

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАКАРЕНКО ЛЮБОВІ ІГОРІВНИ

УДК 697.94:613.155:62-784.4:621.184.53

ДИСЕРТАЦІЯ

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

192 Будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня *доктора філософії*

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

підпис, ініціали та прізвище здобувача

Приймак Олександр Вікторович,

Науковий керівник
(консультант)

Доктор технічних наук, професор,
декан факультету інженерних систем та екології

Київ – 2025

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 комбонування методу механічної фільтрації за допомогою вискоефективних фільтрів (англ. High Efficiency Particulate Air, HEPA). Вискоефективні 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 НЕРА Н11 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 НЕРА Н11 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 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 повітроочишувача для прогнозованої тривалості очищення не більше 1 години. Менша величина CADR призведе до поступового накопичення забруднювачів, що нівелює роботу повітроочишувача. 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 повітроочишувачі 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 данного 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 $41\text{ м}^3/\text{год}$, 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.

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 $\text{PM}_{2.5}$; 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-practicnoi_konferencii_Ekologia_Resursi_Energia_Bagatofunkcionalni_eko_-ta_energoefektivni_reursozberigaucci_tehnologii_v_arhitektur](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_reursozberigaucci_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 BMC №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 PM_{10} (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 PM_{10} 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, PM_{10} , 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 $5\mu g/m^3$. In March 2024, during the spread of dust masses from the Sahara, values up to $1000\mu g/m^3$ 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 PM_{10} 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 HEPA 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.

ЗМІСТ

	Аркуш
Анотація	1-20
Зміст	21-24
Перелік умовних позначень	25
Скорочення	26
ВСТУП	27-36
Аналіз літератури щодо забруднювачів повітря, наслідків	
РОЗДІЛ 1 їх впливу для людини, способів очищення повітря та види існуючих повітроочищувальних установок.	37
1.1 Забруднення повітря та його види	38
1.1.1 Основні забруднювачі та їх наслідки для здоров'я	39
1.1.1.1 Основні забруднювачі	39
1.1.1.2. Наслідки забруднення	40
1.2 Заходи щодо запобігання та зниження забруднення	44
1.3 Способи очищення повітря.	47
1.3.1 Очищення атмосферного повітря	47
1.3.2 Очищення повітря в приміщенні	48
1.3.2.1 Контроль вологості.	48
1.3.2.2 Ботанічна система фільтрації	49
1.3.2.3 Седиментація	50
1.3.2.4 Вентиляція. Повітряні потоки в приміщенні.	51
1.3.2.5 Повітряні очищувачі	54
1.3.3 Конструкція очищувача з вбудованим фільтром	56
1.3.3.1 Класифікація фільтрів для систем очищення повітря.	59
1.3.3.2 Принцип дії фільтра з волокнистих матеріалів	60
1.3.3.3 Основні параметри для фільтрів волокнистого типу	61

1.3.4	Параметри підбору повітряного очищувача	63
1.3.5	Портативні очищувачі як засіб очищення повітря в приміщенні.	64
1.3.5.1	Портативні повітроочисники як засіб впливу на захворюваність	65
1.3.5.1.1	Визначення ефективності очищення	65
1.3.5.2	Ефективність очищення та енергозбереження	69
1.3.5.2.1	Ефективність вловлювання наддрібніших частинок.	71
1.3.5.2.2	Ефективність вловлювання біоаерозолів.	72
1.3.5.2.3	Ефективність вловлювання ЛОС.	73
1.3.5.2.4	Вплив вологості на процес очищення в фільтрі та тиск .	74
1.3.5.2.5	Вплив швидкості повітряного потоку на ефективність фільтрації.	77
1.3.5.2.6	Вплив повітроочищувача на тепловий комфорт	78
1.3.5.2.7	Коефіцієнт нерівномірності очищення очищувачем	81
1.3.5.2.8	Енергозбереження та економічна доцільність	83
1.3.6	Підвищення ефективності очищувачів повітря	84
1.3.6.1	Альтернативні матеріали та технології в галузі виробництва фільтрів розглядається в розділі	84
1.3.6.2	Кратності повітрообміну	87
1.3.6.3	Комбінування фільтрів	88
1.3.6.4	Розумне керування.	89
1.4	Висновки	90
РОЗДІЛ 2	Конструктивний розрахунок фільтр- теплообмінника	93
2.1	Теоретичне обґрунтування конструкції фільтр- теплообмінника.	94

2.1.1	Кількість рециркуляційного повітря з розрахунку теплового потенціалу для підігріву зовнішнього (свіжого) повітря.	97
2.1.2	Кількість повітря для подавання санітарної норми повітря для дихання людини в приміщення.	98
2.1.3	Кінцева температура гарячого теплоносія за рівняння теплового балансу теплообмінника «повітря-повітря».	100
2.1.4	Температурний тиск між теплоносіями та дійсна швидкість руху теплоносіїв	100
2.1.5	Коефіцієнт тепловіддачі та теплопередачі	105
2.1.6	Площа поверхні нагріву теплообмінника	108
2.2	Результати дослідження.	109
2.3	Висновки	111
РОЗДІЛ 3	Експериментальні дослідження фізичних параметрів фільтр- теплообмінника з фільтром H11	112
3.1	Опис комплексного експериментального стенду та методи проведення експериментальних досліджень	114
3.2	Експериментальне дослідження впливу відносної вологості на процес очищення в фільтр- теплообміннику	117
3.3	Експериментальне дослідження CADR фільтр- теплообмінника з фільтром H11	129
3.4	Експериментальне визначення впливу природного осадження на CADR фільтр-теплообмінника	132
3.5	Експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі фільтр-теплообмінника	138
3.5.1	Визначення коефіцієнта тепловіддачі непрямим методом	140

3.5.2	Визначення рівняння регресії коефіцієнту тепловіддачі методом планування повного факторного експерименту	146
3.6	Висновки	155
РОЗДІЛ 4	Техніко-економічне обґрунтування системи фільтр-теплообмінника та її елементів	158
4.1	Методика оцінки економічної ефективності використання фільтр- теплообмінника	159
4.1.1	Енергоощадні заходи при використанні фільтр-теплообмінника.	161
4.1.2.	Особливості впливу вентиляції на енергоефективність будівлі	163
4.2	Техніко-економічне порівняння проектів з однаковими вимогами функціонування систем.	163
4.3	Методологія визначення економічної ефективності впровадження фільтр- теплообмінника.	170
4.4	Висновки	171
	Загальні висновки	174
	Список використаних джерел	178
	Додатки	
	Додаток 1. Публікації.	200
	Додаток 2. Таблиця 1.3. Механізми фільтрації.	205

Перелік умовних позначень

N	електрична потужність, Вт;
P	аеродинамічний тиск, Па
L_1	кількість повітря прийнята як гарячий теплоносіє, м ³ /с
L_2	кількість повітря прийнята як холодний теплоносіє, м ³ /с
t_{r1}	початкова температура гарячого теплоносія, °С
t_{r2}	кінцева температура гарячого теплоносія, °С
t_{x1}	початкова температура холодного теплоносія, °С
t_{x2}	кінцева температура холодного теплоносія, °С
φ_{CO_2}	об'ємний вміст випромінюючих газів в теплоносії, %
d_3	зовнішній діаметр труб, м
d_v	внутрішній діаметр труб, м
λ	коефіцієнт теплопровідності матеріалу труб, Вт/(м·К).
l_1, l_2	крок труб в поперечному та повздовжньому напрямі, м
m_{CO_2}	кількість CO ₂ , що надходить при диханні однієї людини за годину, л/год
ρ	густина, кг/м ³
$C_{гдк}$	гранично допустима концентрація CO ₂ , мг/м ³
C_{in}	концентрація CO ₂ в зовнішньому повітрі, мг/м ³
$P_{атм}$	парціальний тиск, Па
$C_{\rho'}$	питома теплоємність, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$
C'_{pm2}	питома об'ємна ізобарна теплоємність, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\cdot\text{К}}$
ν	коефіцієнт кінематичної в'язкості, $10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
Pr	число Прандтля
Q_x	сепловий потік холодного теплоносія, кВт
Q_r	сепловий потік гарячого теплоносія, кВт
W_x	середня дійсна швидкість холодного теплоносія за законом Гей-Люсака, м/с
W_r	середня дійсна швидкість гарячого теплоносія за законом Гей-Люсака, м/с
α_r	коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від гарячого теплоносія до трубного пучка, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$
α_r	коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від гарячого теплоносія до трубного пучка, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$
Re	число Рейнольдса
Gr	число Грасгофа
β	коефіцієнт теплового об'ємного розширення середовища, 1/К
Nu	число Нуссельта
r	прихована теплота конденсації води, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
$\mu_{пл}$	коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.
k	коефіцієнт теплопередачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$
$\overline{\Delta t}$	середньологарифмічний температурний напір, °С
g	прискорення вільного падіння, м/с ² ;
δ	товщина, м
ΔP	перепад тиску, Па
F, f	площа, м ²

Скорочення

ВООЗ	Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO)
HEPA	Високоєфективний фільтр (High Efficiency Particulate Air)
UVGI	Ультрафіолетове бактерицидне опромінення (Ultraviolet germicidal irradiation)
ANSI	Американський національний інститут стандартів (American National Standards Institute)
ASHRAE	Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)
EN	Європейські норми (European Norm)
EUROVENT	Європейський комітет виробників вентиляційного та холодильного обладнання (European Committee of Air Handling and Refrigeration Equipment Manufacturers)
ISO	Міжнародна організація стандартизації (International Organization for Standardization)
EPA	Агентство з охорони навколишнього середовища США (Environmental Protection Agency)
CDC	Центру з контролю та профілактики захворювань у США (Centers for Disease Control and Prevention)
PM _{2.5}	Дрібнодисперсні частинки фракції 2.5мкм (Particulate matter)
CADR	Гоказник для вимірювання реальної ефективності кімнатних повітроочищувачів повітря.(The Clean Air Delivery Rate)

Вступ

Актуальність теми: Війна в Україні призвела до значного погіршення стану повітря через руйнування промислових об'єктів, пожежі на нафтобазах та ТЕС, а також через переміщення пилових мас із Сахари. За даними Міністерства екології, збитки від забруднення повітря сягають майже 800 мільярдів гривень. Окрім війни, на якість повітря впливають також викиди підприємств та транспорту. Забруднене повітря є небезпечним для здоров'я і може викликати різні захворювання.

Пил із Сахари, що складається з мінеральних сполук, сам по собі не є шкідливим. Проте, дрібнодисперсні частинки цього пилу ($PM_{2.5}$ та PM_{10}) є небезпечними для здоров'я, оскільки можуть проникати глибоко в легені та кровотік. ВООЗ вважає їх найбільш небезпечними забруднювачами повітря.

У березні 2024 року, через значне поширення пилу із Сахари, рівень $PM_{2.5}$ в Україні перевищив безпечні значення в сотні разів, сягнувши 1000 мкг/м^3 . Це призвело до погіршення якості повітря та становило особливу загрозу для людей з респіраторними захворюваннями, літніх людей, вагітних та дітей.

Загалом, дрібнодисперсні частинки можуть викликати серцево-легеневі захворювання, бронхіт, астму та інші проблеми зі здоров'ям, навіть призвести до передчасної смерті. Тому важливо вживати заходів для захисту від забрудненого повітря, особливо в періоди підвищеної концентрації пилу.

Останні події, зокрема пандемія COVID-19, а також загальне зростання забруднення повітря, ставлять нові вимоги до систем очищення повітря в приміщеннях. Серед основних забруднювачів повітря в приміщеннях є леткі органічні сполуки та тверді частинки, джерелами яких можуть бути різні фактори, від куріння та приготування їжі до домашніх тварин та навіть пересування людей.

Очікується, що рівень забруднення атмосферного повітря продовжить зростати через економічне зростання та збільшення населення, що призведе до збільшення респіраторних захворювань. У зв'язку з цим, системи очищення повітря повинні бути надійними, ефективними, мобільними та універсальними, забезпечуючи комфортне

та безпечне повітряне середовище для людей. Важливо також враховувати витрати ресурсів на створення та експлуатацію таких систем.

Сучасні системи очищення повітря повинні відповідати багатьом вимогам, серед яких надійність, ефективність, мобільність, універсальність, поліпшення санітарно-гігієнічних умов, забезпечення комфорту та безпеки, а також економічність.

У нормативних вентиляційних системах для очищення повітря використовуються фільтри грубої очистки G4-F9, які мають низьку ефективність. Найкращий результат очищення повітря до рівня, рекомендованого ВООЗ, досягається поєднанням механічної фільтрації за допомогою HEPA-фільтрів та забезпеченням повітрообміну вище двох разів на годину.

HEPA-фільтри (H11-H14) ефективно очищають повітря від дрібних часток $PM_{2.5}$ та використовуються в "чистих" приміщеннях, таких як операційні. Однак, вони мають значний аеродинамічний опір, що потребує потужних вентиляторів та збільшує споживання енергії. Тому їх зазвичай не використовують у житлових та офісних приміщеннях.

У майбутньому очікується розробка більш ефективних та енергоефективних систем очищення повітря для широкого використання, а також можливості використання цього ж апарату для надання в приміщення свіжого повітря ззовні для дихання, з розрахунку розбавлення надходжень CO_2 в приміщення від людей в залежності від аналізу факторів зовнішнього середовища та параметрів середовища перебування людей з метою створення необхідних умов в приміщенні та підтримки безпечного повітряного середовища.

Таким чином, актуальною проблемою є необхідність у розробленні нових повітроочисних агрегатів для усунення забруднень повітряного середовища та отримання санітарної норми повітря на дихання людини без використання енергії на нагрів цього об'єму повітря взимку. Такий прилад спроможний забезпечити очищення повітря в приміщенні від шкідливих речовин, забезпечення нормативних параметрів температури, вологості, швидкості руху повітря.

Сутність науково-прикладної проблеми, яка розглядатиметься в роботі, полягає в створенні екологічної зони перебування людини завдяки комплексу дії, що включають рекомендації щодо кратності повітрообміну при різних рівнях забруднення повітря, щодо типу фільтрів для досягнення необхідної якості повітря та використання спеціальних повітроочисних установок, що здатні не лише очищувати повітря від фізичних, хімічних та біологічних забруднювачів (в тому числі $PM_{2.5}$) до безпечних рівнів рекомендованих ВООЗ, а і, надавати зовнішнє повітря ззовні без використання енергії на нагрів.

Постановка наукової проблеми полягає в усвідомленні недостатнього вивчення процесів, що протікають під час використання різних інженерних систем очищення повітря в межах одного приміщення, такі як вплив фізичних параметрів повітря на процеси очищення (температура, вологість), значення кратності повітрообміну необхідне для забезпечення якості повітря за вимогою, вибору типу фільтрувальних елементів, та створення нових енергоефективних установок очищення повітря .

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до плану Київської міської ради II сесія IX скликання від 27 травня 2021 року N 1241/1282 Про затвердження Комплексної цільової програми підвищення енергоефективності та розвитку житлово-комунальної інфраструктури міста Києва на 2021 - 2025 роки; ДКТН України, розділ 04.12 "Економічні та технологічні засади енерго- та ресурсозбереження, а також постанови «Комплексна державна програма енергозбереження в Україні» (КМ України від 05.02.1997 р. №148) та розпорядження «Енергетична стратегія України до 2050 р.» (КМ України від 21.04.2023 р. №373-р); Закону України «Про систему громадського здоров'я від 18.12.2024 № 2573-IX, стаття 31. Медико-санітарні вимоги щодо безпечності для здоров'я і життя людини житлових приміщень; Закон України Про енергетичну ефективність від 01.01.2025 № 1818-IX, стаття 3 пункт 2, 8 та розпорядження Кабінету Міністрів України : «Про затвердження Національного

плану заходів щодо неінфекційних захворювань для досягнення глобальних цілей сталого розвитку» пункт 22 підпункт 2 : - проведення моніторингу ефективності заходів із зменшення шкідливого впливу наслідків небезпечних атмосферних поллютантів, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26 липня 2018 р. № 530.

Тема дисертації відповідає направленості тематики науково-дослідної роботи кафедри теплотехніки Київського національного університету будівництва і архітектури.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є дослідження очищення повітря від забруднювачів з використанням «фільтр-теплообмінника» при одночасному вивченні теплообмінних процесів. Визначення способу зниження рівня особистого ураження від забруднень повітряного середовища в приміщенні завдяки повітроочищувачам рециркуляційного типу з фільтрувальними вставками вискоефективних фільтрів типу HEPA, додатковою можливістю яких буде подавання в приміщення не лише очищеного повітря, а й частини свіжого: досягти можливості очищення повітря в кімнаті до 95% від початкового забруднення, орієнтуючись на рекомендація ВООЗ для безпечних рівнів $PM_{2.5}$ в приміщенні не більш ніж 5мкг/м^3 ; разом з тим, забезпечуючи подачу свіжого зовнішнього повітря в приміщення для дихання людини без додаткових втрат на нагрів цього повітря, використовуючи теплообмінник «повітря-повітря» в рециркуляційній секції повітроочисника.

Необхідно виконати такі завдання :

1. провести критичний аналіз літературних джерел наявних нормативних документів щодо підтримання якості повітря та експериментальних установок очищення повітря, їх конструкції та ефективності використання;

2. розробити конструкцію повітроочищувача з вбудованою секцією теплообмінника «повітря-повітря», що виконує дві функції одночасно - фільтрація повітря та нагрів санітарної норми свіжого повітря;

3. розробити фізико-математичну модель процесу тепловіддачі за граничних умов першого роду плоскої стінки труби теплообмінника «повітря-повітря», що знаходиться в очисній секції повітроочищувача, використовуючи лише тепло повітря (теплоносія), що рухається в та зовні труб;

4. встановити чинники що можуть мати вплив та технологію очистки та дослідити їх вплив експериментально, а саме, впливу відносної вологості на процес очищення в очиснику, дослідити CADR повітроочищувача в фільтром типу H11;

5. провести експериментальні дослідження щодо необхідної кратності повітрообміну для отримання якості повітря обмежуючи дослідження тривалість дії досліду до 1 години, отримати рівняння прогнозування тривалості очищення методом повного факторного експерименту;

6. удосконалити методику розрахунку теплообмінника «повітря-повітря» для умов використання в рециркуляційній секції очисника, для розрахунку теплообміну по повітряній стороні для поперечного ряду труб;

7. вивести критеріальне рівняння, що описує тепловіддачу конвекцією між поверхнею труби теплообмінника та омиваючим потоком повітря, враховуючи значну перевагу рециркуляційного повітря(гарячого теплоносія) над свіжим(холодного теплоносія).

8. розрахувати техніко-економічні показники розробленої технології порівняно з відомими технологіями.

Об'єкт дослідження – повітроочисник «фільтр-теплообмінник», рециркуляційного типу, з вбудованим теплообмінною частиною та можливістю подачі в приміщення свіжого повітря.

Предмет дослідження – теплообмінні процеси в мідних трубках теплообмінника в рециркуляційній частині фільтр-теплообмінника, утвореними

поперечним рухом омиваючого потоку теплого повітря до холодного повітря , що рухається в трубці . Також, процес повітрообміну як засіб дотримання якості повітря в заданому діапазоні часу, ефективність очищення від $PM_{2.5}$.

Методи дослідження:

В роботі використано фізико-математичне моделювання на основі законів тепломасообміну, що описує теплопровіддачу конвекцією між поверхнею труби та омиваючим потоком повітря; методи планування експериментів фізичного осадження та механічного очищення; узагальнення отриманої інформації про розподіл температури при використанні датчиків вимірювання температури та теплових потоків; Метод проведення повного факторного експерименту для визначення рівняння прогнозування тривалості очищення при різних рівнях забруднення $PM_{2.5}$. Важливими також є методи аналізу та узагальнення інформації, математичної статистики для опрацювання даних та оцінки їх вірогідності. Достовірність теоретичних досліджень, отриманих результатів, їх аналіз, підтверджені в натурних умовах. Висновки та рекомендації зумовлені задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Наукова новизна полягає :

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 $мкг/м^3$ (початкове значення рівня забруднення $PM_{2.5}$), зміни витрат повітря з 300 до 800 $м^3/год$ 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'єму повітря для дихання;

- конструкція теплообмінника для підігріву зовнішнього (свіжого) повітря за рахунок теплового потенціалу внутрішнього (рециркуляційного) повітря.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

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 нульове споживання енергії на нагрів зовнішнього повітря;
- побудована експериментальна модель приладу «фільтр-теплообмінник», що може забезпечити очищення повітря в кімнаті площею до 150м² 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 150м²;
- 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».

Експериментальна установка встановлена в виробничому приміщенні ТОВ«Аксон» в приміщенні для виробництва виробів подвійного призначення (друк пайка та збірка пластикових деталей до літальних приладів) .

Особистий внесок здобувача полягає в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі є самостійною науковою працею, у якій висвітлено власні ідеї та розробки авторки, що дали змогу вирішити поставлені завдання. Робота містить теоретичні та практичні положення та висновки, сукупність яких кваліфікується як вагомий внесок у вирішення проблеми якості повітря в місцях перебування людей.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні теми, мети та вирішенні основних теоретичних та експериментальних завдань, які поставлені в роботі. За безпосередньої участі автора виконано теоретичні та експериментальні дослідження, розвинуто наукові основи застосування інноваційних технологій в комплексному підході до очищення повітря. Автором розраховано параметри фільтр-теплообмінника, та його конструктивні елементи; побудовано експериментальну установку та розроблено методику проведення експериментальних досліджень теплообмінних процесів, а також проведення всіх описаних експериментів в роботі. Авторів належать основні ідеї опублікованих праць, а також аналіз та узагальнення результатів роботи.

Дисертаційні дослідження, наукові результати автором отримані самостійно.

Публікації

За результатами досліджень опубліковано 21 наукових праць, у тому числі: 4 статі у наукових фахових виданнях України категорії «Б»; 3 – у періодичних наукових фахових виданнях інших держав, які входять до ЄС; 14 тез наукових доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Обсяг та структура роботи.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 273 найменувань та додатків. Текст наведений на 170 сторінках комп'ютерного набору, містить 30 рисунків, 33 таблиць.

Розділ 1

Перший розділ дисертації .

Аналіз літератури щодо забруднювачів повітря, наслідків їх впливу для людини, способів очищення повітря та види існуючих повітроочищувальних установок.

В розділі розглядається низка наукових праць, які формують уявлення про засоби впливу на забруднення повітряного середовища загалом, законодавчі пропозиції, нормативні документи, наведені вже існуючі методи та засоби контролю якості повітряного середовища та розглянуті наукові напрацювання, що безпосередньо впливли на розвиток даної наукової роботи. Особливу цікавість викликали праці пов'язані з розробками в галузі систем механічної фільтрації та організації систем вентиляції в приміщеннях з високими вимогами до якості повітря та енергоефективності.

1.1 Забруднення повітря та його види

Забруднення повітря - це наявність в атмосфері шкідливих домішок, які негативно впливають на здоров'я людини, навколишнє середовище та на екосистеми в цілому. Розрізняють два основних характеру забруднення повітря: антропогенне та природне.

Антропогенне забруднення спричинене діяльністю людини (викиди з промислових підприємств, ТЕС, транспорт, спалювання сміття тощо) та включає стаціонарні, мобільні та побутові джерела.

До стаціонарних джерел належать викиди промислових підприємств, теплоелектростанцій, котелень. Мобільними джерелами викидів в повітряне середовище є викиди від транспортних засобів (автомобілів, літаків, кораблів).

До побутових джерел належать викиди від систем опалення житлових будинків, приготування їжі, використання побутової хімії.

Природні джерела викидів виникають внаслідок природних явищ (виверження вулканів, лісові пожежі, пилові бурі тощо).

Всі ці джерела є значним фактором забруднення атмосфери, вивільняючи в неї широкий спектр шкідливих речовин.

1.1.1. Основні забруднювачі та їх наслідки для здоров'я.

1.1.1.1. Основні забруднювачі

Основними забруднювачами повітря є тверді частинки, що включають пил, сажу, попіл, а також сульфати та нітрати металів. До газоподібних речовин належать оксиди азоту, оксиди сірки, оксид вуглецю, вуглеводні та озон. Серед біологічних часток виділяють бактерії, віруси, грибки та алергени. Вплив твердих частинок (PM) на здоров'я людини детально досліджено Агентством ЕРА [1].

Тверді частинки.

Пил. Дрібні тверді частинки, які можуть бути суспендовані в повітрі протягом тривалого часу. Джерелами пилу можуть бути природні процеси (такі як вивітрювання ґрунту та лісові пожежі) та антропогенні джерела (такі як промислові викиди та вихлопні гази транспортних засобів).

Сажа. Чорна або коричнева частинка, що утворюється при неповному згорянні органічних речовин. Сажа є основним компонентом смогу і може викликати респіраторні проблеми.

Попіл. Дрібні тверді частинки, що утворюються при спалюванні деревини, вугілля або інших видів палива. Попіл може містити шкідливі хімічні речовини, такі як ртуть та свинець.

Металеві сульфати та нітрати. Частинки, що утворюються при спалюванні викопного палива та промислових процесах. Вони можуть викликати респіраторні проблеми та кислотні опади.

Газоподібні речовини.

Оксиди азоту (NO_x). Гази, що утворюються при спалюванні викопного палива та високих температурах. NO_x може викликати респіраторні проблеми та сприяти утворенню озону.

Оксиди сірки (SO_x). Гази, що утворюються при спалюванні викопного палива, що містить сірку. SO_x може викликати респіраторні проблеми та кислотні опади.

Оксид вуглецю (CO). Безбарвний газ, що не має запаху, утворюється при неповному згорянні органічних речовин. CO може бути смертельним при високих концентраціях.

Вуглеводні (VOC). Органічні сполуки, що утворюються при спалюванні викопного палива та випаровуванні розчинників. VOC може викликати респіраторні проблеми та сприяти утворенню озону.

Озон (O₃). Цей газ утворюється в атмосфері при реакції між NO_x та VOC під впливом сонячного світла. Озон може викликати респіраторні проблеми та пошкодити легені.

Біологічні частки

Бактерії. Мікроорганізми, що можуть бути присутні в повітрі у вигляді дрібних крапель або пилу. Деякі бактерії можуть викликати респіраторні захворювання.

Віруси. Мікроскопічні інфекційні агенти, що також можуть бути присутні в повітрі. Віруси можуть викликати респіраторні захворювання, такі як застуда та грип.

Грибки. Спори грибів можуть бути присутні в повітрі і викликати респіраторні проблеми у деяких людей.

Алергени. Речовини, такі як пилок, шерсть тварин і пилові кліщі, можуть викликати алергічні реакції у людей, які чутливі до них.

Забруднення повітря може мати серйозний вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище та, при перевищенні гранично допустимих концентрацій, призвести до негативних наслідків.

1.1.1.2. Наслідки забруднення

Наслідками забруднення повітря є комплексний вплив на стан довкілля (кислотні дощі, фотохімічний смог, руйнування озонового шару, зміна клімату) та, як наслідок, погіршення здоров'я людини (респіраторні захворювання, серцево-судинні захворювання, рак, алергії).

Вплив на здоров'я людини.

Респіраторні захворювання. Забруднення повітря може викликати широкий спектр респіраторних проблем, включаючи астму, бронхіт, емфізему та пневмонію. Це може призвести до загострення існуючих респіраторних захворювань, таких як хронічна обструктивна хвороба легень. Кількість смертей в Україні, що спричинені викидами в повітря у 2019 році, перевищує сумарну кількість смертей в ЕС та інших регіонах, за даними дослідження організації Center for Research on Energy and Clean Air (CREA) та ГО Екодія надано на Рис.1.1.

Серцево-судинні захворювання. Забруднення повітря також може негативно впливати на серцево-судинну систему, що призводить до інфаркту, інсульту та інших серцево-судинних захворювань.

Рак. Деякі забруднювачі повітря - канцерогенні сполуки, можуть призвести до розвитку раку, особливо раку легенів.

Алергії. Забруднення повітря може погіршити алергічні симптоми, такі як свербіж, чхання, нежить і слезотеча.

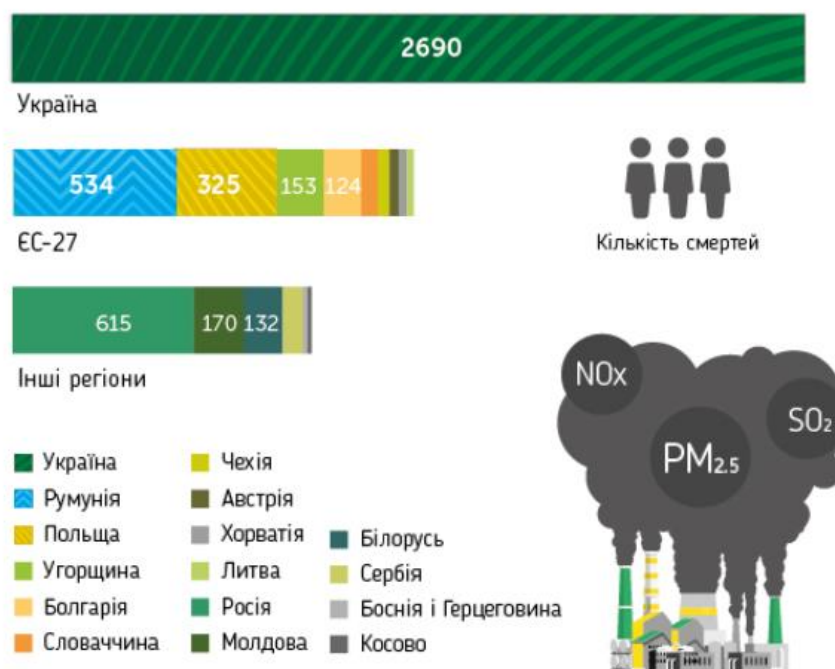


Рис.1.1. Кількість смертей, що спричинені викидами в повітря у 2019 році за даними дослідження організації Center for Research on Energy and Clean Air (CREA) та ГО Екодія, 2019.

Вплив на довкілля.

Кислотні дощі. Кислотні дощі утворюються, коли викиди сірчаного та азотного діоксиду вступають в реакцію з водою в атмосфері. Це може призвести до пошкодження лісів, прісних водних екосистем і будівель.

Фотохімічний смог. Фотохімічний смог утворюється, коли сонячне світло реагує з NO_x та VOC. Це може призвести до проблем з диханням, подразнення очей та пошкодження рослин.

Руйнування озонового шару. Озоновий шар захищає Землю від шкідливого ультрафіолетового випромінювання сонця. Хлорофторвуглеводні, що використовуються в деяких охолоджувальних агентах та аерозолях, можуть руйнувати озоновий шар, що може призвести до раку шкіри, катаракти та інших проблем зі здоров'ям.

Зміна клімату. Забруднення повітря, особливо викиди парникових газів, таких як діоксид вуглецю, сприяє зміні клімату. Це може призвести до підвищення рівня моря, більш екстремальних погодних явищ та інших проблем.

Всесвітня організація здоров'я (WHO) дає перелік речовин, враховуючи інформацію про наявність у приміщенні джерел, щодо наявності токсикологічних та епідеміологічних даних та щодо рівнів впливу, що спричиняє погіршення здоров'я: бензол, монооксид вуглецю, формальдегід, нафталін, діоксид азоту, поліциклічні ароматичні вуглеводні (особливо бенз[а]пірен), радон, трихлоретилен і тетрахлоретилен [2]. Також, в 91,4% випадках РМ частинки вказують як основний чинник хронічних захворювань людей віком 30+ [3].

В Таблиці 1.1 наведено деякі поширені забруднювачі повітря, джерела їх надходження та вплив на здоров'я людини [4], [5], [6], [7].

Таблиця 1.1. Поширенні забруднювачі повітря, джерела їх надходження та вплив на здоров'я людини.

Забруднювач	Джерело забруднювача	Вплив на здоров'я	Заходи усунення впливу
ЛОС (леткі органічні сполуки).	ЛОС виділяються під час спалювання палива (димових газів), використання розчинників, фарб, клеїв, будівельних матеріалів, меблів, аерозольних балонів, та інших матеріалів, що використовуються на роботі чи вдома.	Більшість ЛОС можуть спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям, такі як рак та інші наслідки.	Контроль джерела, механічна вентиляція, фільтрація повітря.
Неорганічні гази (SO ₂ , NO ₂ , NO, CO).	Спалювання бензину, природного газу, вугілля, нафти тощо; промислові процеси (виробництво паперу, металів).	Враження легень, захворювання дихальних шляхів і легень (дихальної системи); зниження здатності крові постачати кисень до клітин і тканин організму.	Контроль джерела, механічна вентиляція, фільтрація повітря.
Тверді частинки (PM _{2.5} та ін.) (пил, дим, кіптява).	Спалювання деревини, дизельного та іншого палива [8], промислові підприємства, сільське господарство [9] (оранка, спалювання полів), ґрунтові дороги.	Подразнення носа та горла, пошкодження легень, бронхіт, депресія в 2,3% випадків [10], когнітивні порушення та деменція [11], передчасна смерть.	Механічна вентиляція, фільтрація повітря.
Озон.	Хімічна реакція забруднюючих речовин, ЛОС та NO _x , наприклад виділяються при роботі лазерних та фотокопіювальних апаратів.	Проблеми з диханням, зниження функції легень, астма, подразнення очей, закладеність носа, зниження стійкості до застуди та інших інфекцій, може прискорити старіння легеневої тканини.	Контроль джерела, механічна вентиляція, фільтрація повітря.
Важкі метали	Етилований бензин, фарба (будинки, автомобілі), плавильні заводи (метал-, нафтопереробні заводи), виробництво акумуляторних батарей, тютюновий дим, пил.	Пошкодження мозку та нервової системи (особливий ризик для дітей). Деякі хімічні речовини, що містять свинець, викликають рак у тварин. Свинець викликає проблеми з травленням та інші проблеми зі здоров'ям.	Видалення джерела, регулярне очищення повітря.
Біо-аерозолі	Люди. Різноманітні мікроорганізми, зволожувачі повітря, різноманітні гриби та бактерії, градирні, антигени, що переносяться повітрям.	Потрапляє в організм людини шляхом вдихання або осідання в ранах і може локалізуватися або мігрувати в інші частини тіла, переносячи: віруси, бактерії, інфекції, гриби, антигени.	Механічна фільтрація, очищення повітря.
Радон	Ґрунт і камінь під будівлею або навколо неї, запаси води, будівельні матеріали та природний газ.	Інертний газ без кольору та запаху, що викликає рак.	Видалення джерела (герметизація входу, механічна вентиляція підвалів), фільтрація повітря.

На підставі інформації, наведеної у Таблиці 1.1, легко зробити висновок, що механічна вентиляція та механічна фільтрація є найбільш ефективними засобами контролю забруднювачів у повітряному середовищі.

1.2.Заходи щодо запобігання та зниження забруднення

Важливо вживати заходів для зменшення забруднення повітря, щоб захистити наше здоров'я та довкілля. Існує ряд міжнародних угод та конвенцій, спрямованих на боротьбу з цим явищем:

1. Віденська конвенція про охорону озонowego шару та Монреальський протокол спрямовані на захист озонowego шару від руйнування хімічними речовинами;

2. Кіотський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату спрямований на скорочення викидів парникових газів, які сприяють зміні клімату;

3. Гетеборзький протокол до Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великій відстані спрямований на скорочення викидів сірчаних та азотних оксидів, а також дрібних твердих частинок;

4. Важливою платформою для міжнародного співробітництва з питань охорони атмосферного повітря є Програма ООН з довкілля (ЮНЕП). ЮНЕП надає країнам допомогу в розробці та впровадженні політики чистого повітря, а також сприяє обміну інформацією та досвідом.

Крім міжнародних угод та конвенцій, існує ряд інших заходів, які можна вжити для боротьби з забрудненням повітря на міжнародному рівні:

Використання альтернативних джерел енергії. Розвиток сонячної, вітрової та інших видів відновлюваної енергетики може допомогти зменшити залежність від викопного палива, яке є основним джерелом викидів забруднюючих речовин.

Підвищення енергоефективності. Заходи з енергозбереження, такі як утеплення будівель та використання енергозберігаючих технологій, можуть допомогти зменшити споживання енергії, що призведе до меншої кількості викидів.

Контроль викидів. Впровадження жорстких норм викидів для промислових підприємств та транспортних засобів може допомогти зменшити кількість забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу.

Захист лісів. Ліси відіграють важливу роль у очищенні повітря, тому їх необхідно берегти та розширювати.

Підвищення екологічної свідомості. Важливо, щоб люди у всьому світі розуміли проблему забруднення повітря та вживали заходів для її вирішення. Це можна зробити за допомогою освітніх програм та кампаній з підвищення обізнаності.

Вдосконалення технологій. Розробка та впровадження нових, більш екологічно чистих технологій на промислових підприємствах та в транспорті може допомогти значно зменшити викиди забруднюючих речовин.

Ефективна боротьба із забрудненням повітря та забезпечення чистого довкілля для майбутніх поколінь вимагають міжнародного співробітництва та спільних зусиль. Досвід США із Законом про чисте повітря 1970 року демонструє значні успіхи у скороченні викидів SO₂ (на 70%), NO_x (на 50%), дрібнодисперсних твердих часток (на 40%) та свинцю (на 95%). Проте, незважаючи на ці досягнення та подальші законодавчі поправки 1977 та 1990 років, проблема впливу викидів CO₂ на клімат залишається актуальною.

Прогнозується, що наслідки триватимуть століттями, і якщо не буде прискорено глобальне скорочення викидів парникових газів, потенційна екологічна шкода може бути глибокою та довготривалою [12]. Це підкреслює необхідність безперервного вдосконалення політики та впровадження ефективних заходів на міжнародному рівні.

Важливо зазначити, що проблема забруднення повітря повинна мати превентивні рішення щодо запобігання та рішення щодо поточного очищення спільними зусиллями країн на міжнародному рівні. Схема забезпечення безпечного повітряного простору перебування людини зображено на Рис.1.2.

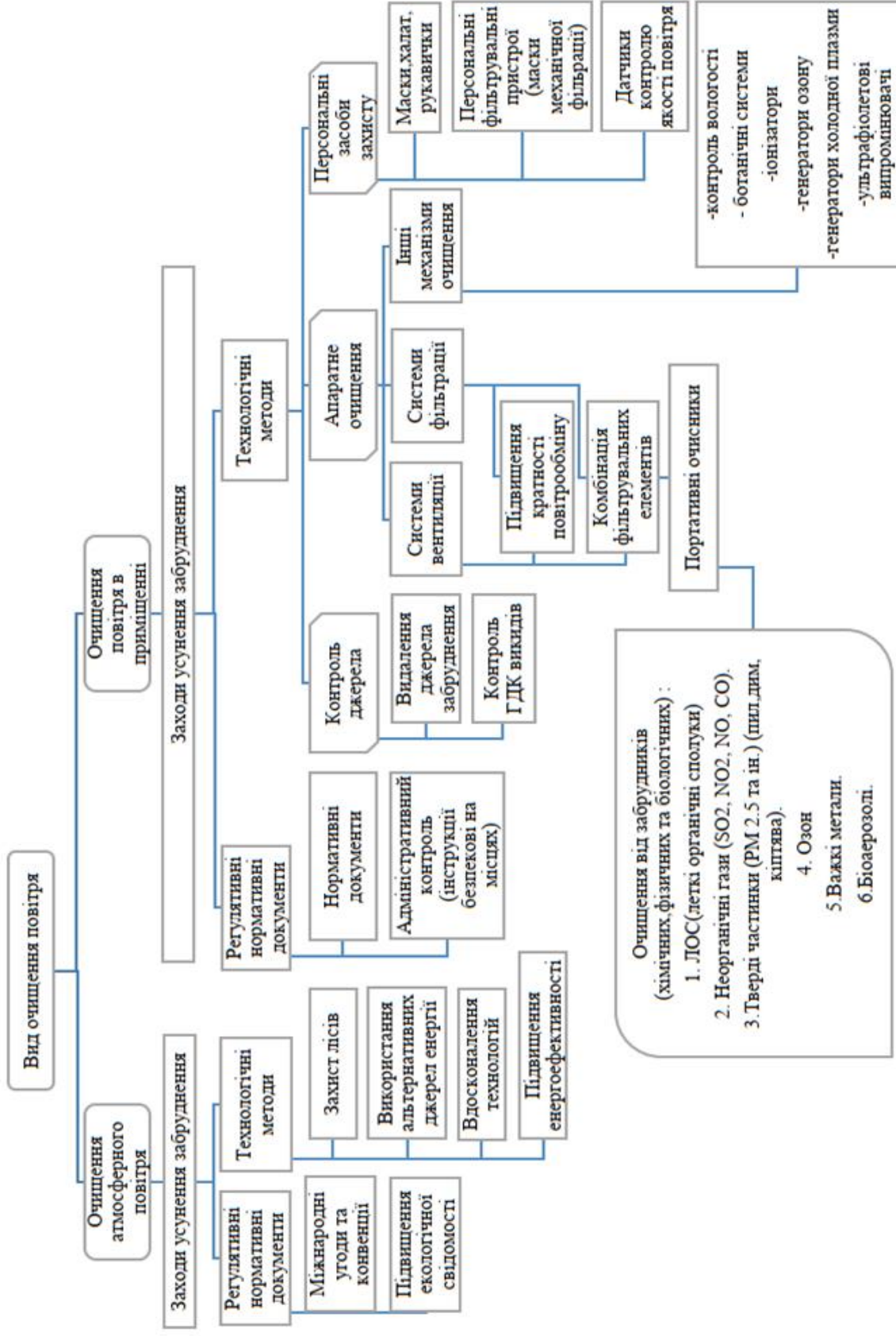


Рис.1.2. Схема забезпечення безпечного повітряного простору перебування людини [власне дослідження].

1.3 Способи очищення повітря.

Способи очищення повітря обираються в залежності від очищення повітря в приміщенні та очищення атмосферного повітря. Очищення атмосферного повітря це комплексна проблема і в даній роботі розглядається лише як декларативна частина. Основний інтерес цього дослідження складає очищення повітря в середині приміщення.

1.3.1 Очищення атмосферного повітря

Найефективніший спосіб очистити атмосферне повітря - це зменшити викиди забруднюючих речовин. Заходи запобіганню та зниженню забрудненню розглядаються в розділі 1.2 даної роботи. Коротко можна вказати основні з них:

- впровадження більш жорстких норм викидів для промислових підприємств та транспортних засобів;
- використання альтернативних джерел енергії;
- підвищення енергоефективності;
- захист лісів та природи в цілому;
- контроль спалювання сміття та біомаси є значним джерелом забруднення повітря. Важливо контролювати спалювання та використовувати екологічно чисті методи утилізації відходів.

Одним з сучасних способів очищення атмосферного повітря за допомогою нових технологій є очищувач зовнішнього повітря, який отримав назву великомасштабної системи очищення за допомогою сонця (SALSCS), був запропонований QINGFENG CAO як інноваційний підхід для полегшення відділення твердих частинок РМ від атмосферного повітря шляхом встановлення складчастих фільтрів у системі [13].

У цій роботі запропоновано основну концепцію SALSCS, яка складається з плоского сонячного колектору, димоходу, блоку фільтрів і вентиляторів, з вежею висотою 60 м і сонячним колектором 43×60м в горизонтальному напрямку. У базовій конфігурації висота димової труби, відносно рівня землі, становить 500м. Діаметр

димової труби 200м в основі, та 136м на виході. Колектор займає кругову ділянку радіусом 2500 м. Досліди на повномасштабній системі показали, що система може генерувати загальну швидкість потоку повітря в кількості $2,64 \times 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ з урахуванням падіння тиску встановленого блоку фільтрів. Умови моделювання з двома витратами системи $2,64 \times 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ і $3,80 \times 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$ були протестовані для семи варіантів забруднення повітря в Пекіні протягом зими 2015–2017років. Результати показали, що з вісьмома SALSCS, встановленими вздовж 6-ї кільцевої дороги міста, концентрація $\text{PM}_{2.5}$ була знижена, при двох вказаних витратах системи, на 11,2% і 14,6% відповідно. Це, безсумнівно, вражаюча технологія, що має розвиватися.

1.3.2 Очищення повітря в приміщенні

Вибір конкретного обладнання та схеми очищення повітря повинен ґрунтуватися на даних про наявні джерела забруднення в приміщенні. Це включає вимірювання вологовиділення, тепловиділення, рівнів CO_2 , а також ідентифікацію біологічних чи хімічних речовин. Отримані дані визначають необхідний повітрообмін у приміщенні та оптимальний вибір повітряних потоків (наприклад, подача повітря згори для мінімізації поширення забруднювачів від зони дихання). Такий комплексний підхід дозволяє підібрати обладнання, що забезпечить відповідність встановленим вимогам до якості повітря та мінімізує ризики для здоров'я мешканців.

1.3.2.1 Контроль вологості.

Проведене дослідження підкреслює критичну важливість підтримання оптимальної відносної вологості повітря в приміщенні (50-60%) для зниження ризику поширення інфекційних захворювань, що передаються повітряно-крапельним шляхом, згідно з ДБН 2.2-10:2022 та Junwei [14]. Водночас, виявлено Montgomery [15], що висока вологість (до 60%) негативно впливає на ефективність повітряних фільтрів, змінюючи їхні властивості та показники завантаження гігроскопічними і негігроскопічними частинками.

Власні дослідження [16, 17] доповнюють ці дані, демонструючи значний вплив відносної вологості на тривалість очищення повітря від частинок $PM_{2.5}$. Зокрема, при низькій відносній вологості (35%) та повітрообміні 100 м³/год, час очищення збільшується на 10% (8 хвилин) при невисокому рівні забруднення та на 25% (60 хвилин) при небезпечному рівні $PM_{2.5}$. При збільшенні повітрообміну до 310 м³/год вплив відносної вологості зменшується, але все ще залишається значущим. Виявлено, що двократна зміна повітрообміну в умовах варіації відносної вологості може призвести до збільшення часу очищення до однієї години, що унеможливорює підтримання рекомендованих ВООЗ безпечних рівнів $PM_{2.5}$ при постійному надходженні забруднень. Проте, при значній інтенсивності повітрообміну (в 6 разів) відносна вологість має незначний вплив на ефективність рециркуляційних агрегатів з комбінованими фільтрами, дозволяючи досягти необхідного рівня якості повітря менш ніж за 1 годину.

Таким чином, отримані результати вказують на необхідність комплексного підходу до контролю параметрів мікроклімату приміщень, що враховує баланс між запобіганням поширенню інфекцій та підтримкою оптимальної ефективності систем очищення повітря. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку інтегрованих систем, що забезпечують одночасний контроль відносної вологості та ефективності фільтрації, зокрема з використанням природних методів, таких як застосування рослин для контролю параметрів повітряного середовища.

1.3.2.2 Ботанічна система фільтрації

Дослідження підтверджують, що певні кімнатні рослини (сансевієрія, спатифіллум, хлорофітум) можуть сприяти очищенню повітря. Розробка динамічних ботанічних систем фільтрації повітря демонструє їхній потенціал для зниження температури, підвищення відносної вологості та, можливо, зменшення потреби в подачі зовнішнього повітря [18]. Це також вказує на значний потенціал для економії енергоресурсів у будівлях [19]. Попри існуючі недоліки, ведуться роботи над створенням біофільтрів на основі природних матеріалів, які здатні повністю видаляти

певні шкідливі гази [5]. Ці напрямки досліджень є перспективними для розробки екологічно чистих та енергоефективних систем очищення повітря.

1.3.2.3 Седиментація

Седиментація (гравітаційне осідання) є добре відомим механізмом осадження. Як показано на Рис.1.3, швидкість седиментації зростає зі збільшенням розміру частинок. Для частинок діаметром 1мкм швидкість седиментації становить $\sim 0,004\text{см/с}$, а для частинок 10мкм — $0,3\text{см/с}$. Принято, що частинки мають щільність води. Таким чином, великі частинки пилу розміром 10мкм видаляються з повітря протягом ~ 10 хвилин, тоді як частинки діаметром 1мкм можуть залишатися в повітрі тривалий час [20].

