

УДК 628.86: 621.184.54.

аспірантка **Любов Макаренко,**

2222555@ukr.net

ORCID: 0009-0005-9024-8521

Київський національний університет будівництва і архітектури

ЕФЕКТИВНЕ ВЕНТИЛЮВАННЯ ПРИМІЩЕНЬ З КОМБІНОВАНИМ ОЧИЩЕННЯМ ВІД ЗАБРУДНЮВАЧІВ

***Анотація.** Представлено результати дослідження, спрямованого на розроблення комплексного рішення для створення безпечного повітряного середовища в житлових та офісних приміщеннях. Розроблено алгоритм дій, що передбачає адміністративні та апаратні складові, для забезпечення високої ефективності очищення повітря та енергоефективності. Представлено результати дослідження ефективності моделі "фільтр-теплообмінника", спрямованої на одночасне покращення якості повітря в приміщенні та зниження енергоспоживання. Розроблено та експериментально протестовано пристрій, що забезпечує економію теплової енергії шляхом використання теплообмінника типу "повітря-повітря", де теплопередача відбувається без додаткового нагрівання зовнішнього повітря. Запропоновано нову експериментальну формулу визначення числа Нуссельта для теплообмінників даного типу, що базується на вивченні теплообміну при поперечному обтіканні як окремої труби, так і пучка труб в діапазоні числа Рейнольдса $700 < Re < 3500$. Дослідження підтверджує високу ефективність системи очищення повітря з фільтром HEPA H11 та потребу високої кратності повітрообміну, забезпечуючи мінімальну ефективність очищення повітря до 95% від початкового забруднення. Показано, що збільшення об'єму оброблюваного повітря значно підвищує швидкість очищення, а кожне збільшення кратності повітрообміну на одиницю скорочує час очищення.*

Ключові слова: фільтр-теплообмінник, HEPA, ефективність, механічна фільтрація повітря, очищення повітря.

Постановка проблеми. Прагненням даного прикладного наукового дослідження є досягнення значного економічного та соціального ефекту шляхом отримання та вдосконалення алгоритму дій та методів, які забезпечить створення місць з безпечним повітрям. Дослідження зосереджено на розробленні комплексного підходу для гарантування чистого повітря в приміщеннях з мінімальними витратами енергії. Прогнозується, що через безперервне економічне зростання та збільшення кількості населення в різних

куточках світу, рівень забруднення атмосферного повітря зростатиме, що, так само, призведе до збільшення випадків респіраторних захворювань [1]. На відміну від атмосферного повітря, якість повітря в приміщеннях, де перебувають люди, можна контролювати з високою точністю за допомогою систем вентиляції та спеціальних очищувачів повітря, відповідно до встановлених вимог параметрів повітря в приміщеннях. Найбільшими джерелами забруднення повітря в приміщеннях є: леткі органічні сполуки (ЛОС) та тверді частинки (Particulate matter - PM). PM2.5 та PM10 – це дрібні тверді частинки, що знаходяться в повітрі в зваженому стані та є небезпечними для здоров'я. Існують вагомі підтвердження того, що забруднювачі повітря, такі як PM2.5 та PM10, тісно пов'язані зі зростанням смертності від серцево-судинних захворювань, хвороб дихальних шляхів та раку легень [2]. Джерелами твердих частинок у приміщеннях є: куріння, приготування їжі, пічне опалення, використання свічок та інсектицидів, наявність домашніх тварин (шерсть, лупа) та звичайне пересування людей по приміщенню [3].

Таким чином, дослідження спрямоване на розробку ефективного рішення для очищення повітря в приміщеннях від цих забруднювачів, враховуючи необхідність мінімізації енергетичних витрат. Це дозволить створити більш здорове та комфортне середовище для людей. Ключова особливість досліджуваного повітроочисника полягає в тому, що він не тільки очищає повітря, але й забезпечує подавання частини свіжого повітря ззовні. Іншими словами, дослідження спрямоване на розробку та аналіз ефективного пристрою, який би одночасно очищав повітря в приміщенні до високих стандартів, забезпечував приплив свіжого повітря та мінімізував втрати тепла завдяки інтегрованому теплообміннику.

Кратність визначається різними державними нормами та рекомендаціями, які в різних країнах приймаються від 2 до 12 залежно від призначення приміщення [5]-[7]. Дослідження необхідної кратності повітрообміну для забезпечення ефективного очищення повітря відображено в статтях Макаренко, Л., & Приймак, О. [8], [9].

