parameters for selecting purification equipment and their effectiveness for cleaning from various types of pollution and ways to increase their effectiveness are analyzed.

It has been established that the most effective way to purify air from physical, chemical and biological pollutants is the physical removal of the pollutant, and the most effective means is exhaust ventilation and mechanical air filtration with a combination of filters. Examples of the use of individual air purification systems as a way to modernize ventilation systems in order to reduce energy consumption are considered.

The best parameters of the air environment for permanent residence of people in premises equipped with air purification engineering networks have been determined. Variants of using built-in elements in air purification installations, which in most cases have low efficiency, have been identified.

Methods and techniques were analyzed and optimal conditions for air purification were determined: optimization of the air exchange rate through the use of decentralized air purification systems, the use of high-efficiency HEPA filters or their combination, as well as providing sanitary air standards in the premises.

In the second section, the design of the filter-heat exchanger is calculated.

A physical and mathematical model of the heat transfer process is presented through the design of a flat wall from the flow washing it. The method of theoretical research using methods of theoretical heat engineering, analytical mathematics, methods of modeling processes and technical systems is presented.

The following scientific tasks are solved in the section: the amount of recirculating air is determined based on the calculation of the thermal potential for heating external (fresh) air - hot coolant; the required amount of air for supplying the sanitary norm of air for human breathing to the room is determined - cold coolant; an air-to-air heat exchanger heat balance equation is drawn up; temperature pressure between heat carriers and actual speed of heat carriers movement are determined; the coefficient of heat transfer and heat transfer is determined; determine the required heating surface area of the heat exchanger. Based on the obtained data, the design of the filter-heat exchanger with the heat exchange part built into the air cleaner is modeled.

In the third section conducted experimental studies in the filter-heat exchanger. The description of the experimental stand and methods of experimental research are given. The optimal conditions for the use of filter elements and the parameters of the cleaner itself are determined. Proved experimentally theoretical data on the multiplicity of air exchange to ensure effective air purification. The cleaning capacity of the filter-heat exchanger for the removal of various levels of PM_{2.5} pollution with the change of some parameters of the internal air environment (relative humidity, air exchange rate) per unit time is determined. Experimentally determined value of air cleaner CADR for the predicted cleaning duration is not more than 1 hour. A smaller CADR will lead to a gradual accumulation of pollutants, which eliminates the operation of the air cleaner. The data obtained in the experiment prove that the process of natural deposition and the amount of external pollution do not allow to clean the air without using mechanical filtration in any of the contaminants indicated in the study. The cleaning period in this type of air purifier will be reduced by 20 minutes with an increase in the multiplicity of air exchange by 1 turn at low pollution levels, and by 1 hour at significant. But the air exchange

rate for cleaning cannot be less than two. The equation by which the cleaning time will be determined with known input data (pollution levels, relative humidity, air cleaning capacity) is determined. At the same time, heat and mass exchange processes in the heat exchange section of the filter-heat exchanger were studied. The criterion equation Nu is defined for this particular case.

The fourth section provides a feasibility study for choosing a filter-heat exchanger system as an air purification system with an additional economic effect. The economic feasibility of introducing a filter-heat exchanger was determined in comparison with other engineering systems that perform similar functions when comparing the capital and operating costs of equipment layout options that fulfill the condition of providing the room with fresh air in a volume of 41 m³/hour, and the possibility of cleaning 800 m³/hour of air to the level of air quality recommended by WHO. The methodology for determining the economic efficiency and the methodology for evaluating the economic efficiency of the filter-heat exchanger are presented. The cost of the filter-heat exchanger has lower capital and operating costs. And it can save from 0.42 to 0.582 kW of thermal energy per hour required for heating outdoor air in winter (according to Table 10897.92 UAH for the heating period). Income created by cost savings in the first year will cover the operating costs of the filter-heat exchanger.

The dissertation study theoretically and experimentally substantiates the use of air cleaners for household premises, proving their effectiveness in cleaning air from physical, chemical and biological pollutants and the possibility of improving their energy efficiency when used in the recirculation part of an air-to-air heat exchanger, that will allow you to get a sanitary rate of air for human breathing based on the dilution of CO₂ levels and not use any energy sources to heat this air.

Keywords: air purifier, filter-heat exchanger, recuperative heat exchanger, heat recovery, recirculation air cleaner personalized ventilation, indoor air quality (IAQ), energy efficiency, ventilation efficiency, energy resource saving, ventilation control of airborne infection, indoor air purifiers, air purification systems, air filters,

HEPA filter, mechanical air filtration, air purification, air treatment, portable air purifier; removal of PM_{2.5} particles; air exchange; recirculation plant; air purifier, responsible equipment, heat transfer coefficient, heat exchange, heat and mass exchange, numerical method, mathematical modeling, numerical research method, regression equation.