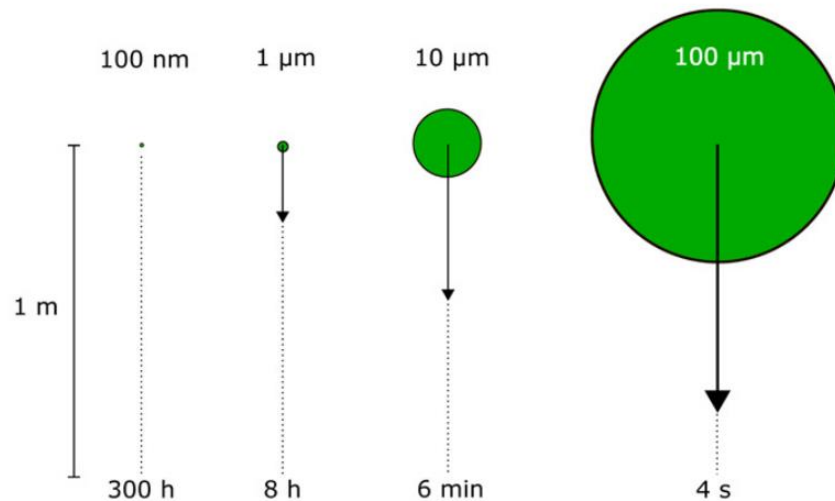


Рис.1.3 . Час осідання частинок різного розміру з висоти 1 м до рівня землі (аеродинамічні еквівалентні діаметри, нано- та мкм) [20].

Власним дослідженням, що було представлено на науковій конференції [21], було виявлено, що при невеликих кратностях повітрообміну з низьким рівнем перемішування та низьким рівнем забруднення (20мкг/м^3) повітряного середовища величина природного осадження $\text{PM}_{2.5}$ не перевищить 25% від початкового забруднення через 1 годину. При роботі повітроочисника гравітаційне осадження часток буде відбуватися в місцях з відсутністю турбулентності, що створена роботою

повітроочисника. При низькій кратності повітрообміну та значному рівні забруднення (180мкг/м^3) через 1 годину кількість $\text{PM}_{2.5}$ скоротилась з 180мкг/м^3 до $78,3\text{мкг/м}^3$, що теж є небезпечним рівнем забруднення $\text{PM}_{2.5}$, і навіть через 9 годин природного осадження кількість часток $\text{PM}_{2.5}$ перевищувало показник 5мкг/м^3 . При тому, що перед дослідом повітря було очищене до рівня $\text{PM}_{2.5} = 4\text{мкг/м}^3$, а в зовнішньому природному повітрі рівень забруднення $\text{PM}_{2.5}$ складав від 13 до 16мкг/м^3 . Потрібні подальші дослідження з отриманням даних щодо створення потоків турбулентності та застійних зон.

1.3.2.4 Вентиляція. Повітряні потоки в приміщенні.

Рух повітряних потоків є фундаментальною складовою повітрообміну, що суттєво впливає на ефективність очищення повітря. Дослідження Xu та Liu [22] виокремлюють п'ять ключових типів потоків, що формують мікросередовище зони дихання: фонові та персоналізовані вентиляції, власне дихання людини, тепловий шлейф від тіла [23], [24] та інфіковані краплі, що перебувають у повітрі [25]. Взаємодія цих потоків створює складний розподіл повітря, що потенційно збільшує ризик зараження. Додатково, конвективні потоки від систем опалення можуть піднімати забруднювачі з нижніх зон у зону дихання [26].

Дослідження Qian та Zheng [28] підкреслює, що для ефективного контролю повітряно-крапельних інфекцій у приміщеннях необхідно глибоко розуміти механізми їх передачі, оцінювати ризики та оптимізувати ключові елементи вентиляції. Аналіз наукових досліджень підкреслює, що вентиляція є критично важливим інженерним засобом для контролю інфекцій, оскільки підвищення її кратності знижує ризик повітряно-крапельного зараження.

Однак, існує потреба в подальших науково обґрунтованих даних щодо мінімальної кратності вентиляції для житлових приміщень. Ефективне видалення забруднювачів з будівлі, як показано на Рис. 1.4, потребує інтеграції інженерних систем вентиляції та повітроочисників.

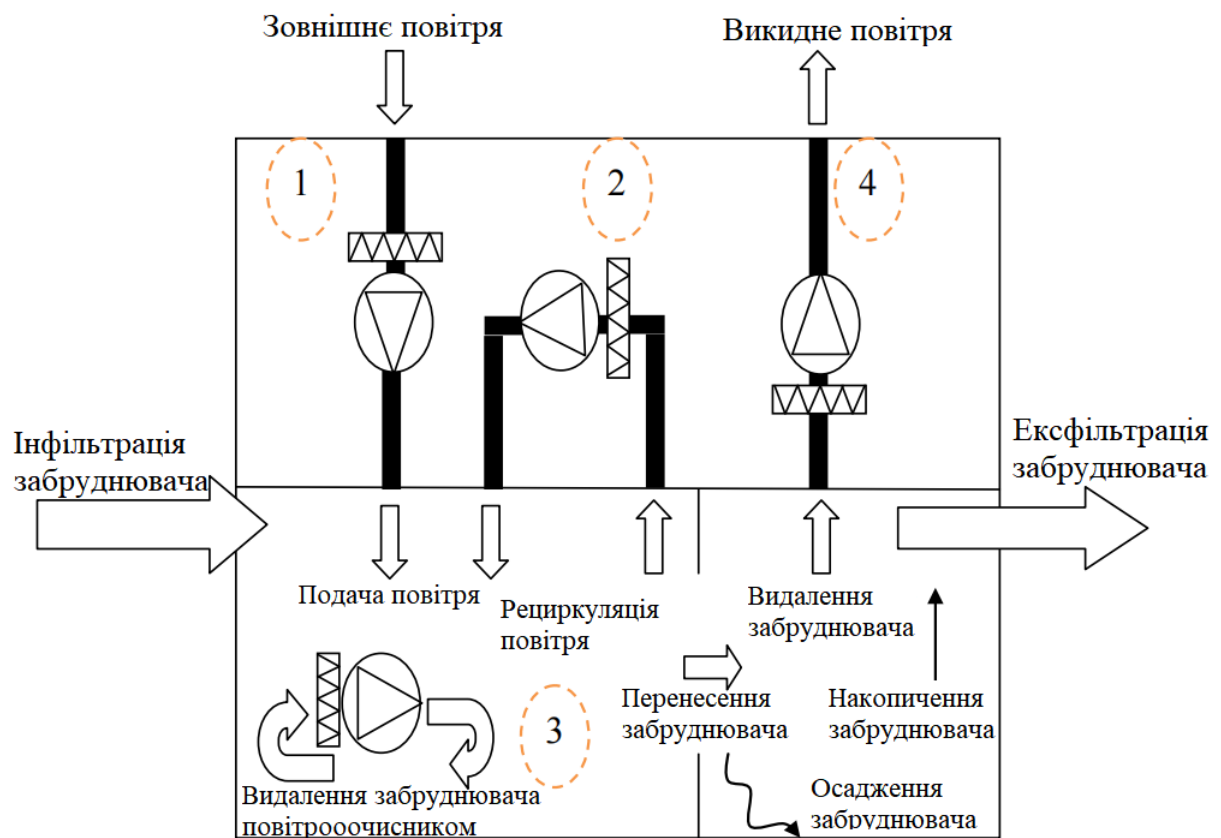


Рис.1.4. Схема видалення забруднювачів з будівлі за допомогою інженерних систем вентиляції та повітроочисників. На схемі вказано розміщення повітряних фільтрів на позиціях 1-4. Фільтр на позиції 1 – на припливній системі вентиляції, очищує зовнішнє повітря. Фільтр 2 – очищує рециркуляційне повітря, що циркулює через кондиціонер в приміщенні. Фільтр 3 – фільтри на повітроочиснику в приміщенні. Фільтр 4 – на витяжній системі вентиляції [27].

Правильне регулювання цих параметрів є основою для зниження концентрації патогенів та мінімізації ризику зараження в закритих просторах.

Схеми вентиляції відіграють вирішальну роль: витісняюча вентиляція (з подачею повітря знизу) не рекомендується через ризик перенесення забруднювачів, включаючи SARS-CoV-2, у зону дихання [29], [30], [31], [32].

Натомість, оптимальною вважається схема з подачею припливного повітря згори та його відбором знизу [29], що імітує ламінарний потік і мінімізує ризик інфікування. Це включає кратність вентиляції, напрямок потоку та схему повітряного потоку (візуалізовані на Рис. 1.5 [29]).

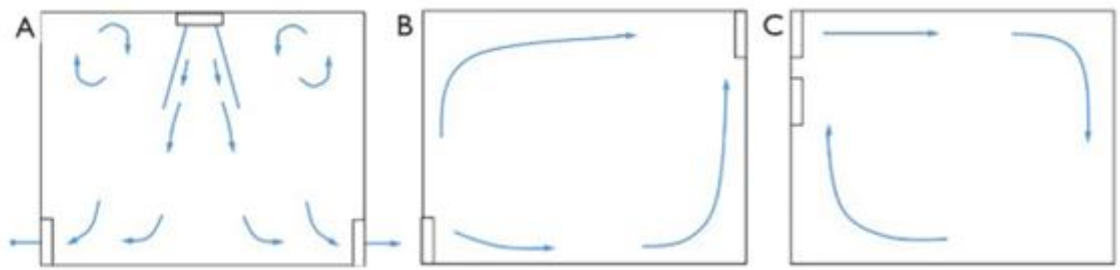


Рис.1.5. Схема напрямку потоку вентиляційних систем. А-зверху-вниз; В – заміщуюча (витісняюча); С-змішувальна [29].

Життєздатність вірусів в аерозолях залежить від умов середовища, зокрема температури та вологості [33], [53], а розташування джерела забруднювача впливає на його поширення [34]. Хоча деякі дослідження вказують на можливе зниження ефективності повітрообміну при збільшенні швидкості припливного повітря [42], для правильно спроектованих систем вентиляції загалом умови покращуються. При витісняючій вентиляції легше контролювати повітряні потоки, а при змішувальній — температуру [44]. Методи розрахунку інтенсивності вентиляції за якістю повітря або кількістю людей [45] забезпечують значення кратності свіжого повітря дещо вищі за 0,7 1/год. Навіть при високій кратності може спостерігатися розшарування CO₂ [46]. Неправильна схема повітряного потоку, особливо за наявності вертикального градієнта температури, може призвести до накопичення забруднювачів, що видихаються, та значно збільшити ризик перехресної інфекції [48], [49]. Збільшення швидкості повітрообміну може послабити теплову стратифікацію, зменшуючи вплив на людей [50].

Існуючі методи дослідження мають певні методологічні обмеження, що ускладнює повне розуміння динаміки передачі інфекцій повітрям [51], [52]. Проте, підтверджено, що повітряно-крапельний шлях є одним з основних шляхів передачі вірусів, а їхня життєздатність залежить від середовища розпилення [53]. Практичні дослідження показали, що використання операційних з ультрачистим повітрям значно знижує глибинні інфекції [54]. При цьому, важливо враховувати, що надмірна кратність вентиляції без правильного вибору схеми може провокувати турбулентність,

перехресне зараження та додатковий шум [43], [55]. Рівень мікробного забруднення в операційних суттєво впливає на післяопераційні інфекції; ламінарний потік повітря, спрямований вниз, демонструє кращі результати.

Для подальшого розуміння механізмів передачі інфекцій повітряно-крапельним шляхом у закритих приміщеннях необхідні додаткові дослідження, що сфокусовані на: впливі напрямку повітряних потоків на поширення інфекцій; високошвидкісних вимірюваннях для адекватного опису динаміки процесу; а також на вдосконаленні програмних засобів для моделювання передачі повітряно-крапельних інфекцій та підвищення точності прогнозування.

1.3.2.5 Повітряні очищувачі

Низький повітрообмін у більшості житлових приміщень, обумовлений природними системами вентиляції, призводить до зростання концентрації забруднювачів усередині будівель, що може бути навіть вищим, ніж на вулиці [56]. Це підкреслює критичну роль належного проектування вентиляції та використання очищувачів повітря для забезпечення здорового внутрішнього середовища. Історія очищувачів повітря бере свій початок з 1850-х років, коли з'явилися перші вугільні маски для захисту шахтарів. Ключовим етапом розвитку стало впровадження НЕРА-технології в 1940-х роках, яка встановила стандарт фільтрації 99,97% частинок розміром до 0,3 мікрон. Сьогодні існує кілька основних типів очищувачів повітря, що відрізняються принципами роботи, включаючи НЕРА-фільтри, фільтри з активованим вугіллям, ультрафіолетові випромінювачі та іонізатори повітря, кожен з яких має свої особливості та призначення.

Фільтри НЕРА. НЕРА-фільтри є визнаним стандартом у галузі очищення повітря, теоретично здатні видаляти 99,97% частинок розміром до 0,3 мкм, включаючи пил, пилок, плісняву, бактерії та віруси [14], [57]. Їхня ефективність проти мікроорганізмів, таких як актинофаги, підтверджена дослідженнями [58]. Однак, критичною проблемою є не сама ефективність фільтруючого матеріалу, а герметичність корпусу, в якому розміщений НЕРА-фільтр. Негерметичні конструкції

очишувачів повітря можуть значно знижувати фактичну ефективність фільтрації до 80% через витік нефільтрованого повітря навколо фільтра. Деякі виробники вирішують цю проблему за допомогою запатентованих технологій ущільнення. Таким чином, при виборі очищувача повітря з HEPA-фільтром важливо звертати увагу не тільки на заявлену ефективність фільтра, а й на конструкцію та герметичність всього пристрою для забезпечення максимальної чистоти повітря.

Активоване вугілля. Для комплексного очищення повітря, що включає видалення як частинок, так і газоподібних забруднювачів, необхідне поєднання різних технологій. HEPA-фільтри ефективно затримують тверді частинки, але не справляються з газами, запахами та ЛОС. Для останніх ключову роль відіграють фільтри з активованим вугіллям. Їхня ефективність базується на процесі адсорбції, коли газові молекули зв'язуються з величезною пористою поверхнею активованого вугілля. Це підкреслює, що для досягнення високої якості повітря в приміщеннях часто потрібен багатоступінчастий підхід до фільтрації.

Ультрафіолетове світло. Ультрафіолетове світло використовується для дезінфекції обладнання в лікарнях та запобігання поширенню шкідливих штамів бактерій та вірусів. Один із найпоширеніших методів очищення ультрафіолетом називається бактерицидним ультрафіолетовим опроміненням (UVGI).

Ультрафіолетове світло, зокрема метод UVGI, є ефективним для дезінфекції та знешкодження бактерій і вірусів, руйнуючи їхню ДНК. Це цінний інструмент у стерильних середовищах, але його ефективність залежить від достатнього часу експозиції. Проте, УФ-очисники мають суттєві обмеження: вони не видаляють тверді частинки з повітря, такі як PM_{10} і $PM_{2.5}$, можуть генерувати шкідливий озон і створюють ризики для здоров'я людини (опіки шкіри, пошкодження очей). Таким чином, хоча УФ-світло дезінфікує, воно не є комплексним рішенням для очищення повітря від усіх забруднень і не може замінити традиційну фільтрацію частинок..

Іонізатори повітря. Іонізатори повітря, що діють за принципом притягування позитивно заряджених частинок забруднення негативно зарядженими іонами, можуть

бути корисними для стримування поширення мікроорганізмів та бактерій у стерильних середовищах, таких як медичні установи. Проте, їхні недоліки є значними.

По-перше, іонізатори не усувають забруднювачів з повітря, а лише переміщують їх на поверхні, включаючи дихальні шляхи людини. Накопичення цих частинок може призвести до серйозних захворювань серця, легень та інших респіраторних проблем.

По-друге, іонізатори генерують озон (O_3), концентрація якого може досягати небезпечних рівнів у приміщенні. Озон, навіть у низьких концентраціях, є шкідливим для дихальних шляхів, може провокувати напади астми, ушкоджувати нюхову цибулину і бути смертельним у високих дозах.

Отже, хоча іонізатори можуть мати обмежене застосування в деяких стерильних умовах для контролю мікроорганізмів, їхні фундаментальні недоліки — відсутність реального видалення забруднень з повітря та продукування шкідливого озону — роблять їх використання у загальному житловому чи робочому просторі сумнівним з точки зору безпеки та ефективності для здоров'я.

Підсумовуючи все викладене, можна зробити висновок, що найбезпечнішим та найефективнішим способом очищення повітря від РМ є механічна фільтрація з допомогою високоефективних фільтрів або поєднання різних типів фільтрів. Запатентована технологія фільтрації HEPA видаляє 99,5% забруднюючих частинок розміром до 0,003 мікрона, найдрібніших із існуючих частинок.

1.3.3 Конструкція очищувача з вбудованим фільтром

Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) надає рекомендації щодо підбору повітроочищувачів [59], [60], [61], [62].

Складовими елементами повітроочищувача є:

- фільтрувальна секція з фільтром класу грубої очистки, зазвичай G4;
- фільтрувальна секція з фільтром класу тонкої очистки, зазвичай F7-F9;
- фільтрувальна секція з високоефективним фільтром твердих частинок, зазвичай фільтром класу HEPA 11-14;
- секція розміщення вентилятора;

- фільтрувальна секція з фільтром з активованого вугілля чи інших видів сорбційних речовин для фільтрації газів та запахів. Головні складові мобільного повітроочищувача, на основі механічної фільтрації показано на Рис. 1.6.

Обов'язковою вимогою є герметичність кожної із секцій фільтрації- відсутність витоків у системі завдяки герметичному корпусу фільтрів та очищувача в цілому.

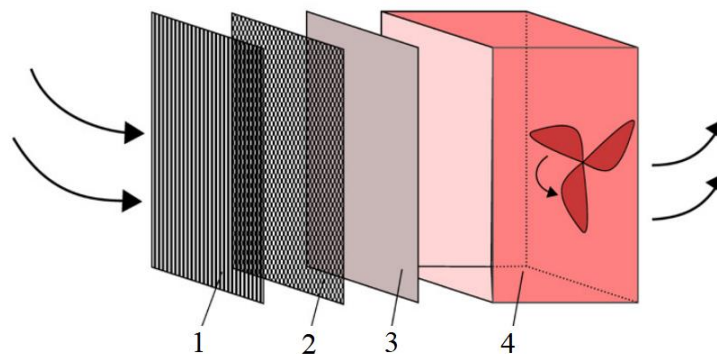


Рис.1.6 . Головні складові мобільного повітроочищувача, на основі механічної фільтрації. 1 – фільтр грубої очистки; 2- фільтр тонкої очистки; 3- HEPA фільтр; 4 – секція вентилятора [20].

Найкращі результати по вловлюванню з повітря часток різних фракцій показали рециркуляційні агрегати з HEPA-фільтрами [63], [64], [65], [66]. Фільтри HEPA зазвичай фіксуються в системах вентиляції та кондиціонування; однак використовуються також портативні пристрої з HEPA-фільтрами потужністю очищення від 500 до 1360 м³/год.

У Німеччині критерії для мобільних очищувачів повітря в будівельному секторі були сформульовані Німецькою асоціацією страхування відповідальності (BG BAU). До них належать вимоги щодо ефективності фільтрації, потужності пристрою (відповідно до розміру приміщення), сигналізації про зменшення потоку повітря (забруднення фільтру) та вказівки щодо уникнення впливу під час заміни фільтрів. Наразі ці вимоги можуть задовольнити тільки мобільні очисники повітря на основі механічної вентиляції [20].

В методичних рекомендаціях Центру з контролю та профілактики захворювань у США CDC [67], [68], в керівництві Американського Інституту Архітектури AIA [69],

в нормах ASHRAE [70] та ISO 29463-1:2011[71] наведена класифікація фільтрів HEPA, що використовуються в закладах охорони здоров'я, як елемент «піраміди інфекційного контролю» надано на Рис.1.7[32].

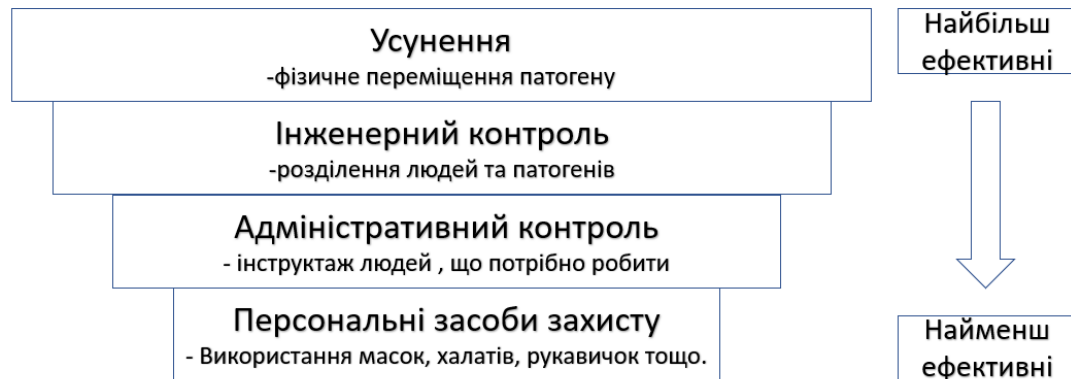


Рис.1.7. Традиційна піраміда інфекційного контролю, адаптована з Центрів по контролю за захворюваннями США (CDC,2015) [32].

Портативні повітроочишувачі з HEPA-фільтрами використовуються як:

- 1) тимчасова рециркуляція повітря в приміщеннях без загальнообмінної вентиляції (наприклад, під час ремонту загальнообмінної системи вентиляції),
- 2) додаткова система рециркуляції повітря для створення необхідної кратності повітрообміну в приміщеннях;
- 3) забезпечення підвищеної ефективності очищення повітря.

Але це обладнання не задовольняє вимоги щодо нормативної санітарної кількості свіжого повітря.

Ефективність портативного повітроочисника з HEPA-фільтром залежить від:

- 1) геометричних розмірів приміщення,
- 2) розміщення перешкод в приміщенні (меблі, обладнання);
- 3) кількості людей в приміщенні;
- 4) місцевих та зовнішніх джерел забруднюючих речовин;
- 5) розташування припливних та витяжних повітророзподільчих пристроїв та інших інженерних мереж в приміщенні;

б) конструкції та дизайну повітроочисника .

1.3.3.1 Класифікація фільтрів для систем очищення повітря.

Класифікація фільтрів за ефективністю фільтрації вказана в ДСТУ EN779:2019[72] та наведено в Таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Класифікація фільтрів згідно ДСТУ EN 779.

Клас очищення повітря	ДСТУ EN 779	DIN 24184 / 24185	Ефективність очищення
Груба очистка	G1.. G4	EU1.. EU4	< 65% частинок розміром > 0.4 мкм > 90 %
Тонка очистка	F5.. F9	EU5.. EU9	40-60% частинок розміром 0.4 мкм >95 %
Високоєфективне очищення	H10.. H14	HEPA 10.. HEPA 14	< 85% частинок розміром більше 0.3 мкм< 99.995 %
Надвисока ефективність очищення	U15.. U17	ULPA 15.. ULPA 17	99,999% частки до 0,12–0,17 мкм <99.99995 %
Вугільні фільтри			Для видалення парів, смороду та диму (3-6 місяців використання)

Наближений діапазон розмірів деяких основних джерел частинок у робочому середовищі наведено на Рис.1.8.

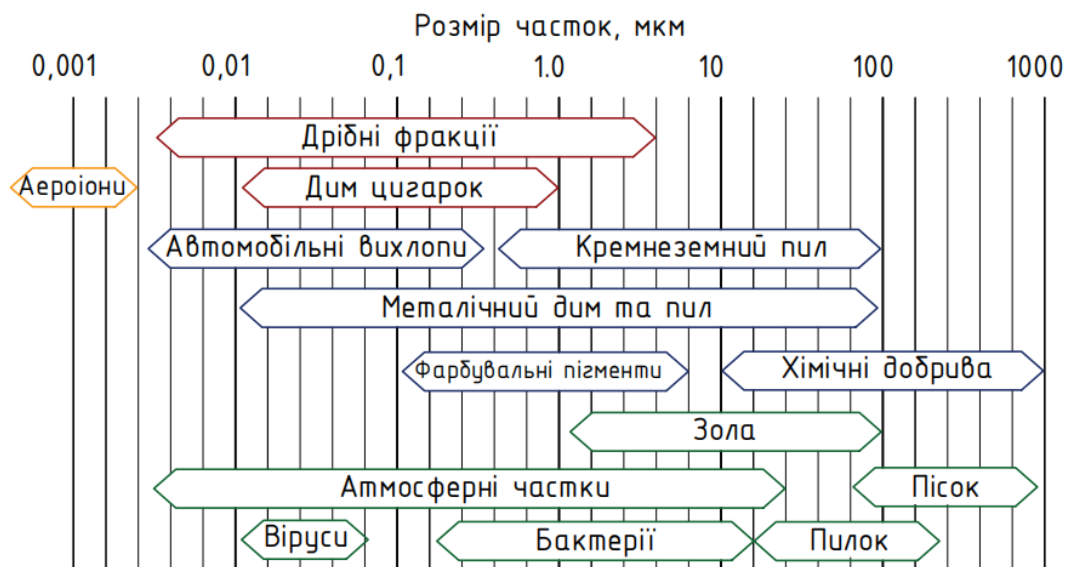


Рис.1.8. Наближений діапазон розмірів деяких основних джерел частинок у робочому середовищі (сині) і на відкритому повітрі (зелені). Розміри частинок у фракції, що вдихають, позначені червоним кольором, а розмір аероіонів жовтою рамкою. Шкала від 0,001 до 1000 мкм [20].

Граничний опір забрудненого фільтру G1..4 до 250 Па, 450Па для M5..6 і F7-9. Визначення розподілу частинок за розміром згідно стандартів ISO21501-1 [73], ISO21501-4 [74], IEST-RP-CC014.2 [75]. В британському стандарті EN1822-1 [76], в Таблиці 1 EN1822-3 [77] вказано умови тестування фільтрів H13 та H14 при температурі $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ та відносній вологості менше 75% з нормованою ефективністю не менше 99,995%.

1.3.3.2. Принцип дії фільтра з волокнистих матеріалів

Існує п'ять механізмів, що визначають ефективність фільтрації [78]: **просіювання, перехоплювання, дифузія, інерційне відокремлення та електростатичне тяжіння.** Ефективність фільтрації - це здатність фільтра видаляти забруднюючі речовини з рідини або газу. Механізми фільтрації, їх спосіб та характеристика наведено в Таблиці 1.3 Додаток 2. Схематичні зображення використані з інших джерел [79].

Для фільтрів HEPA максимальне проникнення частинок визначається механізмами броунівського руху та перехоплення [81]. Зі збільшенням температури броунівський рух зростатиме, тоді як механізм перехоплення залишається постійним. Таким чином, вищі температури призведуть до вищої ефективності фільтрації. Зі збільшенням потоку повітря захоплення броунівським рухом зменшиться через зменшення часу перебування частинок у фільтрі. Оскільки потік повітря не впливає на механізм перехоплення, збільшення потоку повітря призведе до зниження ефективності фільтра. Вже вловлені фільтром частинки утворюють деревовидні структури (дендрити), які захоплюють додаткові частинки, тим самим підвищуючи ефективність фільтра [81], [82], [83]. Рідкі ж частинки об'єднуються у фільтрі та зменшують об'єм пустот у фільтруючому середовищі. Зменшення об'єму порожнечі призводить до вищої внутрішньої швидкості і, отже, меншого часу перебування частинки при броунівському русі .

Таким чином, у міру утворення рідких відкладень у фільтрі проникнення аерозолі збільшиться. З досліджень Abdolghader [84] слідує, що проникнення аерозолі зменшується зі збільшенням товщини фільтра.

Посилаючись на рівняння Lee [85] мінімальна прогнозована ефективність та найбільший проникаючий розмір частинок для волокнистих фільтрів були отримані шляхом розгляду механізмів дифузії та перехоплення. Результати показують, що найбільш проникаючий розмір частинок зменшується зі збільшенням швидкості фільтрації та збільшенням об'ємної частки волокна, і збільшується зі збільшенням розміру волокна фільтра. Також, Lee [85] було виведено відповідне рівняння для мінімальної ефективності, що показує залежність від швидкості фільтрації, об'ємної частки волокна та розміру волокна.

1.3.3.3. Основні параметри для фільтрів волокнистого типу

Фільтри волокнистого типу - це один з найпоширеніших типів фільтрів, які використовуються для очищення рідин та газів. Вони складаються з волокнистого матеріалу, такого як бавовна, поліестер або скловолокно, який затримує забруднюючі речовини. Важливо також враховувати тип забруднюючих речовин, які необхідно видалити, розмір частинок забруднюючих речовин, швидкість потоку рідини або газу та тиск. Параметри фільтра визначаються його напірною швидкістю, швидкістю фільтрації, ефективністю, проникненістю, його перепадом тиску та пилоутримувальною здатністю.

Напірна швидкість та швидкість фільтрації. Напірна швидкість визначається як швидкість потоку повітря, що проходить через поперечний переріз повітряного фільтра (м/с). Вона являє собою потужність потоку, що проходить через встановлену площу повітряного фільтра.

Швидкість фільтрації визначається як швидкість потоку повітря, що проходить через розширену площу фільтруючого матеріалу. Він відображає здатність повітряного потоку проходити через фільтруючий матеріал, особливо ефективність фільтрації фільтруючого середовища.

Діапазон швидкості фільтрації для фільтра суб-HEPA становить 5–7 см/с, а для фільтра HEPA та фільтра ULPA зазвичай становить 2–3 см/с[86].

Ефективність та проникність. Ефективність фільтра - це його здатність видаляти забруднюючі речовини з рідини або газу. Вона вимірюється у відсотках і визначається як частка забруднюючих речовин, які видаляються фільтром.

Проникність фільтра - це його здатність пропускати рідину або газ через себе. Вона вимірюється в одиницях швидкості потоку (наприклад, літрів на хвилину на квадратний метр) і визначається як обсяг рідини або газу, який може пройти через фільтр за певний час.

Перепад тиску. Перепад тиску повітряного фільтра складається з двох компонентів: фільтруючого середовища та структури повітряного фільтра.

Падіння тиску фільтруючого середовища лінійно пропорційне швидкості фільтрації, тоді як загальне падіння тиску повітряного фільтра має експоненціальну залежність від швидкості .

Окрім зменшення падіння тиску самого фільтруючого матеріалу, існують інші способи зменшення падіння тиску повітряного фільтра: розширення площі фільтруючого середовища; зменшення довжини каналу потоку повітря може зменшити опір тертя повітря; спрощення входу та виходу каналів повітряного потоку або зменшення швидкості повітря на вході та виході може зменшити місцевий опір повітряного потоку.

Пилоутримувальна здатність. Пилоутримувальна здатність - це характеристика фільтра, яка визначає його здатність утримувати пил та інші забруднюючі частинки. Вона вимірюється в грамах на квадратний метр (г/м^2) і визначає максимальну кількість пилу, яку може утримати фільтр. Чим вища пилоутримувальна здатність фільтра, тим більше пилу він може утримати, до стану засмічення. Засмічений фільтр може призвести до зниження ефективності фільтрації та збільшення перепаду тиску.

1.3.4 Параметри підбору повітряного очищувача

Ефективність фільтрації зазвичай визначається за допомогою відсотка видалення забруднюючих речовин з рідини або газу. На ефективність фільтрації можуть впливати різні фактори, такі як тип забруднюючих речовин, розмір частинок забруднюючих речовин, тип фільтра, швидкість потоку рідини або газу та тиск. Основні на які потрібно орієнтуватися:

1. очищувач з рейтингом CADR (Clean Air Delivery Rate). CADR - це міра того, наскільки ефективно очищувач видаляє пил, пилок і дим. Чим вище рейтинг CADR, тим ефективніший очищувач.

2. очищувач відповідного розміру до приміщення. Параметри очисника мають задовільняти вимогу очищення повітря в приміщенні визначеного розміру.

3. тип фільтрів, які використовує очищувач. Класифікація фільтрів вказана в розділі 1.3.3.1 цього дослідження. Фільтри обираються у відповідності до забруднювача, який потрібно видалити.

4. додаткові функції (датчик якості повітря, пульт дистанційного керування, таймер та ін.) .

Ефективність повітряних фільтрів, включаючи навіть високоефективні HEPA-фільтри, має обмеження, особливо щодо частинок менше 0,3 мкм. Загальна продуктивність фільтрації залежить від конструкції пристрою, конфігурації фільтрувальних секцій та умов експлуатації, включаючи фізичні параметри повітряного середовища та розміщення обладнання [87].

Порівняльний аналіз систем очищення повітря [87] показав, що як централізовані системи (припливні установки з MERV15, фанкойли з MERV13), так і портативні очищувачі з HEPA-фільтрами здатні значно знижувати концентрацію частинок у приміщенні. Зокрема, використання достатньої кількості переносних HEPA-очисників є ефективним рішенням для швидкого зменшення забруднення повітря, навіть у приміщеннях без інтегрованих систем вентиляції. Це підкреслює

важливість вибору відповідної технології фільтрації та її правильного впровадження для досягнення оптимальної якості повітря в закритих просторах.

1.3.5 Портативні очищувачі як засіб очищення повітря в приміщенні.

В розділі будуть вказані гіпотези впливу роботи повітроочищувачів на зміну параметрів повітряного середовища в приміщенні .

Досліджено різні стратегії організації енергоефективних інженерних мереж для приміщень різного призначення з різними нормативними зовнішніми температурами: W. H.D Alrazni (Кувейт) [88], Liu та ін. (Китай)[89], Wirtanen (Фінляндія) [90], Ying Zhan (Пекін, Китай) [91], S.Michaelis (Австралія) [92], O.Tanskyi (Техас,США) [93], Stefano Schiavon (Італія) [94], J.Wongwatcharapaiboon (Малазія) [95], ZEREN LIAO (Техас,США) [96].

1.3.5.1 Портативні повітроочисники як засіб впливу на захворюваність

Аналіз наведених наукових джерел чітко вказує на глибокий взаємозв'язок між якістю повітря, ефективністю систем вентиляції та фільтрації, а також станом здоров'я населення. Зростання смертності, пов'язаної з атмосферним $PM_{2.5}$ [97], та значний внесок побутового енергоспоживання у забруднення повітря [98] підкреслюють нагальність вирішення цих проблем. Хоча прямий кількісний зв'язок між механічною вентиляцією та передачею інфекційних захворювань потребує подальших досліджень [67], [99], [100], наявні дані свідчать, що належна вентиляція може зменшити ризик інфікування аерозольними частинками [101].

Дослідження переконливо демонструють значні переваги використання очисників повітря, оснащених HEPA-фільтрами. Вони ефективно знижують вплив $PM_{2.5}$ [102], [103], [104], що призводить до помітного зниження смертності [102], має кардіопротекторний ефект [103] та сприяє покращенню контролю над астмою у дітей [105]. HEPA-фільтри також довели свою здатність суттєво зменшувати рівень забруднювачів у шкільних приміщеннях [106] і є рекомендованим засобом для людей з алергічними респіраторними захворюваннями [107]. Більше того, їх застосування

може впливати на зниження концентрації шкідливих речовин, таких як кадмій, в організмі вагітних жінок [108].

Незважаючи на ці позитивні результати, систематичний огляд [109] виявив відсутність досліджень, що безпосередньо вивчають вплив комерційно доступних портативних повітряних фільтрів на захворюваність на респіраторні інфекції у суспільстві, зокрема SARS-CoV-2. Це вказує на критичну прогалину у наявних знаннях, яка вимагає подальших, цілеспрямованих досліджень для кількісної оцінки впливу фільтрації на передачу інфекційних захворювань у реальних умовах.

Таким чином, для комплексного покращення якості повітря в приміщеннях та зниження пов'язаних з цим ризиків для здоров'я, необхідно продовжувати вдосконалення технологій фільтрації, активно впроваджувати ефективні системи очищення повітря, а також проводити глибинні дослідження впливу цих систем на поширення інфекційних агентів.

1.3.5.1.1 Визначення ефективності очищення.

Методики розрахунку систем. Ефективність фільтрації повітря є багатофакторним процесом, що визначається розміром частинок, швидкістю потоку та ступенем забруднення фільтра [110], [111]. Спостерігається, що фільтри краще затримують дуже дрібні (віруси, частинки менші 0,1мкм) та відносно великі (пил, бактерії, частинки 1мкм) частинки, ніж частинки середнього розміру (дим, частинки 0,5мкм). Для стандартизованої оцінки ефективності фільтрів у системах загальної вентиляції використовується метод Eurovent 4/9:1997 [112], який передбачає розрахунок ефективності за відповідною формулою:

$$Eff = \frac{(C_b - C_a)}{C_b} \times 100\% \quad (1.1)$$

де C_b , C_a – концентрація забруднювачів перед і після фільтру відповідно.

Зона ефективного розподілу повітря згідно стандарту ASHRAE Standard 62.1-2019, додаток C1.1 [113] розраховується відповідно до формули:

$$E_z = (C_e - C_s) / (C - C_s), \quad (1.2)$$

де E_z - ефективність розподілу повітря зони;

C - середня концентрація забруднюючих речовин у зоні дихання [2];

C_e - середня концентрація забруднювача на вихлопі;

C_s - середня концентрація забруднювача на подачі .

Для персоналізованих систем вентиляції ключовим є забезпечення ефективного розподілу повітря в зоні дихання, що передбачає розрахункову площу $0,8 \text{ м}^2$ на мешканця на висоті $1,4 \text{ м}$ від підлоги. Дослідження показують, що з часом механічні фільтри забруднюються, знижуючи свою ефективність та збільшуючи перепад тиску, що перешкоджає повітряному потоку [114]. Значна увага приділяється оптимізації конфігурації складчастих фільтрів [7], [79], [86], [115], [116], [117], [118], [119]. Зокрема, було виявлено, що збільшення кута вершини складки з 90° до приблизно 150° при постійній висоті складки може знизити опір конструкції приблизно на 30%, що важливо для покращення гідродинамічних характеристик фільтрів та зменшення енергоспоживання систем вентиляції. Схема розрахунку кута гофри вказано на Рис.1.9

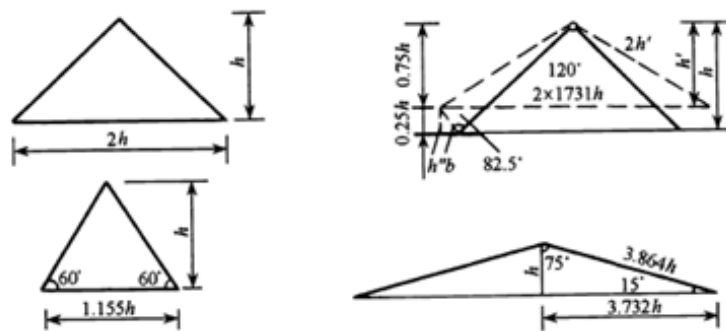


Рис.1.9 .Схема розрахунку кута гофри [117].

Дослідження підкреслюють ключові аспекти, що впливають на продуктивність фільтрів. Збільшення кількості складок може значно подовжити термін служби фільтра, хоча ця залежність не є лінійною і залежить від характеристик аерозолію (полідисперсний чи монодисперсний) [120]. Важливо також враховувати, що фільтри мають коротший термін служби при завантаженні полідисперсними частинками [120]. Крім того, для точного визначення об'ємної витрати повітряного потоку необхідно

враховувати умови потоку (температуру та тиск), використовуючи стандартні умови (наприклад, ISO5011) та закон ідеального газу для встановлення співвідношення між фактичною та стандартною об'ємними витратами [121]. Це підкреслює необхідність комплексного підходу до проектування та експлуатації систем фільтрації, що враховує як конструктивні особливості фільтрів, так і умови навколишнього середовища. Таким чином, співвідношення між стандартною та фактичною об'ємною витратою може бути визначено з використанням закону ідеального газу за формулою:

$$V_a = V_s \frac{\rho_s}{\rho_a} = V_s \left(\frac{P_s}{P_a} \right) \left(\frac{T_s}{T_a} \right); \text{ м}^3/\text{хвилину} \quad (1.3)$$

де V_a – фактична об'ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{хвилину}$;
 V_s – стандартна об'ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{хвилину}$;
 P_a – фактичний абсолютний тиск, кПа;
 P_s – стандартна абсолютний тиск (101,325кПа);
 T_a – фактична температура, С;
 T_s – стандартна температура (20°C).

Швидкість видалення інфекційних частинок (або швидкість подачі свіжого повітря) очищувачами повітря $k_{\text{AirCleaner}}$ можна оцінити за швидкістю повітряного потоку $\lambda_{\text{AirCleaner}}$ і ефективністю фільтра $\eta_{\text{AirCleaner}}$ або на основі швидкості подачі чистого повітря CADR і об'єму приміщення V [122] за формулою:

$$k_{\text{AirCleaner}} = \lambda_{\text{AirCleaner}} \eta_{\text{AirCleaner}} = \frac{\text{CADR}}{V} \quad (1.4)$$

де $k_{\text{AirCleaner}}$ - швидкість видалення інфекційних частинок, 1/год;
 $\lambda_{\text{AirCleaner}}$ – швидкість повітряного потоку, $\text{м}^3/\text{год}$;
 $\eta_{\text{AirCleaner}}$ – ефективність фільтрації, %;
CADR – швидкість подачі свіжого повітря, $\text{м}^3/\text{год}$;
 V – об'єм приміщення, м^3 .

Фактична швидкість вентиляції λ_{vent} є просторовою змінною, яка залежить від конкретного розташування в просторі. Таким чином, до вихідної формули (1.4) буде застосовано додатковий коефіцієнт, щоб адаптувати його до недосконалих сценаріїв змішування. Передбачається, що швидкість видалення інфекційних часток через осадження, а також через зовнішнє повітря, що подається очисниками повітря, є

рівномірними в усьому просторі. Тому ці терміни не потрібно змінювати для недосконалого змішування.

Mølgaard та ін.[123] пропонують формулу (1.5) для визначення ефективності очищення повітря портативним очисником в кімнаті з добре перемішаним повітрям, де $N_{i,ac}$ і $N_{i,nac}$ (см^{-3}) — стаціонарна концентрація частинок у фільтрі розміру i в кімнаті об'ємом V_r (м^3) з очисником повітря та без нього відповідно. Якщо ігнорувати коагуляцію, ефективність очищення повітря ϵ дорівнює:

$$\epsilon_i = 1 - \frac{N_{i,ac}}{N_{i,nac}} = \frac{CADR_i}{V_r \cdot (\lambda + \beta_i) + CADR_i}, \quad (1.5)$$

де λ - кратність систем вентиляції (константа), 1/год ;
 β_i - швидкість осадження частинок (константа) , 1/год ;
 $CARD_i$ - швидкість подачі чистого повітря, $\text{м}^3/\text{год}$.

Рейтинг тяги DR, який є прогнозованим відсотком незадоволених мешканців через протяг[111], був розрахований за допомогою наступної формули:

$$DR = (34 - T_1)(v_1 - 0,05)0,62 (0,37v_1T_u + 3,14) [\%] \quad (1.6)$$

де T_1 = місцева температура повітря (між 20 і 26°C)
 v_1 = місцева середня швидкість повітря (<0,5 м/с)
 T_u = локальна інтенсивність турбулентності (від 10 до 60%)

Якщо T_u невідомо, застосувати 40%; якщо $v_1 < 0,05 \text{ м/с}$, застосувати 0,05м/с; якщо $DR > 100\%$, застосувати 100%.

Аналіз показує, що двоступенева фільтрація є ефективним і потенційно економічно вигідним підходом до очищення повітря, особливо в умовах високої запиленості. Вона може забезпечити якісне очищення з використанням фільтрів нижчого класу та значно подовжити термін служби фільтрів, що зменшує загальні експлуатаційні витрати . Важливо, що переваги двоступеневої фільтрації зберігаються навіть при зростанні цін на електроенергію, а оптимізація термінів заміни фільтрів може суттєво знизити річні витрати (наприклад, на 30% при подовженні термінів служби попереднього та основного фільтрів) [27]. Однак, наявні дослідження мають обмеження, пов'язані з припущеннями про стабільність ефективності фільтрації з

часом та її початкові значення. Це означає, що результати слід інтерпретувати як тенденції, а не як абсолютно достовірні обставини, і підкреслює нагальну потребу в додаткових експериментальних даних, отриманих у реальних умовах експлуатації, для підвищення точності аналізу та практичної значущості висновків.

1.3.5.2. Ефективність очищення та енергозбереження

Важливо знайти баланс між ефективністю очищення та енергозбереженням фільтра. Фільтр з високою ефективністю очищення буде видаляти більше забруднюючих речовин з повітря, але він також може споживати більше енергії.

Дослідження виявляють критичний баланс між ефективністю фільтрації повітря та енергоспоживанням систем. Впровадження фільтрів з високою ефективністю, таких як MERV11 [124], [125], може призводити до значного зниження швидкості повітряного потоку та коефіцієнта конвекційної теплопередачі, збільшення енергоспоживання (наприклад, на 15% для охолодження [124]), а також зростання тиску на вентиляторі, що може збільшити споживання потужності вентилятора. Внесок опору фільтра в загальне падіння тиску в системі зазвичай становить 20%–50% [126].

Тиск на вентиляторі зріс на 20-30%, що призвело до збільшення споживання потужності вентилятора в системі на 3-4%. Теоретичний аналіз та результати досліджень показують, що величина потенційного енергетичного впливу, пов'язаного з використанням фільтрів, загалом, буде невеликою та може призвести або до чистої економії, або до додаткових витрат, залежно від системи. Розподіл статичного тиску в системі зображено на Рис.1.10.

Необхідний тиск вентилятора визначаються за формулою:

$$\Delta P_{fan} = C_{total} \cdot Q_{fan}^2 = (C_{filter} + C_{system}) \cdot Q_{fan}^2; \quad (1.7)$$

де ΔP_{fan} - необхідний тиск на вентиляторі;

Q_{fan} - швидкість повітряного потоку системи;

C_{system} - коефіцієнт пропорційності для системи, за винятком фільтра.

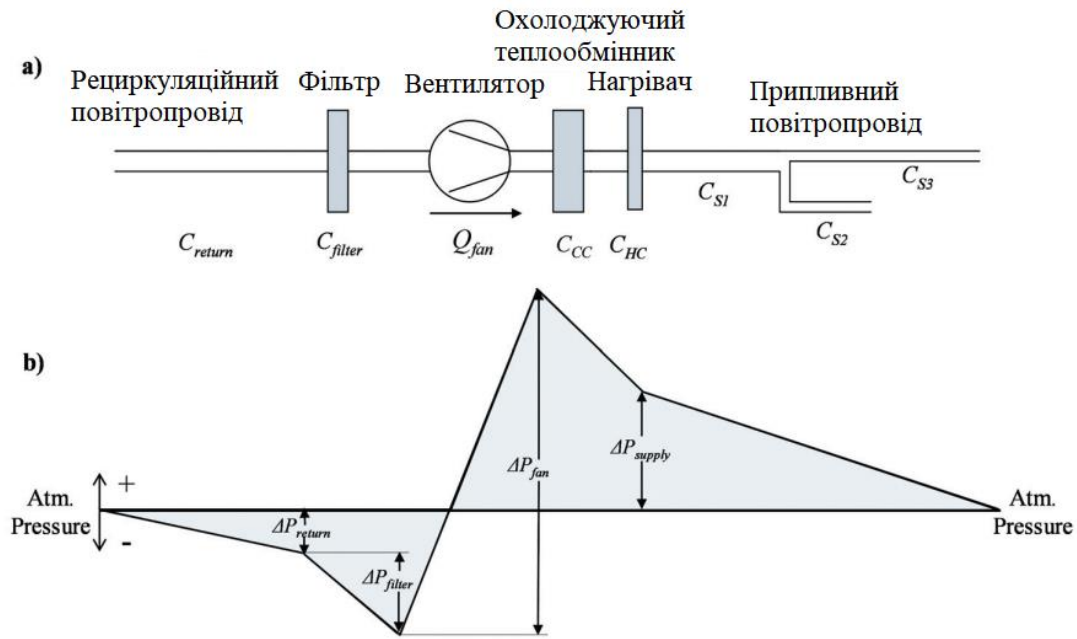


Рис.1.10. Розподіл тиску в системі ОВК: (а) схема системи, (b) розподіл статичного тиску [126].

Коефіцієнт фільтра C_{filter} , змінюється як з ефективністю фільтра, так і з часом під час завантаження. Коефіцієнт фільтра та системний коефіцієнт C_{system} можна використовувати для вираження внеску фільтра в загальний перепад тиску в системі ($C_{filter} / [C_{filter} + C_{system}]$). Визначити потужність електроспоживання вентилятора системи з встановленим фільтром можна за формулою:

$$W_{fan} = \frac{\Delta P_{fan} \cdot Q_{fan}}{\eta_{fan} \cdot \eta_{motor}} = \frac{C_{total} \cdot Q_{fan}^3}{\eta_{fan} \cdot \eta_{motor}} = \frac{(C_{filter} + C_{system}) \cdot Q_{fan}^3}{\eta_{fan} \cdot \eta_{motor}} ; \quad (1.8)$$

Де W_{fan} - споживана потужність вентилятора;
 η_{fan} = ККД вентилятора (типові значення ефективності від 19-23%, середнє значення приймається 20% [127];
 $\eta_{двигун}$ = ККД двигуна вентилятора.