Завдяки механічним системам вентиляції та фільтрування можна створити сприятливі умови повітря в приміщенні. Механічна вентиляція та механічне фільтрування є найдієвішим засобом контролю забруднювачів у повітряному середовищі. Вентиляція є корисним інженерним засобом для контролю інфекцій: більш висока кратність вентиляції знижує ризик зараження повітряно-крапельним шляхом. Coyle та ін. [10] дослідили, що наявність систем вентиляції зменшувала можливість зараження інфікованими аерозольними частинками розміром 0,3–3 мікрметра в повітрі приблизно на 5% на одиницю збільшення повітрообміну за годину (кратність), незалежно від того, чи було

збільшення кратності за рахунок системи вентиляції та кондиціонування повітря чи портативних повітроочисників з HEPA-фільтром та попередньо зібраного пилу цими системами.

Наявні портативні повітроочищувачі з HEPA-фільтрами є корисними для покращення якості повітря в приміщеннях, але вони не можуть замінити повноцінну систему вентиляції, яка забезпечує приплив свіжого повітря та регулювання мікроклімату. Їх слід використовувати як додатковий засіб для очищення повітря в певних ситуаціях, але не як основне джерело вентиляції. Державні будівельні норми (ДБН) чітко регламентують необхідний об'єм зовнішнього повітря для різних типів приміщень [11]. Цей об'єм розраховується на основі кількості людей, що перебувають у приміщенні, призначення самого приміщення та ін. Портативні очищувачі не можуть забезпечити цей нормативний приплив свіжого повітря чи його нагріву/охолодження, тому вони є лише доповненням, а не заміною повноцінної системи вентиляції.

Алгоритм дій, який дозволить створити місця постійного перебування людей з безпечним повітряним простором, визначається початковою інформацією щодо рівнів забруднення повітря, його параметрів (температура, відносна вологість) та кінцевим результатом бажаної якості повітря в приміщенні. За цими даними обираються кратність повітрообміну та клас фільтру, а також необхідне обладнання. Алгоритм відображено на рис.1.

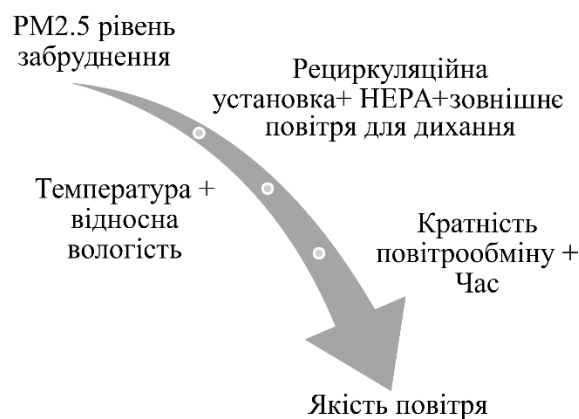


Рис. 1. Алгоритм дій, який забезпечить безпеку повітряного середовища

Дослідження, що стосуються інтегрування теплообмінника в повітроочищувач, здебільшого описують гібридні, експериментальні зразки, які поєднують функції охолоджувального пристрою [12] або осушувача з фільтрувальним блоком [13], [14]. Для кліматичних умов України, з характерними холодними зимами, особливий інтерес представляє робота повітроочисного пристрою за низьких температур та значної різниці між температурою зовнішнього та внутрішнього повітря. Саме відносно низькі робочі температури та значні перепади температур між гарячим (внутрішнім) та

холодним (зовнішнім) повітрям створюють певні труднощі при виборі типу теплообмінника та розробці його конструкції [15].

Тож, з урахуванням усіх наявних напрацювань щодо вибору кратності повітрообміну, класу фільтрації фільтрів, та нормованої температури розроблений пристрій, що може ефективно видаляти з повітря пил, алергени, мікроорганізми та інші забруднювачі та зменшити або усунути потребу в додатковому нагріванні зовнішнього повітря, що особливо важливо в холодний період року. Цей пристрій базується на механічному фільтруванні та одночасно забезпечує подавання зовнішнього повітря для дихання. Ключовими аспектами дослідження є: розроблення ефективного пристрою механічного фільтрування для очищення повітря від різних забруднювачів; забезпечення припливу повітря ззовні для розбавлення вуглекислого газу (CO_2), що виділяється людьми в приміщенні; урахування факторів зовнішнього середовища та параметрів внутрішнього середовища перебування людей для оптимізації роботи пристрою та створення комфортних умов; забезпечення відповідності повітря в приміщенні санітарним нормам та якості повітря безпечного для здоров'я.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження обумовлена зростанням вимог до енергоефективності та якості повітря в приміщеннях, особливо в умовах урбанізації та погіршення екологічної ситуації. Зростання енергоспоживання на опалення та вентиляцію, а також збільшення концентрації забруднювачів у повітрі, вимагають розроблення та впровадження нових технологій, здатних забезпечити комфортні та безпечні умови перебування людей у приміщеннях.

Дослідження спрямоване на вирішення актуальної проблеми ефективного вентиляції шляхом використання теплообмінника типу "повітря-повітря", що дозволяє утилізувати теплоту відпрацьованого повітря для нагрівання припливного. Це особливо важливо в умовах зростання цін на енергоносії та необхідності скорочення викидів парникових газів.

Крім того, актуальність дослідження полягає в розробленні ефективної системи очищення повітря, здатної забезпечити високий рівень фільтрування забруднювачів, зокрема респіраторні аерозолі. Це особливо важливо в умовах епідемій респіраторних захворювань, що вимагають забезпечення безпечного повітряного середовища в приміщеннях.

Таким чином, дослідження має високу актуальність, оскільки спрямоване на розробку та впровадження інноваційних технологій, здатних забезпечити енергоефективність та високу якість повітря в приміщеннях, що є важливим фактором для забезпечення комфортних та безпечних умов перебування людей.

Останні дослідження та публікації. Дослідження Melikov та інших демонструють значний потенціал децентралізованих систем вентиляції для

зниження енергоспоживання в офісних будівлях, особливо в холодних кліматичних зонах. Правильне налаштування температури подаваного повітря та стратегії контролю можуть призвести до значної економії енергії порівняно зі змішаною вентиляцією. Споживання енергії індивідуальною системою вентиляції може суттєво зрости (у діапазоні: 61-268%), якщо стратегії енергоефективності не застосовувалися [16,17]. Terkildsen також підтверджує можливість суттєвого зниження енергоспоживання на вентиляцію шляхом модернізації систем, знизивши споживання енергії на вентиляцію до 50% від вимог 2020 року в Данії [18].

У жаркому кліматі, як показали Schiavon та Melikov [19, 20], децентралізована вентиляція також може суттєво зменшити енергоспоживання (до 51%) завдяки таким стратегіям, як зниження швидкості повітряного потоку, підвищення допустимої температури в приміщенні та подавання зовнішнього повітря лише за потреби. Ці результати підтверджуються дослідженнями Maroto [21], Lu [22], Ghahfarrokhy [23] та інших [24, 25], які демонструють, що зниження швидкості повітряного потоку може підвищити ефективність фільтрування, хоча це може бути обмежено технічними та економічними факторами."

Для ефективного вентиляювання необхідно застосовувати комплексний підхід, який охоплює оптимізацію обміну повітря шляхом поєднання централізованих та децентралізованих систем, використання енергоефективних вентиляторів та фільтрів, застосування автоматичних систем управління на основі датчиків забруднення, а також створення простого у використанні програмного забезпечення для користувача.

Оптимальні умови для очищення:

1. Комбіновані фільтри в рециркуляційному блоці при значній інтенсивності повітрообміну забезпечують ефективне очищення повітря навіть за високої вологості.
2. За високого рівня забруднення дрібними частинками (PM2.5) час очищення збільшується.
3. Збільшення розміру приміщення та швидкості повітрообміну також впливає на тривалість очищення.

Ці висновки можуть бути корисними не тільки для майбутніх довготривалих досліджень здоров'я, але й для застосування за межами досліджень, включаючи моніторинг стану повітря для населення.

У дослідженні пропонується пристрій, який забезпечує належну якість повітря завдяки поєднанню трьох ключових елементів: інтенсивного повітрообміну, механічного фільтрування та забезпечення необхідної кількості зовнішнього повітря для дихання, при цьому без додаткових витрат енергії на

його нагрівання.

Представлена модель повітроочисника оснащена фільтром HEPA H11 та теплообмінником типу «повітря-повітря» для нагрівання зовнішнього повітря в секції. Дослідження фокусується на можливості інтегрування в повітроочисник з фільтром HEPA H11 секції нагрівання зовнішнього повітря. Цю секцію планується розмістити всередині циркуляційної частини повітроочисника. Розрахункова продуктивність циркуляційної частини (гарячого теплоносія) становить 800 м³/год. Цей об'єм повітря дозволяє нагріти зовнішнє повітря в об'ємі 41 м³/год без використання додаткової енергії, використовуючи лише теплоту, що передається.