Збільшення перепаду тиску на фільтрі призводить до зменшення потоку повітря, зростання електроспоживання та зниження холодильної потужності [128]. Навіть незначне забруднення теплообмінника може суттєво погіршити ефективність кондиціонера [127].

Персоналізовані системи очищення повітря можуть підвищити ефективність до 70,6% при правильному комбінуванні з загальнообмінною вентиляцією [129], проте

переміщення людей може погіршувати захоплення CO₂ [130]. Оптимізація розташування та параметрів потоку повітря є ключовою для їх ефективності [130], [131]. Портативні очищувачі повітря демонструють значну ефективність (60-90% для потужніших, 15-45% для менших [132]) у зниженні концентрації твердих часток, зокрема PM_{2.5}, на 95% [133], без модифікації існуючих систем вентиляції [134], [135]. Їхня ефективність є найвищою при розміщенні поблизу джерела забруднення або в центрі приміщення [132], [134], [135]. Однак ефективність портативних очищувачів залежить від схеми повітряних потоків у приміщенні, що може обмежувати їхню ефективність у зонах застою [134], [135]. Крім того, дослідження динаміки аерозолів [134], [135] мають обмеження щодо кількості джерел, розміру частинок та прямої оцінки передачі хвороб, хоча надають цінну інформацію про рух респіраторних аерозолів.

Узагальнюючи, для забезпечення оптимальної якості повітря в приміщеннях необхідно ретельно балансувати між ефективністю фільтрації та енергоспоживанням, враховувати вплив фільтруючих елементів на роботу всієї системи, оптимізувати конфігурацію як централізованих, так і персоналізованих систем, а також враховувати фактори, що впливають на рух аерозолів.

1.3.5.2.1 Ефективність вловлювання РМ та наддрібніших частинок.

Аналіз джерел [136, 137, 138, 139, 140] підкреслює, що значна частка внутрішнього PM_{2.5} є зовнішнього походження. Дослідження демонструють, що неглибокі шари активованого вугілля [137] та поліпропіленові полімерні мембрани з порожнистих волокон [138] виявляють високу ефективність у видаленні наддрібних частинок (≤ 100 нм). Vulejko [138] довів, що поліпропіленові полімерні мембрани з порожнистих волокон дуже ефективні у видаленні наддрібних частинок. Ефективність перевищує 99,97% для частинок понад 100 нм, а для частинок у діапазоні 32-40 нм ефективність становить 90-96%. Водночас, мембрани з порожнистих волокон мають високий перепад тиску, що вимагає оптимізації їхньої геометрії та площі [138]. Обмежена пилоутримувальна здатність деяких мембран

через ефект самоочищення [139] та зниження ефективності електростатичних фільтрів із засміченням [140] є викликами для подальших розробок. Найвищу ефективність у видаленні наддрібних частинок демонструють HEPA-фільтри, які, як показали дослідження Johnson [136], значно знижують концентрацію $PM_{2.5}$ у житлових приміщеннях. Враховуючи тривалий час перебування дітей у приміщеннях, пропонується розробка мобільних, недорогих моніторів якості повітря для оперативного реагування та подальших медичних досліджень [136].

1.3.5.2.2 Ефективність вловлювання біоаерозолів.

Дослідження підкреслюють складність взаємодії фільтрів з мікроорганізмами та забруднювачами. Виживання мікроорганізмів на фільтрах значно залежить від відносної вологості, причому вища вологість сприяє їхньому збереженню [141]. Існуючі антибактеріальні обробки фільтрів можуть бути нерівномірними та навіть потенційно небезпечними, а затримані бактерії, включаючи *E.coli*, *E.mundtii* та *M.synoviae*, здатні зберігати життєздатність у повітрі протягом тривалого часу за певних температурних та вологісних умов [142]. Проте, фільтри з неорганічними наночастинками та екстрактами природних рослин [143], а також матеріали без вуглецевих сполук [144], такі як 3D-аерогелеві фільтри на основі листя зеленого чаю з високим вмістом катехинів [145], демонструють перспективні антибактеріальні властивості. Також активно досліджуються противірусні наноматеріали, включаючи металеві та фотокаталізатори на основі оксиду металу [146]. Ефективність портативних очищувачів повітря від біоаерозолів варіюється, причому використання озонових генераторів з вугільними фільтрами для зниження концентрації озону [147] показує помірне зменшення бактеріальних і грибкових аерозолів, але часто перевищує гранично допустимі концентрації озону.

Натомість, портативні очисники з фільтрами HEPA [148] значно знижують концентрацію аерозолів (на $96\% \pm 2\%$) та скорочують час очищення приміщень, а HEPA-фільтри, просочені TiO_2 , виявилися ефективними проти біоаерозолів, бактерій і формальдегіду [149].

1.3.5.2.3 Ефективність вловлювання ЛОС

Наукові дослідження показують, що сорбційна фільтрація залишається найефективнішою стандартною комерційною технологією, принаймні на початковому етапі, для загального видалення забруднювачів летких органічних сполук (ЛОС) у приміщенні [150]. Jinzhe Nie [151] у своєму дослідженні експериментально довів, що використання силікагелевого рекуператора в системі вентиляції може забезпечити очищення повітря від ЛОС з ефективністю 65% та можливістю заощадження електроенергії до 55,93% у порівнянні зі звичайними системами вентиляції та кондиціонування. Теоретичні дослідження вказують на можливість отримання 80%-ї ефективності очищення, проте є необхідність вивчення впливу параметрів середовища, в якому знаходиться фільтр, на очищення повітря та енергетичні характеристики (коефіцієнт зовнішньої вологості відіграє важливу роль, яка впливає на очищення повітря та енергетичну ефективність).

Легкі та дуже леткі гази, такі як дихлорметан, формальдегід та ацетальдегід, не можуть бути ефективно видалені лише активованим вугіллям [152], [153]. Однак ефективність видалення цих газів можна покращити, якщо додати спеціальні сорбційні середовища (наприклад, активований оксид алюмінію, просочений перманганатом калію). Дослідження Perry [137] для NASA показали видалення від 75 до 90% частинок розміром 0,004 мкм за допомогою шару активованого вугілля глибиною 1,9 см, що містить вуглецеві гранули ($<3,327$ мм і $>0,991$ мм). Ефективність видалення нано- та наддрібних частинок забруднень, схожа на ефективність очищення в фільтрі HEPA. Таку високу ефективність фільтрування спостерігали під час випробування шару активованого вугілля глибиною 38 см. Більшість фільтрів, які використовуються в космічних кораблях, менше 5 см, а застосування високої швидкості потоку в системі вентиляції кабіни зазвичай має проникність <10 см. Тож результати дослідження свідчать, що неглибокі шари активованого вугілля, які використовуються в системах вентиляції кабіни космічного корабля при визначених умовах, можуть забезпечувати певну ефективність видалення наддрібних частинок

(≤ 100 нм). Однак очікувана продуктивність для видалення більших субмікронних (дрібних) частинок є нижча, ніж у HEPA фільтрів з аналогічною продуктивністю. Цього висновку досяг і Kholafaei [154]: збільшення глибини шару вугільного фільтру підвищило ефективність видалення ЛОС (летких органічних сполук), однак падіння тиску на фільтрі значно зросло зі збільшенням глибини шару середовища. Carlucci [155] теж вказує на необхідність комбонування вугільних фільтрів з волокнистими фільтрами для достатньої ефективності очищення.

Zhong та ін. [156] аналізували способи розкладання газоподібних забруднюючих речовин за допомогою фотокаталізаторів V_2O_5/TiO_2 під ультрафіолетовим або сонячним світлом без додавання додаткової енергії. Результати вказують на помірну ефективність фільтрації від 1% до 80% залежно від умов експерименту.

Для ефективного видалення як твердих часток, так і газоподібних забруднюючих речовин необхідне комбінування різних фільтрувальних середовищ та засобів. Дослідження показали, що активоване вугілля ефективне для видалення наддрібних частинок [137], проте для більших субмікронних частинок та мінімізації падіння тиску необхідно комбінувати вугільні фільтри з волокнистими [154], [155]. Це підкреслює важливість інтегрованого підходу для досягнення всебічного очищення повітря.

1.3.5.2.4 Вплив вологості на процес очищення в фільтрі та тиск.

Наукові дослідження активно вивчають вплив відносної вологості на ефективність та експлуатаційні характеристики повітряних фільтрів, а також на потенційне розмноження мікроорганізмів. Godoy та ін. [157] відзначають значне зниження падіння тиску в HEPA фільтрах за високої відносної вологості (90%). Водночас, вологість у фільтрі може створювати сприятливі умови для розмноження мікроорганізмів. Хоча більшість сучасних систем кондиціонування повітря містять фільтри для затримання мікроорганізмів [158], ці мікроорганізми можуть залишатися

життєздатними та повертатися в повітряне середовище за несприятливих умов, таких як неефективна робота фільтра, періоди обслуговування або тимчасові несправності.

Дослідження Montgomery [15] сфокусувалося на впливі відносної вологості на властивості повітряних фільтрів, завантажених гігроскопічними та негігроскопічними частинками. Було встановлено, що вплив відносної вологості залежить від фільтруючого середовища, рівня запиленості та відносної вологості завантаження частинок. Найбільші зміни спостерігалися зі збільшенням рівня завантаження пилом та для фільтрів, завантажених більшою пропорцією гігроскопічних частинок, особливо коли завантажений фільтр піддавався впливу найвищого рівня відносної вологості в дослідженні ($RH=60\%$). Була висунута гіпотеза, що агрегати гігроскопічних солей ($NaCl$, Na_2SO_4 , $(NH_4)_2SO_4$), захоплені фільтруючим середовищем при низькій відносній вологості, збільшуються в розмірі під впливом підвищеної відносної вологості. Це збільшення розміру частинок може спричинити навантаження на структуру (зміни фізичного середовища на 5–16% від розміру сухого заповнювача), що призводить до фізичної реструктуризації захопленого пилу та пояснює незворотні зміни. Для підтвердження цієї гіпотези необхідні подальші дослідження. Варто зазначити, що деякі солі ($LiCl$, $LiBr$, $CaCl_2$, HCO_2K , $MgCl_2$) є природними біоцидами та можуть видаляти віруси або бактерії з повітря [159].

Дослідження Gupta [160] вказує на вплив вологості на масову навантажувальну здатність HEPA фільтрів зі скловолокна. При відносній вологості вищій за 75%, падіння тиску на HEPA фільтрі нелінійно збільшує щільність площі навантаження (площа фільтрації) аерозолі $NaCl$, значно зменшуючи масову навантажувальну здатність фільтра порівняно з сухими гігроскопічними або негігроскопічними навантаженнями частинок.

Дослідження Wongwatcharapaiboon [95] показали, що з огляду на метеорологічні фактори, коли відносна вологість підвищується до вологих умов, ефективність видалення $PM_{2.5}$ знижується, а видалення PM_{10} збільшується. Отже, відносна вологість, здається, ефективно знижує концентрацію PM_{10} , хоча може мати гнучкий вплив на

концентрацію $PM_{2.5}$. Проте, відносне падіння тиску на фільтрі сильніше корелює з внутрішньою температурою за вологим термометром (коефіцієнт кореляції = $-0,28$), що свідчить про значне зниження латентної ємності фільтра (його поглинальної здатності), виміряної за допомогою фільтрів з більш високим падінням тиску, при вимірюваннях, зроблених із нижчими температурами за вологим термометром у приміщенні [161]. Перепад тиску на фільтрі залежить від типу фільтра, об'єму повітряного потоку, що проходить через фільтр, та накопичувальної здатності фільтра затримувати пил. Вплив стану фільтра на швидкість потоку повітря надано в докторській дисертації Dr. Md R. Islan [162] та вказано на Рис. 1.11.

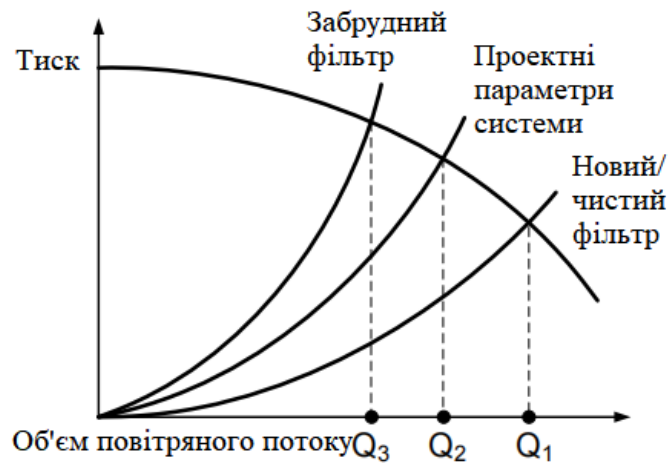


Рис.1.11. Вплив стану фільтра на швидкість потоку повітря. З докторської дисертації Dr.Md R.Islan [162].

Ефективність волокнистих фільтрів у захопленні аерозолів залежить від кількох ключових факторів. Збільшення щільності пакування, товщини фільтра та щільності заряду волокон призводить до зменшення проникнення аерозолу. Дослідження Huang та ін. [163] показують, що проникнення аерозолу зростає зі збільшенням швидкості потоку повітря або діаметра волокна. Це вказує на компроміси між параметрами фільтра та умовами експлуатації.

Загалом, на продуктивність фільтра впливає сукупність властивостей: властивості волокна (щільність заряду, діаметр), властивості самого фільтра (товщина, щільність упаковки), властивості аерозолу (розмір, заряд) та швидкість

повітряного потоку [163]. Для досягнення високої ефективності волокнистих фільтрів необхідно оптимізувати їхню структуру (щільність, товщину, заряд волокон) та враховувати вплив швидкості повітряного потоку і характеристик аерозолію.

Дослідження підкреслюють комплексний вплив відносної вологості на ефективність повітряних фільтрів, включаючи HEPA, та їхню здатність затримувати мікроорганізми та частинки. Висока вологість може знижувати падіння тиску та сприяти розмноженню мікроорганізмів, водночас викликаючи фізичну реструктуризацію гігроскопічних частинок, що впливає на фільтраційні характеристики. Зміна вологості може по-різному впливати на видалення різних фракцій частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} , а також на масову навантажувальну здатність та динамічний опір фільтрів, що вимагає глибокого розуміння цих взаємозв'язків для оптимізації систем фільтрації та забезпечення якості повітря.

1.3.5.2.5 Вплив швидкості повітряного потоку на ефективність фільтрації.

Ефективність фільтрації повітря є ключовим аспектом у системах очищення та вентиляції. Численні дослідження виявили, що цей показник залежить від фізичних параметрів, таких як розмір частинок, швидкість повітряного потоку, відносна вологість та тип фільтруючого матеріалу. Дослідження Rivers та Murhy [164], а також Sipes [165] дійшли висновку, що ефективність фільтрації залежить від розміру частинок і швидкості повітряного потоку у фільтрі. Це стосується як волокнистих фільтрів, так і електронних очищувачів повітря пластинчастого типу, що вказує на те, що накопичення пилу в структурах фільтрів залежить від розподілу частинок за розміром у повітрі, що проходить крізь фільтр. Yinge Qian [166] дослідив максимальну швидкість проходження повітряного потоку через фільтр, зазначивши, що чим більший розмір частинки, тим менша необхідна швидкість повітряного потоку для її "виносу" з фільтра. Крім того, Qiqi Wang [167] для волокнистих нетканих фільтрів довів, що ефективність збирання є вищою для менших швидкостей натиску.

Експериментальні результати Wanyı [168] показали, що в діапазоні швидкостей 2–10 см/с, які зазвичай використовуються в загальнообмінній вентиляції, збільшення швидкості фільтрації призводило до зниження ефективності фільтрації волокнистого середовища та викликало зміну форми осадження частинок на поверхні середніх волокон. Однак, її вплив на динамічний опір волокнистого фільтруючого середовища в цілому був незначним. Важливо зазначити, що збільшення відносної вологості потоку повітря, що проходить, більш ніж на 5% призвело до значного зниження опору протягом короткого періоду часу, коли середовище було завантажене полідисперсними аерозолями KCl.

У дисертації Alqahtani [169] було зроблено висновки, що найвища ефективність HEPA фільтра спостерігалася при швидкості повітряного потоку 2,6 см/с через фільтр. Дослідження також виявило, що при використанні 100% рециркуляційного повітря концентрація частинок у салоні впала до 950 частинок/см³, тоді як при 100% свіжому повітрі концентрація частинок перевищувала 2000 частинок/см³. Це пояснюється багаторазовим проходженням рециркуляційного повітря через фільтрувальну систему. Щодо впливу вологості, при її збільшенні з 30% до 70%, ефективність фільтрації знижувалася з 83% до 73%. Це пов'язано з тим, що конденсація вологи на гігроскопічних частинках збільшує їх розміри, що призводить до підвищення ефективності механічних механізмів захоплення. З іншого боку, ефективність механізмів електростатичного захоплення знижується з високим рівнем вологості.

1.3.5.2.6 Вплив повітроочищувача на тепловий комфорт

Наукові дослідження активно вивчають питання теплового комфорту та енергоспоживання, пов'язані з різними системами вентиляції та охолодження. Цей огляд систематизує ключові висновки та експериментальні результати, що охоплюють діапазон температур повітря від 28 до 32С та відносної вологості від 40% до 60%. Дослідження Songa та ін. [170] надають змогу оцінити продуктивну потужність різноманітних пристроїв. Було встановлено, що пристрої, які використовують потік, створений механічними вентиляторами, демонструють значно

нижчу продуктивну потужність ($<3,5 \text{ Вт/К}$) при різних досліджуваних температурах повітря. Системи вентиляції з охолодженням повітрям показали продуктивну потужність менше $13,6 \text{ Вт/К}$. Натомість, при 32°C , пристрої, що складаються з охолоджувальної панелі чи радіатора, охолоджуваного водою з охолоджувальної машини, мали продуктивну потужність $32,7 \text{ Вт/К}$. Експериментальні результати дослідження Pan та ін. [171] свідчать, що персоналізована система охолодження за допомогою внутрішнього блоку системи кондиціонування, порівняно з центральною системою, може скоротити час роботи для досягнення необхідного рівня теплового комфорту та заощадити до 45% енергії, споживаної центральною системою. Дослідження впливу персоналізованих систем охолодження портативними пристроями було розглянуто в роботах Reyes [172]. Виявлено, що повітря з температурою $27\text{--}29^\circ\text{C}$, що подається механічним вентилятором, може знизити температуру шкіри людини на $0,7^\circ\text{C}$ за 7 ± 2 хвилини. При зменшенні температури шкіри на 2°C , частота серцевих скорочень зменшувалась на 10 ударів за хвилину, при цьому людина виділяла $24\pm 6 \text{ Вт}$ тепла. Дослідження Ivanova та ін. [173] спостерігали, що короткочасна зміна температур з 17°C до 25°C з кроком $2,58^\circ\text{C}$ на годину може позитивно впливати на активність працівників офісу в порівнянні з постійною температурою в 21°C . Проте, дослідження Luo та ін. [174] дійшли висновку, що досягти температурного комфорту працівникам офісу при зниженні температури нижче 18°C та вище 28°C – неможливо. Дестратифікація повітря в приміщенні дозволяє легше досягати теплового комфорту [175]. Серед методів підвищення руху повітря індивідуальна вентиляція має кілька переваг перед персональними вентиляторами. Індивідуальна вентиляція може працювати в режимі охолодження повітря. Така система працює на нижчій швидкості повітря для створення достатнього ефекту охолодження, що знижує ризик протягу або незручності через рух повітря [176]. Cuceanu та ін. [177] розглядали кімнату площею $51,84 \text{ м}^2$ для 31 особи зі споживанням повітря $25,2 \text{ м}^3/\text{год}$ на людину. Було припущено, що порівняно з класичною системою вентиляції, індивідуальна система вентиляції може забезпечити комфортні умови та

зменшити споживання енергії приблизно на 60%. Оптимізація роботи параметрів вентиляції значно покращує продуктивність вентиляції із середнім зниженням прогнозованого відсотка незадоволених і місцевого повітрообміну на 16,3% і 29,5% відповідно, а також середнім збільшенням коефіцієнта використання енергії на 7% [178] при збільшенні швидкості потоку повітря з 1м/с до 4м/с для літніх умов. Для зимових умов цей відсоток зі збільшенням швидкості повітря може зростати з 7% до 9% [179]. Naaland [180] дослідив, що найкращі умови попереднього моніторингу кількох багатоквартирних житлових будинків, побудованих між 1965 і 1975 роками в Торонто, Канада, були визначені як некомфортні приблизно в 50% випадків. Основною причиною теплового дискомфорту був перегрів. Ані тепловий комфорт, ані баланс вологи не показали суттєвої кореляції з висотою чи будь-якими іншими досліджуваними характеристиками будівлі. Melikov та ін. [181, 182] моделювали вплив температури повітря, що подається персоналізованою вентиляційною системою, на потребу в енергії для офісного приміщення, розташованого в холодному кліматі. Результати показують, що температура повітря, що подається персоналізованою вентиляцією, і стратегія її контролю мають помітний вплив на споживання енергії. Споживання енергії за допомогою індивідуальної вентиляції може суттєво зрости (у діапазоні: 61–268%) порівняно з лише змішаною вентиляцією, якщо стратегії енергозбереження не застосовуються. Найкращою стратегією є подача повітря з постійною температурою 20С. Енергозбереження (у діапазоні: 32–47%) можна досягти за допомогою індивідуальної вентиляції порівняно зі змішаною вентиляцією, коли температура в приміщенні регулюється між 18С і 29С. Terkildsen [183] доводить, що можна провести реконструкцію вентиляційної системи, яка покращить якість повітря в приміщенні, одночасно знизивши споживання енергії на вентиляцію до 50% від вимог 2020 року в Данії. У моделюванні Schiavon та Melikov [94, 184] енергоспоживання індивідуальної системи вентиляції, запровадженої в офісній будівлі, розташованій у жаркому та вологому кліматі (Сінгапур), було досліджено, що використання персоналізованої вентиляції може суттєво знизити споживання енергії

(до 51%) порівняно зі змішувальною вентиляцією, якщо застосовуються наступні стратегії контролю: а) зменшення швидкості повітряного потоку завдяки вищій ефективності повітрообміну персоналізованої вентиляції (в роботах Maroto [185], Lu [186], Ghahfarrokhy [187], Thomas та ін. [83, 188] досліджено, що робота з меншою швидкістю потоку дещо підвищує ефективність фільтрації, однак через певні причини, такі як, витрати на електроенергію та розмір вентиляційних каналів, не завжди можливо працювати з найбільш ефективним потоком); б) підвищення максимально допустимої температури повітря в приміщенні за рахунок здатності персоналізованої вентиляції контролювати мікроклімат; в) подача зовнішнього повітря лише тоді, коли споживач знаходиться за столом. Персоналізовані системи очищення, що розміщуються в зоні дихання людини (0,2–0,5м від обличчя при швидкості 0,66;0,88;1,23м/с) можуть спричиняти потенційний фізичний тепловий дискомфорт, наприклад відчуття протягу та сухості очей за рахунок високої швидкості направленого повітряного потоку [189]. Крім того, різкий видих, наприклад чхання, може здувати потік від такої персоналізованої системи очищення (на відстані 1,75м потік кашлю зміг видувати потік протягом найдовшого періоду (1,1с) [190]).

Дослідження демонструють, що персоналізовані системи вентиляції та охолодження мають значний потенціал для покращення теплового комфорту та суттєвого зниження енергоспоживання порівняно з традиційними централізованими системами. Оптимізація параметрів вентиляції, включно з температурою подачі повітря та стратегіями контролю, є ключовою для досягнення максимальної енергоефективності. Однак, при впровадженні персоналізованих систем необхідно враховувати потенційний дискомфорт, спричинений високою швидкістю повітряного потоку, що вимагає ретельного проектування та налаштування.

1.3.5.2.7 Коефіцієнт нерівномірності очищення повітроочищувачем

Коефіцієнт нерівномірності очищення (Ψ) є кількісною характеристикою, що відображає ступінь неоднорідності процесу очищення. Він дозволяє оцінити ефективність очищення середовища від забруднень у різних точках. Способи його

розрахунку залежать від конкретного завдання та використовуваних методів очищення. Загалом, Ψ розраховується як відношення максимального значення концентрації забруднюючої речовини після очищення до мінімального значення.

Для приміщень з очищувачем повітря, визначення коефіцієнта нерівномірності ґрунтується на результатах поточного дослідження чистих приміщень [86]. При кратності повітрообміну $n=2-5 \text{ год}^{-1}$, коефіцієнт нерівномірності Ψ приблизно дорівнює 4–2. При цьому, в різні моменти вимірів Ψ може бути більше 2, коли $n < 5$, тоді як Ψ може бути менше 1, коли $n > 80$. Криві для процесів забруднення та очищення, згідно з Zhonglin Xu, наведені на Рис. 1.12.

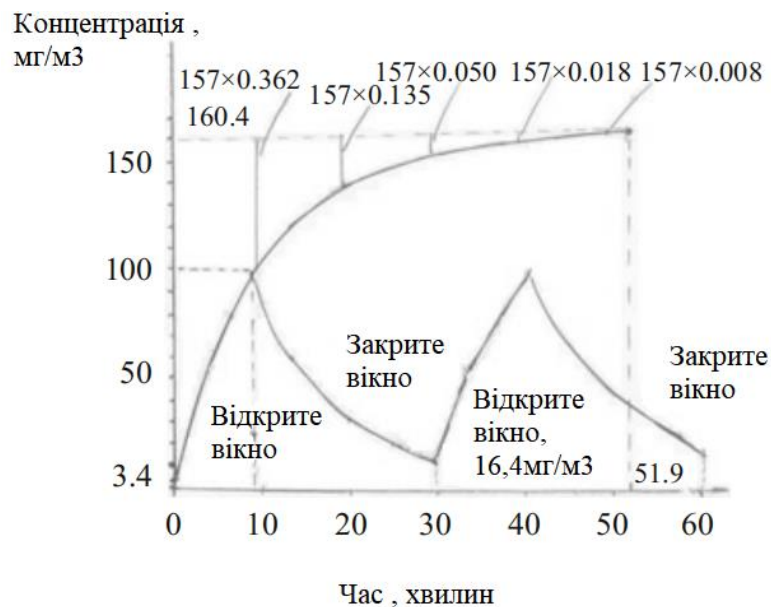


Рис. 1.12. Криві для процесів забруднення та очищення Zhonglin Xu [86] .

Зменшення кратності повітрообміну (n) з 6 год^{-1} до 3 год^{-1} призводить до значного збільшення концентрації частинок у приміщенні. Зокрема, коефіцієнт нерівномірності очищення (Ψ) зростає з 1,6 до 3,5, що вказує на понад ніж однократне збільшення неоднорідності процесу очищення. При цьому загальне значення концентрації частинок (N , частинок/л) подвоюється. Для систем очищення повітря така зміна є суттєвою і вимагає подальшого детального дослідження.

1.3.5.2.8 Енергозбереження та економічна доцільність.

Потенціал енергозбереження використання різних методів вентиляції слід оцінювати з урахуванням комплексних умов у просторі [191].

Stephens та ін.[192] оцінювали величину потенційних енергетичних наслідків фільтрів відносно впливу інших параметрів: встановлення вискоєфективних фільтрів зменшують об'єм повітря в системі до 20% при цьому підвищуючи тиск системи до 30%. На додачу до постійної амортизації системи в 3,7% за рік [193]. При використанні систем вентиляції з рециркуляцією зниження концентрації часток зростає понад 85%, при використанні вискоєфективних фільтрів класу MERV13 [194]. В той же час, стандарт ASHRAE Standard 62.1-2019 рекомендує встановлювати фільтри класу не менше MERV8 перед будь-якими типами трубних теплообмінників в системах вентиляції [113].

Chimack та ін.[195] зазначили, що економічна доцільність використання вискоєфективного фільтру була доведена на будівлі, де вентиляційні агрегати зі змінним об'ємом повітря працювали приблизно 10 годин на день. Це може потенційно регулювати кількість свіжого повітря за кількістю людей для кращого споживання енергії [196].

Вплив очищення повітря на зниження концентрації слід протиставляти вторинним наслідкам(наприклад, використання енергії та виробництво побічних продуктів), які виникають внаслідок використання очисників повітря [197].

Rudnick [198] розглядає звичайні волокнисті фільтри в рециркуляційному агрегаті, який працює в герметичній кімнаті, в якій повітря добре змішане, ніякі інші механізми збору не важливі: з плином часу концентрація частинок у кімнаті зменшуватиметься експоненціально, постійна часу дорівнюватиме об'єму кімнати, поділеному на потужність рециркуляційного агрегату.

Очевидно, що чим вища потужність рециркуляційного агрегату, тим нижчою буде концентрація частинок у будь-який момент часу, незалежно від ефективності збирання фільтра.

1.3.5. Підвищення ефективності очищувачів повітря.

Для досягнення максимальної ефективності очищення повітря в приміщенні необхідно розуміти ключові принципи функціонування систем, а також фактори, що впливають на їх продуктивність. Це включає в себе вибір фільтрувального матеріалу, який відповідає типу забруднень або ж вибір комбінації фільтрів. Важливо також правильно визначити продуктивність очищувача згідно з габаритами та призначенням приміщення, а також підібрати засоби контролю забруднення повітряного середовища. Основним напрямком досліджень, спрямованих на підвищення ефективності фільтрації, є розробка та впровадження нових, інноваційних матеріалів для фільтрації.

1.3.6.1. Альтернативні матеріали та технології в галузі виробництва фільтрів

Сучасні технології та матеріалознавство постійно рухають вперед розвиток фільтрувальних матеріалів. Вибір фільтрувального елементу є складним завданням, що вимагає комплексного підходу, який враховує екологічні, економічні та технологічні аспекти. Кожен з цих аспектів має свої пріоритети та суттєво впливає на остаточне рішення.

Екологічний аспект зосереджений на використанні екологічно чистих матеріалів (наприклад, натуральні волокна, біорозкладні полімери), їх енергоефективності та способах утилізації.

Економічний аспект оцінює вартість матеріалів, термін їх служби та загальну ефективність використання.

Технологічний аспект включає необхідний ступінь очищення від конкретних забруднювачів, враховуючи їх розмір, стійкість та швидкість фільтрації при різній продуктивності системи. Залежно від пріоритетів дослідника, екологічні, економічні чи високотехнологічні аспекти можуть мати переваги. Такі передові технології, як 3D-друк та нанотехнології, відкривають нові можливості для створення інноваційних рішень.

Дослідження пропонують використання бавовняної та марлевої тканини як економічних та доступних систем фільтрації [199]. Також розглядаються лляні та конопляні полотна як натуральні, біорозкладні волоконні фільтри [200]. Для їх очищення пропонуються пневматичні системи, що запобігають пошкодженням та забезпечують ефективне очищення порівняно з ручним [201].

Розроблено каптонову плівку з наскрізними отворами (20 мкм), яка є гнучким, придатним для вторинної переробки повітряним фільтром для частинок $PM_{2.5}$. Вона ефективно вловлює РМ (0.3–10.0 мкм) завдяки мікропорам та сильній електростатичній силі, зберігаючи властивості після миття (навіть водопровідною водою) та нагрівання до 350°C [202]. Крім того, розроблено двошаровий волокнистий фільтр багаторазового використання, що складається з супергідрофобних та супергідрофільних волокон. Ця мембрана ефективно захоплює частинки РМ ($PM_{2.5} > 98\%$, $PM_{10} > 98.4\%$) при низькому перепаді тиску та високій вологості, зберігаючи ефективність після 100 годин випробування при високій концентрації забруднення та п'яти циклів прання. Такі мембрани також володіють високою антибактеріальною активністю [205].

Для одночасної фільтрації повітря та адсорбції виготовлені електропрядені нановолокнисті мембрани на основі біополімерів (желатин), що демонструють чудову ефективність фільтрації та значну адсорбцію ксилолу, бензолу та інших речовин [203, 204]. Повідомляється про розробку макроскопічних повітряних фільтрів з вуглецевих нанотрубок, які синтезуються на пористій поліефірній підкладці. Ці фільтри досягають ефективності 99,999% при низькому перепаді тиску, співмірному з комерційними НЕРА-фільтрами. Вони можуть самодезінфікуватися тепловими спалахами, забезпечуючи повну дезактивацію вірусів [206].

Також розроблені функціональні нановолокнисті мембрани з ефектом ковзання, що демонструють низький опір повітря (29.5 Па), високу ефективність очищення (99.09%) та тривалий термін служби [207]. Представлені ультратонкі нановолокнисті трибоелектричні мембрани, що видаляють РМ з ефективністю до 99.99%, завдяки

використанню гідроксиапатиту як підсилювача заряду, який підвищує ефективність фільтруючого матеріалу на 24% [208]. Однак варто зазначити, що електрично заряджені волокнисті фільтри (електретні) можуть втрачати свій заряд протягом терміну служби, що призводить до значного зниження ефективності їх збирання, і цей момент важко визначити [20, 187, 209].

Досліджувались можливості покращення продуктивності волокнистих металевих фільтрів мікронного розміру шляхом прямого вирощування вуглецевих нанотрубок. Це підвищило ефективність фільтрації з 75% до 90% (максимум 98% при діаметрі частинок 130 нм) без значного збільшення перепаду тиску [210].

Також досліджувалася ефективність фільтрації стійких полілактидних волокон, отриманих за допомогою гібридної техніки 3D-друку/електроформування. Випробування показали ефективність понад 95% для аерозолі з еквівалентним діаметром понад 0.3 мікрметра [211].

Дослідження керамічних НЕРА-фільтрів [212] показує, що фільтри з ефективністю фільтрації 99.97% можуть навіть регенерувати, але при цьому втрачають 38% своєї ефективності. Було визначено вплив навантаження твердих частинок на падіння тиску та ефективність високоефективних повітряних фільтрів (НЕРА), а результати порівняли з тими ж фільтрами після вологого очищення та повторного використання. Фільтри НЕРА з поліпропілену та тефлону, виготовлені у циліндричній формі, після вологого чищення та сушіння поверталися майже до вихідного рівня перепаду тиску. Всі фільтри, як нові, так і повторно використовувані, ефективно уловлювали частинки (>99.97% при 0.3 мкм), що свідчить про можливість їх ефективного вологого очищення та повторного використання [213].

Загалом, постійний розвиток фільтрувальних матеріалів, що включає використання нанотехнологій, біополімерів, вдосконалення методів очищення та регенерації, відкриває значні можливості для підвищення ефективності, довговічності та екологічності систем фільтрації повітря.

Ці інновації дозволяють вирішувати складні завдання, пов'язані з різними типами забруднювачів, оптимізацією експлуатаційних витрат та забезпеченням здорового внутрішнього середовища.

1.3.6.2. Кратності повітрообміну

Оптимальна кратність повітрообміну є критично важливою для забезпечення необхідного класу чистоти повітря та контролю інфекцій у закладах охорони здоров'я та навчальних приміщеннях.

У закладах охорони здоров'я для досягнення необхідного класу очищення за допомогою портативних пристроїв з HEPA-фільтрами рекомендована кратність повітрообміну становить не менше 12 крат [255]. Для навчальних приміщень Kirkman та ін. [214] рекомендують 1 крат припливної вентиляції та 2-4 крати рециркуляційного повітря. Подальші дослідження ВООЗ (США) [215] вказують, що ймовірність зараження після 15 хвилин перебування в приміщенні з джерелом інфекції становить 4% при кратності 12 крат і знижується до 2% при кратності 24 крати.

Методика Escombe [216] дозволила збільшити кратність повітрообміну до 28 крат (порівняно з рекомендованими 6-12 кратами [67, 69, 217-221]) за рахунок природної вентиляції (особливості будови [222], розміщення та кліматичні умови закладів охорони здоров'я в Лімі, Перу), що зменшило захворюваність з 39% до 11%. Однак, для наших кліматичних умов використання природної вентиляції для досягнення такої кратності не розглядається як основний метод (через низькі зимові температури, вимоги до чистоти повітря [2] та відсутність віконних отворів в операційних). Проте, ці дані підтверджують необхідність забезпечення вищої кратності повітрообміну за допомогою енергоефективних рециркуляційних установок.

Bolashikov [223, 224] пропонує знизити кратність вентиляції в інфекційних відділеннях Німеччини з 12 год⁻¹ до 6 год⁻¹ завдяки застосуванню індивідуальних пристроїв вентиляції біля ліжок хворих. Дослідження Qian та ін. [225] показало, що використання портативного повітроочисника з HEPA-фільтром у лікарняній кімнаті

ефективно знижує концентрацію частинок (до 99% за 70 хвилин), досягаючи ефективної швидкості обміну повітря від 2.7 до 5.6 крат (для видалення частинок). Сильний струмінь припливного повітря від такого очисника взаємодіє зі структурою повітряного потоку в кімнаті, створюючи глобальне змішування.

13.6.3. Комбінування фільтрів

Наукові дослідження вказують, що комбінування фільтрів часто ефективніше впливає на якість повітря, ніж проста зміна кратності повітрообміну. Заміна фільтрів MERV8 на MERV14 або MERV15 значніше знижує рівень $PM_{2.5}$ у приміщеннях (на 30.9% та 39.4% відповідно), ніж підвищення кратності повітрообміну (від 13.6% до 30.0%) [226]. Комбінації фільтрів також підвищують загальну ефективність фільтрації PM_{10} та $PM_{2.5}$ [227].

Фільтрація зовнішнього повітря ефективна для частинок <0.01 мкм та >1 мкм, тоді як рециркуляційна фільтрація краще видаляє частинки діаметром 0.1–1 мкм. Також відзначено, що малі (<0.01 мкм) та великі (>1 мкм) частинки частіше осідають на поверхнях. Дослідження підкреслюють необхідність контролю швидкості та режиму вентиляції за допомогою датчиків забруднювачів [27].

Використання фільтрів попереднього очищення (G4-F9) подовжує термін служби HEPA-фільтрів та знижує витрати на їх придбання [15, 230]. Фільтри класу F7, наприклад, демонструють ефективність близько 96% для PM_{10} незалежно від діаметра частинок та рівня засмічення [141]. Дослідження також підтверджують ефективність фільтрації рециркуляційного повітря для покращення здоров'я тварин [228, 229] та уловлювання бактерій і грибків комбінованими фільтрами (до 91.8% та 100% відповідно) [158]. Додавання середнього або грубого фільтра перед HEPA-фільтром значно зменшує падіння тиску, оптимізуючи розподіл частинок у фільтрі, що особливо важливо для наночастинок [230].

Таким чином, ці дослідження підкреслюють важливість багатоступеневої фільтрації та використання комбінованих фільтрів для забезпечення високої якості

повітря, оптимізації експлуатаційних витрат та захисту здоров'я у різних середовищах.

1.3.6.4. Розумне керування.

Якісна вентиляція приміщень критично важлива для здоров'я та комфорту, а також становить значну частину енергоспоживання в будівлях. В останні роки механічна вентиляція з регульованим об'ємом подачі повітря активно впроваджується як стратегія підвищення енергоефективності, базуючись на фактичній потребі, а не на максимально можливому розрахунковому об'ємі [231].

Наукові дослідження зосереджені на розробці моделей для прогнозування концентрації забруднюючих речовин у приміщеннях, що дозволяє оптимізувати вентиляцію, балансуючи між енергозбереженням та якістю повітря. Наприклад, інтелектуальна система онлайн-контролю вентиляції продемонструвала зниження CO₂ до 28% та підвищення енергоефективності до 43,8% [232]. Впровадження "розумного" керування вентиляцією, базованого на даних про забруднювачі, забезпечує необхідний повітрообмін при одночасному зниженні енергоспоживання, включаючи 10%-ве зменшення пікового споживання енергії завдяки підтримці постійної роботи систем на знижених обертах у "фоновому" режимі [233]. Застосування робототехніки та передових систем моніторингу підвищує ефективність вентиляції, пропонуючи парадигми "автоматичного мобільного зондування" [234] та системи безперервного моніторингу з кількох точок, включаючи виявлення небезпечних газів. Ці системи є доступними для широкого впровадження [236].

Технології, подібні EnergyPlus, здатні прогнозувати використання енергії системами обробки повітря, потенційно забезпечуючи економію до 50% [235]. Окрім того, розробляються інтелектуальні системи машинного навчання, зокрема нейронечіткі моделі, для точного прогнозування погодинних даних забруднення повітря [237]. Для підвищення доступності та функціональності портативних очищувачів повітря з HEPA-фільтрами створюються інтуїтивно зрозумілі користувацькі інтерфейси [238], а персональні прилади для вимірювання

забруднювачів безпосередньо в зоні дихання дозволяють оцінювати індивідуальну експозицію [9].

Концепція інтелектуальної вентиляції, зокрема в рамках проекту Smart Ventilation Advanced for Californian Homes (SVACH) [239], базується на трьох ключових аспектах: вентиляція за потребою (у відповідь на вологість або CO₂); принцип еквівалентної вентиляції (перенесення теплових навантажень на періоди з меншими втратами енергії); та використання багатоджерельних контролерів і сенсорів, що інтегрують дані з зовнішніх (температура, вологість, забруднення, вітер) та внутрішніх умов (кількість людей, забруднення, статичний тиск), а також загальногосподарських та глобальних даних (графіки, робота обладнання, попит на електроенергію) для прийняття обґрунтованих рішень.

Загалом, наукові дослідження підтверджують можливість досягнення до 60% економії енергії в системах вентиляції без погіршення, а часто навіть з покращенням якості повітря в приміщеннях. Це підкреслює значний потенціал інтелектуальних та адаптивних систем вентиляції для підвищення енергоефективності та забезпечення здорового внутрішнього середовища.

1.4. Висновки.

Проведений аналіз наукових публікацій дозволяють сформулювати низку рекомендацій щодо оптимізації процесу очищення повітря в приміщеннях. Ці рекомендації є методологічною основою для поточного дослідження та базуються на наступних положеннях:

1. Використання індивідуальних повітроочисних систем з HEPA-фільтрами забезпечує значно вищу енергоефективність порівняно із загальнообмінними системами вентиляції. Зокрема, такі системи можуть скоротити споживання енергії до 60% відносно класичних вентиляційних систем.

2. Частки PM_{2.5} є домінуючим забруднювачем повітряного середовища в приміщеннях з постійним перебуванням людей. Найбезпечнішим та найефективнішим методом видалення як твердих (PM), так і газоподібних чи

біологічних частинок є механічна фільтрація, що реалізується за допомогою високоефективних або комбінованих фільтрів.

3. Дотримання оптимальних параметрів повітряного середовища: відносна вологість, температурний режим, швидкість та напрям потоку повітря.

Відносна вологість: Рекомендований діапазон відносної вологості повітря для зниження ризику поширення інфекційних захворювань повітряно-крапельним шляхом становить 50-60%. Водночас, чим нижча відносна вологість, тим швидше відбувається очищення повітря від дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$. Важливо знайти баланс між мінімізацією ризику інфікування та забезпеченням комфорту мешканців шляхом адаптації інженерних систем до мінімальних вимог для приміщень різного призначення.

Температурно-вологісний режим: Тепловий комфорт та вологість у будівлі незначно змінюються з її висотою і не залежать від інших архітектурних характеристик. Отже, висновки, отримані в даному дослідженні, можуть бути застосовані до будь-яких житлових чи комерційних будівель.

Швидкість потоку повітря: В літній період доцільно збільшувати швидкість потоку повітря до 4 м/с, що дозволяє знизити прогнозований відсоток незадоволених осіб з 23% до 8%. Для зимового періоду оптимальною є швидкість 1,5 м/с. Рекомендованою температурою подачі повітря є постійна температура 20°C. Подача повітря «згори» є найбезпечнішою з точки зору ризику зараження повітряно-крапельним шляхом.

4. Збільшення кратності повітрообміну за рахунок використання персональних повітроочищувачів або рециркуляційних установок з HEPA-фільтрами може зменшити кількість захворювань на 28%, при цьому мінімальна кратність санітарної норми свіжого повітря становить 1-2 крати. Збільшення кратності лише на 1 крат знижує ймовірність інфікування аерозольними частинками на 5%.

5. Двоступенева фільтрація дозволяє знизити експлуатаційні витрати за рахунок подовження терміну служби HEPA-фільтрів та використання менш дорогих фільтрів

попереднього очищення. Вибір HEPA-фільтрів з низьким робочим опором сприяє економії енергоресурсів, необхідних для підтримання тиску в системі в процесі забруднення фільтра.

6. Для ефективного контролю енергоспоживання систем вентиляції необхідно застосовувати комплексний підхід, що включає: оптимізацію кратності повітрообміну шляхом комбінування централізованої та децентралізованої систем, використання енергоефективних вентиляторів та фільтрів, застосування систем автоматичного управління на основі датчиків забруднення, а також розробку інтуїтивно зрозумілого програмного забезпечення для кінцевого користувача.

Тож, проведені дослідження обґрунтовують низку рекомендацій для оптимізації очищення повітря в приміщеннях. Встановлено енергоефективність індивідуальних HEPA-систем та визначено механічну фільтрацію як найефективніший метод видалення забруднень, зокрема $PM_{2.5}$. Рекомендовано двоступеневу фільтрацію та вибір HEPA-фільтрів з низьким опором для експлуатаційної та енергетичної оптимізації. Ефективний контроль енергоспоживання систем вентиляції вимагає комплексного підходу, поєднуючи оптимізацію, енергоефективні компоненти та автоматизоване управління.

Оптимальні параметри мікроклімату включають відносну вологість 50-60%, оптимальні швидкості та напрямки потоку повітря залежно від сезону, та постійну температуру 20°C. Підтверджено, що збільшення кратності повітрообміну знижує захворюваність.

Оптимальні умови очищення повітря досягаються завдяки використанню комбінованих фільтрів у рециркуляційних агрегатах зі значною інтенсивністю повітрообміну, що забезпечує ефективність навіть за високої вологості. Час очищення зростає при високому рівні забруднення $PM_{2.5}$, а також зі збільшенням об'єму приміщення та швидкості повітрообміну. Ці висновки є цінними як для майбутніх довгострокових досліджень здоров'я, так і для ширшого практичного застосування, включаючи моніторинг всього населення.

Розділ 2

Другий розділ “Конструктивний розрахунок фільтр- теплообмінника”

В розділі викладено методику теоретичного дослідження з використанням методів теоретичної теплотехніки, аналітичної математики, методів моделювання процесів і технічних систем, що складається з шести етапів:

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;
- визначено необхідну площа поверхні нагріву теплообмінника. Результатом теоретичного дослідження буде визначення параметрів «фільтр-теплообмінника» та його конструктивні параметри.

2.1. Теоретичне обґрунтування конструкції фільтр-теплообмінника.

Стан повітря в містах може змінюватися в залежності від вітру, викидів промислових підприємств, наявності великих шляхопроводів, водоочисних споруд, напрямку вітру і т.д. Кількість забрудників, що знаходяться в ньому в зваженому стані може змінюватися протягом доби від «безпечного» до «небезпечного». Деякі рівні забрудників навіть при тривалому впливі на людину не внесуть вагомих змін в людському організмі, але деякі вже через декілька годин впливу суттєво зашкодять [240].

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 [241]. Є вагомі докази того, що такі забруднювачі повітря, як $PM_{2.5}$ та PM_{10} , пов'язані зі збільшенням

смертності від серцево-судинних захворювань, респіраторних захворювань і раку легенів [242]. На відміну від атмосферного повітря, стан повітря в приміщеннях перебування людей можна контролювати достатньо точно, як системами вентиляції, так і, спеціальними повітроочищувачами згідно вимог до параметрів повітря в приміщенні. Основними забруднювачами повітря в приміщенні є леткі органічні сполуки і тверді частки. Джерелами твердих часток є куріння, приготування їжі, опалення, свічки та інсектициди, домашні тварини, хатня робота та, навіть, пересування по приміщенню людей [243].

Повітроочищувач повинен обиратися в залежності від потреб індивідуально: вимоги очищення від наявності хімічних сполук в повітрі, пилу, алергенів, тютюнового диму, або будь-яких забрудників, які є результатом дихання – всі ці вимоги впливатимуть на набір фільтрувальних елементів. Отримавши цю інформацію можна продовжувати роботу, обравши: потужність очищення; місце розміщення очисного апарату (вільне переміщення повітряного потоку); очисний агрегат з реальними результатами випробувань, проведених надійною третьою організацією [244]. Забезпечити очищення повітря в робочій зоні від шкідливих речовин, забезпечення нормативних параметрів температури, швидкості руху повітря. Одночасно з тим, ці апарати повинні мати низьке енергетичне споживання, високу ефективність та низькі експлуатаційні витрати.