Визначено необхідні параметри та габаритні розміри теплообмінника. Розрахункова частина конструкції повітроочисника надана в статті Макаренко [26]. Робота приладу розрахована на періодичну дію: під час перебування людини в приміщенні, за необхідності провітрювання або компенсації витяжного повітря від роботи інших витяжних систем невеликої потужності.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження, відображеного в статті, є розроблення та експериментальне верифікування ефективної моделі "фільтр-теплообмінника", здатної забезпечити одночасне покращення якості повітря в приміщенні та зниження енергоспоживання. Зокрема, ставиться завдання продемонструвати можливість заощадження енергії на нагріванні зовнішнього повітря шляхом інтегрування теплообмінника типу "повітря-повітря" в систему очищення.

Окремим завданням є дослідження процесів теплообміну в розробленому теплообміннику та визначення числа Нуссельта, що дозволить більш точно оцінити та оптимізувати його теплотехнічні характеристики.

Основна частина. Місце проведення досліду: фільтр-калорифер з фільтрувальною вставкою H11 розташовано в кімнаті площею 20м² і висотою стелі 2,75м. Вікна закриті. Працює система опалення. Температура та відносна вологість приймалась для кожного досліду виходячи з реальних умов назовні. Рівень CO₂ 400-500 ppm. Рівень забруднення PM2.5 в повітрі приміщення на час проведення досліду приймалось від незначного до небезпечного рівня. У цьому дослідженні використовувалися один тип повітроочищувача при різних варіантах використання його продуктивності від 100 до 800 м³/год, двох варіантах забруднення внутрішнього повітряного середовища: об'ємна концентрація PM2.5 становить 20 мкг/м³ (індекс якості повітря 2 для PM2.5 – незначний) і 180 мкг/м³ (індекс якості повітря 5 для PM2.5 – небезпечний). Повітроочищувач складається з двох вентиляторів (для холодного та гарячого теплоносіїв, якими є зовнішнє та внутрішнє повітря, відповідно), одного фільтра або комбінації фільтрів залежно від мети досліду (фільтра G4, фільтра

F7, фільтра з активованим вугіллям, фільтра HEPA 11), теплообмінника «повітря-повітря» та повіторозподільного пристрою в частині «гарячого теплоносія». Принципова схема розміщення обладнання при проведенні дослідів вказана на рис.2. Світлину розміщення обладнання надано на рис.3.

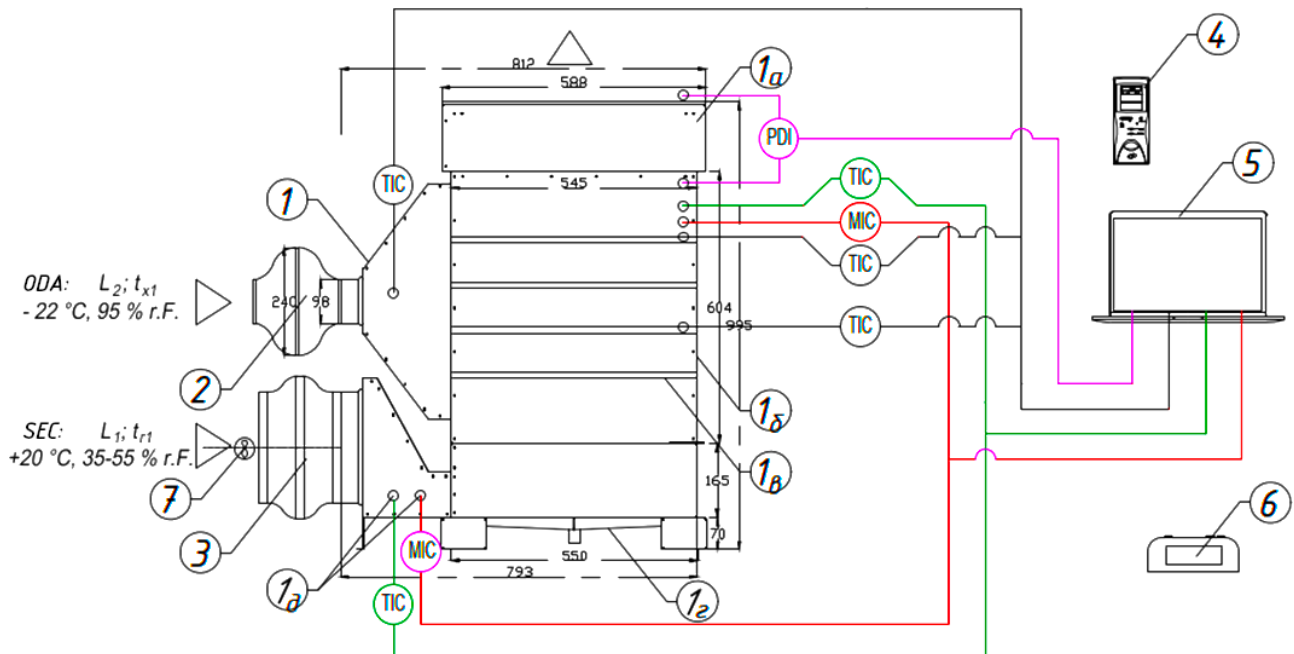


Рис.2. Принципова схема розміщення обладнання при проведенні дослідів: 1 – фільтр-калорифер у складі: 1а – секція фільтра HEPA H11; 1б – теплообмінна секція; 1в – мідні трубки; 1г – піддон для конденсату; 1д – умовне позначення розміщення різних датчиків (прилад для вимірювання: TIC – температури; MIC – вологості; PDI – перепаду тиску); 2 – вентилятор подавання зовнішнього повітря; 3 – вентилятор внутрішнього повітря; 4 – датчик частинок PM Particle Scan Lite; 5 – пристрій оброблення інформації; 6 – монітор якості повітря AirVisualPro; 7 – анемометр ET-965; ODA – зовнішнє повітря; SEC – забирання внутрішнього повітря для фільтрування та повернення в приміщення

Процес очищення повітря. Дослідження показало, що збільшення кратності повітрообміну з двох до шести разів значно впливає на швидкість очищення повітря від дрібнодисперсних частинок $\text{PM}_{2.5}$ в офісному приміщенні. При низькому рівні забруднення (від $12,1$ до $35,4 \text{ мкг/м}^3$) швидкість очищення до рекомендованого ВООЗ рівня в 5 мкг/м^3 зростає у 8 разів, а час очищення скорочується до 10 хвилин, при цьому споживання електроенергії рециркуляційним агрегатом збільшується незначно (з 46 Вт до 113 Вт). Тривалість очищення в повітрочишувачі даного типу при низьких та високих рівнях забруднення $\text{PM}_{2.5}$ надано на рис.4.