Постановка наукової проблеми полягає в усвідомленні недостатнього вивчення процесів, що протікають під час використання різних інженерних систем вентиляції в межах одного приміщення, при використанні новітніх фільтрувальних матеріалів, та встановленні логічних недоліків існуючих методів використання таких систем, як наслідок нових запитів та вимог, які вимагають вийти за межі раніше отриманих знань, працювати над їх поповненням. Наприклад є рекомендація щодо використання очищувачів повітря з механічними фільтрами (HEPA) замість повітроочищувачів, які виділяють іони для очищення повітря (кількість іонів після процесу очищення

збільшилась за рахунок роботи самого очисника) [245]. Наразі ці вимоги можуть задовольнити тільки мобільні очисники повітря на основі механічної вентиляції [246].

Портативні повітроочишувачі з HEPA-фільтрами використовуються як: тимчасова рециркуляція повітря в приміщеннях без загальнообмінної вентиляції (наприклад, під час ремонту загальнообмінної системи вентиляції), додаткова система рециркуляції повітря, для створення необхідної кратності повітрообміну в приміщеннях; забезпечення підвищеної ефективності очищення повітря.

Але це обладнання не задовольняє вимоги щодо нормативної санітарної кількості свіжого повітря [247], або його нагріву чи охолодження. Дослідження з встановленням теплообмінника в повітроочишувач в більшості випадків являють собою гібриди, експериментального зразку, охолоджуючого пристрою [248] чи осушувача з фільтрувальною частиною [249], [250]. Для наших температурних умов цікавить саме робота повітроочишувального пристрою при низьких температурах з високим перепадом між температурами зовнішнього та внутрішнього приміщення. Відносно невеликі робочі температури та значні перепади температур холодного повітря, створює певні складнощі під час вибору теплообмінника та його конструкції [251].

Даним дослідженням розглядається можливість спорядження повітроочишувача додатковою функцією, що може забезпечити нагрів деякої кількості повітря ззовні, за рахунок влаштування теплообмінника рекуперативного типу в центральній частині рециркуляційної секції .

Теоретичні дослідження виконано з використанням методів теоретичної теплотехніки, аналітичної математики, методів моделювання процесів і технічних систем. Для визначення параметрів фільтр-теплообмінника з теплообмінником рекуперативного типу «повітря-повітря» визначаємо кількість гарячого та холодного теплоносія. Докладно викладено в власній статті [252].

Концептуальний вигляд секції теплообмінника фільтр-теплообмінника та напрям руху теплоносіїв, зображено на Рис.2.1.

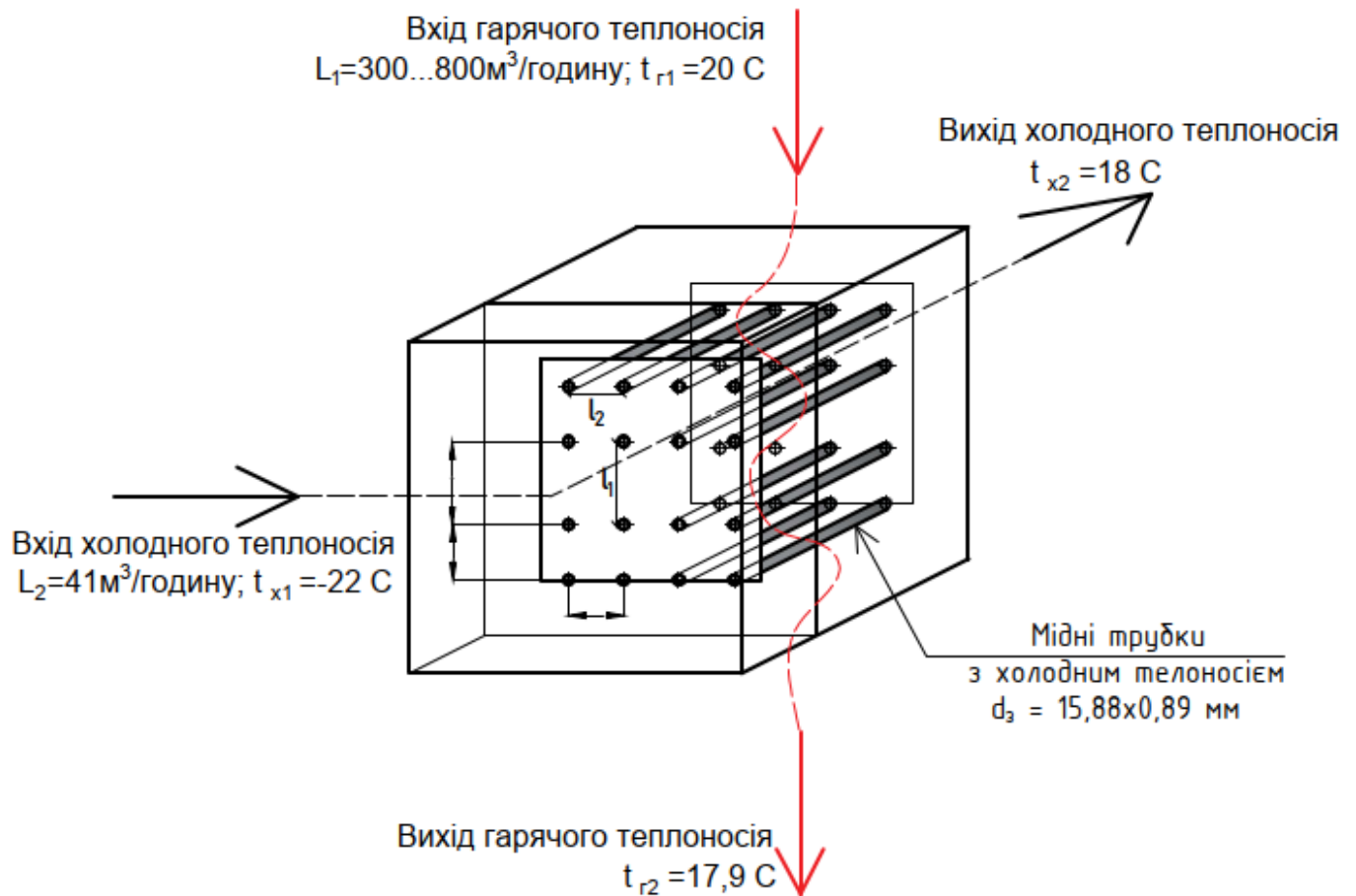


Рис 2.1. Схема руху теплоносіїв в фільтр-теплообміннику.
 Гарячий та холодний теплоносії перехресні по відношенню один до одного.

Параметри для розрахунку фільтр- теплообмінника .

2.1.1.Кількість рециркуляційного повітря з розрахунку теплового потенціалу для підігріву зовнішнього (свіжого) повітря.

Кількість повітря, визначена як гарячий теплоносії (повітря, яке буде нагрівати трубки по яким рухається холодний теплоносії), буде очищуватися до рекомендованих безпечних рівнів ВООЗ $\text{PM}_{2,5}$, а саме $5\text{мкг}/\text{м}^3$ $L_1=800\text{м}^3/\text{год}=0,22\text{м}^3/\text{с}$. Напрямок руху гарячого теплоносія по відношенню до холодного - перехресний рух. Початкова температура гарячого теплоносія $t_{r1}=20^\circ\text{C}$, кінцева t_{r2} — розрахункове значення. Середня швидкість $v_r=3\text{м}/\text{с}$. Теплові втрати в теплообміннику крізь його стінки 4 % $\varepsilon=0,04$. Фізична модель тепломасообмінного процесу зміни параметрів

свіжого та рециркуляційного повітря в теплообміннику типу «повітря-повітря», зображено на Рис.2.2.

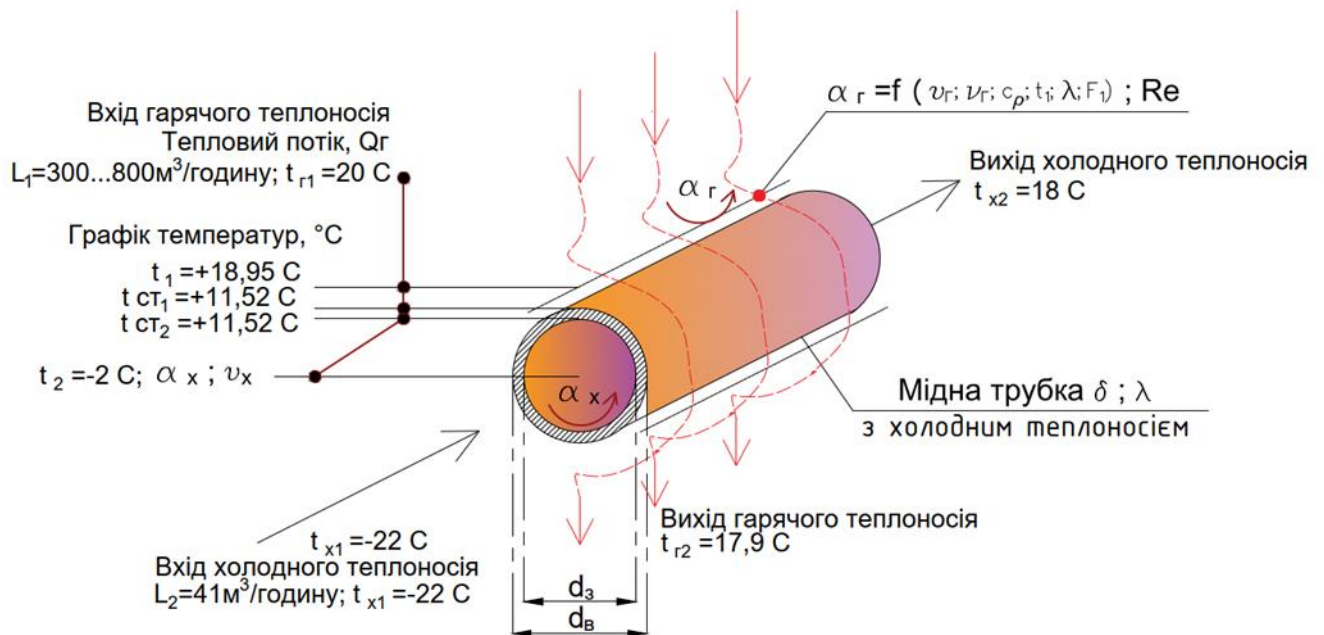


Рис 2.2. Фізична модель тепломасообмінного процесу зміни параметрів свіжого та рециркуляційного повітря в теплообміннику типу «повітря-повітря». Де: t_1 -середня температура рециркуляційного повітря (гарячий теплоносіє), °C; t_2 -середня температура свіжого повітря(холодний теплоносіє), °C; $t_{ct1,2}$ -середня температура стінки труби зовні і всередині, °C; L_1 -кількість рециркуляційного повітря, м³/год; L_2 -кількість свіжого повітря, м³/год; α_r -коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до пучка труб, Вт/м²·K; α_x -коефіцієнт тепловіддачі від холодного теплоносія до стінки труби, Вт/м²·K; $\nu_{r,ч}$ -швидкість руху теплоносіїв, м/с; $\nu_{r,х}$ -коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; c_p -питома ізобарна теплоємність, кДж/(м³·K); λ -коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·K; F_1 -площа поверхні теплообміну, м².

2.1.2. Кількість повітря для подавання санітарної норми повітря для дихання людини в приміщення.

Кількість повітря обрана з розрахунку розбавлення надходження рівнів CO₂ від дихання людини. Мінімальна санітарна норма свіжого повітря для дихання однієї людини $L_{св}=40$ м³/год при низькому рівні забруднення повітря будівлі згідно Додатку X Таблиця X.1 [247].

Розрахунок свіжого повітря: кількість свіжого повітря L_2 для розбавлення концентрації CO₂ до оптимальних значень CO₂=400-600ppm згідно Додатку X Таблиця X.3 [247] визначається за формулою:

$$L_2 = \frac{m_{CO_2}}{C_{ГДК} - C_{in}}, \quad (2.1)$$

де m_{CO_2} - кількість CO_2 , що надходить при диханні однієї людини за годину, та становить від 12,9 до 16,1 л/год. Приймаємо 14,5 л/год, згідно дослідження де вимірювалися рівні викидів CO_2 людьми в різних контрольованих умовах під час сидячої діяльності. Виміряні показники викидів коливалися від 12,9 до 15,1 л/год на людину вранці та від 14,5 до 16,1 л/год на людину в день (після короткої перерви на обід і за трохи вищих температур, але в інших ідентичних умовах) [253];

$C_{ГДК}$ – гранично допустима концентрація CO_2 в приміщеннях приймаємо як значення згідно додатку X Таблиця X.3 [247] при допустимих параметрах (при молярній масі вуглецю 44,01г/моль): $800ppm = 1478,736 \text{ мг/м}^3 = 1478,736 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$;

C_{in} – концентрація CO_2 в зовнішньому повітрі, приймаємо як значення згідно сайту NASA, що становило 422 ppm в грудні 2023 року [254] (при молярній масі вуглецю 44,01г/моль): $422ppm = 780,0332 \text{ мг/м}^3 = 780,0332 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$.

Густина CO_2 в нормальному стані $\rho = 1,98 \text{ кг/м}^3$, тоді маса m_{CO_2} визначається за формулою :

$$m_{CO_2} = 14,5 \frac{\text{л}}{\text{год}} \cdot 1,98 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,001 = 0,02871 \frac{\text{кг}}{\text{год}}, \quad (2.2)$$

де 0,001 - коефіцієнт переведення (л) в (м³), де 1(л)=0,001м³.

Тож, згідно розрахунку, кількість повітря, визначена як холодний теплоносій, що рухається в трубках $L_2 = 41 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0113 \text{ м}^3/\text{с}$. Початкова температура холодного теплоносія $t_{x1} = -22^\circ\text{C}$, кінцева $t_{x2} = 18^\circ\text{C}$. Середня швидкість $v_x = 4,5 \text{ м/с}$. Об'ємний вміст випромінюючих газів в теплоносії $\varphi_{CO_2} = 0,03\%$, $\varphi_{H_2O} = 1,26\%$. Зовнішній діаметр труб приймається як для мідних труб Halcor, Греція "5/8" 15,88x0,89 d_з=0,01588м, d_в=0,0141м. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу труб $\lambda = 407 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Крок труб в поперечному $l_1 = 0,1 \text{ м}$ та повздовжньому напрямі $l_2 = 0,1 \text{ м}$ розташованих по коридорному типу.

2.1.3. Кінцева температура гарячого теплоносія за рівняння теплового балансу теплообмінника «повітря-повітря».

Тепловий потік, що може відібрати холодний теплоносії від гарячого може бути визначено за формулою:

$$Q_x = L_2 \cdot C'_{pm2} \cdot (t_{x2} - t_{x1}) \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{с}} (\text{кВт}) \quad (2.3)$$

де C'_{pm2} - питома ізобарна теплоємність холодного теплоносія, середня в інтервалі температур $t_{x2} - t_{x1}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$. Значення питомої об'ємної ізобарної теплоємності приймаємо як для повітря при температурі від -22С до 20С $C'_{pm1} = C'_{pm2} = 1,299 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$.

Температура гарячого теплоносія в кінці апарата t_{r2} визначається з рівняння теплового балансу, при $Q_x = Q_r$ при теплових втратах в теплообміннику крізь його стінки 4 % $\varepsilon=0,04$, як вказано в формулі:

$$Q_x = Q_r = L_1 \cdot C'_{pm2} \cdot (t_{r1} - t_{r2}), \quad (\text{кВт}) \quad (2.4)$$

Тоді, кінцева температура на гарячого теплоносія при виході з теплообмінника виражена як:

$$t_{r2} = t_{r1} - \frac{Q_x}{L_1 \cdot C'_{pm1} \cdot (1 - \varepsilon)}, \quad (2.5)$$

2.1.4. Температурний тиск між теплоносіями та дійсна швидкість руху теплоносіїв.

Зміна температур теплоносіїв на поверхні теплообмінника при протічці зображена з боку гарячого та холодного теплоносіїв зображено на Рис.2.3 Для розрахунку коефіцієнту кінематичної в'язкості, коефіцієнту теплопровідності, коефіцієнту Прандтля теплоносіїв необхідні дані фізичних параметрів сухого повітря при парціальному тиску $P_{\text{атм}}=1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

За відомими табличними даними фізичних параметрів отримано значення фізичних величин для розрахункових температур t_1 , t_2 . Дані розрахунків зведено в Таблицю 2.1.

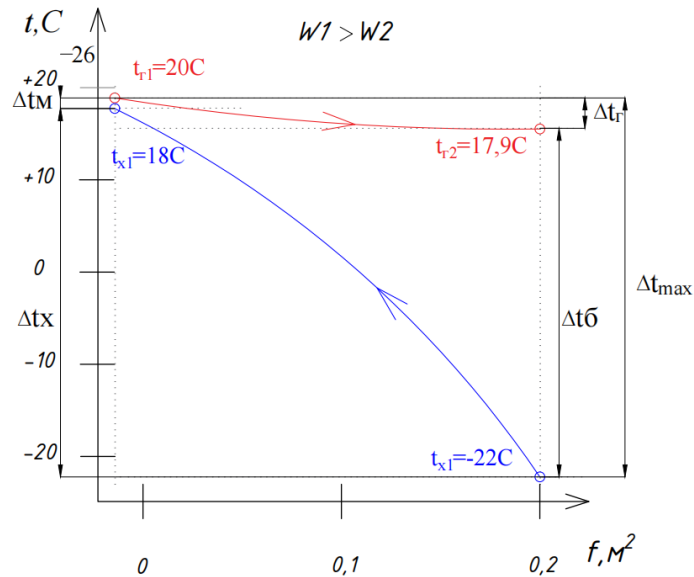


Рис 2.3 Зміна температур теплоносіїв на поверхні теплообмінника при протічанні. f , m^2 – площа теплообміну з боку гарячого та холодного теплоносія.

$\Delta t_{\Gamma} = t_{\Gamma 1} - t_{\Gamma 2}$ – різниця температур холодного теплоносія на вході в теплообмінник та при виході з нього ;

$\Delta t_x = t_{x 2} - t_{x 1}$ – різниця температур холодного теплоносія на вході в теплообмінник та при виході з нього ;

$\Delta t_{\delta} = t_{\Gamma 2} - t_{x 1}$ – більша різниця температур в теплообміннику ;

$\Delta t_m = t_{\Gamma 1} - t_{x 2}$ – менша різниця температур в теплообміннику .

Таблиця 2.1. Фізичні параметри сухого повітря при $P = 1,01325 \cdot 10^5$ Па.

Температура	Густина	Питома теплоємність	Питома об'ємна ізобарна теплоємність	Коефіцієнт теплопровідності	Коефіцієнт кінематичної в'язкості
$t, ^\circ C$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$C_{\rho}, \frac{кДж}{кг \cdot K}$	$C_{pm2}, \frac{кДж}{м^3 \cdot K}$	$\lambda, \cdot 10^{-2}, \frac{Вт}{м \cdot K}$	$\nu, \cdot 10^{-6}, \frac{м^2}{с}$
-22	1,4063	1,009	1,299	2,28	12,79
-2	1,293	1,005	1,299	2,426	13,11
+18,95	1,213	1,005	1,299	2,5816	14,976
+20	1,2047	1,005	1,299	2,59	15,06

Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією при русі теплоносіїв усередині труб і в міжтрубному просторі проводився визначивши середні температури гарячого та холодного теплоносіїв.

За результатами теоретичних розрахунків визначено:

а) середня температура гарячого теплоносія t_1 , °C (T_1 , K):

$$t_1 = \frac{1}{2} \cdot (t_{r1} + t_{r2}) , \quad (2.6)$$

б) середня температура холодного теплоносія t_2 , °C (T_2 , K):

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot (t_{x1} + t_{x2}) , \quad (2.7)$$

в) середня дійсна швидкість гарячого та холодного теплоносіїв $W_1 = 3,2081$ м/с, $W_2 = 4,467$ м/с, за формулою Гей-Люсака:

$$W = v \cdot \frac{T}{273,15} , \quad (2.8)$$

Де v - швидкість руху теплоносіїв, м/с;

T - абсолютна температура, К.

г) гарячий теплоносій рухається зовні впоперек труб, то $d=d_3=0,01588$ м. Число Рейнольдса для середньої температури гарячого теплоносія $Re_{18,95} = 3427,46$ визначається за формулою:

$$Re_{18,95} = \frac{W_r \cdot d}{\nu_{18,4}} , \quad (2.9)$$

де ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

Оскільки холодний теплоносій рухається всередині труб, то $d=d_b=0,0141$. Число Рейнольдса $Re_{-2} = 4804,32$ для холодного теплоносія при $t_2 = -2,45$ С.

д) середня температура станки $t_{ст}$, °C ($T_{ст}$, K):

$$t_{ст} = \frac{1}{2} \cdot (t_1 + t_2) , \quad (2.10)$$

де t_1 - середня температура рециркуляційного повітря (гарячий теплоносій), °C;

t_2 - середня температура свіжого повітря (холодний теплоносій), °C;

$t_{ст1,2}$ - середня температура стінки труби зовні і всередині, °C.

ж) різниця середніх температур теплоносія та стінки Δt , °C (ΔT , K):

$$\Delta t = t_1 - t_{ст1} ; \quad (2.11)$$

з) число Нуссельта $Nu_{18,95} = 34,84$ при поперечному омиванні глибинних рядів пучків труб гарячим теплоносієм формула для повітря приймає вигляд :

$$Nu_{18,95} = C \cdot Re_{18,95}^n \cdot Pr_{18,95}^{1/3} (1)^{0,25} \cdot \varepsilon_{\varphi} \cdot \varepsilon_l, \quad (2.12)$$

де C – коефіцієнт, що враховує поперечне розміщення труб при числі $Re_{18,95}$;

Pr - число Прандтля;

к) число Нуссельта $Nu_{-2} = 15,87$ при русі холодного теплоносія всередині для повітря приймає вигляд :

$$Nu_{-2} = 0,018 \cdot Re_{-2}^{0,8}, \quad (2.13)$$

л) величина ε_l враховує взаємне розташування труб в пучку, та при поправці на напрям потоку $\varepsilon_{\varphi} = 1$ на кут 90° по відношенню до трубного пучку, для глибинних рядів коридорного пучка становить :

$$\varepsilon_l = \left(\frac{d_3}{l_2} \right)^{0,15}, \quad (2.14)$$

де d_3 – зовнішній діаметр труб, м;

l_2 - міжтрубний проміжок, м.

м) в одиниці об'єму повітря міститься 78,08% азоту (N_2), 20,95% кисню (O_2), 0,93% аргону (Ar), 0,03% вуглекислого газу CO_2 . Вміст водяної пари в об'ємі повітрі земної поверхні коливається від 0,02% в полярних широтах до 2,5% в тропіках (за даними Nasa). Повітря містить одноатомні (Ar , He) та двоатомні гази (O_2 , N_2), що прозорі до теплового випромінювання, та трьохатомні гази (H_2O , CO_2), що поглинають тепло та випромінюють його. Поглинально-випромінювальна здатність CO_2 та H_2O залежить від товщини і щільності шар газу, його температури, парціального тиску та ефективної довжини теплових променів l_{ef} в газовому шарі.

Об'ємний вміст випромінюючих газів в теплоносії $\varphi_{CO_2} = 0,03\%$, $\varphi_{H_2O} = 1,26\%$ (приймаємо середнє значення між 0,02% та 2,5%). Ефективна довжина теплових променів l_{ef} в газовому шарі між труб $d=d_3$ кроком $l_1 = 0,1$ м та $l_2 = 0,1$

Парціальний тиск випромінюючих газів при $P_{атм} = 1,01325 \cdot 10^5$ Па:

$$P_{CO_2} = \varphi_{CO_2} \cdot P_{атм}, \text{ Па} \quad (2.15)$$

$$P_{H_2O} = \varphi_{H_2O} \cdot P_{атм}, \text{ Па} \quad (2.16)$$

н) ефективна довжина теплових променів l_{ef} в газовому шарі .

Оскільки гарячий теплоносіє рухається між труб $d=d_3=0,01588\text{м}$ кроком $l_1 = 0,1\text{м}$ та $l_2 = 0,1\text{м}$ в поперечному і повздовжньому напрямі розташованих по коридорному типу, ефективна довжина теплового проміння $l_{\text{еф}}$ в газовому шарі :

$$l_{\text{еф}} = 1,08 \cdot d_3 \cdot \left(\frac{l_1 \cdot l_2}{d_3^2} - 0,785 \right), \quad (2.17)$$

п) загальний парціальний тиск випромінюючих газів при розрахунковій ефективній довжині проміння в газовому шарі МПа :

$$P_{\text{фCO}_2} = P_{\text{CO}_2} \cdot l_{\text{еф}}; \quad (2.18)$$

$$P_{\text{фH}_2\text{O}} = P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_{\text{еф}}; \quad (2.19)$$

Значення міри чорноти газів $\varepsilon_{\text{пмч}}$ можна визначити використовуючи наближену аналітичну залежність $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,058$ та $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,05$ та коефіцієнта об'ємного теплового розширення для газових середовищ $\beta=0,1$ визначено по довідковим графічним залежностям при температурі гарячого теплоносія $t_1 = 18,95^\circ\text{C}$ і розрахункових парціальних тисків $P_{\text{фCO}_2}$, $P_{\text{фH}_2\text{O}}$.

Тоді, повна міра чорноти гарячого теплоносія :

$$\varepsilon_{\text{пмч}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta; \quad (2.20)$$

Зведена міра чорноти поверхні труб в просторі фільтр-теплообмінника:

$$\varepsilon_{\text{зв}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{пмч}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1}, \quad (2.21)$$

р) температура стінок рекуперативного теплообмінника з боку гарячого $t_{\text{ст1}}$ і холодного $t_{\text{ст2}}$ теплосіїв для тонких циліндричних стінок $\frac{d_3}{d_b} < 2,^\circ\text{C}$:

$$t_{\text{ст1}} = \frac{\left(\frac{\alpha_1 \cdot F_1 + \alpha_1 \cdot F_1 \cdot \sigma}{\alpha_2 \cdot F_2 + \frac{\lambda \cdot F_{\text{ср}}}{l}} \right) \cdot t_1 + t_2}{1 + \frac{\alpha_1 \cdot F_1 + \alpha_1 \cdot F_1 \cdot \sigma}{\alpha_2 \cdot F_2 + \frac{\lambda \cdot F_{\text{ср}}}{l}}}, \quad (2.22)$$

$$t_{\text{ст2}} = \frac{\left(\frac{\alpha_2 \cdot F_2 + \alpha_2 \cdot F_2 \cdot \sigma}{\alpha_1 \cdot F_1 + \frac{\lambda \cdot F_{\text{ср}}}{l}} \right) \cdot t_2 + t_1}{1 + \frac{\alpha_2 \cdot F_2 + \alpha_2 \cdot F_2 \cdot \sigma}{\alpha_1 \cdot F_1 + \frac{\lambda \cdot F_{\text{ср}}}{l}}}, \quad (2.23)$$

де α_1 -коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до пучка труб, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

α_2 -коефіцієнт тепловіддачі від холодного теплоносія до стінки труби, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

λ -коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

F_1 -площа поверхні теплообміну, м².

с) середній температурний напір для перехресної схеми руху теплоносія, °С :

$$\overline{\Delta t} = \overline{\Delta t}^{\text{прот}} \cdot \varepsilon_{\Delta t}, \quad (2.24)$$

де $\Delta t^{\text{прот}}$ - середній температурний напір для протитечії;

$$\Delta t^{\text{прот}} = \frac{(t_{r2} - t_{x1}) - (t_{r1} - t_{x2})}{\ln \frac{t_{r2} - t_{x1}}{t_{r1} - t_{x2}}}, \quad (2.25)$$

$\varepsilon_{\Delta t}$ – корегуючий коефіцієнт, який визначають за діаграмою для перехресній течії при відомих $P=0,95$ та $R=0,05$ буде $\varepsilon_{\Delta t} = 0,95$:

$$P = \frac{t_{x2} - t_{x1}}{t_{r1} - t_{x1}}, \quad (2.26)$$

$$R = \frac{t_{r1} - t_{r2}}{t_{x2} - t_{x1}}, \quad (2.27)$$

Середній температурний тиск, °С для перехресної схеми відносного руху теплоносія визначено $\overline{\Delta t}=12,065$. При середній дійсній швидкості гарячого теплоносія $W_1=3,2081$ м/с в міжтрубному просторі та середній дійсній швидкості холодного теплоносія $W_2=4,467$ м/с в трубах температура стінок труб з боку гарячого теплоносія буде $t_{\text{ст1}}=11,52$ С, а температура стінок труб з боку холодного теплоносія $t_{\text{ст2}}=11,52$ С.

2.1.5. Коефіцієнти тепловіддачі та теплопередачі

Визначивши середню температуру гарячого та холодного теплоносіїв та фізичні параметри з розділу 2.1.4 перейдено до визначення коефіцієнту тепловіддачі конвекцією від гарячого теплоносія до трубного пучка звернувшись до визначення числа Нуссельта для турбулентного потоку гарячого теплоносія $Nu_{18,95}= 34,84$ та числа Нуссельта для ламінарного потоку холодного теплоносія в середині труб $Nu_{-2}=15,87$.

В результаті розрахунків було визначено :

а) коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від гарячого теплоносія до трубного пучка, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{Nu_{18,95} \cdot \lambda_{18,95}}{d_3}, \quad (2.28)$$

б) середній коефіцієнт тепловіддачі в трубному пучку.

При урахуванні зниження тепловіддачі при поперечному обтіканні - для першого ряду труб приймаємо 60% від α_{Γ} , для другого ряду труб 70% від α_{Γ} , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{\text{сер}} = \frac{0,6 \cdot \alpha_{\Gamma 1} \cdot F_1 + 0,7 \cdot \alpha_{\Gamma 2} \cdot F_2 + 1 \cdot \alpha_{\Gamma 3} \cdot F_3}{F_1 + F_2 + F_3}; \quad (2.29)$$

в) середній коефіцієнт тепловіддачі при плівковій конденсації на горизонтальній трубі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{\text{к}} = 0,728 \cdot \left(\frac{g \cdot r \cdot \rho_{\text{пл}}^2 \cdot \lambda_{\text{пл}}^3}{\mu_{\text{пл}} \cdot (T_{18,95} - T_{\text{т.р}}) \cdot d_3} \right)^{0,25}, \quad (2.30)$$

де g – прискорення вільного падіння, $9,81 \text{ м/с}^2$;

d – розмір труби на якій утворюється конденсат, $d = d_3 = 0,01588 \text{ м}$;

r – прихована теплота конденсації води $2485 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$T_{18,95}$ - абсолютна температура суміші повітря = $292,1 \text{ К}$;

$T_{\text{т.р}}$ – абсолютна температура утворення конденсату при контакті суміші повітря. Температура точки роси для повітря з температурою $18,95 \text{ С}$ визначено за $I-d$ діаграмою і становить $7,7 \text{ С}$. з $t = 18,95 \text{ С}$ з холодною поверхнею та становить $280,85 \text{ К}$.

$\mu_{\text{пл}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

$$\mu_{\text{пл}} = A \cdot 10^{\frac{B}{T_{\text{т.р}} - C}}, \quad (2.31)$$

де A - постійна запропонована Бінгом $= 2,414 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$;

$B = 247,8 \text{ К}$, $C = 140 \text{ К}$ – константи.

Рівняння справедливе якщо виконується умова:

$$d_3 = 0,01588 < 20 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{пл}}}{g \cdot \rho_{\text{пл}}} \right)^{0,5}, \quad (2.32)$$

де $\sigma_{\text{пл}}$ – сила поверхневого натягнення плівки, Н/м .

Поверхневий натяг рідини на межі з повітрям при 20С становить $\sigma_{пл}=29 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

г) витрату конденсату при стаціонарному процесі конденсації де потік фазового переходу рівний:

$$Q = G \cdot r ; \quad (2.33)$$

де Q – тепловий потік від гарячого теплоносія до стінки при конденсації , Вт;

G – витрата конденсату ,кг/с;

r – прихована теплота конденсації води, Дж/кг.

Процес теплообміну при конденсації розраховують за законом тепловіддачі Ньютона:

$$Q=\alpha \cdot \Delta t \cdot F , \quad (2.34)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі при конденсації , Вт/м²·К;

$\Delta t=(T_{18,95} - T_{т.р})$ – різниця температур між середовищем та стінкою, на якій виникає конденсат, К;

$T_{18,95}$ – абсолютна температура суміші повітря= 292,1К;

$T_{т.р}$ – абсолютна температура утворення конденсату при контакті суміші повітря з $t=18,95$ С з холодною поверхнею= $12,2+273,15=285,35$ К;

F – площа труб, м².

Витрати конденсату можна визначити з рівності :

$$Q= G \cdot r =\alpha \cdot \Delta t \cdot F ; \rightarrow G =(\alpha \cdot \Delta t \cdot F)/ r , \quad (2.35)$$

д) коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням від гарячого теплоносія визначено за законом Стефана – Больцмана, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{1в} = \frac{\varepsilon_{зв} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_{ст}}, \quad (2.35)$$

де $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ -коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

ж) сумарний коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки труби, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{г.н} = \alpha_{г} + \alpha_{1в}, \quad (2.36)$$

з) середнє значення коефіцієнту тепловіддачі з боку холодного теплоносія, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{\text{х.н}} = \frac{Nu_{-2} \cdot \lambda_{-2}}{d_{\text{в}}}; \quad (2.37)$$

к) коефіцієнт теплопередачі крізь стінки труб за формулами плоскої стінки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{т.н}}} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{х.н}}}}, \quad (2.38)$$

Загальний коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки труби становить $\alpha_{\text{т.н}} = 56,64 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. При цьому, враховуючи особливості поперечного обтікання, середній коефіцієнт тепловіддачі для першого ряду труб приймається як 60% від значення $\alpha_{\text{т}}$, для другого ряду труб 70%, для третього ряду труб приймається 100% від $\alpha_{\text{т}}$. Оскільки середнє значення коефіцієнту тепловіддачі холодного теплоносія дорівнює $\alpha_{\text{х.н}} = 27,31 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ визначено коефіцієнт теплопередачі крізь стінки труб, який можна розрахувати за формулами плоскої стінки, де $\frac{1}{\alpha_{\text{т.н}}}$ та $\frac{1}{\alpha_{\text{х.н}}}$ - термічний опір тепловіддачі гарячого та холодного теплоносія, а $\frac{\sigma}{\lambda}$ - термічний опір стінки. Таким чином, коефіцієнт теплопередачі теплообмінника фільтр-теплообмінника крізь стінки труб становить $K = 16,81 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

2.1.6. Площа поверхні нагріву теплообмінника.

За коефіцієнтом тепловіддачі визначено площа поверхні теплообміну з боку холодного та гарячого теплоносія, середню поверхню теплообміну при товщині стінки труби $\sigma = 0,00089$ м та визначено необхідну площу теплообміну для забезпечення необхідної величини теплового потоку, діаметр труб приймається як для мідних труб $15,88 \times 0,89$ $d_{\text{в}} = 0,01588$ м:

а) поверхня теплообміну з боку гарячого теплоносія , м^2 :

$$F_1 = \pi \cdot d_3 \cdot l, \quad (2.39)$$

б) поверхня теплообміну з боку холодного теплоносія , м^2 :

$$F_2 = \pi \cdot d_B \cdot l, \quad (2.40)$$

в) середня поверхня теплообміну при товщині стінки труби $\sigma = 0,00089\text{м}$, м^2 :

$$F_{\text{ср}} = \pi \cdot \frac{d_3 + d_B}{2}, \quad (2.41)$$

г) необхідна площа поверхні теплообміну, м^2 :

$$F = \frac{Q_x}{K \cdot \Delta t}, \quad (2.42)$$

2.2. Результати досліджень

На основі проведених розрахунків було детально визначено конструктивні параметри теплообмінної частини фільтр-теплообмінника. Для коридорного пучка труб в поперечному n_1 в повздовжньому напрямі n_2 прийнято: $n_1 = n_2 = 4$. Загальна кількість труб у системі складає 16 одиниць. Розрахункова дійсна швидкість холодного теплоносія в трубах досягає 2,8 м/с, при цьому простір між трубами підтримується в межах 10 см. Габаритні розміри всієї теплообмінної частини становлять 0,4мх0,4м.

Крім того, були проаналізовані гідродинамічні втрати тиску в системі. Встановлено, що втрати тиску по довжині від тертя при русі повітря в трубах з дійсною швидкістю $v_x=2,8$ м/с Па складають $\Delta P_2^{\text{тер}}=7,5$ Па. Загальна втрата тиску в частині гарячого теплоносія: $\Sigma \Delta P_1 = \Delta P_1^{\text{тер}} + \Delta P_1^{\text{м.о.}} + \Delta P_{\text{ф}}^{\text{м.о.}}=136,2\text{Па}$. Загальна втрата тиску в частині холодного теплоносія: $\Sigma \Delta P_2 = \Delta P_2^{\text{тер}} + \Delta P_2^{\text{м.о.}} + \Delta P_{\text{р}}^{\text{м.о.}}=84,7\text{Па}$.

На підставі всіх цих параметрів була розроблена та представлена модель повітроочищувача фільтр-теплообмінник з інтегрованим теплообмінником «повітря-повітря», візуальне зображення якої наведено на Рис. 2.4.

Ця модель узагальнює отримані дані та відображає функціональну інтеграцію теплообмінних процесів з функціями очищення повітря.

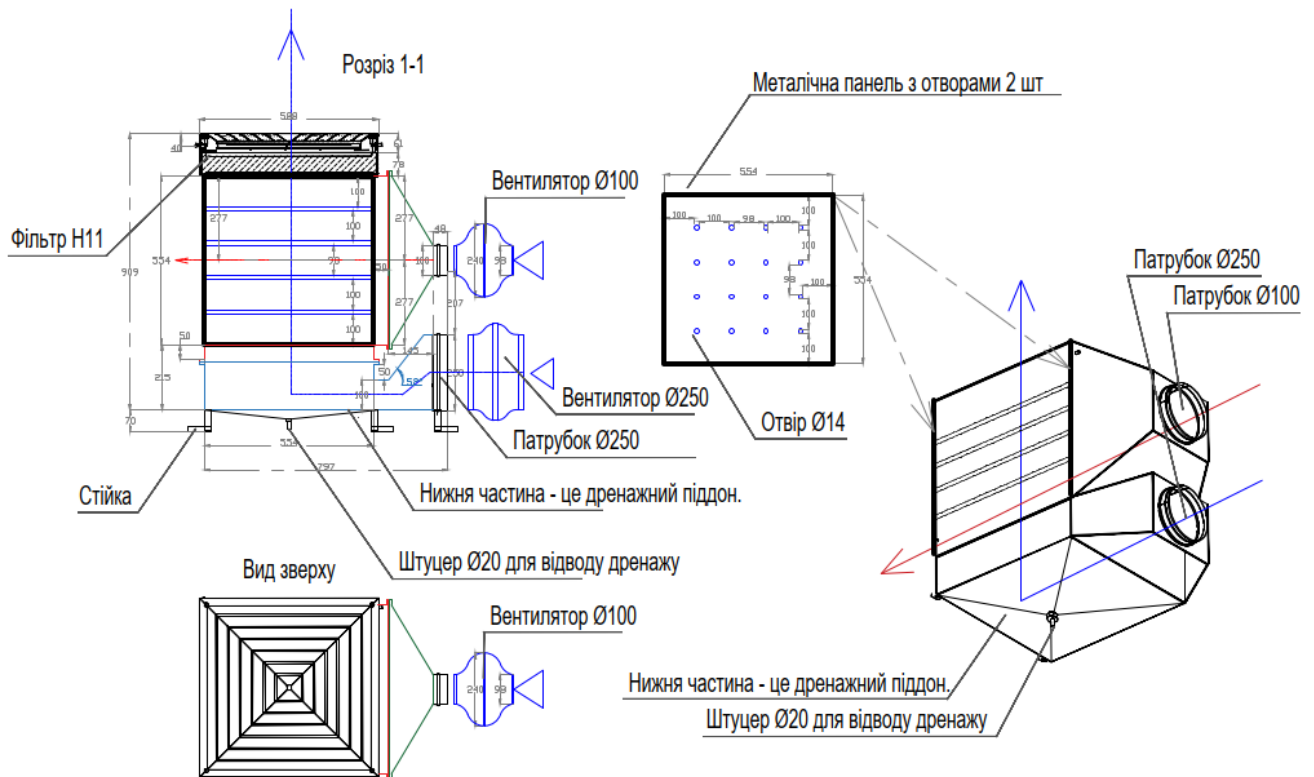


Рис 2.4. Модель очищувача повітря рециркуляційного типу з вставкою HEPA 11 та теплообмінником «повітря-повітря».

Повітроочищувач складається з двох окремих секцій, що межують одна з одною через теплообмінник. Перша секція – і є саме повітроочисник, вона складається з вентилятора, секції рециркуляції повітря та вискоєфективного фільтра HEPA 11. Друга секція містить повітрозабірний пристрій, вентилятор, статичну камеру повітророзподілення та теплообмінник.

Отримана модель дозволить забезпечити в приміщенні кратність повітрообміну більшу 6 (рекомендовано кратність повітрообміну згідно нормативних документів [217]-[220], [255], а розміщення фільтра типу HEPA 11, при такій кратності повітрообміну, забезпечить очищення повітря на 95% від початкового рівня забруднення. Додатковою функцією повітроочищувача є можливість нагрівати зовнішнього повітря в рециркуляційній частині повітроочищувача без використання додаткової енергії, лише температури повітря в кімнаті.

2.3. Висновки

Представлено модель повітроочищувача з секцією для нагріву свіжого повітря з вулиці без використання додаткової енергії на нагрів, окрім електричної енергії, яка буде живити два вентилятора: один з яких буде рухати гарячий теплоносій (повітря, що очищується), інший – холодний теплоносій (повітря, що надходить ззовні). Визначено необхідні параметри теплообмінника та габаритні розміри самого очищувача повітря. Також, визначено необхідну кількість холодного теплоносія для можливості нагріву його за рахунок гарячого теплоносія в рециркуляційній камері очисника. Представлена модель поєднує дві функції: можливість очищення повітря в приміщенні до рекомендованих безпечних рівнів забруднювачів та можливості отримання свіжого повітря ззовні без необхідності нагрівати його додатковою енергією. В даному випадку для нагріву $41\text{м}^3/\text{год}$ свіжого повітря з вулиці з початковою температурою -22°C (в зимовий період) знадобиться $0,5871\text{ кВт}$ за одну годину роботи. Але в даній моделі енергія на нагрів холодного теплоносія буде надходити від повітря в кімнаті, понижуючи його температуру з початкових 20°C до 18°C , що є допустимою температурою для приміщень перебування людей. Отримана модель може очистити об'єм повітря в кількості $800\text{ м}^3/\text{год}$, що при об'ємі приміщення в 55м^3 становить більше 14 крат, а розміщення фільтру типу HEPA 11 забезпечить очищення повітря на 95% від початкового рівня забруднення. Робота приладу розрахована на періодичну дію: при знаходженні людини в кімнаті, при необхідності провітрювання чи компенсації витяжного повітря від роботи інших витяжних систем невеликої потужності.

Всі теоретичні розрахунки потребують перевірки в натурних умовах .

Розділ 3

РОЗДІЛ 3 Експериментальні дослідження фізичних параметрів фільтр-теплообмінника з фільтрувальними елементами .

Ефективний контроль забруднювачів у внутрішньому повітряному середовищі є невід'ємною умовою для підтримання належної якості повітря та здоров'я користувачів приміщень. У цьому контексті механічна вентиляція та механічна фільтрація визнані найбільш дієвими засобами.

Для оптимізації показників якості повітря необхідним є глибоке розуміння механізмів та методів фільтрації найбільш поширених забруднювачів, детальний опис яких представлено у Розділі 1. Крім того, критично важливим є дослідження оптимальних умов застосування фільтрувальних матеріалів та параметрів функціонування очисних систем з метою визначення їхніх якісних характеристик для конкретних об'єктів приміщень.

Важливим аспектом ефективного очищення повітря є також розрахунок та забезпечення необхідної кратності повітрообміну. Дослідження, проведені Макаренко, Л., & Приймак, О. [256], [257], надають суттєві дані щодо оптимізації цього параметра.

Зазначені підходи дозволяють формулювати науково обґрунтовані рекомендації та розробляти ефективні інженерні рішення для забезпечення оптимального мікроклімату в приміщеннях, що має прямий вплив на добробут та здоров'я людини.

Метою цього дослідження є визначення очисної потужності фільтр-теплообмінника для видалення різних рівнів забруднення $PM_{2.5}$ при зміні деяких параметрів внутрішнього повітряного середовища (відносна вологість, кратність повітрообміну) за одиницю часу. А точніше, визначення рівняння за яким буде визначено час очищення при відомих вхідних даних (рівні забруднення, відносна вологість, потужність повітроочищення). Додатковий інтерес викликають теплообмінний процес в теплообмінній секції фільтр-калорифера. А саме, визначення критеріального рівняння Nu для даного конкретного випадку.

3.1 Опис комплексного експериментального стенду та методи проведення експериментальних досліджень.

Географічне розташування досліду: Київ, Україна (50°27'00"пн.ш.; 30°31'25"сх.д. - місто з високим транспортним навантаженням та значним індустриального забруднення, що призводить до погіршення якості зовнішнього повітря та, у свою чергу, впливає на якість повітря в приміщеннях.

Проведені експериментальні дослідження:

- впливу відносної вологості на процес очищення в фільтр- теплообміннику;
- визначена найбільш точна математична модель, яка дозволяє передбачити значення параметрів стану часу очищення (об'єкта Y) та оптимізувати його параметри в подальших дослідженнях в залежності від вологості повітря, рівнів забруднення, потужність очисника (факторів Xi);
- дослідження CADR фільтр-теплообмінника з фільтром H11 з визначенням впливу природного осадження на CADR фільтр-теплообмінника;
- визначення коефіцієнта тепловіддачі фільтр-теплообмінника непрямим методом та методом ПФЕ.

Місце проведення досліду: фільтр-калорифер розташовано в кімнаті площею 20м² і висотою стелі 2,75м. Вікна закриті. Температура та вологість приймалась для кожного досліду виходячи з реальних умов назовні. Рівень CO₂ 400-500ppm. Рівень забруднення PM_{2.5} в повітрі приміщення на час проведення досліду як візуальне уявлення якості повітря надано в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Рівень забруднення повітря як візуальне уявлення якості повітря .

Індекс якості	Рівень забруднення по AQI	PM _{2.5} ; мкг/м ³	Коефіцієнт забруднення, %
1	0 – 50	0 - 12	5
2	51 - 100	12.1 – 35.4	15
3	101 – 150	35.5 – 55.4	25
4	151 - 200	55.5 – 150.4	60
5	201 - 300	150.5 – 250.4	90
6	+301	250.5	100

У цьому дослідженні використовувалися один тип повітроочищувача фільтр-теплообмінника при різних варіантах використання його продуктивності від 100 до 800м³/год, двох варіантах забруднення внутрішнього повітряного середовища: об'ємна концентрація РМ_{2.5} становить 20 мкг/м³ (індекс якості повітря 2 для РМ_{2.5} (незначний)) і 180 мкг/м³ (індекс якості повітря 5 для РМ_{2.5} (небезпечний)).

Повітроочищувач повітря фільтр-теплообмінник складається з двох вентиляторів (для холодного та гарячого теплоносіїв), одного фільтра або комбінації фільтрів залежно від мети дослідів (фільтра G4, фільтра F7, фільтра з активованим вугіллям, фільтра НЕРА 11), теплообмінника «повітря-повітря» та повітророзподільного пристрою в частині «гарячого теплоносія». Принципова схема розміщення обладнання при проведенні дослідів вказана на Рис.3.1.

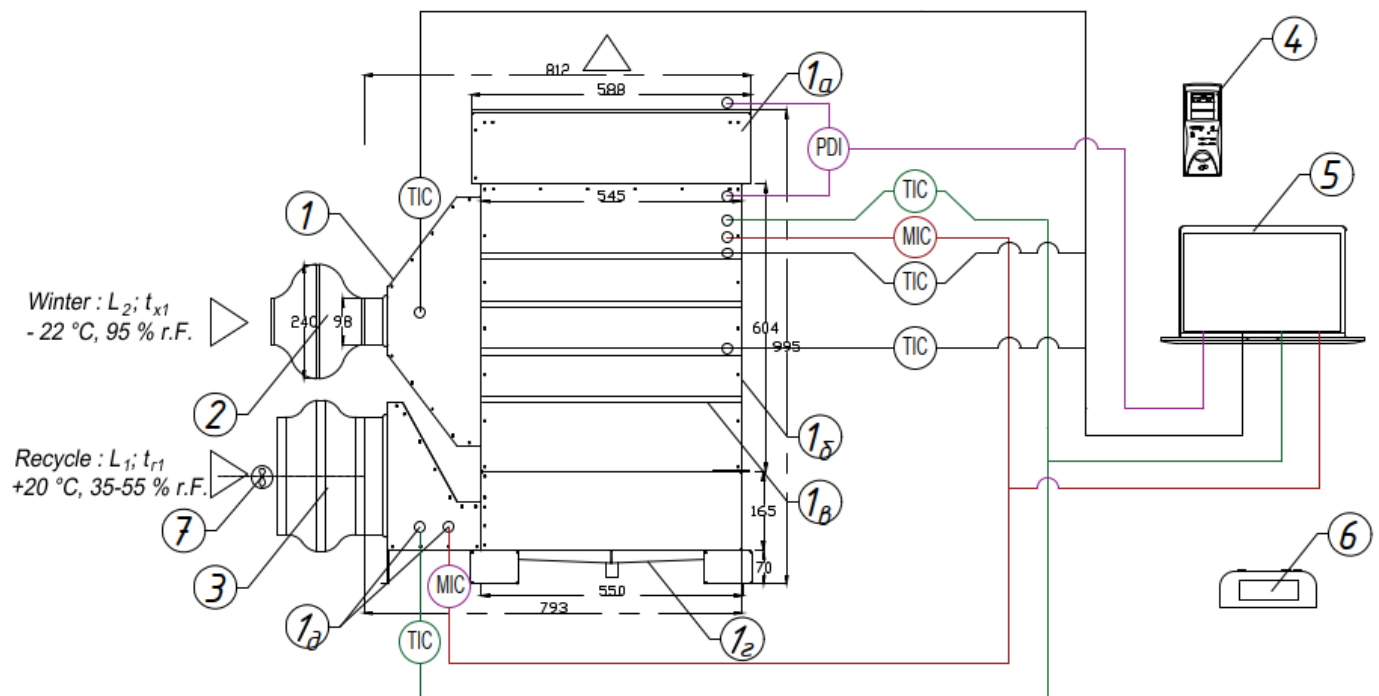


Рис.3.1. Принципова схема розміщення обладнання при проведенні дослідів.

1 - фільтр-калорифер в складі: 1а – секція фільтра НЕРА H11; 1б – теплообмінна секція; 1в – мідні трубки; 1г – піддон для конденсату; 1д – умовне позначення розміщення різних датчиків (прилад для вимірювання: ТІС-температури; МІС- вологості; PDI - перепаду тиску); 2 - вентилятор подачі повітря зовні; 3-рециркуляційний вентилятор; 4 - датчика частинок РМ Particle Scan Lite; 5- пристрій обробки інформації; 6-монітор якості повітря AirVisualPro; 7 - анемометр ET-965.

Для вимірювання даних використовувалися такі прилади: монітор якості повітря AirVisualPro; анемометр ET-965; гравіметричний відбір проб РМ фракції розміру 2,5–1,0 мкм, проводився за допомогою датчика частинок Particle Scan Lite, IQAir. Serial nr.:2005.30837. Flow 0,025 cfm у загальному повітрі приміщення з і без роботи очищувача повітря.

Згідно з обмеженням робочого часу датчика, відбір проб проводився протягом 6 інтервалів часу від 1хвилини до 5 годин.

Фото розміщення обладнання та деяких його елементів надано на Рис.3.2.



Рис. 3.2. Фото розміщення експериментальної установки.

1 - фільтр-теплообмінник; 2 - вентилятор подачі повітря зовні; 3-рециркуляційний вентилятор; 4 - датчика частинок РМ Particle Scan Lite; 5-пристрій обробки інформації.

На Рис.3.3а,б зображена теплообмінна частина повітроочисної установки з теплообмінною секцією «фільтр-теплообмінник». На Рис.3.3.а схематично зображено рух теплоносіїв в середині теплообмінної секції. Зовнішнє повітря (холодний теплоносіїв) через патрубок 5 подається всередину мідних трубок теплообмінника, в той же час рециркуляційне повітря (гарячий теплоносіїв) з приміщення подається

через патрубок 6, омиває мідні трубки теплообмінника зовні та очищується в фільтрі НЕРА.

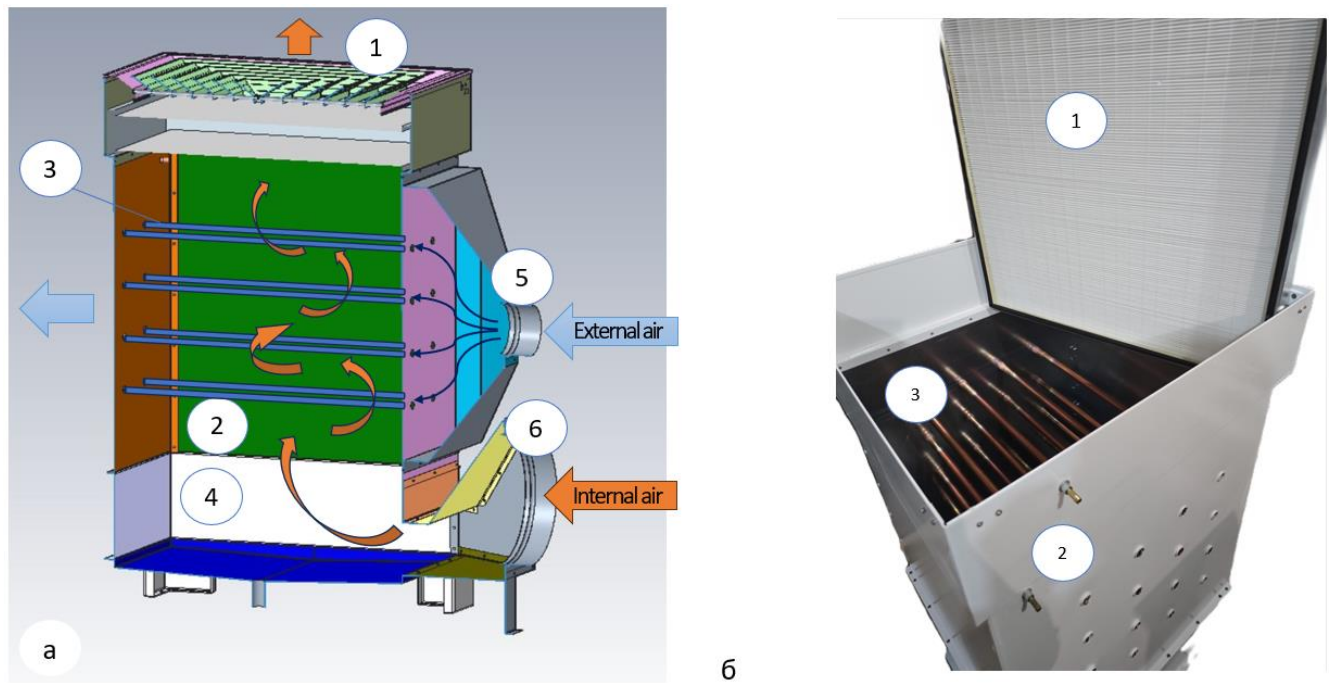


Рис. 3.3. Теплообмінна секція «фільтр-теплообмінник».

а - розріз частини очисника з інтегрованим теплообмінником; б-вид з середини. 1 – секція фільтра НЕРА Н11 з повітророзподільником (дифузор); 2 – теплообмінна секція; 3 - мідні трубки; 4 – піддон для конденсату; 5 – патрубок для подачі зовнішнього повітря ; 6-патрубок подачі рециркуляційного повітря.

3.2 Експериментальне дослідження впливу відносної вологості на процес очищення в фільтр- теплообміннику.

Дослідження якості повітря традиційно акцентуються на моніторингу атмосферного повітря навколишнього середовища. Сучасні роботи застосовують регресійний аналіз для вивчення атмосферних змін, концентрацій ртуті в повітряних масах, рівнів забруднення частинками РМ, динаміки концентрацій забруднювачів залежно від їхнього розміру та часу доби, а також їхнього поширення під впливом різних атмосферних явищ (наприклад, диму від пожеж). Окрім того, досліджується вплив сезонних антропогенних викидів та спалювання відходів на атмосферу. Представлене дослідження сфокусоване на прогнозуванні параметрів внутрішнього повітря за допомогою різних методів експериментального планування, таких як повнофакторний експеримент, ортогональне планування та ротатабельне планування.

Щоб досягти вимог до якості повітря, що вказані в рекомендаціях ВООЗ необхідно визначити продуктивність очисника повітря, рівні забруднення та параметри повітряного середовища. В якості контрольного забрудника обрано дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$, що знаходяться в повітрі в зваженому стані.

Для всебічного вивчення комбінацій рівнів факторів, що забезпечує комплексне розкриття їхнього впливу та взаємодії, застосовано повнофакторний експеримент. Альтернативні підходи, такі як ортогональне та ротатабельне планування, дозволило оптимізувати дослідження, концентруючись на певних аспектах взаємодії факторів. Мета полягала в тому, щоб зрозуміти, як зміни в незалежних змінних корелюють зі змінами в залежній змінній, а також використати ці дані для прогнозування або передбачення майбутніх значень залежної змінної. Подальший статистичний аналіз експериментів дав можливість визначити спостережувані результати як статистично значущі.

Метою цього дослідження була розробка математичної моделі прогнозування показників очисної продуктивності фільтр-теплообмінника. Це дозволило визначити, як ефективно він видаляє забруднення $PM_{2.5}$ за одиницю часу, враховуючи зміни певних параметрів внутрішнього повітряного середовища (такі як, відносна вологість та кратність повітрообміну). Зрештою, визначено найкраще рівняння регресії, за яким визначено час очищення на основі відомих вхідних даних: рівнів забруднення, відносної вологості та потужності повітроочищення.

Дослідження проводилось в офісному приміщенні в м.Київ. Розрахунковий об'єм приміщення складав $54,9 \text{ м}^3$. Вимірювання проводилися з 20 липня по 15 серпня 2023 року при внутрішній температурі $+24,5^\circ\text{C}$, відносній вологості в приміщенні 35% та 55% при вимкнених системах вентиляції та опалення. Час очищення при кожній з пропускних потужностей повітроочисної установка фіксувався при незначному забрудненні дрібнодисперсними частками $PM_{2.5}$ (рівень забруднення від 12,1 до $35,4 \text{ мкг/м}^3$) та небезпечному забрудненні (рівень забруднення від 55,5 до $260,4 \text{ мкг/м}^3$). Час досліду тривав до набуття повітряним середовищем параметрів встановлених

рекомендаціями ВООЗ в 5мкг/м^3 . Провівши експерименти за методом ПФЕ, результати були перевірені за допомогою планування другого порядку, де рівняння регресії враховує взаємодії та квадратичні члени. Центром плану другого порядку є досліди проведені в ПФЕ з додаванням зоряних та нульових точок. Дослідження проведено по методу планування повного факторного фізичного експерименту (ПФЕ) для трирівневого співвідношення факторів. Додатковим фактором визначена відносна вологість повітря, що надходить на фільтр. Докладно описано в матеріалах конференції [17]. Центральні точки плану обраних змінних визначені на Рис.3.4.

Проведено кодування центральних точок факторного простору:

$$X_1 = \frac{L-L^0}{\Delta L}; X_2 = \frac{\eta-\eta^0}{\Delta \eta}; X_3 = \frac{\varphi-\varphi^0}{\Delta \varphi}, \quad (3.1)$$

де X_1 -пропускна потужність повітроочисної установка (100 та 310 $\text{м}^3/\text{годину}$); X_2 -рівень початкового забруднення (15% та 60%); X_3 -відносна вологість (35% та 55%).

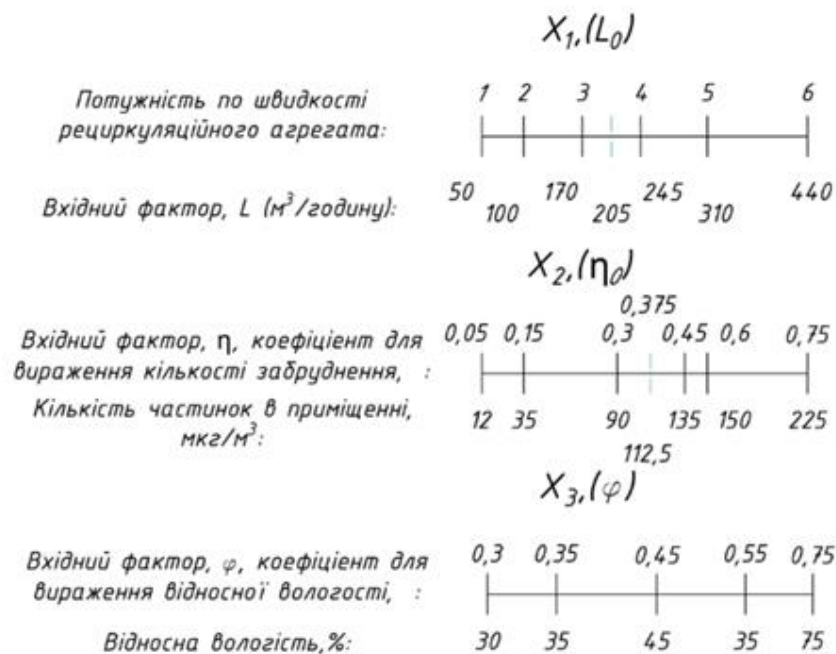


Рисунок 3.4. Центральні точки плану для ПФЕ при трьох факторах : X_1 -пропускна потужність повітрообробної установка (100 та 310 $\text{м}^3/\text{год}$); X_2 -рівень початкового забруднення (15% та 60%); X_3 -відносна вологість (35% та 55%).

Схема побудови факторного простору при двох- та трьох факторах для ПФЕ, ортогонального та ротатабельного планування надано на Рис.3.5, Рис.3.6, Рис.3.7.

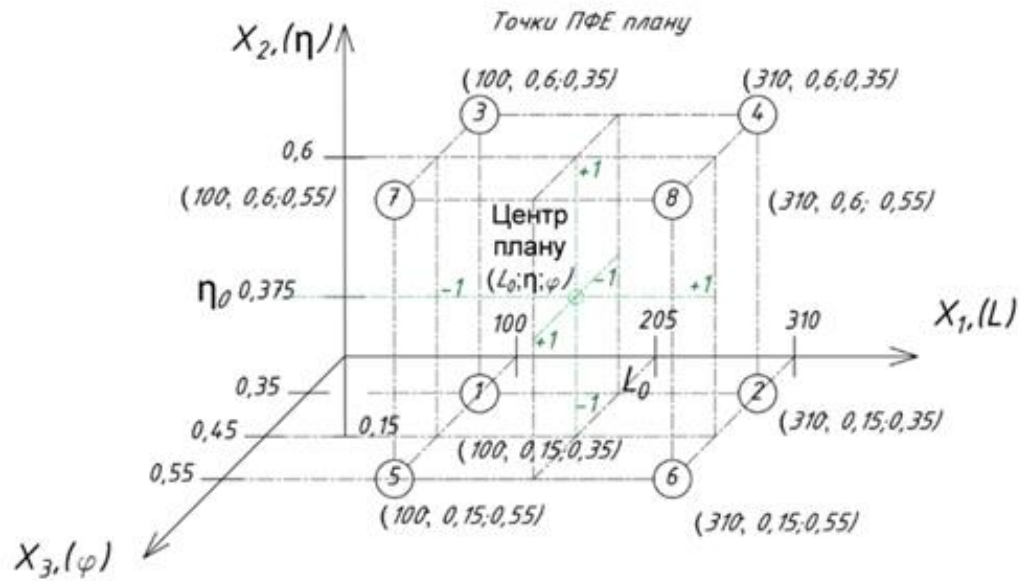


Рисунок 3.5. Схема точок повного факторного експерименту, де 1-4 точки при 2-х вхідних факторах: точки 1-8 при 3-х вхідних факторах.

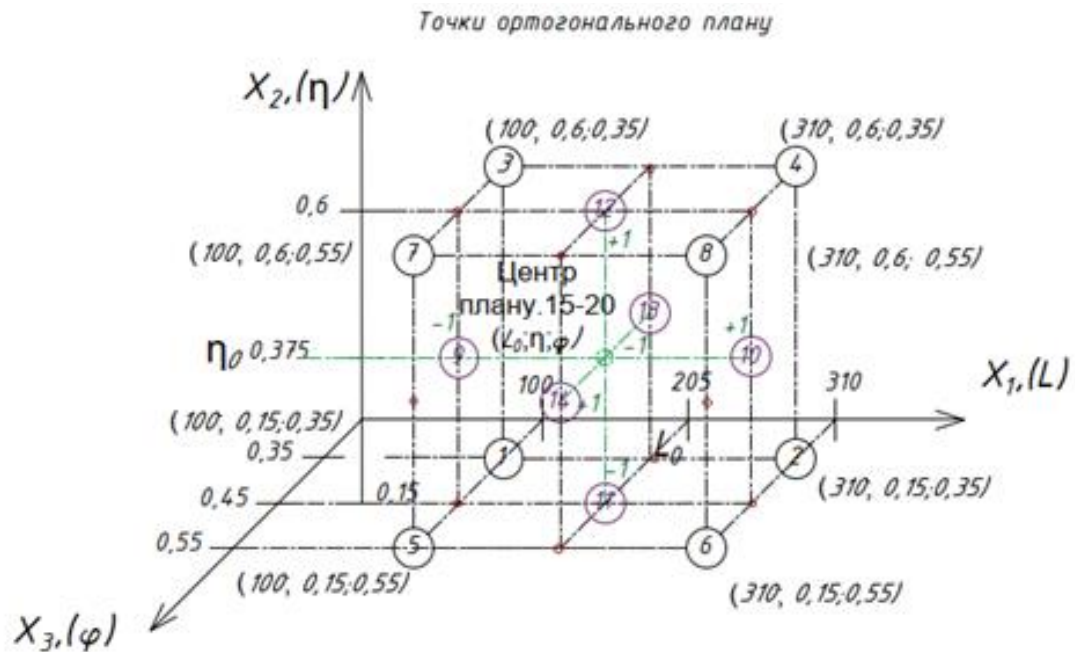


Рисунок 3.6. Схема точок ортогонального планування, де 1-9 точки при 2-х вхідних факторах: точки 1-15 при 3-х вхідних факторах.

Визначені вектори (значення суми квадрантів) вписані для кожного стовбця матриці.

Умови ротатабельності забезпечують інваріативність плану до обертання координат. Ці умови визначаються відношеннями:

$$\sum_{g=1}^N X_{i,g}^2 = N \cdot \lambda_2 \quad (3.5)$$

при $i = 1, 2, \dots, n$; а g – номер досліду;

$$\sum_{g=1}^N X_{i,g}^4 = 3 \sum_{g=1}^N X_{i,g}^2 \cdot X_{j,g}^2 = 3 \cdot N \cdot \lambda_4 \quad (3.6)$$

при $i, j = 1, 2, \dots, n$; але $i \neq j$

де λ_2 та λ_4 – константи, що задовольняють нерівність:

$$\lambda_4^* = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} > \frac{n}{n+2}; \text{ при } n=2 \text{ або } 4 \text{ константи пов'язані співвідношенням:}$$

$$\lambda_4^* = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} = \frac{n \cdot c}{n+2};$$

де $c = \frac{N}{N-N_0} = 1,625$ для 2х факторів; $c = \frac{N}{N-N_0} = 1,429$ для 3х факторів.

Кількість нульових точок N_0 враховує необхідність перевірки адекватності моделі, оцінки похибки експерименту та створення умов, при яких забезпечується незмінність. При ротатабельному плануванні другого порядку всі точки плану (крім нульових) розміщено на однаковій відстані від центральних точок на сфері, радіус якої рівний довжині зоряного плеча. Ядром плану є точки ПФЕ.

Коефіцієнти рівняння регресії при цьому визначаються по формулах:

$$b_0 = \alpha_1 \sum_{g=1}^N \bar{y}_g - \alpha_2 \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^N X_{i,g}^2 \cdot \bar{y}_g; \quad (3.7)$$

$$b_i = \alpha_3 \sum_{g=1}^N X_{i,g} \cdot \bar{y}_g; \quad (3.8)$$

$$b_{i,j} = \alpha_4 \sum_{g=1}^N X_{i,g} \cdot X_{j,g} \cdot \bar{y}_g; \quad (3.9)$$

$$b_{i,i} = \alpha_5 \sum_{g=1}^N X_{i,g}^2 \cdot \bar{y}_g + \alpha_6 \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^N X_{i,g}^2 \cdot \bar{y}_g - \alpha_7 \sum_{g=1}^N \bar{y}_g. \quad (3.10)$$

Знаючи величину зоряного плеча можна виразити координати точок №5-№8 для побудови плану за формулою:

$$X_i = X_i^0 \pm \alpha \cdot \Delta X_i; \quad (3.11)$$

де Π - коефіцієнти, значення яких залежить від числа факторів та загального числа дослідів.

Аналогічно побудовано матрицю планування для трьох факторів, при величині зоряного плеча $\Pi = 1,68$, а перетворення квадратичних змінних виконується згідно формули: $\tilde{X}_i^2 = X_i^2$. Результати розрахунків внесено в Таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Рівняння регресії прогнозування параметрів очисника при 2-х та 3-х факторному плануванні.

ПФЕ	
2	$\hat{T} = [6053,667] + [-3669,667] \cdot X_1 + [3332,667] \cdot X_2 + [-1629,333] \cdot X_1 \cdot X_2;$ $\hat{n} = [930860,000] + [32517,0] \cdot X_1 + [61940,833] \cdot X_2 + [-18345,833] \cdot X_1 \cdot X_2.$ $\widehat{CADR} = [90,760] + [-0,523] \cdot X_1 + [6,224] \cdot X_2 + [0,475] \cdot X_1 \cdot X_2.$
3	$\hat{T} = [5532,291] + [-3172,033] \cdot X_1 + [2941,603] \cdot X_2 + [521,505] \cdot X_3 + [-1249,281] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-497,756] \cdot X_1$ $\cdot X_3 + [391,166] \cdot X_2 \cdot X_3 + [-379,935] \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$ $\hat{n} = [9291155,576] + [40330,158] \cdot X_1 + [63086,987] \cdot X_2 + [1704,396] \cdot X_3 + [-13431,551] \cdot X_1 \cdot X_2$ $+ [-7813,162] \cdot X_1 \cdot X_3 + [-1146,319] \cdot X_2 \cdot X_3 + [-4914,245] \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$ $\widehat{CADR} = [90,807] + [-0,535] \cdot X_1 + [6,170] \cdot X_2 + [-0,047] \cdot X_3 + [0,462] \cdot X_1 \cdot X_2 + [0,013] \cdot X_1 \cdot X_3 + [0,054] \cdot X_2$ $\cdot X_3 + [0,013] \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$
ОРТОГОНАЛЬНЕ	
2	$\hat{T} = [6049,892] + [-3654,404] \cdot X_1 + [3330,844] \cdot X_2 + [-1629,333] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-10,886] \cdot X_1^2 + [4,177] \cdot X_2^2;$ $\hat{n} = [928325,177] + [33789,315] \cdot X_1 + [63013,187] \cdot X_2 + [-18345,833] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-199,430] \cdot X_1^2 + [-4152,232] \cdot X_2^2;$ $\widehat{CADR} = [90,575] + [-0,520] \cdot X_1 + [6,225] \cdot X_2 + [0,475] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-0,143] \cdot X_1^2 + [-0,138] \cdot X_2^2;$
3	$\hat{T} = [5528,393] + [-3011,436] \cdot X_1 + [2798,930] \cdot X_2 + [503,369] \cdot X_3 + [-1249,417] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-497,750] \cdot X_1$ $\cdot X_3 + [391,083] \cdot X_2 \cdot X_3 + [-10,428] \cdot X_1^2 + [-3,549] \cdot X_2^2 + [8,067] \cdot X_3^2;$ $\hat{n} = [928079,660] + [38440,224] \cdot X_1 + [61420,996] \cdot X_2 + [399,819] \cdot X_3 + [-13431,551] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-7813,162]$ $\cdot X_1 \cdot X_3 + [-1146,319] \cdot X_2 \cdot X_3 + [1994,885] \cdot X_1^2 + [-654,598] \cdot X_2^2 + [-2058,651] \cdot X_3^2;$ $\widehat{CADR} = [90,898] + [-0,508] \cdot X_1 + [5,876] \cdot X_2 + [-0,046] \cdot X_3 + [0,462] \cdot X_1 \cdot X_2 + [0,015] \cdot X_1 \cdot X_3 + [0,055] \cdot X_2$ $\cdot X_3 + [0,022] \cdot X_1^2 + [0,022] \cdot X_2^2 + [0,022] \cdot X_3^2;$
РОТАТАБЕЛЬНЕ	
2	$\hat{T} = [6123,849] + [-3665,558] \cdot X_1 + [3333,470] \cdot X_2 + [-1629,333] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-47,011] \cdot X_1^2 + [-34,467] \cdot X_2^2;$ $\hat{n} = [931486,399] + [34379,734] \cdot X_1 + [61570,006] \cdot X_2 + [-18345,833] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-344,131] \cdot X_1^2 + [-896,402] \cdot X_2^2;$ $\widehat{CADR} = [90,057] + [-0,515] \cdot X_1 + [6,222] \cdot X_2 + [0,475] \cdot X_1 \cdot X_2 + [0,281] \cdot X_1^2 + [0,283] \cdot X_2^2;$
3	$\hat{T} = [5529,507] + [-3163,953] \cdot X_1 + [2939,791] \cdot X_2 + [530,092] \cdot X_3 + [-1249,281] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-487,756] \cdot X_1$ $\cdot X_3 + [391,166] \cdot X_2 \cdot X_3 + [-8,716] \cdot X_1^2 + [0,597] \cdot X_2^2 + [9,614] \cdot X_3^2;$ $\hat{n} = [926276,4738] + [40337,9732] \cdot X_1 + [64406,724] \cdot X_2 + [351,332] \cdot X_3 + [-13431,551] \cdot X_1 \cdot X_2 + [-7813,162] \cdot X_1 \cdot X_3$ $+ [-1146,319] \cdot X_2 \cdot X_3 + [1879,357] \cdot X_1^2 + [604,729] \cdot X_2^2 + [-192,016] \cdot X_3^2;$ $\widehat{CADR} = [90,508] + [-0,532] \cdot X_1 + [6,021] \cdot X_2 + [-0,048] \cdot X_3 + [0,462] \cdot X_1 \cdot X_2 + [0,015] \cdot X_1 \cdot X_3 + [0,055] \cdot X_2$ $\cdot X_3 + [0,136] \cdot X_1^2 + [-0,076] \cdot X_2^2 + [0,136] \cdot X_3^2;$

Порівняльний аналіз коефіцієнтів регресії, отриманих за допомогою повного факторного експерименту, ортогонального та ротатбельного планувань, дозволяє зробити висновок про їхню значну подібність. Виявлено, що отримані значення коефіцієнтів є близькими, а в деяких випадках спостерігається їх тотожне значення.

Ця відповідність свідчить про консистентність результатів та надійність моделей, побудованих на основі різних підходів до планування експерименту. Це особливо важливо для підтвердження обґрунтованості висновків щодо впливу факторів на досліджувану систему, незалежно від обраного плану експерименту.

Статистичний аналіз експерименту. Для забезпечення точності проведених досліджень було здійснено ретельний аналіз похибок як вхідних, так і вихідних даних. З огляду на однорідність дисперсій, загальна оцінка експерименту проводилася за допомогою дисперсії відтворюваності.

Коефіцієнти регресії були оцінені з метою спрощення рівнянь моделі та ідентифікації впливу окремих факторів на кінцевий результат. Вагомість (статистична значущість) цих коефіцієнтів встановлювалася на основі дисперсії відтворюваності, що дозволило визначити значущість кожного фактора у формуванні досліджуваного показника.

Цей підхід забезпечує наукову обґрунтованість отриманих результатів та дозволяє з високою достовірністю оцінити внесок кожного фактора у досліджуваний процес. Коефіцієнт рівняння регресії вагомий якщо його величина більше довірчого інтервалу: $P(b_i - \Delta b_i \leq b_i \leq b_i + \Delta b_i) = P_g$

Для планів першого порядку дисперсії, що пов'язана з похибкою визначення коефіцієнтів регресії дисперсії відтворюваності $\sigma_{\{b_i\}}^2$, визначається по формулі:

$$\sigma_{\{b_i\}}^2 = \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{N \cdot l}; \text{ тоді } \Delta b_i = \pm t_p \sigma_{\{b_i\}}. \quad (3.12)$$

Для планів другого порядку оцінка вагомості коефіцієнтів регресії $\sigma_{\{b_i\}}^2$ для ортогонального планування, визначається формулами:

$$\sigma_{\{B_i\}}^2 = \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{l \cdot \sum_{j=1}^N X_{i,j}^2}; \quad (3.13)$$

$$\sigma_{\{B_0\}}^2 = \sigma_{\{B'_0\}}^2 + n \cdot \bar{X}^2 \cdot \sigma_{\{B'_{ii}\}}^2; \quad (3.14)$$

$$\text{тоді } \Delta B_0 = \pm t_p \sigma_{\{B_0\}}; \Delta B_i = \pm t_p \sigma_{\{B_i\}}; \Delta B_{ij} = \pm t_p \sigma_{\{B_{ij}\}}; \Delta B_{ii} = \pm t_p \sigma_{\{B_{ii}\}}.$$

Для двох факторів при числі ступенів свободи $f = 9(3 - 1) = 18$ та $P_g = 0,95$ табличне значення критерію Ст'юдента рівне $t_p = 2,1$. Для трьох факторів при числі ступенів свободи $f = 15(3 - 1) = 30$ та $P_g = 0,95$ табличне значення критерію Ст'юдента рівне $t_p = 2,5$.

Визначення коефіцієнтів регресії $\sigma_{\{B_i\}}^2$ для ротатабельного планування, визначається формулами:

$$\sigma_{\{B_0\}}^2 = C_8 \cdot \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{l}; \text{ тоді } \Delta B_0 = \pm t_p \sigma_{\{B_0\}}; \quad (3.15)$$

$$\sigma_{\{B_i\}}^2 = C_9 \cdot \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{l}; \Delta B_i = \pm t_p \sigma_{\{B_i\}}; \quad (3.16)$$

$$\sigma_{\{B_{i,j}\}}^2 = C_{10} \cdot \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{l}; \Delta B_{ij} = \pm t_p \sigma_{\{B_{ij}\}}; \quad (3.17)$$

$$\sigma_{\{B_{ii}\}}^2 = C_{11} \cdot \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{l}; \Delta B_{ii} = \pm t_p \sigma_{\{B_{ii}\}}. \quad (3.18)$$

Для трьох факторів при числі ступенів свободи $f = 13(3 - 1) = 26$ та $P_g = 0,95$ табличне значення критерію Ст'юдента рівна $t_p = 2,5$. Для трьох факторів при числі ступенів свободи $f = 20(3 - 1) = 40$ та $P_g = 0,95$ табличне значення критерію Ст'юдента рівна $t_p = 2,4$.

Адекватність рівняння регресії була підтверджена за допомогою критерію Фішера. Це свідчить про те, що отримана модель достовірно описує взаємозв'язок між досліджуваними змінними та може бути використана для прогнозування.

Варто зазначити, що коефіцієнти формули часу демонструють вищу точність. Це пояснюється тим, що визначення часу було здійснено з більшою прецизійністю порівняно з кількістю частинок в одиницю часу в 1 м^3 повітря. Така відмінність у точності вимірювань впливає на валідацію та надійність відповідних коефіцієнтів у

регресійній моделі. Коефіцієнти рівняння регресії є ключовими показниками, що кількісно характеризують ступінь впливу кожного фактора на вихідний параметр — у даному випадку, на тривалість очищення повітря.

Дослідження виявило, що найбільш значущий вплив на тривалість очищення мають два фактори, причому їхній вплив є майже однаковим: X_1 (пропускна потужність повітроочисної установки) та X_2 (початкова кількість частинок $PM_{2.5}$ в 1 м³ повітря). Другим за значимістю є коефіцієнт, що відображає спільний вплив цих двох факторів, що свідчить про їхню взаємодію в процесі очищення.

Цікаво, що відносна вологість повітря (як окремо, так і в комбінації з іншими факторами) демонструє найменші коефіцієнти впливу на тривалість очищення в рамках проведеного дослідження.

Таким чином, виведені рівняння регресії забезпечують можливість прогнозування часу очищення повітря, враховуючи ключові параметри: продуктивність повітроочищувача, початковий рівень забруднення $PM_{2.5}$, а також, хоча і з меншим впливом, відносну вологість повітря. Ця модель може бути використана для оптимізації процесів очищення повітря та підвищення їхньої ефективності.

Рівняння, отримане в результаті повного факторного експерименту (ПФЕ) з трьома факторами, є найбільш адекватним інструментом для встановлення зв'язку між вхідними факторами та параметрами рециркуляційної установки. Воно точно відображає результати проведених експериментальних досліджень, зокрема, що важливо, враховує фактор відносної вологості повітря, що очищається. Це робить рівняння особливо цінним для всебічного моделювання та оптимізації роботи таких систем:

$$\begin{aligned} \hat{T} = & 5532,291 - 3172,033 \cdot X_1 + 2941,603 \cdot X_2 + 521,505 \cdot X_3 - 1249,281 \cdot \\ & X_1 \cdot X_2 - 497,756 \cdot X_1 \cdot X_3 + 391,166 \cdot X_2 \cdot X_3 - 379,935 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \end{aligned} \quad (3.19)$$

де $\hat{T}$ - тривалість очищення, с; X_1 , X_2 , X_3 – вхідні кодовані фактори: X_1 -пропускна потужність повітрообробної установка (100 та 310 м³/год); X_2 -рівень початкового забруднення (15% та 60%); X_3 -відносна вологість (35% та 55%).

Результати натурних вимірів та дані, що описані рівнянням 3.19 внесено в Таблицю 3.3.

Таблиця 3.3. Результати натурних вимірів ПФЕ при 3-х факторах.

Планування				Результати вимірів				
Вхідні фактори				Вихідні фактори : t(час очищення,с)				
№	L, м ³ /год	Рівень початкового забруднення (до очищення)	Відносна вологість, $\varphi_{в.в.}$	m=1	m=2	m=3	$\bar{T}$	$\hat{T}$
1	100	0,15	0,35	4320	4203	4272	4265	4265,280
2	310	0,15	0,35	650	662	655	655	655,417
3	100	0,60	0,35	11164	10997	11154	11105	11104,847
4	310	0,60	0,35	4050	4022	3981	4018	4017,600
5	100	0,15	0,55	4800	4766	4718	4762	4761,600
6	310	0,15	0,55	680	670	692	680	680,453
7	100	0,60	0,55	14804	14700	14552	14686	14685,568
8	310	0,60	0,55	4140	4028	4094	4088	4087,560

Показники очищення повітря при відносній вологості 35% та 55% при використанні рециркуляційного агрегату з змінною витратою повітря з фільтрувальною вкладкою типу HEPA11 зображено на Рис.3.8

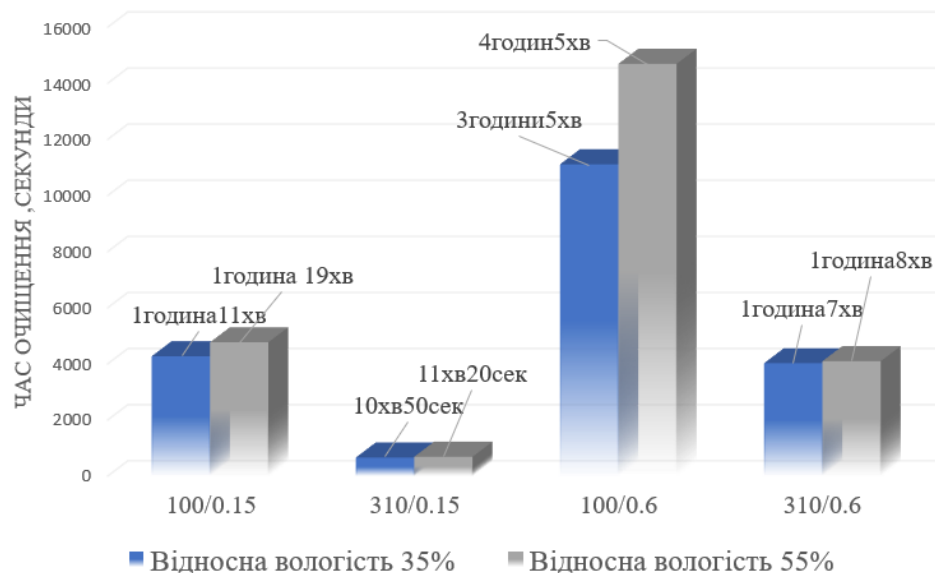


Рисунок 3.8. Показники очищення повітря при відносній вологості 35% та 55% при використанні рециркуляційного агрегату з змінною витратою повітря з фільтрувальною вкладкою типу HEPA11. Потужність агрегату 100м³/год та 310м³/год.

Результатом проведеної роботи можна є наступні висновки:

1. При відносній вологості повітря 35%, кількості повітря 100м³/год тривалість терміну очищення зменшується на 10 % (8хвилин) при невисокому рівні забруднення РМ_{2.5} та на 25% (60хвилин) при небезпечному рівні забруднення РМ_{2.5} в порівнянні з таким же процесом очищення при відносній вологості 55% в приміщенні, розрахунковий об'єм якого складав 54,9м³. При відносній вологості повітря 35%, кількості повітря 310м³/год тривалість терміну очищення зменшується на 5 % (30 секунд) при невисокому рівні забруднення РМ_{2.5} та на 10% (1хвилина30секунд) при небезпечному рівні забруднення РМ_{2.5} в порівнянні з таким же процесом очищення при відносній вологості 55% в приміщенні ,розрахунковий об'єм якого складав 54,9м³.

2. При повітрообміні в 2 крати зміна відносної вологості вплинула на тривалість очищення – на 1 годину, що вагомо відобразиться на подальшому забрудненні приміщення – при надходженні в наступну годину додаткових рівнів забрудненні система очищення повітря просто не зможе підтримувати рекомендовані ВООЗ безпечні рівні РМ_{2.5}.

3. При значній інтенсивності повітрообміну в 6 крат відносна вологість незначно впливає на процес очищення в рециркуляційному агрегаті з комбінованими фільтрами, але дозволяє небільше ніж за 1 годину забезпечити необхідний рівень якості повітря.

4. При збільшенні кратності повітря з 2 до 6 крат в офісному приміщенні при незначному забрудненні дрібнодисперсними частками РМ_{2.5} (рівень забруднення від 12,1 до 35,4 мкг/м³) швидкість очищення повітря до встановлених рекомендацій ВООЗ в 5 мкг/м³ збільшується в 8 разів, а термін очищення скорочується до 10 хвилин при незначному збільшенні електроспоживання рециркуляційного агрегату з 46Вт до 113Вт.

5. При збільшенні повітрообміну з 2 до 6 крат в офісному приміщенні при значному забрудненні дрібнодисперсними частками РМ_{2.5} (рівень забруднення від 55,5 до 260,4 мкг/м³) швидкість очищення повітря до встановлених рекомендацій

ВООЗ в 5мкг/м^3 збільшується в 4 рази, а термін очищення скорочується до 1 години 30 хвилин при цьому ефективність очищення повітря до 97%.

Виведене рівняння 3.19 дозволяє прогнозувати час очищення знаючи продуктивність повітроочищувача, рівень початкового забруднення $\text{PM}_{2.5}$ та навіть враховує відносну вологість повітря. При використанні фільтр калорифера з фільтрувальною вставкою HEPA H11 при низьких рівнях забруднення частками $\text{PM}_{2.5}$ достатньо 2 кратного повітрообміну щоб знизити рівні $\text{PM}_{2.5}$ до рівня рекомендованого ВООЗ та 6 кратного повітрообміну при небезпечних рівнях забруднення орієнтуючись на обмеження терміну очищення не більше 1 години. При збільшенні кількості повітря, що обробляється повітроочисником та незначному збільшенні електроспоживання цього агрегату можна досягти значного підвищення швидкості очищення повітря, що дозволить контролювати та якісно реагувати на зміну якості повітря в середовищі перебування людей та підтримувати необхідну якість повітряного середовища. Результати дослідження відображено в статті статті Приймак, О. & Макаренко, Л., [258].

3.3 Експериментальне визначення впливу природного осадження на CADR фільтр-теплообмінника.

Дрібнодисперсні частинки $\text{PM}_{2.5}$ є одним з п'яти ключових компонентів, що визначають індекс якості повітря (AQI), і вважаються одними з найбільш шкідливих забруднювачів для здоров'я людини. Контроль безпечних рівнів $\text{PM}_{2.5}$ у повітряному просторі, де перебуває людина, є критично важливим для запобігання хворобам та шкоді для здоров'я [259], [260].

Стандарти якості повітря Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA) базуються на середньому значенні концентрації $\text{PM}_{2.5}$ за останні 24 години, що використовується для розрахунку AQI. Хоча дані AirNow (офіційний сайт уряду США) оновлюються щогодини, вони відображають середнє значення концентрації $\text{PM}_{2.5}$ за останні 12 годин і не використовують фактичні показники за годину. Однак, дослідження, проведені в Азії в рамках аналізу міських житлових будинків Європи,

Азії, Африки та Північної Америки, показали, що концентрація $PM_{2.5}$ може зрости до 1000 мкг/м^3 за декілька хвилин [261].

Високі концентрації дрібнодисперсного пилу $PM_{2.5}$ в атмосферному повітрі, особливо в зимовий період через роботу систем опалення, створюють умови, за яких просте провітрювання приміщень є недостатнім для досягнення безпечних санітарних норм. Більше того, у таких умовах природне провітрювання може бути неефективним і навіть призвести до накопичення забруднення повітря всередині приміщення [262]. Це підкреслює необхідність застосування більш ефективних методів очищення та вентиляції для забезпечення належної якості повітря в приміщеннях.

Проблема забруднення атмосферного повітря частками $PM_{2.5}$ є особливо гострою в зимовий період, коли системи опалення значно підвищують концентрацію цих шкідливих речовин. У таких умовах природне провітрювання стає неефективним і навіть ризикованим, оскільки може призвести до збільшення концентрації забруднювачів всередині приміщень замість їх очищення.

Парадоксально, але саме системи вентиляції, залежно від їхньої потужності та класу фільтрації, потенційно можуть бути джерелом значного надходження забруднювачів у приміщення [263, 264].

У приміщеннях з мінімальною турбулентністю повітряних потоків (тобто без працюючих систем вентиляції та кондиціонування), природне осадження частинок під дією гравітаційних сил може становити значну частину процесу очищення.

Для кращого розуміння цього явища, було проведено дослідження природного процесу осадження пилу в приміщенні (в м. Києві) за двох різних рівнів забруднення повітря, без будь-яких систем, що створюють турбулентність. Дані цих замірів були занесені до Таблиці 3.4. Одночасно, було вивчено процес очищення повітря за допомогою повітроочисника (дані представлені в Таблиці 3.5).

Заміри концентрації $PM_{2.5}$ проводились через 1, 10, 30, 45 та 60 хвилин для кожного рівня початкового забруднення. Порівняння цих даних дозволить зробити

припущення щодо частки природного осадження в загальній ефективності роботи повітроочисника.

Таблиця 3.4. Концентрація часток $PM_{2.5}$ в повітрі при природньому осадженні.

L	Рівень забруднення $PM_{2.5}$ (початковий)	Рівень забруднення $PM_{2.5}$ (за 1 годину)	Відсоток часток, що осіли
м ³ /ГОД	мкг/м ³	мкг/м ³	%
Вентиляція відсутня	20	15	25
	180	93	48

Таблиця 3.5. Концентрація часток $PM_{2.5}$ в повітрі при роботі повітроочисника.

L	Рівень забруднення $PM_{2.5}$ (початковий)	Рівень забруднення $PM_{2.5}$ (за 1 годину)	Коефіцієнт фільтрації повітроочисника
м ³ /ГОД	мкг/м ³	мкг/м ³	%
100	20	5	75
	180	78,3	56
310	20	5	75
	180	5	97

За результатами дослідження визначено, що при природньому рівні вентиляції з низьким рівнем перемішування та низьким рівнем забруднення (20мкг/м³) повітряного середовища величина природного осадження $PM_{2.5}$ не перевищить 25% від початкового забруднення через 1 годину тривалості дослідів. А при значному рівні забруднення (180мкг/м³) величина природного осадження $PM_{2.5}$ не перевищить 48% від початкового забруднення, і навіть після 9 годин тривалості дослідів не досягне рівня рекомендованого ВООЗ. А в реальних умовах людина буде весь цей час під впливом наднормованої кількості шкідливих речовин. При тому, що перед дослідом повітря було очищене до рівня $PM_{2.5} = 4\text{мкг/м}^3$, а в зовнішньому природному повітрі рівень забруднення $PM_{2.5}$ складав від 13 до 16мкг/м³.

При роботі повітроочисника гравітаційне осадження часток буде відбуватися в місцях з відсутністю турбулентності, що створена роботою повітроочисника. При низькому рівні забруднення (20мкг/м³) повітроочисник обладнаний фільтрувальною

вставкою HEPA11 досягає вимог ВООЗ щодо рівня $PM_{2.5}$ при будь-якому досліджуваному повітрообміні через 1 годину тривалості досліді.

При двох кратному повітрообміні та значному рівні забруднення (180 мкг/м^3) через одну годину кількість $PM_{2.5}$ скоротилась з 180 мкг/м^3 до $78,3 \text{ мкг/м}^3$, що теж є небезпечним рівнем забруднення $PM_{2.5}$. Бажаного рівня часток $PM_{2.5}$ вдалося досягти через 5 годин тривалості досліді, що не може бути зараховано як успішний результат. Досліджено продовжено в підпункті 3.4.

Потрібні подальші дослідження з отриманням даних щодо створення потоків турбулентності та застійних зон.

3.4 Експериментальне дослідження CADR фільтр-теплообмінника з фільтром H11.

У дослідженні встановлено залежність ефективності очищення фільтр-теплообмінника з HEPA-фільтром (далі повітроочишувач) від змін робочих параметрів установки та рівнів забруднення повітряного середовища дрібнодисперсними частинками $PM_{2.5}$ в реальних умовах без зміни фізичних параметрів повітряного середовища (сталі температура, вологість та кількість CO_2). Дослідження було спрямоване на оцінку ефективності повітроочишувача в умовах перевищення фонових забруднень зовнішнього повітря дрібними частинками $PM_{2.5}$ в $16,7 \text{ мкг на } 1 \text{ м}^3$. Завдання полягало у визначенні реального CADR пристрою при очищенні повітря до рівня, рекомендованого ВООЗ (5 мкг/м^3), за умови обмеження часу очищення однією годиною. Докладно описано в матеріалах конференції [21] та статті Макаренко, Л., & Приймак, О [265].

Розглянемо формули, які описують теоретичний CADR.

Якщо коефіцієнт ефективності фільтра визначається за формулою:

$$E_{\text{фільтра}} = \frac{N_{\text{вхід,фільтра}} - N_{\text{вихід,фільтра}}}{N_{\text{вхід,фільтра}}} \cdot 100\% \quad (3.20)$$

де $N_{\text{вхід,фільтра}}$, $N_{\text{вихід,фільтра}}$ – концентрація часток на вході та після фільтра [266].

То показник реальної ефективності повітроочищувача CADR визначається за формулою :

$$CADR = E \cdot L = L \cdot E_{\text{оч.}} - V \cdot E_{\text{осад.}} = L \cdot \frac{N_{\text{вхід.оч}} - N_{\text{вихід.оч}}}{N_{\text{вхід.оч}}} - V \cdot \frac{N_{\text{вхід.осад.}} - N_{\text{вихід.осад.}}}{N_{\text{вхід.осад.}}} \quad (3.21)$$

де $E_{\text{оч.}}$ – ефективність очисника;

L – потужність (продуктивність) повітроочисника, м³/год;

V - об'єм приміщення, м³ [267].

Концентрація часток в момент часу визначається за формулою:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{E \cdot L \cdot t}{V}} = N_0 \cdot e^{-\frac{CADR \cdot t}{V}}; \quad (3.22)$$

де N_t - концентрація часток в момент часу t ;

N_0 – початкова концентрація часток ;

t – час роботи [268].

Експериментальне визначення показника CADR проводилося в контрольованих умовах. Пробопідготовка здійснювалася в приміщенні з площею 20 м² та висотою стелі 2.75 м протягом січня 2024 року. Було прийнято допущення про відсутність внутрішніх джерел забруднення. Віконні прорізи були герметично закриті. Система опалення функціонувала в штатному режимі. Температура повітря підтримувалася на рівні 25°C, відносна вологість становила 40%. Концентрація CO₂ знаходилася в діапазоні 400-500 ppm. Рівень забруднення зовнішнього повітря на момент проведення дослідження становив 16,7 мкг/м³. Цей комплекс умов забезпечує стандартизоване середовище для достовірної оцінки ефективності повітроочисного обладнання.

Повітроочищувач повітря складався з вентилятора, фільтра G4, фільтра F7 фільтра з активованим вугіллям, фільтра HEPA 11.

Метою цього дослідження є кількісне визначення реального показника подачі чистого повітря (CADR) повітроочищувачем. Це включає оцінку його фактичної продуктивності та дійсного об'єму очищеного повітря, який пристрій здатен генерувати за одиницю часу в умовах заданого рівня забруднення.

Методологія вимірювання CADR при очищенні від часток $PM_{2.5}$.

Процедура вимірювання показника CADR для дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ передбачає реалізацію двох послідовних етапів:

1) Базові вимірювання без функціонування повітроочищувача: на цьому етапі проводяться заміри динаміки концентрації забруднюючих речовин в повітрі за відсутності роботи повітроочищувача. Дослідження здійснюється при двох початкових рівнях забруднення: 20 мкг/м^3 та 180 мкг/м^3 . Ці вимірювання дозволяють встановити швидкість природного осідання частинок.

2) Експериментальні вимірювання з активним повітроочищувачем: після завершення базових вимірювань, дослідження повторюється за ідентичних параметрів навколишнього середовища (температура, відносна вологість, початковий рівень забруднення), але з активним повітроочищувачем. Тестування пристрою проводиться при двох режимах продуктивності: $100 \text{ м}^3/\text{год}$ та $310 \text{ м}^3/\text{год}$.

Ця двоетапна методологія забезпечує можливість порівняльного аналізу ефективності пасивного (природного) очищення повітря з активним видаленням забруднень повітроочищувачем при різних робочих параметрах.

Перед дослідом з природним осадженням часток попередньо очищуємо повітря до значення $PM_{2.5}=4 \text{ мкг/м}^3$. Потім створюємо в кімнаті концентрацію часток $PM_{2.5}$. Проводимо виміри зміни концентрації часток в певні моменти часу: від 1хвилини до 5 годин.

Другим етапом створюємо туж саму концентрацію часток $PM_{2.5}$, як і в першому етапі та вмикаєм повітроочищувач. Вимірюємо зміну концентрації часток в повітрі з тим самим часовим інтервалом. Дані наведені в Таблиці 3.6 та на Рисунку 3.9.

В даному випадку цікавий лише часовий проміжок в одну годину. Тому отримаємо показники параметрів в даний момент часу і визначимо які параметри установки дозволили отримати бажані 5 мкг/м^3 часток $PM_{2.5}$.

Таблиця 3.6. Зміну концентрації часток в повітрі з часовим інтервалом.

Метод очищення	Природне осадження	100, м³/год	310, м³/год	Природне осадження	100, м³/год	310, м³/год
Початкове забруднення	Індекс якості повітря 2 (незначний) $PM_{2.5} = 20 \text{ мкг/м}^3$ (до 3 021 486 частинок/фут)			Індекс якості повітря 6 (небезпечний) $PM_{2.5} = 180 \text{ мкг/м}^3$ (до 29 906 327 частинок/фут)		
t, час	мкг/м³			мкг/м³		
Початкове	20,0	18,9	20,0	114,0	114,0	115,0
10 хв.	18,0	16,7	4,0	110,0	96,2	79,2
30 хв.	17,0	11,0	-	99,0	90,9	19,0
45 хв.	17,0	7,0	-	96,0	81	9,0
1 год.	15,0	5,0	-	93,0	78,3	5
2 год.	11,0	-	-	55,0	36,0	4
3 год.	9,0	-	-	45,0	21,0	-
4 год.	6,0	-	-	29,0	12,0	-
5 год.	5,0	-	-	19,0	5,0	-

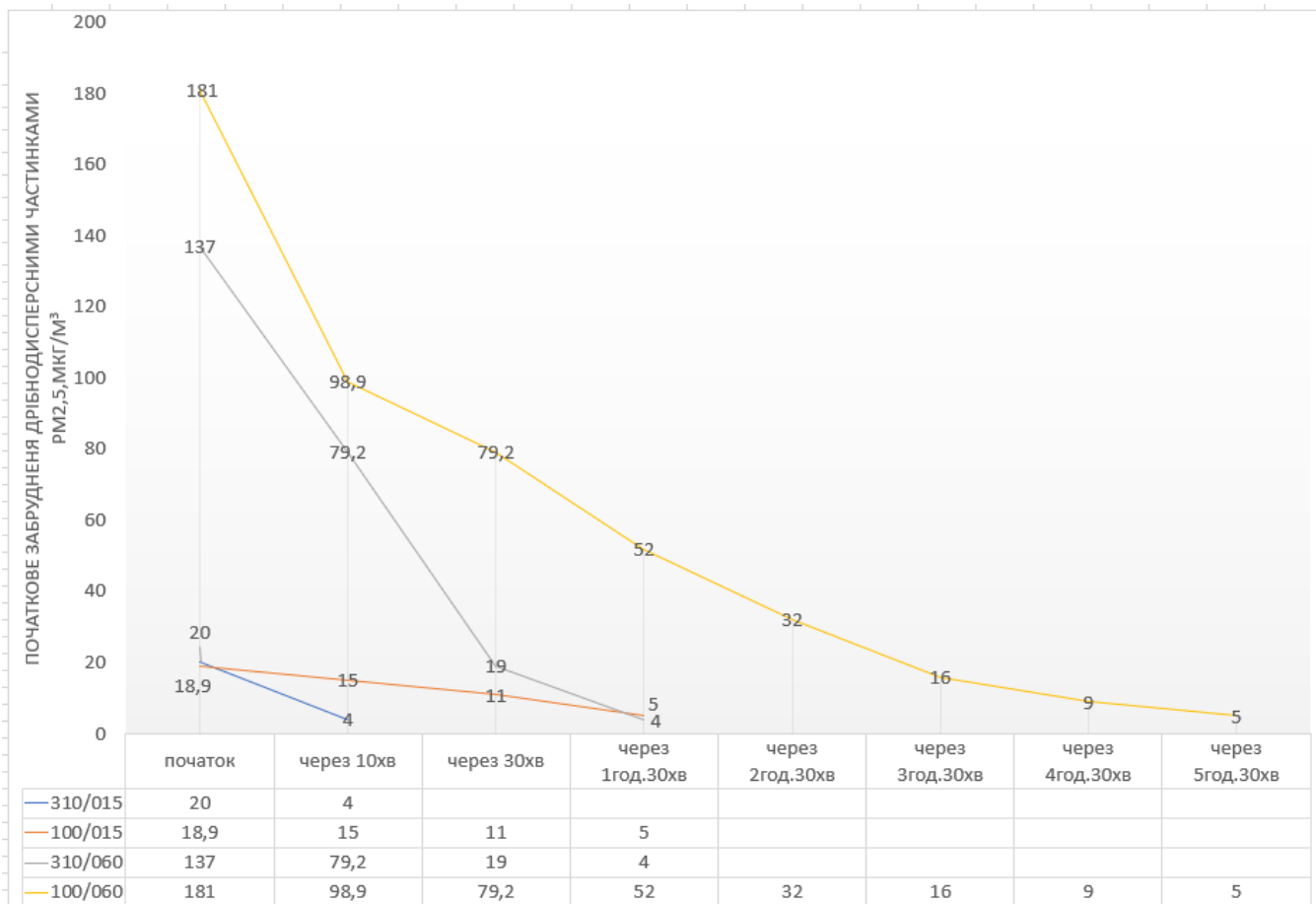


Рис.3.9. Показники очищення повітря в приміщенні при використанні рециркуляційного агрегату з змінною витратою повітря з фільтрувальною вкладкою типу HEPA11.

На Рисунку 3.10 візуалізовано порівняльний аналіз тривалості процесу очищення повітря у приміщенні. Дослідження охоплює два сценарії: природне осідання забруднюючих речовин та очищення повітря за допомогою повітроочисника зі змінною витратою повітря, оснащеного фільтрувальною вставкою типу HEPA11.

Це зіставлення дозволяє оцінити, наскільки значно використання активної системи фільтрації, зокрема з високоефективним HEPA11 фільтром, прискорює процес досягнення заданого рівня чистоти повітря порівняно з пасивними механізмами осадження.

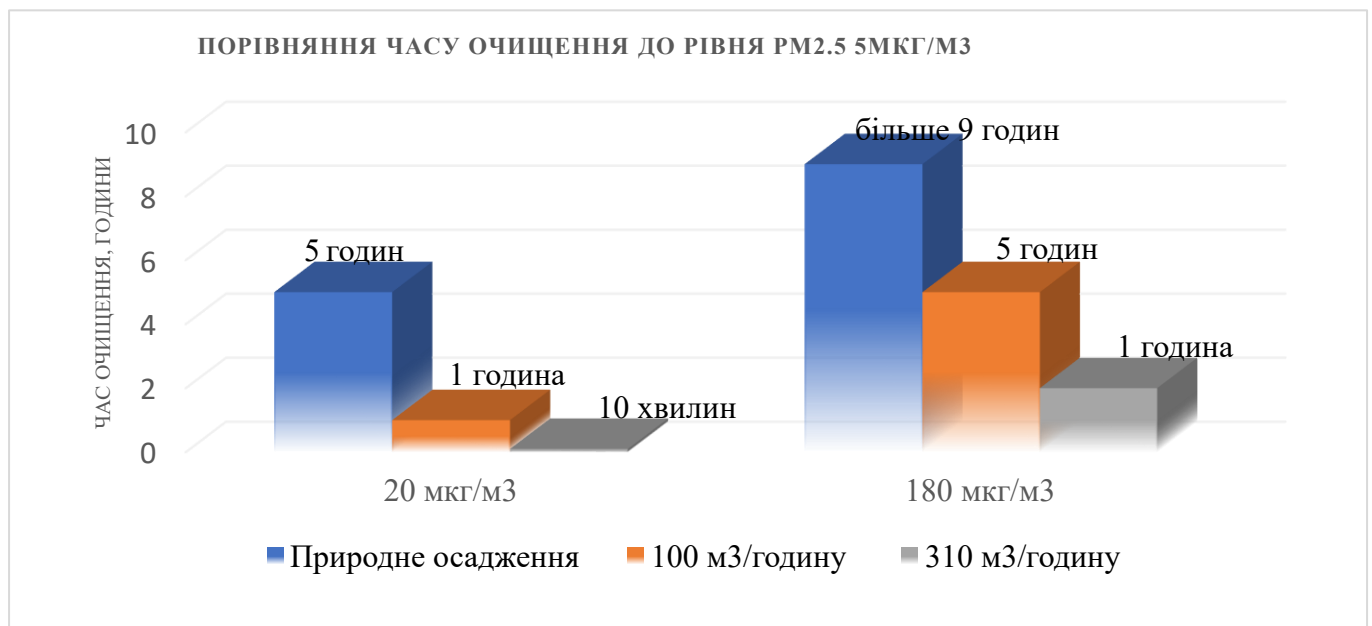


Рис.3.10.Показники очищення повітря до рівня $PM_{2.5} = 5 \text{ мкг/м}^3$ в приміщенні при використанні рециркуляційного агрегату.

Використовуючи формулу (3.21), було розраховано показник CADR (Clean Air Delivery Rate) для кожного досліджуваного випадку. Розрахунки проводились для фіксованого об'єму приміщення $V = 55 \text{ м}^3$ протягом одного періоду роботи повітроочищувача.

Отримані результати розрахунків представлені в Таблиці 3.7.

Таблиця 3.7. Зміну концентрації часток в повітрі з часовим інтервалом.

Рівень забруднення PM _{2.5}	Частка фільтрації повітроочисника	Частка осідання часток	L	CADR		Кратність повітрообміну
мкг/м ³	%	%	м ³ /год	м ³ /год	1/год	1/год
20	73	25	100	59	1,1	1,8
	80	25	310	234	4,3	5,6
180	31	18	100	21	0,4	1,8
	94	18	310	282	5,1	5,6

Результати проведеного дослідження однозначно свідчать, що збільшення продуктивності повітроочишувача корелює зі скороченням часу, необхідного для очищення повітря, незалежно від початкової концентрації PM_{2.5}. Для ефективного очищення протягом однієї години, особливо за низьких рівнів забруднення PM_{2.5}, розрахункове значення CADR має становити щонайменше 50% від номінальної продуктивності пристрою; менші значення CADR можуть призвести до кумуляції забруднювачів, нівелюючи функцію очисника.

Зокрема, при незначному забрудненні PM_{2.5} (20 мкг/м³) у житлових та офісних приміщеннях, де достатньо двократної кратності повітрообміну, CADR повітроочисника досягав 59% його продуктивності (за L=100 м³/год, CADR=59 м³/год), враховуючи 73% ефективність фільтрів та 25% природного осідання часток. При значному забрудненні PM_{2.5} (180 мкг/м³) у тих самих умовах необхідна шестикратна кратність повітрообміну з високою інтенсивністю перемішування повітря та високоефективною фільтрацією, при цьому CADR становив 91% продуктивності пристрою (за L=310 м³/год, CADR=59 м³/год), враховуючи 94% ефективність фільтрів та 18% природного осідання часток; інші тестовані параметри не забезпечували досягнення цільового часу очищення протягом однієї години.

Дослідження також довело, що процеси природного осідання та рівень зовнішнього забруднення є недостатніми для ефективного очищення повітря без застосування механічної фільтрації за будь-яких рівнів забруднення PM_{2.5}, оскільки

осілі частки (25-48% $PM_{2.5}$) легко повертаються в повітряне середовище при будь-яких повітряних потоках. Встановлено, що збільшення кратності повітрообміну з 2 до 6 разів в офісному приміщенні при незначному забрудненні $PM_{2.5}$ (12.1-35.4 $мкг/м^3$) прискорює очищення повітря до рекомендованих ВООЗ 5 $мкг/м^3$ у 8 разів, скорочуючи термін очищення до 10 хвилин з незначним зростанням електроспоживання рециркуляційного агрегату (з 46 Вт до 113 Вт); при значному забрудненні $PM_{2.5}$ (55.5-260.4 $мкг/м^3$) швидкість очищення збільшується у 4 рази, скорочуючи термін очищення до 1 години 30 хвилин при ефективності очищення до 97%.

Отже, підвищення об'єму оброблюваного повітря повітроочищувачем за незначного збільшення електроспоживання суттєво підвищує швидкість очищення повітря, що дозволяє ефективно контролювати та оперативно реагувати на зміни якості повітря у середовищі перебування людей.

3.5 Експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі фільтр-теплообмінника.

Теорія теплопровідності ґрунтується на концепції безперервності матеріального середовища. У цьому контексті, закон Фур'є є наріжним співвідношенням, що встановлює лінійну залежність між густиною теплового потоку та градієнтом температури. Згідно з законом Фур'є, вектор густини теплового потоку q прямо пропорційний градієнту температури ∇T . Математично це описується формулою:

$$q = -\lambda \cdot \nabla T; \quad (3.23)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Коефіцієнт теплопровідності λ слугує кількісною мірою здатності речовини проводити теплову енергію, таким чином характеризуючи інтенсивність процесу теплопередачі в матеріалі шляхом теплопровідності. Знак мінус у законі Фур'є вказує на те, що вектор густини теплового потоку q є антипаралельним вектору градієнта температури ∇T , тобто тепло передається в напрямку зменшення температури.

Скалярна величина вектора густини теплового потоку — це фізична величина,

яка кількісно характеризує об'єм теплоти, що проходить крізь одиницю площі за одиницю часу, у напрямку, перпендикулярному до цієї площини. По суті, це чисельне значення теплового потоку, що не враховує його просторовий напрямок. Знання скалярної величини теплового потоку дозволяє кількісно оцінити швидкість теплопередачі через матеріал.

Скалярна величина вектора густини теплового потоку чисельно дорівнює модулю цього вектора. Таким чином, якщо вектор густини теплового потоку позначено як q , його скалярна величина буде $|q|$. Отже, скалярна величина теплового потоку визначається за формулою :

$$|q| = \lambda \cdot |\nabla T|, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.24)$$

Коефіцієнт теплопровідності є функцією хімічної природи речовини та термодинамічних параметрів, таких як густина, вологість, тиск і температура.

Трубка по якій рухається холодний теплоносій розглядається як одношарова однорідна плоска стінка товщиною δ , на внутрішній і зовнішній поверхнях якої підтримуються температури t_{c1} й t_{c2} , причому $t_{c1} < t_{c2}$ (рис. 3.1). Температура змінюється лінійно від внутрішньої до зовнішньої поверхні - за однією координатою x . Коефіцієнт теплопровідності $\lambda \approx \text{const}$. Тепловий потік в цьому випадку, згідно закону Фур'є, визначається за формулою :

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} = \lambda \cdot \frac{(t_{c2} - t_{c1})}{\delta} = \frac{(t_{c2} - t_{c1})}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{(t_{c2} - t_{c1})}{R_{\lambda}}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3.25)$$

де $(t_{c2} - t_{c1}) = \Delta t$, причому $t_{c1} < t_{c2}$;

R_{λ} - внутрішній термічний опір теплопровідності стінки, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

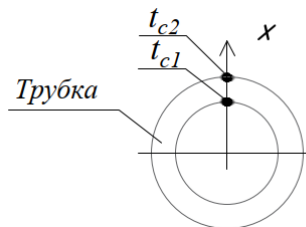


Рисунок 3.8- Лінійна зміна температура по товщині однорідної стінки

Тепловий потік (потужність теплового потоку) визначається за формулою:

$$Q = q \cdot F = \lambda \cdot \frac{(t_{c2} - t_{c1})}{\delta} \cdot F \quad (3.26)$$

Де q – тепловий потік, Вт/м²;

F – площа теплообміну, м²;

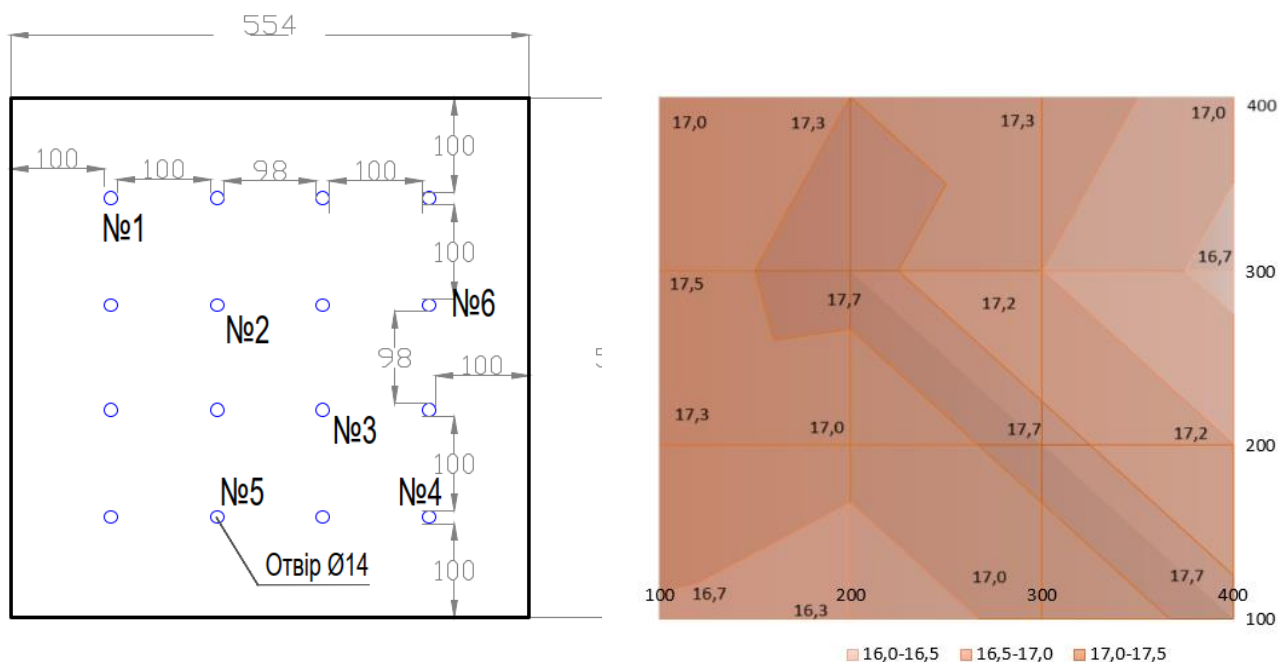
λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

ΔT – різниця температур, С.

3.5.1. Визначення коефіцієнту теплопередачі непрямим методом .

Коефіцієнт тепловіддачі є ключовою характеристикою теплообміну, яка відображає інтенсивність передачі теплоти між твердою поверхнею та рухомою рідиною або газом. Для стаціонарного режиму теплообміну коефіцієнт тепловіддачі визначався спрощеним експериментальним методом. Детальні результати цього дослідження представлені у статті Макаренко, Л. [269].

Методологія: Процес включав фіксацію температур на вході та виході трубок №1-№6, а також вимірювання температури на вході в очисну частину фільтр-теплообмінника та на його виході (як показано на Рис. 3.11). Знаючи товщину трубки δ та її коефіцієнт теплопровідності λ (який вважається незалежним від температури та однаковим по всій товщині стінки), значення коефіцієнта тепловіддачі фільтр-теплообмінника було розраховано за формулою теплопередачі (2.41), що використовується для розрахунку теплового потоку через перегородку (стінку) між двома середовищами з різними температурами, де коефіцієнт теплопередачі k враховує всі види теплообміну: конвекцію з обох боків стінки та теплопровідність самої стінки. Ця формула називається формулою теплопередачі або рівнянням теплопередачі. Вона є узагальненням закону Ньютона-Ріхмана (що стосується тепловіддачі) та закону Фур'є (що стосується теплопровідності) і застосовується для розрахунку загального теплового потоку через складніші системи, де враховується як теплопровідність через матеріал, так і тепловіддача від однієї поверхні до рідини/газу та від рідини/газу до іншої поверхні.



а б
Рис.3.11. Градієнт температур на поверхні:
а - схема розташування вимірних точок стенду; б—діаграма ізотерм.

Дані вимірів температури теплоносіїв — як холодного, так і гарячого — на вході та виході з фільтр-теплообмінника було систематизовано та внесено до Таблиць 3.8 та 3.9 відповідно.

Таблиця 3.8. Таблиця температур гарячого теплоносія .

	Температура гарячого теплоносія на вході в теплообмінник t_{r1}	Температура гарячого теплоносія на виході з теплообмінника, t_{r2}
Вимір №1	+20С	17,6С
Вимір №2	+20С	17,0С
Вимір №3	+20С	17,5С

Таблиця 3.9. Таблиця температур холодного теплоносія .

Температура холодного теплоносія							
	на вході, t_{x1}	на виході з теплообмінника, t_{x2}					
		Трубка 1	Трубка 2	Трубка 3	Трубка 4	Трубка 5	Трубка 6
Вимір №1	-21	+17	+18	+17	+17	+16	+17
Вимір №2	-22	+17	+17	+18	+18	+17	+17
Вимір №3	-21	+17	+18	+18	+18	+16	+16

Знаючи кількість трубок, їх площу перерізу та швидкість повітря на виході з кожної трубки, розраховано загальний об'єм повітря, що проходить через трубки.

Результати вимірів швидкості повітря, необхідні для цих розрахунків, представлені в Таблиці 3.10.

Таблиця 3.10. Таблиця швидкості руху теплоносія в трубах.

	Трубка 1	Трубка 2	Трубка 3	Трубка 4	Трубка 5	Трубка 6
Вимір №1	3,3м/с	3,5м/с	3,4м/с	3,2м/с	3,4м/с	3,2м/с
Вимір №2	3,3м/с	3,6м/с	3,6м/с	3,3м/с	3,5м/с	3,3м/с
Вимір №3	3,2м/с	3,5м/с	3,5м/с	3,2м/с	3,4м/с	3,2м/с

Внутрішній діаметр труб приймається як для мідних труб 15,88x0,89
 $d_b=0,01588\text{м}$:

а) перетин однієї труби (в перетині), м^2 :

$$f_T = 0,785 \cdot d_b^2, \quad (3.27)$$

б) загальний перетин каналів для проходження теплоносія всередині труб, м^2 :

$$f_d = n_{\text{заг}} \cdot f_T, \quad (3.28)$$

в) Дійсна об'ємна витрата холодного теплоносія в трубах при середній розрахунковій швидкості, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$L_d = f_d \cdot v_x, \quad (3.29)$$

Тепловий потік, який може бути відібраний холодним теплоносієм від гарячого, був визначений у Розділі 2 за формулами (2.3) та (2.4). Спочатку він становив $Q_x=0,5871 \text{ кВт}$.

Після підстановки дійсних значень температури та середньої розрахункової швидкості у ті ж формули, отримано уточнене значення теплового потоку. Воно складає $Q_g=0,5482 \text{ кВт}$ для гарячого теплоносія та $Q_x=0,5485 \text{ кВт}$ для холодного теплоносія.

Середня розрахункова температура гарячого теплоносія становить $t_1=18,4 \text{ }^\circ\text{C}$ що еквівалентно $T_1=291,55\text{K}$ згідно з формулою (2.6).

Середня розрахункова температура холодного теплоносія становить $t_2=-2,45 \text{ }^\circ\text{C}$ що еквівалентно $T_2=270,7 \text{ K}$ за формулою (2.7).

Середня дійсна швидкість гарячого теплоносія становить $W_1 = 1,5$, м/с, визначена за формулою Гей-Люссака (2.8). Середня дійсна швидкість холодного теплоносія $W_2 = 3,34$ м/с.

Використовуючи табличні дані фізичних параметрів, представлені у Таблиці 3.11, будуть визначені відповідні значення фізичних величин для заданих розрахункових температур t_1, t_2 .

Таблиця 3.11. Фізичні параметри сухого повітря при $P = 1,01325 \cdot 10^5$ Па.

Температура теплоносія	Питома теплоємність	Питома об'ємна ізобарна теплоємність	Коефіцієнт теплопровідності	Коефіцієнт кінематичної в'язкості	Число Прандтля
$t, ^\circ\text{C}$	$C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$C_{pm2}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$\lambda, \cdot 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\nu, \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
-22	1,009	1,299	2,28	12,79	0,716
-2,45	1,005	1,299	2,4256	13,11	0,708
+18,4	1,005	1,299	2,5772	14,932	0,703
+20	1,005	1,299	2,59	15,06	0,703

Для визначення фізичних параметрів повітря за заданої температури $t_1 = 18,4^\circ\text{C}$ застосовано метод апроксимації, що базується на використанні відомих значень наближених параметрів. У розрахунках враховуватимуться фізичні параметри сухого повітря при парціальному тиску $P_{\text{атм}} = 1,01325 \cdot 10^5$ Па. Приймаємо середній температурний напір, $^\circ\text{C}$ для перехресної схеми відносного руху теплоносія становить $\overline{\Delta t} = 286,21\text{K}$, за формулою (2.24).

Для зовнішнього поперечного руху гарячого теплоносія відносно труб, характерний розмір d приймається рівним зовнішньому діаметру трубки, який становить $d = d_3 = 0,01588\text{м}$. Число Рейнольдса (Re) для гарячого теплоносія за його середньої температури розраховується відповідно до формули (2.9).

Натомість, для внутрішнього руху холодного теплоносія всередині труб, характерний розмір d відповідає внутрішньому діаметру трубки, що дорівнює $d = d_b = 0,0141\text{м}$. За цих умов, число Рейнольдса для холодного теплоносія при температурі $t_2 = -2,45^\circ\text{C}$ становить $Re_{-2,45} = 3592$.

Число Нуссельта (Nu) для внутрішнього руху холодного теплоносія всередині труб становить $Nu_{x2} = 12,57$ при $Re_{-2} = 3592$. Оскільки для газів число Прандтля (Pr) є приблизно сталою величиною $Pr \approx \text{const}$, то для повітря застосовується специфічна формула (2.13), яка описує теплообмінні процеси для газів.

Використовуючи число Нуссельта (Nu), розраховано середнє значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією $\alpha_x = 21,62, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ за допомогою формули (2.37).

Три ключові параметри, що впливають на тепловий потік, це площа поверхні теплообміну (F), коефіцієнт теплопередачі (k) та різниця температур (ΔT). Формула (2.41) є спрощеним виразом, що застосовується для стаціонарного режиму теплообміну, коли температура в системі залишається незмінною з часом. Це дозволяє визначити дійсний коефіцієнт теплопередачі $k = 15,96 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Дійсний коефіцієнт тепловіддачі до гарячого теплоносія α_r визначено на основі емпіричних даних. Для цього використовувалися встановлене значення дійсного коефіцієнта теплопередачі $k = 15,96 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ та коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від холодної стінки $\alpha_x = 21,62 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Розрахунок проводився для плоскої стінки, якщо $\frac{d_3}{d_b} < 2$ і становить $\alpha_r = 60,97 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ за формулою (2.38).

Дійсне число Нуссельта для гарячого теплоносія було визначено на основі значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією $\alpha_r, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ для першого ряду труб та становить $Nu_{18,4} = 38,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, за формулою (2.28).

Аналогічно було проведено серію експериментів із варіюванням швидкості руху гарячого теплоносія. Експериментально отримані дані, що ілюструють залежність числа Нуссельта (Nu) від числа Рейнольдса (Re), представлені на Рис. 3.12.

Ці дані стосуються розрахунку на один ряд коридорного пучка труб та описуються емпіричним рівнянням у вигляді степеневої залежності числа Нуссельта від числа Рейнольдса :

$$Nu = 0,3284 \cdot Re^{0,629}; \quad (3.30)$$

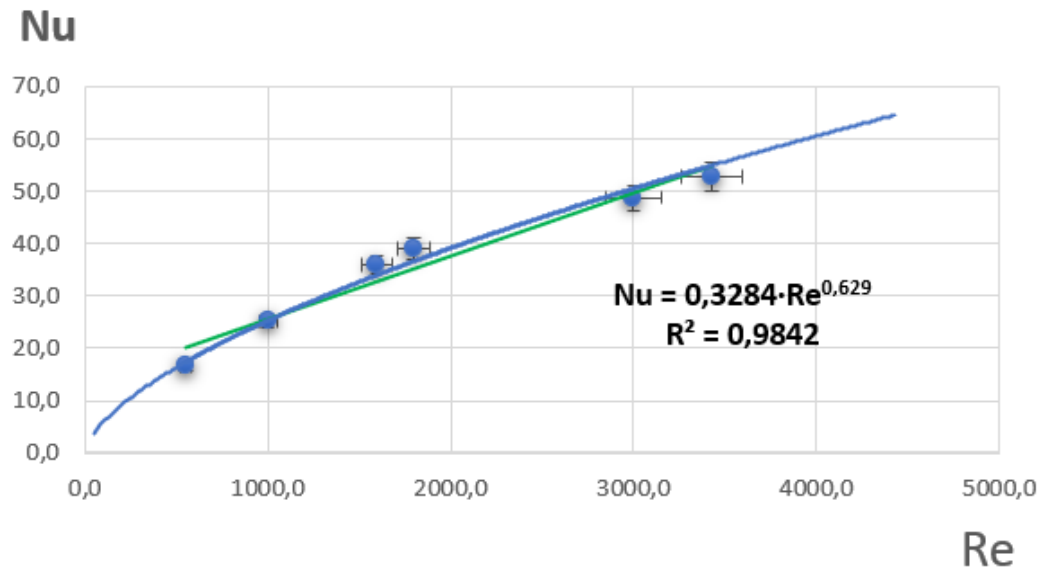


Рис.3.12. Експериментальні значення числа Нуссельта та числа Рейнольдса для коридорного пучка труб. Швидкість повітряного потоку перед коридорним пучком змінювалась в діапазоні 1...3,5 м/с, , при числах Re 700 ÷ 3500 і $Pr=0,73$.

Дане рівняння застосовується для коридорного пучка труб за умови, що швидкість повітряного потоку перед пучком знаходиться в діапазоні від 1 до 3.5 м/с. Його дійсність підтверджена для чисел Рейнольдса (Re) в межах 700 ÷ 3500 і при сталому значенні числа Прандтля (Pr) рівному $Pr=0,73$.

Для верифікації моделей турбулентності були використані експериментальні дані з двох незалежних джерел: дослідження Горобця В.Г. та співавторів (2017) [270] охоплювали коридорний пучок труб зі швидкістю повітряного потоку 5–15 м/с, числами Рейнольдса (Re) 3000–6000 та постійним числом Прандтля (Pr) 0.73; тоді як дані Мейріса А.Ж. (2018) [271] стосувалися шахового пучка труб та обтікання одиночної труби, де швидкість потоку варіювалась від 1 до 9 м/с при температурі 15–20°C, а число Рейнольдса (визначене за діаметром трубки) змінювалося в інтервалі 3000–25000.

Для підвищення точності розрахунків умов турбулентності необхідне збільшення обсягу експериментальних даних, отриманих при варіюванні швидкості

руху гарячого теплоносія. Спостерігається задовільне узгодження даних із середнього теплообміну для гладкотрубного пучка з результатами досліджень професора Горобця В.Г. [270], причому максимальна розбіжність становить 10%. Ця розбіжність може бути пояснена відмінностями у виборі швидкості теплоносія в різних експериментах. Ефективність фільтр-теплообмінника E складає 93% за формулою:

$$E = \frac{Q}{Q_{\max}} \cdot 100\%; \quad (3.31)$$

Де Q – експериментальне значення теплового потоку, кВт.
 $Q_{\max}$ – теоретично розрахований тепловий потік, кВт.

3.5.2. Визначення рівняння регресії коефіцієнту тепловіддачі методом планування повного факторного фізичного експерименту.

Задачу полягає у вивченні динаміки температурного режиму холодного теплоносія в системі фільтр-теплообмінника. Це дослідження передбачає аналіз залежності температури нагріву зазначеного теплоносія від його початкової температури. Ключовим аспектом є оцінка впливу варіацій швидкості руху холодного теплоносія в межах фільтр-теплообмінника на його кінцеву температуру після нагріву. Описано процес нагрівання холодного теплоносія у фільтр-теплообміннику, що функціонує в приміщенні з наступними параметрами: площа $S=20 \text{ м}^2$, висота $h=2.75 \text{ м}$, та об'єм $V=55 \text{ м}^3$. Фільтр – теплообмінник з пропускною потужністю, що варіюється в діапазоні від $300 \text{ м}^3/\text{год}$ до $1000 \text{ м}^3/\text{год}$. Цей агрегат інтегрований з високоефективним фільтром H11, який забезпечує ефективність очищення до 85% частинок розміром до 0.3 мкм .

У контексті експериментального дослідження, діапазон варіювання кожного з вхідних факторів (що є незалежними один від одного) встановлюється від 10% до 60% від їхньої загальної можливої області варіювання. Це дозволяє охопити значний сегмент робочих умов для всебічного аналізу.

Процес нагрівання теплоносія відбувається під впливом кількох ключових параметрів. До них належать початкова температура холодного та гарячого теплоносіїв, швидкість їх руху через фільтр-теплообмінник та пропускна потужність фільтр-теплообмінника. Ці фактори прямо впливають на інтенсивність теплообміну та, відповідно, на кінцеву температуру нагріву теплоносія. Взаємодія між цими змінними та особливості конструкції фільтр-теплообмінника (включаючи фільтр Н11, який хоч і не є безпосередньо теплообмінним елементом, але впливає на загальний опір потоку та, можливо, на аеродинамічні характеристики, що можуть опосередковано впливати на теплообмін) визначають ефективність і стабільність процесу нагрівання.

Аналіз цього процесу вимагає врахування як теплофізичних властивостей теплоносія, так і аеродинамічних характеристик системи, що включає рециркуляційний агрегат та фільтраційний елемент.

Дослідження проведено за методологією повного факторного фізичного експерименту для дворівневих співвідношень факторів, що дозволить вивчити вплив кожного з них та їх взаємодії на процес нагрівання.

Вхідними параметрами визначено швидкість руху холодного теплоносія в трубках та пропускну потужність фільтр-теплообмінника, яка варіюватиметься в діапазоні від 400 м³/год до 800 м³/год. Для кожного фактора встановлені два рівні, що вимагатиме проведення експериментальних випробувань для побудови матриці планування та подальшого аналізу ефектів.

У межах експериментального дослідження вихідними параметрами є температура нагріву холодного теплоносія, що фіксується при сталій початковій температурі, а також коефіцієнт тепловіддачі, який визначається непрямим методом. Важливо зазначити, що фільтр-теплообмінник, як ключовий компонент системи, функціонує у двох різних режимах, що забезпечують дві різні швидкості руху теплоносія.

Параметр, позначений як $L(\text{м}^3/\text{год})$, враховує його вплив на отримані результати.

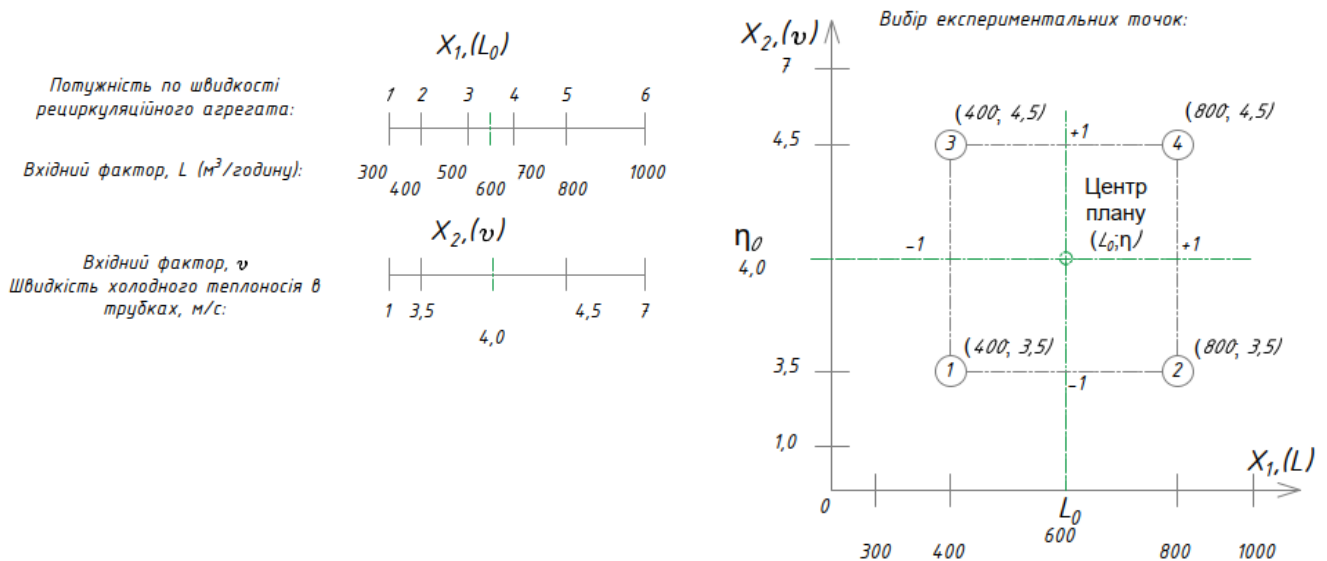


Рисунок 3.13. Схема факторного простору для ПФЕ при двох факторах : X_1 -пропускна потужність повітрообробної установка (400 та 800 $\text{м}^3/\text{год}$); X_2 -швидкість холодного теплоносія в трубках (3,5..4,5м/с)

Центральні точку плану: $L^0=600\text{м}^3/\text{год}$; Крок вимірювання $\Delta L=200$; $v^0=4$. Крок вимірювання $\Delta v=1,0$.

Реалізація дослідження базується на чотирьох експериментальних точках ($N=4$), причому кожний дослід був повторений тричі ($l=3$). Цей підхід забезпечив підвищену вірогідність отриманих результатів, сприяв їхній статистичній оцінці та мінімізував вплив неконтрольованих зовнішніх факторів на експериментальний процес.

Загальна кількість проведених дослідів склала $N \times l = 4 \times 3 = 12$. Для запобігання систематичним помилкам порядок виконання дослідів був рандомізований і представлений у трьох серіях: перша серія ($m=1$) — (3,1,2,4); друга серія ($m=2$) — (4,2,1,3); третя серія ($m=3$) — (1,3,4,2).

Матриця планування повного факторного експерименту для двох факторів деталізована в Таблиці 3.12.

Таблиця 3.12. Матриця ПФЕ для двох вхідних факторів.

№досліджу	Фіктивна величина	Планування		Взаємодія факторів	Значення отриманої величини
y	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	y
1	+1	-1	-1	+1	y ₁
2	+1	+1	-1	-1	y ₂
3	+1	-1	+1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	+1	y ₄

Отримані в ході експерименту дані щодо температури холодного теплоносія на виході з теплообмінної частини фільтр-теплообмінника, а також розрахункові значення коефіцієнта тепловіддачі, зафіксовані в Таблиці 3.13. На поточному етапі ці значення округлені до тисячних. Подальше обґрунтування такого рівня точності буде надано після визначення довірчих інтервалів для вимірювань..

Таблиця 3.13. Параметри вихідних величин ПФЕ (планування типу 2).

Планування			Результати вимірів									
	Фактор		t(температура холодного теплоносія на виході), °C					α (коэф.тепловіддачі), Вт/(м²·K)				
	L, м³/год	v (м/с)	m=1	m=2	m=3	$\bar{t}$	$\hat{t}$	m=1	m=2	m=3	$\bar{\alpha}$	$\hat{\alpha}$
1	400	3,5	-7,0	-7,1	-6,9	-7,0	-6,883	6,67	6,61	6,72	6,67	6,7318
2	800	3,5	+18	+18	+17,9	18,0	17,900	46,37	46,37	45,62	46,12	45,6496
3	400	4,5	-6,6	-6,4	-6,6	-6,5	-6,650	6,89	7,01	6,89	6,93	6,8636
4	800	4,5	17,7	17,6	17,8	17,7	17,767	44,22	43,57	44,91	44,91	44,7060

Розрахункові коефіцієнти рівняння регресії для кожного з досліджуваних вихідних факторів, для температури нагріву холодного теплоносія та коефіцієнта тепловіддачі, детально представлені в Таблиці 3.14.

Таблиця 3.14. Розрахункові коефіцієнти рівняння регресії для вихідних факторів.

Вихідний фактор	t(температура холодного теплоносія на виході), °C	α (коэф.тепловіддачі), Вт/(м²·K)
Розрахункові коефіцієнти рівняння регресії для вихідного фактору	$b_0 = 5,533;$	$b_0 = 25,988;$
	$b_1 = 12,300;$	$b_1 = 19,190;$
	$b_2 = 0,050;$	$b_2 = -0,406;$
	$b_{1,2} = -0,183 ;$	$b_{1,2} = -0,538;$

Коефіцієнти є ключовими для побудови математичних моделей, що описують залежність вихідних параметрів від вхідних факторів. Аналіз цих коефіцієнтів дозволить кількісно оцінити вплив кожного фактора окремо та їхніх взаємодій на процес нагріву та тепловіддачі, а також виявити найбільш значущі впливи

Використовуючи шаблонне рівняння регресії

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{1,2} \cdot X_1 \cdot X_2$$

, отримано математичну модель, яка встановлює зв'язок між вхідними факторами експерименту та вихідними параметрами, що характеризують роботу рециркуляційного агрегату:

1) температура холодного теплоносія на виході з трубки при сталій початковій температурі холодного теплоносія -22С, °С:

$$\hat{t} = 5,533 + 12,300 \cdot X_1 + 0,050 \cdot X_2 - 0,183 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (3.32)$$

2) коефіцієнт тепловіддачі трубки до теплого теплоносія :

$$\hat{\alpha} = 25,988 + 19,190 \cdot X_1 - 0,406 \cdot X_2 - 0,538 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (3.33)$$

У дослідженні встановлено, що кількість повітря, яке обдуває трубки, в яких рухається холодний теплоносій, вихідний фактор X_1 , є найбільш значущим чинником, що впливає на температуру холодного теплоносія на виході, та на коефіцієнт тепловіддачі трубки. Адекватність цієї залежності була підтверджена експериментально.

Статистичний аналіз експерименту.

Для забезпечення достовірності та надійності отриманих результатів дослідження, буде проведена ретельна оцінка похибок як для вхідних, так і для вихідних величин. Це дозволить кількісно визначити точність вимірювань і розрахунків, а також встановити довірчі інтервали для отриманих значень.

Однорідність дисперсій та дисперсія відтворюваності.

Перевірку однорідності дисперсій експериментальних даних виконано за допомогою критерію Кохрена. Дисперсії вважаються однорідними, якщо розраховане значення критерію Кохрена є меншим за табличне значення при довірчій ймовірності

0.95. Відповідне табличне значення критерію Кохрена при заданому числі ступенів свободи представлено в Таблиці 3.15.

Таблиця 3.15. Значення Кохрена при числі ступеню свободи.

Кількість дослідів, N	Кількість спостережень, l	Ступінь свободи, f= l-1	Табличне значення критерію Кохрена, G
4	3	2	0,77

Перевірка однорідності дисперсій у досліді повного факторного експерименту є критично важливою для достовірності результатів. Для цього використовується критерій Кохрена, як було зазначено раніше. Окрім цього, для виявлення грубих помилок у даних може бути застосований t_p -критерій (критерій Стюдента для викидів), що дозволяє оцінити, чи не є окремі вимірювання аномальними та чи слід їх виключити з подальшого аналізу.

Результати перевірки однорідності дисперсій факторів $\hat{t}$ та $\hat{\alpha}$, а також дані, отримані за допомогою t_p -критерію, представлені у Таблицях 3.16 та 3.17 відповідно. Ці таблиці містять необхідні статистичні показники для оцінки якості експериментальних даних.

Таблиця 3.16. Перевірка дисперсії однорідності фактору $\hat{t}$ (2-го типу).

g	m=1	m=2	m=3	$\bar{t}$	$\sigma_g^2 t$	G_t	<Gтабл.	$\sigma_{\{y\}}^2 t$	Rt	$\sigma_{\{y\}}^2 t$	tp	<tpтабл.
1	-7,0	-7,1	-6,9	-7,0	0,010		0,77	0,013	0,200	0,011	0,962	
2	18,0	18,0	17,9	18,0	0,003		0,77				0,321	
3	-6,6	-6,4	-6,6	-6,5	0,013		0,77				1,282	
4	17,3	17,2	17,5	17,3	0,023	0,46667	0,77				1,603	2,130
$\sum_{g=1}^N \sigma_g^2$					0,050							

Таблиця 3.17. Перевірка дисперсії однорідності фактору $\hat{\alpha}$ (2-го типу).

g	m=1	m=2	m=3	$\bar{\alpha}$	$\sigma_g^2 \alpha$	G_α	<Gтабл.	$\sigma_{\{y\}}^2 \alpha$	R α	$\sigma_{\{y\}}^2 \alpha$	tp	<tpтабл.
1	6,67	6,61	6,72	6,67	0,003		0,77	0,160	0,578	0,090	-0,186	
2	46,37	46,37	45,62	46,12	0,187		0,77				0,831	
3	6,89	7,01	6,89	6,93	0,004		0,77				-0,127	2,310
4	44,22	43,57	44,91	44,23	0,446	0,69625	0,77				-2,207	
$\sum_{g=1}^N \sigma_g^2$					0,641							

Визначене значення t_p виявилося меншим за нормативне табличне значення $t_{p,табл.}=2,31$ при заданій довірчій ймовірності 0,95 та числу ступеню свободи 2

остаточної дисперсії. Тож, значення знаходиться в прийнятій довірчій ймовірності і можуть бути використані.

Оскільки дисперсії є однорідними, перейдено до оцінки експерименту в цілому, тобто до визначення дисперсії відтворюваності $\sigma_{\{y\}}^2$, що характеризує похибку всього експерименту. За умови однакової кількості спостережень у кожному досліді, дисперсія відтворюваності розраховується за рівнянням :

$$\sigma_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{g=1}^N \sigma_g^2}{N}; \quad (3.34)$$

де σ_g^2 - дисперсії помилок окремих дослідів.

Згідно з критерієм Кохрена, встановлено, що дисперсії є однорідними $G_t = 0,46 < G_{\text{табл.}} = 0,77$ та $G_a = 0,69 < G_{\text{табл.}} = 0,77$, таким чином, оцінка дисперсії відтворюваності була успішно проведена, що підтверджує надійність отриманих експериментальних даних для подальшого аналізу.

Оцінка значимості коефіцієнтів регресії.

Оцінка коефіцієнтів регресії проводиться для спрощення рівняння регресії та дозволяє кількісно оцінити вплив кожного окремого фактора на вихідну величину. Для цього використовується критерій Ст'юдента. Його табличне значення при восьми ступенях свободи надано в Таблиці 3.18. Величина Δv_i , яка використовується для розрахунку, визначається за рівнянням :

$$\Delta v_i = \pm t_p \sqrt{\frac{\sigma_{\{y\}}^2}{N \cdot l}}; \quad (3.35)$$

де t_p - критерій Ст'юдента ;

$N \cdot l$ - кількість вимірів.

Таблиця 3.18. Табличне значення критерію Ст'юдента при числі ступеню свободи.

Кількість дослідів, N	Кількість спостережень, l	Ступінь свободи, f= N(l – 1)	Табличне значення критерію Ст'юдента, t_p
4	3	8	2,31

Для планів першого порядку, дисперсія, пов'язана з похибкою визначення коефіцієнтів регресії $\sigma_{\{b_i\}}^2$, визначається по формулі:

$$\sigma_{\{b_i\}}^2 = \frac{\sigma_{\{y\}}^2}{N \cdot l}; \quad (3.36)$$

Тоді, довірчий інтервал коефіцієнтів рівняння регресії розраховується за формулою :

$$\Delta b_i = \pm t_p \sigma_{\{b_i\}}; \quad (3.37)$$

Значимість коефіцієнтів рівняння повного факторного експерименту (ПФЕ) для двох факторів оцінюється шляхом порівняння абсолютної величини розрахованого коефіцієнта з його довірчим інтервалом. Якщо $|b_i| > \Delta b_i$, то коефіцієнт вважається статистично значущим. Це порівняння проводиться при заданому числі ступенів свободи $f = 4(3 - 1) = 8$ та $P_g = 0,95$ при табличному значенні критерію Ст'юдента, що рівний $t_p = 2,31$ визначається якщо його величина більша за його довірчий інтервал. Розрахункові коефіцієнти рівняння регресії для двох факторів та їх довірчі інтервали представлені в Таблиці 3.19:

Таблиця 3.19. Оцінка значимості коефіцієнтів регресії ПФЕ (2-го типу).

Вихідний фактор	Довірчий інтервал визначення коефіцієнтів, Δb_i	Розрахункові коефіцієнти рівняння регресії для вихідного фактору	Оцінка значимості коефіцієнтів регресії
t(температура холодного теплоносія на виході), °C	$\pm 0,258$	$b_0 = 5,533 \pm 0,258$	Значимий
		$b_1 = 12,300 \pm 0,258$	Значимий
		$b_2 = 0,050 \pm 0,258$	Незначимий
		$b_{1,2} = -0,183 \pm 0,258$	Незначимий
α (коэф.тепловіддачі), Вт/(м ² ·К)	$\pm 0,92$	$b_0 = 25,988 \pm 0,92$	Значимий
		$b_1 = 19,190 \pm 0,92$	Значимий
		$b_2 = -0,406 \pm 0,92$	Незначимий
		$b_{1,2} = -0,538 \pm 0,92$	Незначимий

Коефіцієнти, що визначають формулу для температури холодного теплоносія, є більш точними, оскільки їхнє визначення ґрунтується на прямих вимірюваннях. На противагу цьому, коефіцієнти рівняння регресії для коефіцієнта тепловіддачі були

отримані опосередковано, за допомогою непрямих методів, що може впливати на їхню точність.

Повірка адекватності рівняння регресії.

Адекватність рівняння регресії перевіряється за допомогою критерію Фішера, використовуючи відповідну формулу (3.38). Цей критерій дозволяє оцінити, наскільки добре побудована модель регресії описує експериментальні дані:

$$F = \frac{\sigma_{ад}^2}{\sigma_{\{y\}}^2}; \quad (3.38)$$

де $\sigma_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;

$\sigma_{\{y\}}^2$ – дисперсія відтворюваності.

Отримане значення критерія Фішера порівняємо з табличним з Таблиці 3.20.

Таблиця 3.20. Табличне значення критерію Фішера при числі ступеню свободи

Кількість факторів	Кількість нульових	Кількість коефіцієнтів рівняння регресії, М	Кількість коефіцієнтів рівняння регресії, $f_{ад}$	Ступінь свободи, $f_2 = N(l - 1)$	Табличне значення критерію Фішера, F
4	-	$M_t=4; M_n=4$	$f_{ад}=0$	8	$F_t=7,71; F_n=7,71$

Якщо розрахункове значення критерію Фішера менше або дорівнює табличному значенню $F_{розр} \leq F_{табл.}$ – рівняння регресії вважається адекватним. Табличне значення критерію Фішера визначається залежно від ступенів свободи більшої дисперсії f_2 та дисперсії адекватності $f_{ад}$. Для планів :

-першого порядку $f_{ад} = N - M$,

- для планів другого порядку $f_{ад} = N - M - (N_0 - 1)$,

де N_0 – кількість нульових точок, М-кількість коефіцієнтів рівняння регресії.

Дисперсія адекватності визначається за рівнянням :

$$\sigma_{ад}^2 = \frac{\sum_{g=1}^N l \cdot (\bar{y}_g - \hat{y}_g)^2}{f_{ад}}; \quad (3.39)$$

$l=3$ – кількість спостережень в дослідях.

Проведено адекватність рівняння регресії для повнофакторного експерименту для двох факторів. Всі коефіцієнти регресії значимі $f_{ад}=0$. Для отримання однієї

ступені свободи додамо додатковий дослід в нульовій точці. Тож, $\bar{t}_0=5,6$. Розрахунок рівняння регресії в цій точці $\hat{t}_0 = 5,533$. Дисперсія відновлюваності $\sigma_{\{t\}}^2=0,013$.

Тоді, $\sigma_{ад}^2 = 0,003$; а $F = 0,267$; що відповідає умові $F_{розр} \leq F_{табл}=5,32$.

Аналогічно проведемо визначення для α . Дані внесено в Таблицю 3.21.

Таблиця 3.21. Перевірка адекватності рівняння регресії.

Експеримент	Фактор вихідний	Дисперсія відтворюва- ності, $\sigma_{\{y\}}^2$	Дисперсія адекватності $\sigma_{ад}^2$	Розрах-ве значення критерію Фішера, $F_{розр}$	Табличне значення критерію Фішера, $F_{табл}$	Перевірка адекватності рівняння регресії $F_{розр} \leq$ $F_{табл}$
Плани 1-го порядку						
ПФЕ 2типу	t	0,013	0,003	0,267	5,32	Адекватне
	α	0,160	0,001	0,004	5,32	Адекватне

Таким чином, рівняння адекватно описує результати експерименту.

3.6 Висновки

У рамках дослідження було проведено визначення коефіцієнту теплопередачі як непрямим методом, так і за допомогою методу планування повного факторного фізичного експерименту (ПФЕ), що ґрунтується на чотирьох експериментальних точках ($N=4$) з трикратним повторенням кожного досліду ($l=3$), загалом 12 дослідів, порядок яких рандомізовано трьома серіями. Для дворівневих співвідношень факторів (швидкість руху холодного теплоносія в трубках та пропускна потужність фільтр-теплообмінника від 400 м³/год до 800 м³/год) було отримано рівняння регресії, які є дійсними для фільтр-теплообмінника з пропускною потужністю від 300 м³/год до 1000 м³/год і прогнозують значення ключових вихідних параметрів: температури холодного теплоносія на виході з теплообмінника "повітря-повітря" теплообмінної частини фільтр-теплообмінника та його коефіцієнту тепловіддачі). Згідно з критерієм Кохрена, дисперсії виявилися однорідними ($G_{розр} < G_{табл}$), що дозволило провести оцінку дисперсії відтворюваності, яка підтверджує вагомість коефіцієнтів регресії та характеризує похибку всього експерименту. Визначені довірчі інтервали коефіцієнтів

регресії, а їхня значущість порівнювалася з табличним значенням критерію Ст'юдента. Адекватність рівняння регресії, в якому фактор X_1 (кількість повітря, що обдуває трубки) має найбільший вплив, була успішно перевірена за допомогою критерію Фішера ($F_{\text{розр.}} \leq F_{\text{табл.}}$), що свідчить про відповідність моделі експериментальним даним.

Загальні висновки.

Підсумовуючи наші висновки, тривалість очищення повітря у повітроочищувачі цього типу може бути скорочена на 20 хвилин при збільшенні кратності повітрообміну на один крат за умов низького рівня забруднення, і до одної години за значних рівнів. Важливо зазначити, що для ефективного очищення кратність повітрообміну не може бути меншою за два.

У межах проведеного дослідження розроблено фізико-математичну модель процесу тепловіддачі крізь плоску стінку, що омивається потоком, із застосуванням методів теоретичної теплотехніки, аналітичної математики та моделювання технічних систем. Було вирішено ключові наукові задачі, що включали визначення об'єму рециркуляційного повітря для підігріву зовнішнього (гарячий теплоносій) та необхідної кількості повітря для забезпечення санітарної норми дихання (холодний теплоносій). Складено рівняння теплового балансу теплообмінника "повітря-повітря", визначено температурний тиск між теплоносіями, їх дійсну швидкість руху, а також коефіцієнти тепловіддачі та теплопередачі, разом з необхідною площею поверхні нагріву теплообмінника. Проведено повний факторний експеримент з ортогональним та ротатабельним плануванням для двох- та трирівневого співвідношення факторів, а також виконано статистичний аналіз, що дозволило знайти найбільш точну математичну модель. Ця модель дозволяє прогнозувати значення параметрів стану об'єкта (Y) та оптимізувати його характеристики залежно від факторів (X_i). На основі отриманих даних було змодельовано конструкцію фільтр-теплообмінника з теплообмінною частиною, інтегрованою у повітроочисник.

Основними вихідними параметрами були температура нагріву холодного теплоносія на виході та коефіцієнт тепловіддачі, який визначався непрямим методом. Було встановлено, що кількість повітря, яке обдуває трубки, є найбільш значущим фактором, що впливає на ці показники.

Загалом, дослідження не лише представило фізико-математичну модель процесу тепловіддачі та вирішило низку наукових задач (визначення кількості рециркуляційного та свіжого повітря, теплового балансу, температурного тиску, коефіцієнтів тепловіддачі/теплопередачі, площі поверхні нагріву), але й показало, що повітроочишувачі є ефективним засобом для покращення якості повітря. Водночас, вони не замінюють основний повітрообмін із зовнішнім повітрям. Підтверджено можливість використання повітроочишувача для забезпечення санітарної норми повітря для дихання без додаткових енерговитрат на його підігрів.

Розділ 4

РОЗДІЛ 4 Техніко-економічне обґрунтування системи фільтр-теплообмінника та її елементів

4.1 Методика оцінки економічної ефективності використання фільтр-теплообмінника.

4.1.1 Енергоощадні заходи при використанні фільтр-теплообмінника.

4.1.2. Особливості впливу вентиляції на енергоефективність будівлі

4.2 Техніко-економічне порівняння проектів з однаковими вимогами функціонування систем.

4.3 Методологія визначення економічної ефективності впровадження фільтр-теплообмінника.

4.1 Методика оцінки економічної ефективності використання фільтр-теплообмінника.

Процес розробки техніко-економічного обґрунтування проектів з енергозбереження передбачає два ключових етапи: початкове, де аналізуються технічні та технологічні аспекти проекту, та заключний – детальне дослідження всіх компонентів проекту.

Технічні та технологічні аспекти проекту.

1) технічні та технологічні обмеження застосування установки фільтр-теплообмінника:

- установка не може бути використана в приміщеннях де заборонена рециркуляція повітря;
- розрахунок теплообмінної секції виконано для агрегатів потужністю від 300 до 1000м³/год очищення повітря та до 41м³/год зовнішнього повітря;
- установка призначена для побутових чи виробничих приміщеннях з об'ємом до 150м³.

2) екологічні аспекти застосування установки фільтр-теплообмінника:

- робота установки при великих кратностях повітрообміну забезпечує необхідну якість повітря, знижує вплив повітряних забрудників на здоров'я людини, що

позитивно впливає на працездатність. Можливість додавання свіжого повітря дає можливість регулювати кількість CO₂ в приміщенні. Установа не несе ризиків, що пов'язані з витоком фреону чи іншого теплоносія, має допустимі рівні шуму, що може бути змінено при підборі різного типу вентиляторів. Проста в експлуатації, утилізація установки, така ж, як і будь які вироби з металу.

3) місце розміщення обладнання, навколишнє природне середовище:

– установка очищення «фільтр-теплообмінник» може бути використана в побутових чи виробничих приміщеннях з об'ємом до 150м³. Установка може працювати з повітрям до -22С, що представлене як зовнішнє повітря з вулиці. Внутрішні температури повітря в кімнаті повинні бути вище +18С в зимовий період. Для видалення дренажу, що буде утворюватися (при роботі установки з зовнішнім повітрям) в зимовий період передбачено розміщення піддону в нижній частині установки з патрубком підключення, що може бути під'єднано до системи каналізації через сифон. В літній період немає обмеження температури для використання установки очищення повітря «фільтр-теплообмінник». В якості елемента фільтрації може бути використано фільтр будь-якого типу фільтрації з товщиною 78мм в залежності від вимог. Рекомендована відносна вологість повітря для ефективної роботи фільтрувальної вставки від 30 до 65%. Збільшення відносної вологості знижує ефективність фільтрації та термін роботи фільтрувальної вставки.

4) суб'єктивні чинники .

Використання установки очищення «фільтр-теплообмінник» не потребує кваліфікованих кадрів, може бути встановлено покупцем одразу після покупки. Процес заміни фільтру в установці теж не потребує кваліфікованого персоналу. Лише при використанні опції подавання в приміщення свіжого повітря зовні необхідно здійснити підключення припливного отвору до окремого забірною пристрою зовнішнього повітря в зовнішніх огорожуючих конструкціях. Саме створення цього отвору в зовнішніх конструкціях потребує уваги конструктора, архітектора або експлуатуючої організації будівлі.

5) доступність обладнання.

Дана установка може бути виконана та зібрана, з наявних та розповсюджених матеріалів на ринку України, в будь-якому збірному цеху виробництва фасонних деталей для вентиляції при наявності збірних креслень. Вентилятори можуть бути замінені на аналогічні зі збереженням необхідних технічних характеристик.

Друга частина містить визначення перспективності проекту у сфері енергоефективності та енергозбереження.

Впровадження нових енергоефективних технологій, незважаючи на вищі початкові інвестиції, є вигідним довгостроковим рішенням. Окрім економічної вигоди завдяки зниженню витрат на енергоносії, такі технології сприяють збереженню довкілля та підвищують конкурентоспроможність підприємства на ринку, де все більше цінуються екологічні стандарти.

4.1.1 Енергоощадні заходи при використанні фільтр-теплообмінника.

Енергоощадні заходи, що можуть реалізуватися безпосередньо споживачем під час експлуатації об'єкта для постійного чи тимчасового перебування людей, потребують незначних ресурсів та сприяють стабільності експлуатаційних параметрів та комфорту житлового середовища. Наведена нижче інформація, базується на рекомендаціях обґрунтування енергоефективного обладнання [272], та дозволяє визначити характер окупності заходу (впровадження системи очистки повітря фільтр-теплообмінник) і пріоритетність проведення його впровадження на різних етапах життєвого циклу будівництва. Характер окупності та доцільність приведення на різних етапах будівництва наведена в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Характер окупності та доцільність приведення на різних етапах будівництва .

Енергозберігаючий захід	Термін окупності			Доцільність проведення при		
	Коротко-строковий	Середній	Тривалий	Новому будівництві	Комплексній санації	Експлуатації
Встановлення системи фільтр-теплообмінник	+	+		+	+	+

В приміщеннях не обладнаних системою вентиляції спостерігається погіршення якості повітря, появи цвілі, розвитку алергій, респіраторних захворювань та інших проблем зі здоров'ям. Наявність вентиляції безпосередньо впливає на енергоефективність будівлі. При постійному перебуванні людей, є постійні енергетичні втрати як наслідок «провітрювання» - відкривання вікон, дверей для отримання зовнішнього повітря на заміну відпрацьованого в приміщенні. Особливо взимку навантаження на системи опалення в приміщенні збільшуються за рахунок необхідності нагрівання зовнішнього повітря, що надійшло з вулиці з температурою мінус 22С. Встановлення обладнання для вентиляції з системою рециркуляції з деяким підмішуванням зовнішнього повітря забезпечує регульовану вентиляцію, тоді, коли в приміщенні багато людей взимку та, якщо можливе кондиціонування повітря, влітку. Але вартість таких систем значна та потребує постійних експлуатаційних втрат.

Цей захід доцільно застосовувати в у багатоквартирних житлових будинках чи окремих офісних приміщень. Запровадження заходу в будівлях соціально-культурного призначення, є технічно складним із-за габаритних розмірів та специфіки їх розміщення в кімнаті (рекомендовано розміщення по центру приміщення для створення максимального перемішування повітряного середовища в кімнаті)

Зауваження при роботі даних систем.

1. Економічність роботи обладнання з рециркуляцією повітря залежить від загального часу його роботи та зазвичай використовується у системах, що працюють 24 години на добу.
2. Рециркуляція повітря може використовуватись тільки в приміщеннях де рециркуляція дозволена нормативними документами.
3. Встановлення пристроїв рециркуляції тепла повітря зазвичай є економічно доцільним не тільки для зимового, а й для літнього періоду, через те, що забезпечує збереження енергії цілий рік.

Системи з рециркуляцією тепла присутні на ринку України в різних варіаціях та

цінових категоріях. Рекомендації щодо установки, монтажу та експлуатації обладнання необхідно отримувати в організаціях з кваліфікованим персоналом.

4.1.2. Особливості впливу вентиляції на енергоефективність будівлі .

Покращення теплоізоляції будівель призвело до зростання питомої ваги енергоспоживання на вентиляцію внаслідок підвищення герметичності огорожувальних конструкцій та посилення вимог до якості повітря внутрішнього середовища.

Парадокс сучасного енергозбереження полягає в тому, що прагнення зменшити теплові втрати через огорожуючі конструкції призводить до збільшення витрат на вентиляцію

4.2. Техніко-економічне порівняння проектів з однаковими вимогами функціонування систем.

В зв'язку з постійним погіршенням якості повітря зовні (див. розділ 1) є необхідність розглянути альтернативні способи організації вентиляції в приміщеннях з головною метою забезпечити екологічно чисті зони перебування людини без застосування надмірних енергетичних витрат. Тому, розглянемо можливість використання рециркуляційної установки з можливістю отримання свіжого повітря без використання додаткової енергії та з застосуванням фільтрувальних вставок високої ефективності типу HEPA. З метою порівняння економічних характеристик, та визначення найбільш економічно вигідного варіанту, розглядаються варіанти використання системи вентиляції з очищенням повітря для яких розраховано капітальні витрати (К) та експлуатаційні витрати на обслуговування (В), згідно Постанови Кабінету Міністрів №2145 [273]. Розглядаються три варіанти 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.

Варіант 1. Рециркуляційна установка потужністю $800\text{ м}^3/\text{час}$. Свіжого повітря $41\text{ м}^3/\text{год}$.

Варіант 2. Два очисники повітря + система вентиляції на 41м³/год .

Варіант 3. Очисник повітря з теплообмінником.

Варіант 1 . Рециркуляційна установка потужністю 800м³/час. Свіжого повітря 41м³/год.

Розрахунок капітальних затрат .

До порівняння взята установка фірми «Aerostar» типу SkyStar-2 з прайсовою вартістю 2 498,67€ + вартість щита автоматики 1 790,67€. Основні параметри установки наведені в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Основні параметри установки Варіант 1.

Модель	SkyStar-2(h450)
Витрата свіжого повітря	41м ³ /год
Повна витрата повітря	800м ³ /год
Вільний тиск на установці	75Па
Розрахункова зовнішня температура	-22С
Швидкість повітря в припливній секції	0,66м/с
Габарити установки ШхВхД,мм	760х450х2857мм. Вага 176кг
Комплект фільтрів	G4+HEPA11
Електронагрівач	2,0кВт; 3~380V; 50Hz. Робоче споживання 0,6кВт.
Встановлена потужність вентилятора типу R3G310RR05H1	ЕС MOTOR 0.5kW; 1~/230/50/60; IP55; динамічний тиск 3 Па. Макс. число обертів 2360 rpm. Номінальний струм 2.2А. Рівень звукової потужності 84.31 dB(A)
Виробництво	Україна, м. Київ

Розрахунок експлуатаційних витрат

Вихідними даними для розрахунку експлуатаційних витрат є вартість енергоресурсів для побутових споживачів м. Києва згідно НКРЕКП від 04.12.2018 № 1597 «Про внесення змін до постанови НКРЕКП від 23 серпня 2018 року № 894» <http://www.nerc.gov.ua/?news=8487>:

- вартість електричної енергії (II клас напруги) – 4,32 грн/кВт·год (з ПДВ).

При застосування нічного двозонного тарифу інтегрована вартість електричної енергії – 2,16 грн / кВт·год. (з ПДВ).

Вартість електроенергії, витраченої на виробництво теплової енергії за рік у разі „прямого” електроопалення: установка має періодичний характер роботи - при необхідності від 8 до 24 годин до 4 днів в тиждень. За 1 годину установка може обігріти $L_2=41\text{м}^3/\text{год}=0,0113\text{м}^3/\text{с}$. Початкова температура холодного теплоносія $t_{x1}=-22^\circ\text{C}$, кінцева $t_{x2}=18^\circ\text{C}$. Кількість тепла необхідна для нагріву зовнішнього повітря 0,6кВт. Тривалість опалювального періоду прийнято згідно ДСТУ-Н Б В.1.1.27-2010 - "Будівельна кліматологія", що становить 176 діб для м. Київ.

Таким чином річна вартість електричної енергії становитиме:

$$B2 \min = B4 = 8 \cdot 176 \cdot (0,6+0,5) \cdot 4,32=6990,82 \text{ тис. грн.}$$

$$B2 \max = B4 = 24 \cdot 176 \cdot (0,6+0,5) \cdot 4,32= 22079,69 \text{ тис. грн.}$$

Пусконаладжувальні роботи 1234грн з ПДВ.

Варіант 2. Два очисники повітря + система вентиляції на $41\text{м}^3/\text{год}$.

Розрахунок капітальних затрат .

До порівняння взята установка фірми «IQAir» типу HealthPro250 з прайсовою вартістю 1415,63€ (курс 40,90 на 16.10.24) + пульт керування. Основні параметри очисника повітря наведено в Таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Основні параметри очисника Варіант 2.

Модель	HealthPro250
Витрата свіжого повітря	-
Повна витрата повітря	$440\text{м}^3/\text{год}$ на 6 швидкості
Виробництво	Швейцарія, м. Штайнах
Габарити установки ШхВхД,мм	380х710х410мм. Вага 16кг
Комплект фільтрів	F8 ($\geq 55\%$ для часток $\geq 0,3$ мкм H12/13 ($\geq 99,5\%$ для частинок розміром $\geq 0,003$ мкм)
Електронагрівач	-
Встановлена потужність вентилятора	EC MOTOR 0.135 kW 1~/230/ 50/60 ; IP 55

Основні параметри частини постачання свіжого повітря.

До порівняння взято вентилятор фірми «Aerostar» типу RS 100 L з прайсовою

вартістю 120 € (курс 40,90 на 16.10.24) + електричний калорифер фірми «Aerostar» типу REN 100/0,6 з прайсовою вартістю 90 € (курс 40,90 на 16.10.24). Основні параметри частини постачання свіжого повітря наведені в Таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Основні параметри частини постачання свіжого повітря Варіант 2.

Модель вентилятора Aerostar	RS 100 L
Витрата свіжого повітря	41м ³ /год
Вільний тиск на установці	130Па на 2 швидкості
Встановлена потужність вентилятора	MOTOR 0.068 kW 1~/230/ 50/60 ; IP 44; Динамічний тиск 3 Pa. Макс. число обертів 2408 rpm. Номінальний струм 0.3 A. Рівень звукової потужності 45-59dB(A)
Габарити установки ШхВхД,мм	245x209x287мм. Вага 3кг
Розрахункова зовнішня температура	-22С
Електронагрівач Aerostar REN 100/0,6	0,6кВт 1 ~ 220 V 50 Hz; IP 44;
Габарити установки ШхВхД,мм	100x180,7x380мм. Вага 1,9кг
Виробництво	Україна, м.Київ

Розрахунок експлуатаційних витрат

Установка має періодичний характер роботи: при необхідності від 8 до 24 годин до 4 днів в тиждень. За 1 годину система вентиляції може нагріти $L_2=41\text{м}^3/\text{год}=0,0113\text{м}^3/\text{с}$. Початкова температура холодного теплоносія $t_{x1}=-22^\circ\text{C}$, кінцева $t_{x2}=18^\circ\text{C}$. Кількість тепла необхідна для нагріву зовнішнього повітря 0,6кВт.

Таким чином річна вартість електричної енергії становитиме:

$$B2 \text{ min} = B4 = 8 \cdot 176 \cdot (0,135 \cdot 2 + 0,068 + 0,6) \cdot 4,32 = 5705,44 \text{ тис. грн.}$$

$$B2 \text{ max} = B4 = 24 \cdot 176 \cdot (0,135 \cdot 2 + 0,068 + 0,6) \cdot 4,32 = 17116,32 \text{ тис. грн.}$$

Пусконаладжувальні роботи вентиляційної частини з підключенням кнопки On/Off 617 грн з ПДВ.

Варіант 3. Очисник повітря з теплообмінником експериментальний далі «фільтр-теплообмінник».

Основні параметри установки фільтр-теплообмінника.

Вартість теплообмінної частини розрахована по вартості матеріалів з яких вона

складається . Основні параметри теплообмінної частини наведено в Таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Основні параметри теплообмінної частини Варіант 3.

Корпус із оцинкованої сталі 0,9мм	4,068м ² 872грн/м ²
Опора рами	4шт 100грн за 1шт
Нера фільтр 595*595*78 H11	НЕРА фільтри є елементами для очищення повітря від бактерій, парів ртутних, лужних і кислотних випарів. Виготовлений з використанням високоякісного фільтрувального матеріалу з прогресивною структурою, з ультратонких і мікротонких скловолокон, упакованих у вигляді дрібних складок (мінігофр), розділених термопластичними або алюмінієвими сепараторами. НЕРА фільтр 8922грн з ПДВ.
Диффузор квадратний 600х600	1 шт х 1300грн.
Труби мідні Ø1/2'' (12,7)	8,75 м.п. х 5,48Євро
Кріплення комплект (винт М5х12, М6х40, заклепки , гайки М5, М6	1к-т 562грн
Збірка	2567грн
Загальна вартість ,грн	19259,5грн

До порівняння взято вентилятор фірми «Aerostar» типу RS 100 L з прайсовою вартістю 120 € (курс 40,90 на 16.10.24) + вентилятор фірми електричний калорифер фірми «BVN» типу OBR 200-2К з прайсовою вартістю 113 € (курс 40,90 на 16.10.24) . Основні параметри частини постачання повітря наведені в Таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Основні параметри частини постачання повітря Варіант 3.

Модель вентилятора Aerostar, Україна	RS 100 L
Витрата свіжого повітря	41м ³ /год
Вільний тиск на установці	130Па на 2 швидкості
Встановлена потужність вентилятора	MOTOR 0.068 kW 1~/230/ 50/60 ; IP 44; Динамічний тиск 3 Pa. Макс. число обертів 2408 rpm. Номінальний струм 0.3 A. Рівень звукової потужності 45-59dB(A)
Габарити установки ШхВхД,мм	245х209х287мм. Вага 3кг

Модель вентилятора BVN, Турція	OBR 200-2K
Витрата свіжого повітря	800м³/год
Вільний тиск на установці	450Па
Встановлена потужність вентилятора	МОТОР 0.45 kW; 1~/230/ 50/60 ; IP 44. Макс. число обертів 2770 rpm. Номінальний струм 2.0 А. Рівень звукової потужності 55dB(A)
Габарити установки ШхВхД,мм	322х295х310мм. Вага 9кг

Розрахунок експлуатаційних витрат

Установка має періодичний характер роботи: при необхідності від 8 до 24 годин до 4 днів в тиждень. За 1 годину установка може обігріти $L_2=41\text{м}^3/\text{год}=0,0113\text{м}^3/\text{сек}$. Початкова температура холодного теплоносія $t_{x1}=-22^\circ\text{C}$, кінцева $t_{x2}=18^\circ\text{C}$. Кількість тепла, що можна відібрати від повітря, що очищується $0,5871\text{кДж/с}$ (кВт).

Таким чином річна вартість електричної енергії становитиме:

$$B2_{\min} = B4 = 8 \cdot 176 \cdot (0,068+0,45) \cdot 4,32=3150,77 \text{ тис. грн.}$$

$$B2_{\max} = B4 = 24 \cdot 176 \cdot (0,068+0,45) \cdot 4,32= 9452,30 \text{ тис. грн.}$$

Пусконаладжувальні роботи 1234грн з ПДВ.

Зведена інформація наведена в Таблиці 4.7 та на рисунках 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.7. Капітальні та експлуатаційні витрати варіантів 1-3.

	Використання установки, годин	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Капітальні витрати, грн		175434,0	124387,53	28789,2
Експлуатаційні витрати, грн	8	6990,82	5705,44	3150,77
	24	22079,69	17116,32	9452,30
Пусконаладжувальні роботи, грн		1234	617	1234

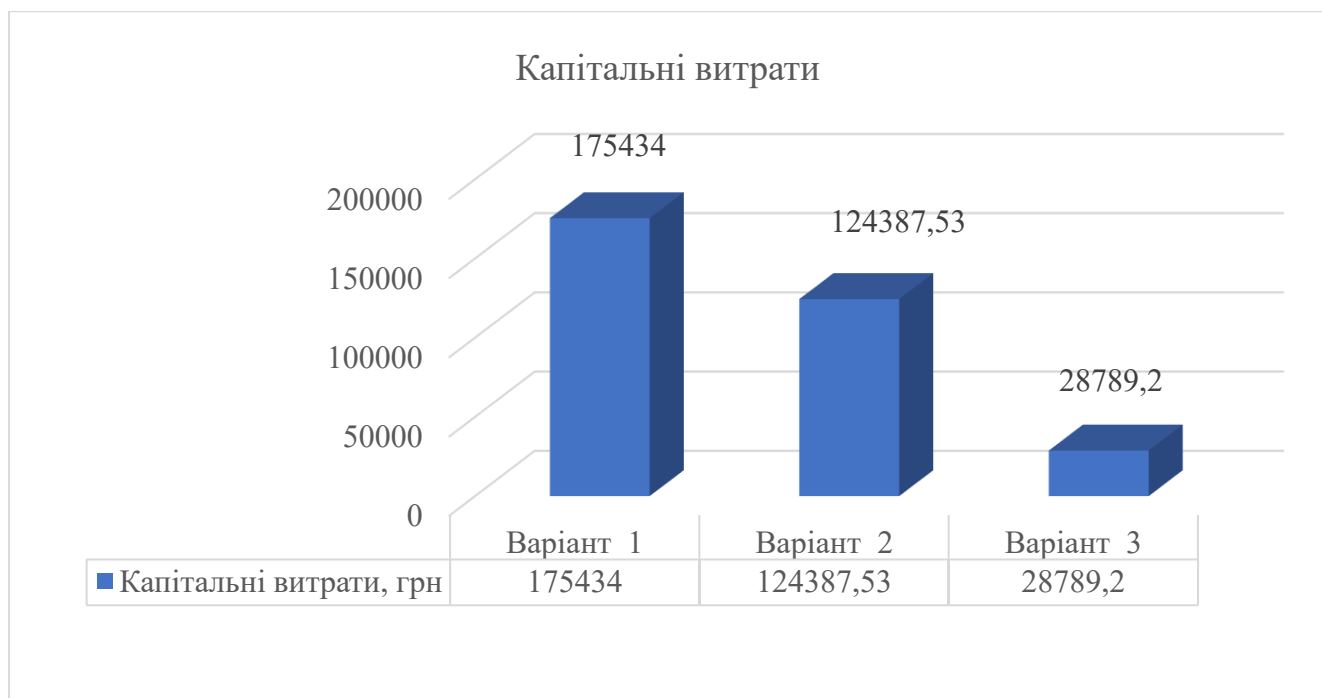


Рис.4.1. Порівняння капітальних витрат варіантів компонування обладнання, що виконує умову забезпечення приміщення свіжим повітрям в об'ємі 41м³/год, та можливістю очищення 800м³/год повітря до рівні якості повітря рекомендованих ВООЗ.



Рис.4.2. Порівняння 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.

4.3. Методологія визначення економічної ефективності впровадження фільтр- теплообмінника.

Постійне зростання вартості енергоресурсів обумовлює підвищену актуальність забезпечення енергоефективності будівель житлово-громадського призначення. Для більшості споживачів енергоресурсів зростання тарифів є основним стимулом для впровадження заходів щодо підвищення енергоефективності будівель.

За прогнозом голови Спілки споживачів комунальних послуг Олега Попенка, ціна на електроенергію для українців може значно зрости найближчими роками: вже наступного року вартість за кіловат-годину електроенергії може збільшитися на 50-75% більше, ніж зараз. Тобто, ціна може сягнути 6,5-7 гривень. А ще через кілька років, за його оцінками, вартість може зрости до 8-9 гривень за кіловат-годину. Як пояснював міністр Герман Галущенко, енергетичні компанії, такі як "Енергоатом" та "Укргідроенерго", зазначають, що реальна вартість виробництва електроенергії набагато вища, ніж тариф, який платять українці. Тариф на електроенергію для населення не покриває собівартості її виробництва, різницю між ринковою ціною кіловат-години й тарифами для населення, покривається в межах виконання спеціальних зобов'язань із забезпечення доступності електрики для побутових споживачів. За умов складної економічної ситуації через війну тариф можуть бути впроваджені згідно ринкового рівня 7,5 гривень за кВт*год.

Розміри капітальних витрат та експлуатаційних витрат визначаються діючими тарифами на енергоресурси та ринковою вартістю матеріалів залучених в проєкті, а також, прогнозованими змінами їх вартості з часом. Визначивши Варіант 3, як найбільш пріоритетний визначимо економічний ефект від його реалізації E_T за формулою 4.1:

$$E_T = D_T - B_T \quad (4.1)$$

де E_T – економічний ефект від реалізації Варіанту 3 за розрахунковий період T ;

D_T – вартісна оцінка результатів реалізації Варіанту 3 за період T ;

B_T - вартісна оцінка витрат при реалізації Варіанту 3 за період T .

Початковим роком розрахункового періоду вважається рік початку фінансування проекту. Кінцевим – момент завершення проекту. Розрахунок економічного ефекту проведено з проведенням різнотермінових витрат для розрахункового року t .

Проведення різнотермінових витрат приведена з коефіцієнтом дисконтування α_t за формулою (4.2) :

$$\alpha_t = (1+E)^{-t} \quad (4.2)$$

де E – норма дисконту , відсоткова ставка за кредитною позицією згідно міжнародної кредитної лінії 10 % річних $E=0,1$.

Економія витрат визначена потужністю на нагрів зовнішнього повітря при відкритому вікні в зимовий період з розрахунку 0,5 кратності приміщення площею 70м³. Робота установки ще в перший рік роботи повністю економить 50% електричної потужності, яка була би використана для нагріву зовнішнього повітря. Економія витрат визначена потужністю що була б використана для охолодження при роботі системи кондиціонування при відкритому вікні в літній період з розрахунку споживання електричної енергії звичайного кондиціонера потужністю охолодження 2,5кВт з роботою не більше 18 годин на добу .

Чистий інтегральний дисконтований прибуток (чиста поточна вартість) NPV розраховується за формулою (4.3):

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{(D_t - B_t)}{(1+E)^t} \quad (4.3)$$

Термін окупності проекту згідно розрахунків починається на 8 році реалізації проекту. Дані розрахунків наведено в таблиці 4.8.

4.4. Висновок: Аналізуючи дані порівняння вартості капітальних та експлуатаційних витрат використання фільтр-теплообмінника має значні переваги перед використанням стандартної рециркуляційної установки та двох очищувачів з прямою системою. 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. Хоча термін окупності дещо перевищує очікуванні ринком терміни окупності, використання фільтр-теплообмінника дозволяє підняти показники енергоефективності будівлі, значно заощадити на енергопостачанні та дозволяє досягти стандартів якості повітря в побутових умовах, що неможна оцінити економічно поки що.

Таблиця 4.8. Показники економічної ефективності впровадження фільтр- теплообмінника.

Вихідні дані	Розрахунковий період								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Капітальна витрати Кt, грн	28789,2								
Вартість, 1кВтгодина/грн		4,3	7	8	8	9	9	11	11
Експлуатаційні витрати В експ.т,грн		19512,02	31763,76	36301,44	36301,44	40839,12	40839,12	49914,48	49914,48
Економія витрат зимовий період,грн		10897,92	17740,80	20275,20	20275,20	22809,60	22809,60	27878,40	27878,40
Економія витрат літній період,грн		11702,88	19051,20	21772,80	21772,80	24494,40	24494,40	29937,60	29937,60
Показники ефективності									
Дохід (економія витрат за літній та зимовий період)Dt, грн		22600,80	36792,00	42048,00	42048,00	47304,00	47304,00	57816,00	57816,00
Витрати на реалізацію $Bt=Kt+V_{\text{експ.т}}$, грн	28789,20	19512,02	31763,76	36301,44	36301,44	40839,12	40839,12	49914,48	49914,48
Економічний ефект, $Dt-Bt$	-28789,20	3088,78	5028,24	5746,56	5746,56	6464,88	6464,88	7901,52	7901,52
Економічний ефект дисконтований $(Dt-Bt)/(1+E)^t$	-28789,20	2807,98	4155,57	4317,48	3924,98	4014,18	3649,26	4460,20	4460,20
Чиста вартість NPV, грн	-28789,20	-25981,22	-21825,65	-17508,18	-13583,20	-9569,02	-5919,76	-1459,56	3000,64

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне обґрунтування, та експериментально доведено доцільність використання, повітроочишувача рециркуляційного типу нової конструкції – «фільтр-теплообмінник». Вивчено його характеристики до підтримання якості повітря при різних рівнях забруднення. Доведено ефективність приладу при відомих обмеженнях в часі очищення та визначено рівняння, які дозволяють прогнозувати параметри роботи приладу, такі як час очищення, його теплотехнічні параметри теплообмінної частини. Досліджено теплообмінні процеси в його рекуперативній частині без використання додаткової енергії на нагрів зовнішнього повітря. Запропоновано нове вирішення наукової задачі для визначення числа Нуссельта для теплообмінників такого типу, як результат вивчення теплообміну при поперечному обтіканні одиночної труби та пучка труб. Також проведено економічні розрахунки для обґрунтування окупності фільтр-калорифера в порівнянні з обладнанням, яке можуть виконувати аналогічні функції.

Головними науковими і практичними результатами дисертації є:

Наукова новизна полягає :

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'єму повітря для дихання;

- конструкція теплообмінника для підігріву зовнішнього (свіжого) повітря за рахунок теплового потенціалу внутрішнього (рециркуляційного) повітря.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

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 150м² 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 150м²;

- 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.

Експериментальна установка встановлена в виробничому приміщенні ТОВ«Аксон» в приміщенні для виробництва виробів подвійного призначення (друк пайка та збірка пластикових деталей до літальних приладів).

Список використаних джерел інформації.

1. EPA (2009), "Integrated Science Assessment for Particulate Matter," EPA/600/R-08/139F, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC., December 2009.
2. World Health Organization. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.
3. World Health Organization. (2015). Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth. In *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: clean air, health and wealth*.
4. Wang, L. K. (2005). *Advanced air and noise pollution control*. American.
5. Wang, L. K., Pereira, N. C., Hung, Y. T., & Li, K. H. (Eds.). (2004). *Air pollution control engineering* (Vol. 1). Totowa, NJ: Humana press.
6. Bhola R.Gurjar, Luisa T. Molina, Chandra S.P.Ojha. AIR POLLUTION .Health and Environmental Impacts .2010
7. Xu, Z., & Zhou, B. (2014). *Fundamentals of air cleaning technology and its application in cleanrooms* (pp. 560-567). Springer Berlin Heidelberg.
8. Moles, N. (2006). Investigation of techniques and effects of diesel particulate filter cleaning.
9. Wangchuk, T. (2016). *Quantitative assessment of air quality in different indoor and outdoor environments in rural Bhutan* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
10. Taylor, W. L. (2020). The connection between indoor air quality and mental health outcomes.
11. Tseng, T. W. (2021). *Exposure to household air pollution and cognitive function among older adults in northern China*. McGill University (Canada).
12. Schmalensee, R., & Stavins, R. N. (2019). Policy evolution under the clean air act. *Journal of Economic Perspectives*, 33(4), 27-50.
13. Cao, Q. (2019). *A Cleaning System for Urban Air Pollution Removal* (Doctoral dissertation, University of Minnesota).
14. Ding, J., Yu, C. W., & Cao, S. J. (2020). HVAC systems for environmental control to minimize the COVID-19 infection. *Indoor and Built Environment*, 29(9), 1195-1201.
15. Montgomery, J. (2015). *Air filtration: predicting and improving indoor air quality and energy performance* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
16. 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 -

<https://drive.google.com/file/d/18Hg2JA7eP4qkqhJbW4szjTBIwela-9bW/view>

17. Макаренко, Л. (2024, February). КРАТНІСТЬ ПОВІТРООБМІНУ ТА ВІДНОСНА ВОЛОГОСТЬ ЯК ФАКТОР ВПЛИВУ НА ТРИВАЛІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ЧАСТОК РМ 2.5 ДО РЕКОМЕНДОВАНИХ ВООЗ РІВНІВ. In *X 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. (p. 277).
18. Wang, Z. (2011). *Dynamic botanical filtration system for indoor air purification*. Syracuse University.
19. Newkirk, D. W. (2014). *Improving indoor air quality through botanical air filtration in energy efficient residences* (Master's thesis, Purdue University).
20. Pagels, J., Alsved, M., Malmberg, V., Omelekhina, Y., Wierzbicka, A., & Bohgard, M. (2019). Airborne dust removal using mobile air cleaners in the construction sector.
21. Макаренко, Л. (2024, March). ПРИРОДНЕ ОСАДЖЕННЯ ЯК СКЛАДОВА МЕХАНІЧНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ЧАСТОК РМ2. 5 В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ. In *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. (p. 363).
22. Xu, C., & Liu, L. (2018). Personalized ventilation: one possible solution for airborne infection control in highly occupied space?. *Indoor and Built Environment*, 27(7), 873-876.
23. Licina, D., Melikov, A., Pantelic, J., Sekhar, C., & Tham, K. W. (2015). Human convection flow in spaces with and without ventilation: personal exposure to floor-released particles and cough-released droplets. *Indoor air*, 25(6), 672-682.
24. Jurelionis, A., Stasiulienė, L., Prasauskas, T., & Martuzevicius, D. (2018). Dispersion of indoor air pollutants emitted at near-floor levels in rooms with floor heating and mixing ventilation. *Indoor and Built Environment*, 27(2), 205-218.
25. Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Morawska, L., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., ... & Katoshevski, D. (2009). Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of aerosol science*, 40(2), 122-133.
26. Brohus, H. (1997). Personal exposure to contaminant sources in ventilated rooms. (Doctoral dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University).

27. Shi, B. (2012). *Removal of ultrafine particles by intermediate air filters in ventilation systems: Evaluation of performance and analysis of applications*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden). THESIS PhD.
28. Qian, H., & Zheng, X. (2018). Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings. *Journal of thoracic disease*, 10(Suppl 19), S2295.
29. Kosonen, R., Melikov, A. K., Mundt, E., Mustakalio, P., & Nielsen, P. V. (2017). *Displacement ventilation*. Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations, REHVA.
30. Zhang, J. S., R. H. Zhang, Z. H. Li, C. Y. Shaw, L. L. Christianson, and L. H. Sparks. 1995. An experimental study of the ventilation performance of cold air distribution systems. *ASHRAE Transactions*, 100, 2, pp. 360-367
31. Sandle, T. (2020). Review of the efficacy of HEPA filtered air to control coronavirus risks in cleanrooms. *Eur. J. Parenter. Pharm. Sci*, 252(10.37521), 25203.
32. Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., ... & Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?. *Environment international*, 142, 105832.
33. Chan, K. H., Peiris, J. M., Lam, S. Y., Poon, L. L. M., Yuen, K. Y., & Seto, W. H. (2011). The effects of temperature and relative humidity on the viability of the SARS coronavirus. *Advances in virology*, 2011(1), 734690.
34. Yang, C., Yang, X., Xu, Y., & Srebric, J. (2007). Contaminant dispersion in personal displacement ventilation.
35. Yang, J., Sekhar, S. C., Cheong, K. W. D., & Raphael, B. (2015). Performance evaluation of a novel personalized ventilation–personalized exhaust system for airborne infection control. *Indoor Air*, 25(2), 176-187.
36. Junjing, Y., Sekhar, C., Cheong, D., & Raphael, B. (2014). Performance evaluation of an integrated Personalized Ventilation–Personalized Exhaust system in conjunction with two background ventilation systems. *Building and environment*, 78, 103-110.
37. Li, J. (2021). *Patient Room Design that Integrates the Personalized Ventilation System for Cross-Infection Control* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
38. Wu, Y. L., Wu, Y. L., & Hanifan, A. H. (2020, April). Study on ventilation performance in operating room with variation ventilation design. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1500, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.

39. Jouvray, A. (2003). *Computation and measurements of flows in rooms* (Doctoral dissertation, University of Warwick).
40. Hagström, K., Sirén, K., & Zhivov, A. M. (1999). Calculation methods for air supply design in industrial facilities. Literature review.
41. Müller, D., Kandzia, C., Kosonen, R., Melikov, A. K., & Nielsen, P. V. (2013). *Mixing ventilation: Guide on mixing air distribution design*. REHVA: Federation of European Heating and Air-conditioning Associations.
42. 1) Shaw, C. Y., Zhang, J. S., Said, M. N., Vaculik, F., & Magee, R. J. (1993). Effect of air diffuser layout on the ventilation conditions of a workstation-Part 1 air distribution patterns.
2) Shaw, C. Y., Zhang, J. S., Said, M. N., Vaculik, F., & Magee, R. J. (1993). Effect of air diffuser layout on the ventilation conditions of a workstation, part II: air change efficiency and ventilation efficiency.
43. Wang, C. (2019). *Ventilation performance in operating rooms: a numerical assessment* (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
44. Foda, E. (2012). Evaluating local and overall thermal comfort in buildings using thermal manikins. DOCTORAL DISSERTATIONS.
45. Kapalo, P., Domnita, F., & Lojkovics, J. (2014). Methodology for calculating the fresh air ventilation airflow rate based on CO₂ concentration. *Pollack Periodica*, 9(2), 89-97.
46. Deng, H. Y., Feng, Z., & Cao, S. J. (2018). Influence of air change rates on indoor CO₂ stratification in terms of Richardson number and vorticity. *Building and Environment*, 129, 74-84.
47. Clausen, G. (2003). ECA 23: Ventilation, good indoor air quality and rational use of energy.
48. Zhou, Q., Qian, H., Ren, H., Li, Y., & Nielsen, P. V. (2017). The lock-up phenomenon of exhaled flow in a stable thermally-stratified indoor environment. *Building and Environment*, 116, 246-256.
49. Zhou, Q., Qian, H., & Liu, L. (2018). Numerical investigation of airborne infection in naturally ventilated hospital wards with central-corridor type. *Indoor and Built Environment*, 27(1), 59-69.
50. Wei, J., & Li, Y. (2016). Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *American journal of infection control*, 44(9), S102-S108.
51. Ai, Z. T., & Melikov, A. K. (2018). Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review. *Indoor air*, 28(4), 500-524.
52. Loomans, M. G. L. C. (1998). The measurement and simulation of indoor air flow.
53. Pan, M., Lednicky, J. A., & Wu, C. Y. (2019). Collection, particle sizing and detection of airborne viruses. *Journal of applied microbiology*, 127(6), 1596-1611.

54. Thomas, A. M., & Simmons, M. J. (2018). The effectiveness of ultra-clean air operating theatres in the prevention of deep infection in joint arthroplasty surgery. *The bone & joint journal*, 100(10), 1264-1269.
55. Eroğlu, M. (2019). *Estimation of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) noise levels in hospitals* (Master's thesis, Middle East Technical University).
56. Aris, M., & Shukri, M. (2013). *An assessment of indoor air quality at two contrasting location and building ventilation types in London* (Doctoral dissertation, King's College London (University of London)).
57. da Roza, R. A. (1982). *Particle size for greatest penetration of hepa filters-and their true efficiency* (No. UCRL-53311). Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
58. Roelants, P., Boon, B., & Lhoest, W. (1968). Evaluation of a Commercial Air Filter for Removal of Virus from the Air. *Applied Microbiology*, 16(10), 1465-1467.
59. US Environmental Protection Agency. (2021). Air cleaners, HVAC filters, and coronavirus (COVID-19). <https://www.epa.gov/coronavirus/air-cleaners-hvac-filters-and-coronavirus-covid-19>
60. Harriman, L., Stephens, B., & Brennan, T. (2019). New guidance for residential air cleaners. *ASHRAE J*, 61, 14-23.
61. Evaluation of In-Room Particulate Matter Air Filtration Devices. EPA/600/R-08/012 | October 2008 | www.epa.gov/ord
62. Criteria for room air cleaners for particulate matter. REHVA. 2020. https://www.rehva.eu/fileadmin/content/documents/Downloadable_documents/REHVA_COVID-19_Recommendation_Criteria_for_room_air_cleaners_for_particulate_matter.pdf
63. Offermann FJ, Sextro RG, Fisk WJ, Grimsrud DT, Nazaroff WW, Nero AV, Revzan KL, Yater J. Control respirable particles in indoor air with portable air cleaners— Atmospheric Environment (1967). 1985 Jan 1;19(11):1761-71.
64. Christopherson, D. A., Yao, W. C., Lu, M., Vijayakumar, R., & Sedaghat, A. R. (2020). High-efficiency particulate air filters in the era of COVID-19: function and efficacy. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 163(6), 1153-1155.
65. Kelly, F. J., & Fussell, J. C. (2018). Improving indoor air quality, health and performance within environments where people live, travel, learn and work. ATMOSPHERIC ENVIRONMENT. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.058>

66. Mudiya, Pavan Kumar, "Experimental Testing and Performance Analysis of "Room Air Cleaners"" (2008). *ETD Archive*. 427. <https://engagedscholarship.csuohio.edu/etdarchive/427>
67. Centers for Disease Control and Prevention. (2020). Guidelines for environmental infection control in health-care facilities (2003). *Appendix B. Air*. Available online: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/appendix/air.html#tableb1>. Accessed March, 16.
68. Joseph, G., Schramm, P. J., Vaidyanathan, A., Breysse, P., & Goodwin, B. (2020). Evidence on the use of indoor air filtration as an intervention for wildfire smoke pollutant exposure: A summary for health departments.
69. AIA Academy of Architecture for Health, & Facilities Guidelines Institute. (2001). *Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities*. American Institute of Architects.
70. Handbook-Fundamentals, A. S. H. R. A. E., & Edition, S. I. (2009). Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Inc.(see page 14.14 for summary description of RP-1171 work on uncertainty in design temperatures)*.
71. ISO 29463-1:2024 (2024). *High Efficiency Filters and Filter Media for Removing Particles from Air — Part 1: Classification, Performance, Testing and Marketing..*
72. ДСТУ EN 779:2019 Фільтри повітря для загальної вентиляції. Визначення ефективності фільтрації (EN 779:2012, IDT)
73. ISO 21501-1 *Determination of particle size distribution — Single particle light interaction methods: — Part 1: Light scattering aerosol spectrometer*
74. ISO 21501-4 *Determination of particle size distribution — Single particle light interaction methods: Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spaces.*
75. IEST-RP-CC014.2 *Calibration and characterization of optical airborne particle counters.*
76. SIST EN 1822-1:2019 - *High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking*
77. EN ISO 29463-3:2018 - *High-efficiency filters and filter media for removing particles in air - Part 3: Testing flat sheet filter media (ISO 29463-3:2011).*
78. The NAFA Guide to Air Filtration, Sixth Edition is published by the National Air Filtration Association (NAFA). 2021. ISBN No: 978-0-938423-22-5
79. Xu, Z., & Xu, Z. (2014). Filtration mechanism of fine particle. *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms*, 133-183.
80. Liu, C., Dai, Z., He, B., & Ke, Q. F. (2020). The effect of temperature and humidity on the filtration performance of electret melt-blown nonwovens. *Materials*, 13(21), 4774.

81. Bergman, W., First, M. W., Anderson, W. L., Gilbert, H., & Jacox, J. W. (1995). *Criteria for calculating the efficiency of deep-pleated HEPA filters with aluminum separators during and after design basis accidents* (No. UCRL-JC-119798; CONF-940738-12). Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
82. Hsiao, T. C. (2009). *Aerosol filtration and separation*. Washington University in St. Louis. Dissertation.
83. Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., & Appert-Collin, J. C. (2016). *Aerosol filtration*. Elsevier.
84. Abdolghader, P. (2018). *Development of an Experimental Setup to Measure the Effectiveness of Mechanical Filters For Nanoparticles* (Doctoral dissertation, Concordia University)
85. Lee, K. W., & Liu, B. Y. H. (1980). On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30(4), 377-381.
86. Xu, Z. (2018). *Air purifier: Property, assessment and applications*. Springer.
87. Cao, Q., Kuehn, T. H., Kim, S. C., Ou, Q., Pei, C., & Pui, D. Y. (2021). An experimentally validated analytical model for aerosol number concentration reduction in classrooms. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(9), 210038.
88. Alrazni, W. H. (2016). *Improving indoor air quality (IAQ) in Kuwaiti housing developments at design, construction, and occupancy stages*. University of Salford (United Kingdom)..
89. Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L., ... & Clements-Croome, D. (2017). A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. *Sustainable cities and society*, 32, 375-396..
90. Wirtanen, G., Miettinen, H., Pakkala, S., Enbom, S., & Vanne, L. (2002). Clean air solutions in food processing. *VTT publications*.
91. Zhan, Y. (2018). *The Influence of Air Cleaners on Indoor Particulate Matter Concentrations and Oxidative Potential in Residential Households in Beijing* (Doctoral dissertation).
92. Michaelis, S. (2010). *Health and Flight Safety Implications from Exposure to Contaminated Air in Aircraft* (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
93. Tanskyi, O. (2012). *Analysis of Innovative HVAC System Technologies and Their Application for Office Buildings in Hot and Humid Climates* (Doctoral dissertation, Texas A & M University)..
94. Schiavon, S. (2008). Energy saving with personalized ventilation and cooling fan. Thesis PhD .
95. Wongwatcharapaiboon, J. (2017). *Experimental investigations of indoor air particular matter in hot and humid climates* (Doctoral dissertation, University of Nottingham).

96. Jiao, Z. (2018). *Optimize Ventilation Systems in Confined Workplaces Using Computational Fluid Dynamics* (Doctoral dissertation).
97. Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The lancet*, 389(10082), 1907-1918.
98. Conibear, L. A. (2018). *Ambient air quality and human health in India* (Doctoral dissertation, University of Leeds).
99. Luongo, J. C., Fennelly, K. P., Keen, J. A., Zhai, Z. J., Jones, B. W., & Miller, S. L. (2016). Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. *Indoor air*, 26(5), 666-678.
100. Li, Y., Leung, M., Tang, J. W., Yang, X., Chao, C. Y. H., Lin, J. Z., ... & Yuen, P. L. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review. *Indoor air*, 17(1).
101. Coyle, J. P., Derk, R. C., Lindsley, W. G., Blachere, F. M., Boots, T., Lemons, A. R., ... & Noti, J. D. (2021). Efficacy of ventilation, HEPA air cleaners, universal masking, and physical distancing for reducing exposure to simulated exhaled aerosols in a meeting room. *Viruses*, 13(12), 2536.
102. Liao, J., Ye, W., Pillarisetti, A., & Clasen, T. F. (2019). Modeling the impact of an indoor air filter on air pollution exposure reduction and associated mortality in Urban Delhi household. *International journal of environmental research and public health*, 16(8), 1391.
103. Morishita, M., Adar, S. D., D'Souza, J., Ziemba, R. A., Bard, R. L., Spino, C., & Brook, R. D. (2018). Effect of portable air filtration systems on personal exposure to fine particulate matter and blood pressure among residents in a low-income senior facility: a randomized clinical trial. *JAMA internal medicine*, 178(10), 1350-1357.
104. Tzoutzas, I., Maltezou, H. C., Barmpareos, N., Tasios, P., Efthymiou, C., Assimakopoulos, M. N., ... & Madianos, P. (2021). Indoor air quality evaluation using mechanical ventilation and portable air purifiers in an academic dentistry clinic during the COVID-19 pandemic in Greece. *International journal of environmental research and public health*, 18(16), 8886.
105. Drieling, R. L., Sampson, P. D., Krenz, J. E., Tchong French, M. I., Jansen, K. L., Massey, A. E., ... & Karr, C. J. (2022). Randomized trial of a portable HEPA air cleaner intervention to reduce asthma morbidity among Latino children in an agricultural community. *Environmental Health*, 21, 1-16.

106. Env'tl & Occupational Health Sciences, Healthy Air, Healthy Schools Study: Phase 1 Report: Report to the Washington State Legislature (Dec. 2021). <https://deohs.washington.edu/sites/default/files/2021-12/Healthy-air-healthy-schools-phase1-report%20FINAL%2021521.pdf>
107. Sublett, J. L., Seltzer, J., Burkhead, R., Williams, P. B., Wedner, H. J., Phipatanakul, W., ... & Immunology Indoor Allergen Committee. (2010). Air filters and air cleaners: rostrum by the American academy of allergy, asthma & immunology indoor allergen committee. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 125(1), 32-38.
108. Barn, P. (2018). A randomized air filter intervention study of air pollution and fetal growth in a highly polluted community: the Ulaanbaatar Gestation and Air Pollution Research (UGAAR) study.
109. Hammond, A., Khalid, T., Thornton, H. V., Woodall, C. A., & Hay, A. D. (2021). Should homes and workplaces purchase portable air filters to reduce the transmission of SARS-CoV-2 and other respiratory infections? A systematic review. *PLoS One*, 16(4), e0251049.
110. Hanley, J. T., Ensor, D. S., Smith, D. D., & Sparks, L. E. (1994). Fractional aerosol filtration efficiency of in-duct ventilation air cleaners. *Indoor air*, 4(3), 169-178.
111. Bluysen, P. M., Ortiz, M., & Zhang, D. (2021). The effect of a mobile HEPA filter system on 'infectious' aerosols, sound and air velocity in the SenseLab. *Building and environment*, 188, 107475.
112. Eurovent 4/9:1997 Method of testing air filters used in general ventilation for determination of fractional efficiency.
113. ASHRAE (2019a) ANSI/ASHRAE standard 62.1-2019 ventilation for acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers, Georgia
114. Fenton, D. L., Gunaji, M. V., Gregory, W. S., & Martin, R. A. (1985). *Investigation of high-efficiency particulate air filter plugging by combustion aerosols* (No. NUREG/CR-4264; LA-10436-MS). Los Alamos National Lab., NM (USA).
115. Feng, Z., Long, Z., & Chen, Q. (2014). Assessment of various CFD models for predicting airflow and pressure drop through pleated filter system. *Building and Environment*, 75, 132-141.
116. Schousboe, F. C. (2017). Media velocity considerations in pleated air filtration.
117. Xu, Z., & Xu, Z. (2014). Structural Design of HEPA Filter. *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms*, 267-288.
118. Tebbutt, C. B. (1995). CFD model of flow through air filter pleats.

119. Al-Attar, I. S., Wakeman, R., Tarleton, E., & Husain, A. (2009). The effect of pleat count and air velocity on the initial pressure drop and fractional efficiency of HEPA filters. *IN: Proceedings of Filtech*, 9, 19-26.
120. Saleh, A. M. (2015). Micro-and Macro-scale Modeling of Filter Aging: Effects of Particle Polydispersity and Fiber Cross-sectional Shape.
121. Cho, H., & Waggoner, C. A. (2016). Effect of Elevated Temperature and Humidity on Air Flow for HEPA Filter Testing. In *34th Nuclear Air Cleaning Conference, San Antonio, TX (June)*. Accessed May (Vol. 22, p. 2022).
122. Kong, M., Shen, J., Dong, B., & Zhang, J. J. (2020). Effectiveness of building systems strategies for mitigation of airborne transmission of SARS-CoV-2.
123. Mølgaard, B., Koivisto, A. J., Hussein, T., & Hämeri, K. (2014). A new clean air delivery rate test applied to five portable indoor air cleaners. *Aerosol Science and Technology*, 48(4), 409-417.
124. Suksuntornsiri, P., Lek-ngam, S., & Limpitpanich, P. (2020). Effects of add-on high-efficiency filter on room air conditioning performance in a Thai climate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 18, 100604.
125. Goetzler, W., Guernsey, M., Young, J., Fujrman, J., & Abdelaziz, A. (2016). *The future of air conditioning for buildings* (No. DOE/EE-1394). Navigant Consulting, Burlington, MA (United States).
126. Stephens, B., Novoselac, A., & Siegel, J. A. (2010). The effects of filtration on pressure drop and energy consumption in residential HVAC systems (RP-1299). *Hvac&R Research*, 16(3), 273-294.
127. Siegel, J., Walker, I., & Sherman, M. (2002). Dirty air conditioners: Energy implications of coil fouling.
128. Kruger, A. J. (2013). *The Impact of Filter Loading on Residential HVAC Performance* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
129. Yang, J., Sekhar, S. C., Cheong, K. W. D., & Raphael, B. (2015). Performance evaluation of a novel personalized ventilation–personalized exhaust system for airborne infection control. *Indoor Air*, 25(2), 176-187.
130. Al Assaad, D., Ghali, K., & Ghaddar, N. (2019). Effect of flow disturbance induced by walking on the performance of personalized ventilation coupled with mixing ventilation. *Building and Environment*, 160, 106217.

131. Kong, M. (2017). *Semi-open space and micro-environmental control for improving thermal comfort, indoor air quality, and building energy efficiency* (Doctoral dissertation, Syracuse University).
132. Kang, S. Y., Siegel, J., & Novoselac, A. (2008, August). Effective positioning of portable air cleaning devices in multizone residential buildings. In *11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen-Denmark* (pp. 17-22).
133. Virta, M., & Mathur, S. Indoor Air Quality Improvement in a School Building in Delhi.
134. Lindsley, W. G. (2021). Efficacy of portable air cleaners and masking for reducing indoor exposure to simulated exhaled SARS-CoV-2 aerosols—United States, 2021. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 70.
135. Smythe, A. (2018). *Effectiveness of particle air purifiers in improving the air quality in classrooms in three urban public schools in the Northeastern United States* (Master's thesis, Harvard University).
136. Johnson, K. K. (2020). *Evaluating air pollutant exposure and the impacts of indoor air filtration using low-cost monitors* (Doctoral dissertation, Duke University).
137. Perry, J. L., Agui, J. H., & Vijayakumar, R. (2016). *Submicron and nanoparticulate matter removal by HEPA-rated media filters and packed beds of granular materials* (No. M-1414).
138. BULEJKO, Pavel. *Application of Polymeric Hollow-Fiber Membranes in Air Filtration*. Online, Disertační práce, vedoucí Tomáš Svěrák. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Laboratoř přenosu tepla a proudění, 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/176153>. [cit. 2024-11-28].
139. Bulejko, P., Křištof, O., & Dohnal, M. (2021). An assessment on average pressure drop and dust-holding capacity of hollow-fiber membranes in air filtration. *Membranes*, 11(7), 467.
140. Kanaoka, C. (2019). Fine particle filtration technology using fiber as dust collection medium. *KONA Powder and Particle Journal*, 36, 88-113.
141. Abd Ali, S. A. Z. (2018). *Filtration performances of antimicrobial and regular HVAC filters regarding PM10 and microbial aerosols in laboratory and realistic conditions* (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique)..
142. Hoeksma, P., Aarnink, A. J. A., & Ogink, N. W. M. (2015). *Effect of temperature and relative humidity on the survival of airborne bacteria= Effect van temperatuur en relatieve luchtvochtigheid op de overleving van bacteriën in de lucht* (No. 864). Wageningen UR Livestock Research.

143. Komaladewi, A. A. I. A. S., Khoiruddin, K., Surata, I. W., Subagia, I. D. G. A., & Wenten, I. G. (2018). Recent advances in antimicrobial air filter. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 67, p. 03016). EDP Sciences.
144. Al-Abkari HA. Studies on microbial contamination in air conditioning systems in the Eastern region of Saudi Arabia Kingdom and their control [M.Sc. thesis in Microbiology]. Dammam, Saudi Arabia: University of Dammam; 2014
145. Ma, D. X. Y. (2020). Environmentally benign three-dimensional aerogels for air filtration and the mechanisms.
146. Li, R., Cui, L., Chen, M., & Huang, Y. (2021). Nanomaterials for airborne virus inactivation: a short review. *Aerosol Science and Engineering*, 5, 1-11.
147. Mainka, A., Mucha, W., Pastuszka, J. S., Brągoszewska, E., & Janoszek, A. (2020). Non-commercial Air Purifier—The Effectiveness and Safety. *Buildings*, 10(6), 104.
148. Garzona-Navas, A., Sajgalik, P., Csécs, I., Askew, J. W., Lopez-Jimenez, F., Niven, A. S., ... & Allison, T. G. (2021). Mitigation of aerosols generated during exercise testing with a portable high-efficiency particulate air filter with fume hood. *Chest*, 160(4), 1388-1396.
149. Stefanov, B. (2015). *Photocatalytic TiO₂ thin films for air cleaning: Effect of facet orientation, chemical functionalization, and reaction conditions* (Doctoral dissertation, Acta Universitatis Upsaliensis)..
150. Chen, W., Zhang, J. S., & Zhang, Z. (2005). Performance of air cleaners for removing multiple volatile organic compounds in indoor air. *ASHRAE transactions*, 111(1), 1101-1114.
151. Nie, J. (2015). *Active indoor air cleaning and heat recovery technology for energy saving of building ventilation*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering..
152. Popescu, R. S., Blondeau, P., & Colda, I. (2010, May). Modeling of an air cleaning device with activated carbon filter. In *Clima 2010 Conference, Antalya, Turkey*.
153. Deng, Z., & Zhang, X. (2018). Performance test and structural analysis of indoor air purifier. *Chemical Engineering Transactions*, 71, 817-822.
154. Kholafaei, H. (2009). *Indoor air contaminant removal: full-scale testing of in-duct filters* (Doctoral dissertation, Concordia University).
155. Carlucci, D. (2019). *URBAN AIR CLEANER DESIGN AND FEASIBILITY STUDY* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
156. Zhong, L., & Haghighat, F. (2015). Photocatalytic air cleaners and materials technologies—abilities and limitations. *Building and Environment*, 91, 191-203.

157. Godoy, C., & Thomas, D. (2020). Influence of relative humidity on HEPA filters during and after loading with soot particles. *Aerosol Science and Technology*, 54(7), 790-801.
158. Al-abdalall, A. H., Al-dakheel, S. A., & Al-Abkari, H. A. (2019). Impact of air-conditioning filters on microbial growth and indoor air pollution. *Low-temperature technologies*, 179-206.
159. Giampieri, A., Ma, Z., Smallbone, A., & Roskilly, A. P. (2018). Thermodynamics and economics of liquid desiccants for heating, ventilation and air-conditioning—An overview. *Applied Energy*, 220, 455-479.
160. Gupta, A., Novick, V. J., Biswas, P., & Monson, P. R. (1993). Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters. *Aerosol Science and Technology*, 19(1), 94-107.
161. Stephens, B., Novoselac, A., & Siegel, J. A. (2009). Impacts of HVAC Filtration on air-conditioner energy consumption in residences. In *Proceedings of Healthy Buildings* (Vol. 2009).
162. Islam MR, Air-conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems. Institution of Engineers. [https://www.ies.org.sg/Tenant/C0000005/PDF%20File/Registry/SCem/ACMV\(1\).pdf](https://www.ies.org.sg/Tenant/C0000005/PDF%20File/Registry/SCem/ACMV(1).pdf). Accessed 24 Oct 2022
163. Huang, S. H., Chen, C. W., Kuo, Y. M., Lai, C. Y., McKay, R., & Chen, C. C. (2013). Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(1), 162-171.
164. Rivers, R. D., & Murphy, D. J. (1996). ASHRAE 675-RP: Determination of Air Filter Performance under Variable Air Volume (VAV) Conditions—Final Report—Part I—experimental Studies”. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
165. Sipes, J. (2011). Basics of Air Filtration. *Price Industries* [https://www. priceindustries. com/content/uploads/assets/literature/technical-papers/basics-ofair-filtration. pdf](https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/technical-papers/basics-ofair-filtration.pdf).
166. Qian, Y., Willeke, K., Ulevicius, V., & Grinshpun, S. A. (1997). Particle reentrainment from fibrous filters. *Aerosol Science and Technology*, 27(3), 394-404.
167. Wang, Q. (2008). An Investigation of Aerosol Filtration via Fibrous Filters.
168. Zhang, W. (2021). Dynamic filtration resistance of fibrous filter media used for general ventilation and clean air-conditioning.
169. Alqahtani, F. (2020). *Performance Study of Five Different Cabin Air Filters in The Laboratory and On-Road Drive*. West Virginia University.

170. Song, W., Zhang, Z., Chen, Z., Wang, F., & Yang, B. (2022). Thermal comfort and energy performance of personal comfort systems (PCS): A systematic review and meta-analysis. *Energy and Buildings*, 256, 111747.
171. Pan, C. S., Chiang, H. C., Yen, M. C., & Wang, C. C. (2005). Thermal comfort and energy saving of a personalized PFCU air-conditioning system. *Energy and buildings*, 37(5), 443-449..
172. Janbakhsh, S. (2015). *A ventilation strategy based on confluent jets: an experimental and numerical study* (Vol. 1671). Linköping University Electronic Press.
173. Ivanova, Y. M., Pallubinsky, H., Kramer, R., & van Marken Lichtenbelt, W. (2021). The influence of a moderate temperature drift on thermal physiology and perception. *Physiology & behavior*, 229, 113257.
174. Luo, W., Kramer, R., de Kort, Y., & van Marken Lichtenbelt, W. (2022). Effectiveness of personal comfort systems on whole-body thermal comfort—a systematic review on which body segments to target. *Energy and Buildings*, 256, 111766.
175. Dalgo, D. A. (2018). DATA-DRIVEN ANALYSIS OF INDIVIDUAL THERMAL COMFORT WITH PERSONALIZED COOLING.
176. Veselý, M., & Zeiler, W. (2014). Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 401-408.
177. Cruceanu, I., Maalouf, C., Colda, I., & Lachi, M. (2013). Parametric study and energy analysis of a personalized ventilation system. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*.
178. Yang, B., Melikov, A. K., Kabanshi, A., Zhang, C., Bauman, F. S., Cao, G., ... & Lin, Z. (2019). A review of advanced air distribution methods-theory, practice, limitations and solutions. *Energy and Buildings*, 202, 109359.
179. Conceição, E., & Awbi, H. (2021). Evaluation of integral effect of thermal comfort, air quality and draught risk for desks equipped with personalized ventilation systems. *Energies*, 14(11), 3235.
180. Haaland, D. (2016). *The Development of Quantitative Filter Forensics for Indoor Air Quality Sampling and a Pre-Retrofit Indoor Environmental Quality Assessment of Pre-War Multi-Unit Residential Buildings*. University of Toronto (Canada).
181. Schiavon, S., & Melikov, A. (2008). Energy analysis of a personalized ventilation system in a cold climate: influence of the supplied air temperature.

182. Halvoňová, B., & Melikov, A. K. (2010). Performance of “ductless” personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation: Impact of intake height. *Building and Environment*, 45(4), 996-1005.
183. Terkildsen, S. (2013). Development of mechanical ventilation system with low energy consumption for renovation of buildings.
184. Schiavon, S., Melikov, A. K., & Sekhar, C. (2010). Energy analysis of the personalized ventilation system in hot and humid climates. *Energy and buildings*, 42(5), 699-707.
185. Diez Maroto, M. (2011). Filtration efficiency of intermediate ventilation air filters on ultrafine and submicron particles.
186. Lu, Z., Wei, Z., Li, Q., & Wang, H. (2019). Numerical simulation of dust deposition in the filter tube of adsorption air purifier. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(1), 9478659.
187. Alavy Ghahfarrokhy, S. M. (2019). *In-situ Measurement of Ventilation and Impacts of Filtration on IEQ and Energy use of Residential Buildings* (Doctoral dissertation).
188. Thomas, D., Pacault, S., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., & Appert-Collin, J. C. (2019). Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model. *Separation and Purification Technology*, 215, 557-564.
189. Xu, J., Fu, S., & Chao, C. Y. (2021). Performance of airflow distance from personalized ventilation on personal exposure to airborne droplets from different orientations. *Indoor and Built Environment*, 30(10), 1643-1653..
190. Pantelic, J., Sze-To, G. N., Tham, K. W., Chao, C. Y., & Khoo, Y. C. M. (2009). Personalized ventilation as a control measure for airborne transmissible disease spread. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(suppl_6), S715-S726.
191. Zhao, W., Kosonen, R., Kilpeläinen, S., & Lestinen, S. (2019). A review of total volume environment and individually controlled micro-environment. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 111, p. 02002). EDP Sciences.
192. Stephens, B., Novoselac, A., & Siegel, J. A. (2009). Impacts of HVAC Filtration on air-conditioner energy consumption in residences. In *Proceedings of Healthy Buildings* (Vol. 2009).
193. Center, F. S. E., & Fenaughty, K. (2018). Evaluation Of Air Conditioning Performance Degradation: Opportunities From Diagnostic Methods.
194. Faulkner, D. (2001). Performance and cost of particle air filtration technologies. *Indoor air*, 12(4).

195. Chimack, M., & Sellers, D. (2000). Using extended surface air filters in heating ventilation and air conditioning systems: Reducing utility and maintenance costs while benefiting the environment. *the Proceedings of the 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 3, 77-88.
196. Mazanec, V., & Kabele, K. (2019, June). Effect of the personalized ventilation to a human thermal comfort. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 290, No. 1, p. 012146). IOP Publishing.
197. Siegel, J. A. (2016). Primary and secondary consequences of indoor air cleaners. *Indoor air*, 26(1), 88-96.
198. Rudnick, S. N. (2004). Optimizing the design of room air filters for the removal of submicrometer particles. *Aerosol science and technology*, 38(9), 861-869.
199. Kumar, B. V., Naveen, M., Kalyan, P., Bhavana, P., & Nikhil, K. (2019). Design and fabrication of economical air filter. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) Volume*, 3.
200. Matysiak, A. (2016). *Natural Fibre Filters as a Suitable Alternative to Current Filter Media Products* (Doctoral dissertation, University of Guelph).
201. Lade, A., Bobde, S., Mungle, N. P., & Jiwtode, V. (2017). Fabrication of automatic air filter cleaning system: a review. In *International Conference on Science and Engineering for Sustainable Development*.
202. Choi, S. J., Kim, K. H., Kim, H. J., Yoon, J. S., Lee, M. J., Choi, K. S., ... & Cho, S. (2019). Highly efficient, flexible, and recyclable air filters using polyimide films with patterned thru-holes fabricated by ion milling. *Applied Sciences*, 9(2), 235.
203. Kadam, V. (2018). *Multifunctional air filtration for respiratory protection using electrospun nanofibre membrane* (Doctoral dissertation, RMIT University)..
204. Graham, K., Ouyang, M., Raether, T., Grafe, T., McDonald, B., & Knauf, P. (2002, April). Polymeric nanofibers in air filtration applications. In *5th annual technical conference & expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas* (pp. 9-12).
205. Liu, H., Huang, J., Mao, J., Chen, Z., Chen, G., & Lai, Y. (2019). Transparent antibacterial nanofiber air filters with highly efficient moisture resistance for sustainable particulate matter capture. *Iscience*, 19, 214-223.
206. Issman, L., Graves, B., Terrones, J., Hosmillo, M., Qiao, R., Glerum, M., ... & Boies, A. (2021). Filtration of viral aerosols via a hybrid carbon nanotube active filter. *Carbon*, 183, 232-242.

207. Zhao, X., Wang, S., Yin, X., Yu, J., & Ding, B. (2016). Slip-effect functional air filter for efficient purification of PM_{2.5}. *Scientific reports*, 6(1), 35472.
208. Sanyal, A., & Sinha-Ray, S. (2021). Ultrafine PVDF nanofibers for filtration of air-borne particulate matters: A comprehensive review. *Polymers*, 13(11), 1864.
209. Nelson, A. J. (2011). *Bench-scale evaluation of an energy efficient acoustic aerosol purification device with a newly designed bioaerosol testing and evaluation chamber* (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).
210. Park, S. J., & Lee, D. G. (2006). Performance improvement of micron-sized fibrous metal filters by direct growth of carbon nanotubes. *Carbon*, 44(10), 1930-1935.
211. Pierpaoli, M., Giosuè, C., Czerwińska, N., Ryciewicz, M., Wieloszyńska, A., Bogdanowicz, R., & Ruello, M. L. (2021). Characterization and filtration efficiency of sustainable PLA fibers obtained via a hybrid 3D-printed/electrospinning technique. *Materials*, 14(22), 6766.
212. Bishop, B., Goldsmith, R., Nielsen, K., & Paquette, P. (2002). *ALTERNATE HIGH EFFICIENCY PARTICULATE AIR (HEPA) FILTRATION SYSTEM*. CeraMem Corporation (US).
213. SMIGIELSKI, K., AKBAR-KHANZADEH, F. A. R. H. A. N. G., & GOLBABAEI, F. (2018). Characteristics, Pressure Drop and Capture Efficiency of Heavily Loaded New and Repeatedly Washed HEPA Filters. *International Journal of Occupational Hygiene*, 10(2), 94-100.
214. Kirkman, S., Zhai, J., & Miller, S. L. (2020). *Effectiveness of air cleaners for removal of virus-containing respiratory droplets: Recommendations for air cleaner selection for campus spaces*.
215. Atkinson, J. (Ed.). (2009). Natural ventilation for infection control in health-care settings.
216. Escombe, A. R., Oeser, C. C., Gilman, R. H., Navincopa, M., Ticona, E., Pan, W., ... & Evans, C. A. (2007). Natural ventilation for the prevention of airborne contagion. *PLoS medicine*, 4(2), e68.
217. GB 15982-2012. Hygienic standard for disinfection in hospitals. Beijing, China: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2012.
218. ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017: Ventilation of Health Care Facilities. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2017.
219. HTM 03-01: Specialised ventilation for healthcare premises: part A – design and validation. London: Department of Health/Estates and Facilities Division, 2007.
220. CEN/TS 16244:2018. Ventilation in hospitals – coherent hierarchic structure and common terms and definitions for a standard related to ventilation in hospitals. Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2018.

221. Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C. L., Jensen, P., Li, Y., & Seto, W.-H. (2009). Annex C Respiratory Droplets. In *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings* (pp. 77-82). Geneva: World Health Organization. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143281>
222. Zhou, Q., Qian, H., & Liu, L. (2018). Numerical investigation of airborne infection in naturally ventilated hospital wards with central-corridor type. *Indoor and Built Environment*, 27(1), 59-69.
223. Bolashikov, Z. D. (2010). *Advanced methods for air distribution in occupied spaces for reduced risk from air-borne diseases and improved air quality*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.
224. Bolashikov, Z. D., Melikov, A. K., & Spilak, M. (2010). WITHDRAWN: Inserted Jets Applied In Wearable Personalized Unit.
225. Qian, H., Li, Y., Sun, H., Nielsen, P. V., Huang, X., & Zheng, X. (2010, September). Particle removal efficiency of the portable HEPA air cleaner in a simulated hospital ward. In *Building Simulation* (Vol. 3, pp. 215-224). Springer Berlin Heidelberg.
226. Jones, E. R., Laurent, J. G. C., Young, A. S., MacNaughton, P., Coull, B. A., Spengler, J. D., & Allen, J. G. (2021). The effects of ventilation and filtration on indoor PM_{2.5} in office buildings in four countries. *Building and environment*, 200, 107975.
227. Kabrein, H., Hariri, A., Leman, A. M., Noraini, N. M. R., Yusof, M. Z. M., & Afandi, A. (2017, September). Impact of the air filtration on indoor particle concentration by using combination filters in offices building. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 243, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.
228. Wenke, C., Pospiech, J., Reutter, T., Altmann, B., Truyen, U., & Speck, S. (2018). Impact of different supply air and recirculating air filtration systems on stable climate, animal health, and performance of fattening pigs in a commercial pig farm. *PLoS One*, 13(3), e0194641.
229. Mrozek, M., Zillmann, U., Nicklas, W., Kraft, V., Meyer, B., Sickel, E., ... & Wetzels, A. (1994). Efficiency of air filter sets for the prevention of airborne infections in laboratory animal houses. *laboratory Animals*, 28(4), 347-354.
230. Charvet, A., Pacault, S., Bourrous, S., & Thomas, D. (2018). Association of fibrous filters for aerosol filtration in predominant Brownian diffusion conditions. *Separation and Purification Technology*, 207, 420-426.
231. BERTOLDI, P., & ATANASIU, B. (2006). IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN COMMERCIAL BUILDINGS.

232. Ren, C., & Cao, S. J. (2020). Implementation and visualization of artificial intelligent ventilation control system using fast prediction models and limited monitoring data. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101860.
233. Clark, J. D., Less, B. D., Dutton, S. M., Walker, I. S., & Sherman, M. H. (2019). Efficacy of occupancy-based smart ventilation control strategies in energy-efficient homes in the United States. *Building and Environment*, 156, 253-267.
234. Jin, M., Liu, S., Schiavon, S., & Spanos, C. (2018). Automated mobile sensing: Towards high-granularity agile indoor environmental quality monitoring. *Building and Environment*, 127, 268-276.
235. Lorenzetti, D. M., & Wray, C. P. (2014). Air-Handling System Modeling in EnergyPlus: A Strategic Plan for Enhancements to Meet Stakeholder Needs.
236. Borkar, C. (2012). *Development of wireless sensor network system for indoor air quality monitoring*. University of North Texas.
237. KANJO, M. F. (2019). *INTELLIGENT SYSTEM FOR AIR POLLUTION PREDICTION* (Doctoral dissertation, NEAR EAST UNIVERSITY).
238. Bergam, N., Chen, L., Lende, S., Snow, S., Zhang, J., DiBuono, M. J., & Calzaretto, N. J. (2020). Designing and simulating a smart SARS-CoV-2 air purifier. *New Jersey's Governor's School Eng Technol*, 1-10.
239. Guyot, G., Sherman, M., Walker, I., & Clark, J. D. (2017). Residential smart ventilation: a review.
240. Tong, D. Q., Gill, T. E., Sprigg, W. A., Van Pelt, R. S., Baklanov, A. A., Barker, B. M., ... & Vimic, A. V. (2023). Health and safety effects of airborne soil dust in the Americas and beyond. *Reviews of Geophysics*, 61(2), e2021RG000763.
241. Tran, H. M., Tsai, F. J., Lee, Y. L., Chang, J. H., Chang, L. T., Chang, T. Y., ... & Chuang, H. C. (2023). The impact of air pollution on respiratory diseases in an era of climate change: A review of the current evidence. *Science of the Total Environment*, 166340.
242. Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environment international*, 143, 105974.
243. Maung, T. Z., Bishop, J. E., Holt, E., Turner, A. M., & Pfrang, C. (2022). Indoor air pollution and the health of vulnerable groups: a systematic review focused on particulate matter (PM), volatile organic compounds (VOCs) and their effects on children and people with pre-existing lung disease. *International journal of environmental research and public health*, 19(14), 8752.

244. Szczotko, M., Orych, I., Mąka, Ł., & Solecka, J. (2022). A review of selected types of indoor air purifiers in terms of microbial air contamination reduction. *Atmosphere*, 13(5), 800.
245. Dubey, S., Rohra, H., & Taneja, A. (2021). Assessing effectiveness of air purifiers (HEPA) for controlling indoor particulate pollution. *Heliyon*, 7(9).
246. Pagels, J., Alsved, M., Malmborg, V., Omelekhina, Y., Wierzbicka, A., & Bohgard, M. (2019). Airborne dust removal using mobile air cleaners in the construction sector.
247. ДБН, В. (2013). 2.5-67: 2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. *Мінрегіон України, К.*
248. Yang, Z., Zhao, J., Wang, B., Zhuang, R., Li, X., Xiao, H., & Shi, W. (2021). Experimental performance analysis of hybrid air conditioner in cooling season. *Building and Environment*, 204, 108160.
249. Sheng, Y., Fang, L., & Sun, Y. (2018). An experimental evaluation on air purification performance of Clean-Air Heat Pump (CAHP) air cleaner. *Building and Environment*, 127, 69-76.
250. O'Connor, D., Calautit, J. K., & Hughes, B. R. (2016). A novel design of a desiccant rotary wheel for passive ventilation applications. *Applied Energy*, 179, 99-109.
251. Alekseik, Y., & Alekseik, O. (2022). КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ НА ДВОФАЗНИХ ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПОВІТРЯ У ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ: ОГЛЯД. *KPI Science News*, 135(1-2), 11-25.
252. Makarenko, L. (2024). Модель повітроочисника з фільтрувальними вставками HEPA 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> (Index Copernicus; Crossref)
253. Sakamoto, M., Li, M., Kuga, K., Ito, K., Bekö, G., Williams, J., & Wargocki, P. (2022). CO2 emission rates from sedentary subjects under controlled laboratory conditions. *Building and Environment*, 211, 108735.
254. Carbon Dioxide measured by NOAA at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Available at: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide>
255. ДБН, В. (2022). 2.2-10: 2022 Заклади охорони здоров'я *Мінрегіон України, К.*
256. 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>

257. Макаренко, Л., & Приймак, О. (2023). 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>
258. Pryimak, O., & Makarenko, L. Reducing the cleaning time of PM2. 5 pollution to WHO-recommended air quality levels with a recirculation filter unit. DOI: 10.17512/bozpe.2024.13.14 (*Index Copernicus*)
259. Liu, Y., Ma, H., Zhang, N., & Li, Q. (2022). A systematic literature review on indoor PM2. 5 concentrations and personal exposure in urban residential buildings. *Heliyon*, 8(8).
260. Маремуха, Т. П. Гігієнічна оцінка забруднення атмосферного повітря теплоенергетичними об'єктами. *Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата медичних наук*, 14(01).
261. Liu, Y., Dong, J., Ma, H., Jiang, Y., Zheng, W., & Luo, X. (2022). An overview: PM2. 5 concentration levels in urban residential buildings during the past Two decades. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(10), 220174.
262. Mohammed, M. A., Bulama, K., Bukar, A. M., Modu, M. A., Usman, A. A., Lawan, A. K., & Habib, G. A. (2023). The impacts of building opening characteristics on dust particle deposition indoors. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*.
263. Wong, N. H., & Huang, B. (2004). Comparative study of the indoor air quality of naturally ventilated and air-conditioned bedrooms of residential buildings in Singapore. *Building and Environment*, 39(9), 1115-1123.
264. Koo, J., Jo, Y. M., Lee, T. J., Park, S., & Song, D. (2023). Ventilation strategy for simultaneous management of indoor particulate matter and airborne transmission risks—A case study for urban schools in South Korea. *Building and Environment*, 242, 110575.
265. Макаренко, Л., & Приймак, О. (2024). Ефективність рециркуляційного повітроочищувача в реальних умовах при варіації продуктивності та вмісту PM2. 5. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 48, 21-31. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.21-31>
266. United States. Environmental Protection Agency. Office of Policy, & Evaluation. Office of Policy Analysis. (1987). *Unfinished business: A comparative assessment of environmental problems* (Vol. 2). US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Office of Policy Planning and Evaluation.
267. Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., ... & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of exposure science & environmental*

- epidemiology*, 11(3), 231-252.
- 268.** Stephens, B., Gall, E. T., Heidarinejad, M., & Farmer, D. K. (2022). Interpreting Air Cleaner Performance Data. *ASHRAE Journal*, 64(4).
- 269.** Makarenko, L. (2024). Експериментальне визначення коефіцієнту тепловіддачі спрощеним методом для стаціонарного режиму теплообміну в повітроочиснику. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(5), 18-29. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240305.03> (*Index Copernicus; Crossref*)
- 270.** Горобець, В. Г., Богдан, Ю. О., & Троханяк, В. І. (2017). Теплообмінне обладнання для когенераційних установок: монографія.
- 271.** Мейріс, А. Ж. (2018). *Теплообмін та теплогідравлічна ефективність пучків труб з поверхневими заглибленнями* (Doctoral dissertation, Інститут технічної теплофізики НАН України).
- 272.** Мамалига, В. М., & Горб, І. Ю. (2017). Парадокси техніко–економічного обґрунтування вибору енергоефективного обладнання (на прикладі освітлювальних пристроїв). *Формування ринкових відносин в Україні*, (5), 79-87.
- 273.** 25 листопада 1999 року була прийнята Постанова Кабінету Міністрів України № 2145 "Про порядок проведення на конкурсній основі оцінки і відбору інвестиційних проектів, що передбачають залучення засобів державного бюджету".

Додаток 1.

Наукові публікації у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

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., & 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>

4. 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>

Наукові публікації у періодичних виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу, та у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз.

5. Макаренко, Л. (2024). Модель повітроочисника з фільтрувальними вставками HEPA 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> (*Index Copernicus; Crossref*)

6. 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*)

7. Oleksandr Pryimak, Liubov Makarenko (2024). Reducing the cleaning time of PM2.5 pollution to WHO-recommended air quality levels with a recirculation filter unit. Construction of optimized energy potential . Vol. 13, 2024, 143-151. DOI: 10.17512/bozpe.2024.13.14 (*Index Copernicus*)

Публікації тез доповідей на конференціях

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 вискоєфективних 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_-

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 PM2.5 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

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 PM2.5 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. . Сертифікат.

<https://isg-konf.com/uk/new-ways-of-improving-outdated-methods-and-technologies/>

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.

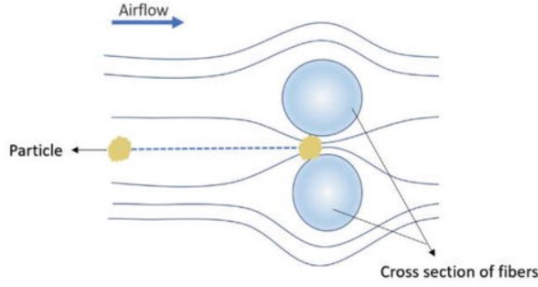
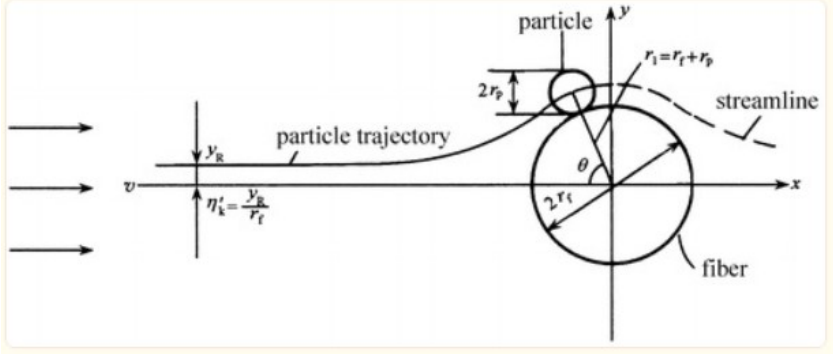
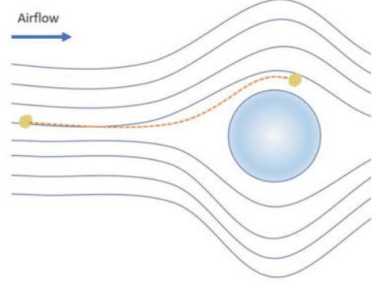
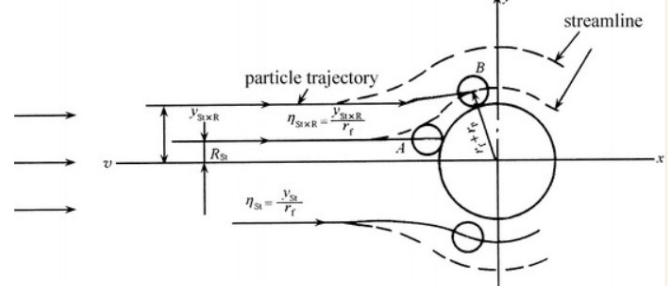
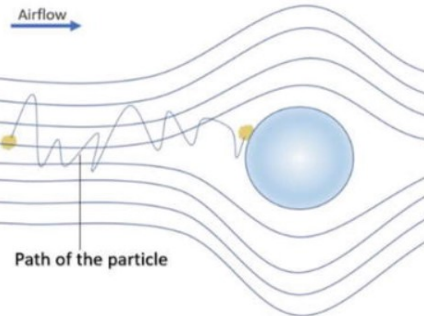
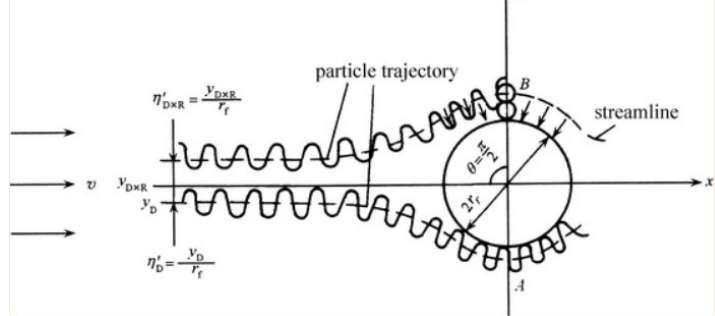
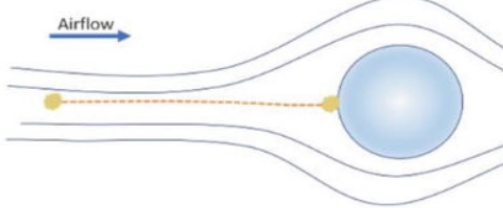
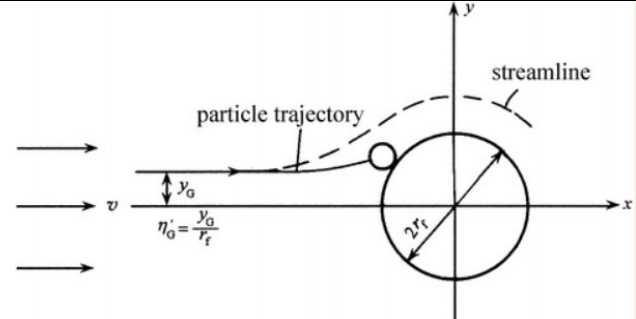
Теза Любов Макаренко. Загальна картина впливу забруднення повітря та системи очищення. – 263-266с. https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/12/Evolution_and_improvement_of_traditional_approaches_to_scientific_research_December_11-13_2024_Ljubljana_Slovenia.pdf

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

Додаток 2.

Таблиця 1.3. Механізми фільтрації.

Механізм фільтрації	Спосіб фільтрації	Характеристики	Схематичне зображення	
Просіювання	Механічне вловлення, коли проміжок між складовими середовища (наприклад, волокнами, нитками чи гофрованим металом) менший за діаметр частинки, яку фільтр призначений вловлювати.	-розмір часток; -проміжок між складовими середовища фільтру; - щільності середовища.		
Перехоплення	Частки значного розміру зіштовхуються з волокнами фільтру	-розмір частинки;		
Дифузія (вловлювання часток < 0,2 мкм)	В результаті броунівського руху частинка зіштовхується з волокном.	-броунівський рух (частка залишає середовище за рахунок механізмів 1 та 2, в цьому місті концентрація середовища знижується, куди потрапляє інша частинка; -низька швидкість руху повітряного потоку; -висока концентрація волокон фільтру;		
Інерційне відокремлення	Швидка зміна напрямку повітряного потоку при зіштовхуванні його з перешкодою (інша частинка чи волокно фільтра) тоді як частинка продовжує рух в старому напрямі.	-висока концентрація твердих частинок; - їх швидкість та напрям;		
5.Електростатичне тяжіння (вловлювання часток > 0,2 мкм)	Досягається за рахунок вловлювання дрібних частинок за допомогою електростатичних сил поляризованих волокон [80].	-кількість заряду; -речовини, що ізолюють заряд.	