Рис.3. Світлина розміщення експериментальної установки:
позначення див. рис. 2

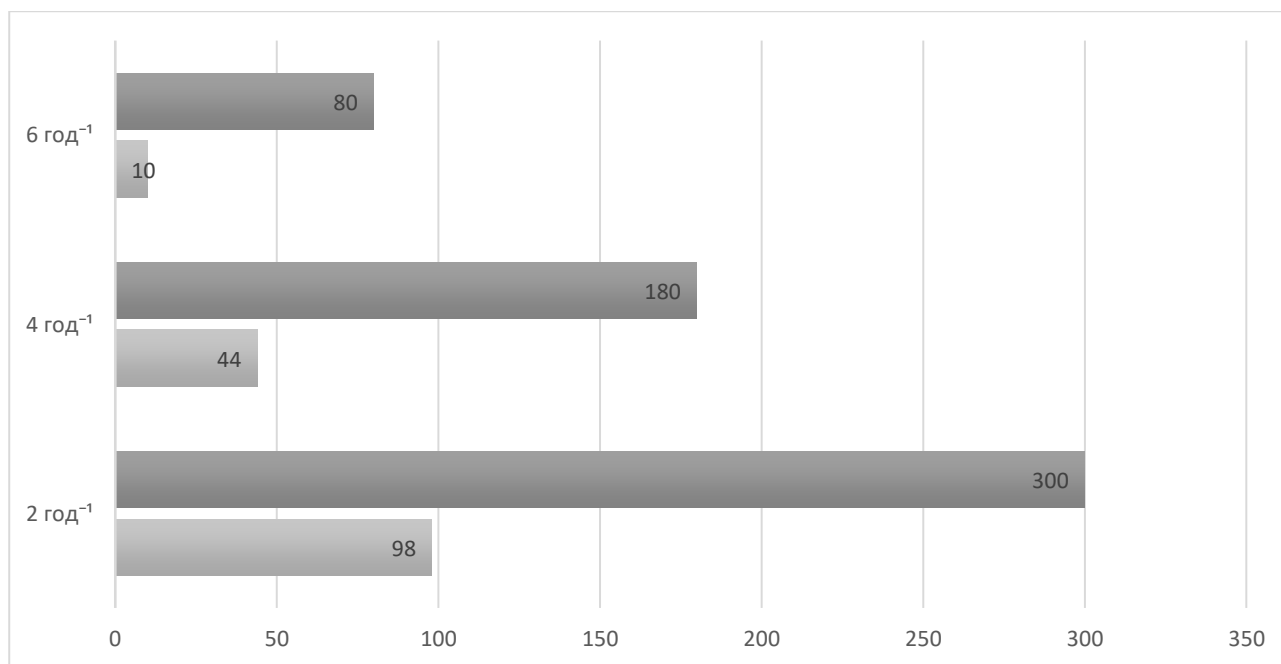


Рис.4. Тривалість очищення в повітроочищувачі даного типу у хвилинах при низьких (світло-сірий колір) та значних (темно-сірий колір) рівнях забруднення PM2.5.

У випадку значного забруднення (від 55,5 до 260,4 мкг/м³) аналогічне збільшення кратності повітрообміну призводить до чотириразового зростання швидкості очищення та скорочення часу очищення до 1,5 години, забезпечуючи ефективність очищення до 97%.

Загалом, збільшення об'єму оброблюваного повітря при невеликому

збільшенні енергоспоживання дозволяє значно пришвидшити очищення повітря та ефективно реагувати на зміни його якості. Кожне збільшення кратності повітрообміну на одну одиницю кратності скорочує час очищення приблизно на 20 хв при низькому рівні забруднення та на 1 год при високому, проте кратність повітрообміну не повинна бути менше 2.

Процес теплообміну. Для визначення коефіцієнта тепловіддачі фільтр-теплообмінника використовується метод, що полягає у фіксуванні температур на вході та виході трубок №1-№6, а також вимірюванні температури на вході та виході з очисної частини пристрою. Градієнт температур показано на рис. 6. У контексті опису методу визначення коефіцієнта тепловіддачі фільтр-теплообмінника, формула Ньютона-Ріхмана використовується для опису теплообміну між поверхнею трубок та повітрям, що проходить через фільтр. Вимірюючи температури трубок та повітря, а також знаючи інші параметри (товщину стінки, коефіцієнт теплопровідності), можна розрахувати коефіцієнт тепловіддачі α для даного теплообмінника. Використовуються емпіричні залежності, які пов'язують α з безрозмірними критеріями подібності, такими як число Нуссельта (Nu), число Рейнольдса (Re). Тож, згідно з розрахунком [27], кількість повітря, визначена як холодний теплоносіє, що рухається в трубках $L_2 = 41 \text{ м}^3/\text{год}$ або $0,0113 \text{ м}^3/\text{с}$. Початкова температура холодного теплоносія $t_{x1} = -22^\circ\text{C}$, кінцева $t_{x2} = +18^\circ\text{C}$. Середня швидкість $v_x = 3,37 \text{ м/с}$. Об'ємний вміст газів, здатних до випромінювання, в теплоносії $\varphi_{\text{CO}_2} = 0,03\%$, $\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 1,26\%$. Зовнішній діаметр труб приймається як для мідних труб Halcor, Греція 5/8" або $15,88 \times 0,89$ з зовнішнім діаметром $d_3 = 0,01588 \text{ м}$ і внутрішнім діаметром $d_6 = 0,0141 \text{ м}$. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу труб $\lambda = 407 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Крок труб в поперечному та поздовжньому напрямі $l_1 = l_2 = 0,1 \text{ м}$. Труби розташовані за коридорним типом. Градієнт температур на поверхні зображено на рис.5.

Знаючи кількість трубок, їх площу перерізу та швидкість повітря на виході з трубки визначено тепловий потік, що може відібрати холодний теплоносіє від гарячого теплоносія за формулою

$$Q = L \cdot C'_{pm2} \cdot (t_{e1} - t_{e2}), \quad (1)$$

де L – об'ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; C'_{pm2} – об'ємна ізобарна теплоємність гарячого теплоносія, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$; t_{e1} і t_{e2} – температура гарячого теплоносія на вході та виході, відповідно, $^\circ\text{C}$.

Середня дійсна швидкість гарячого W_e та холодного W_x теплоносія визначена за законом Гей-Люсака за формулою, м/с :

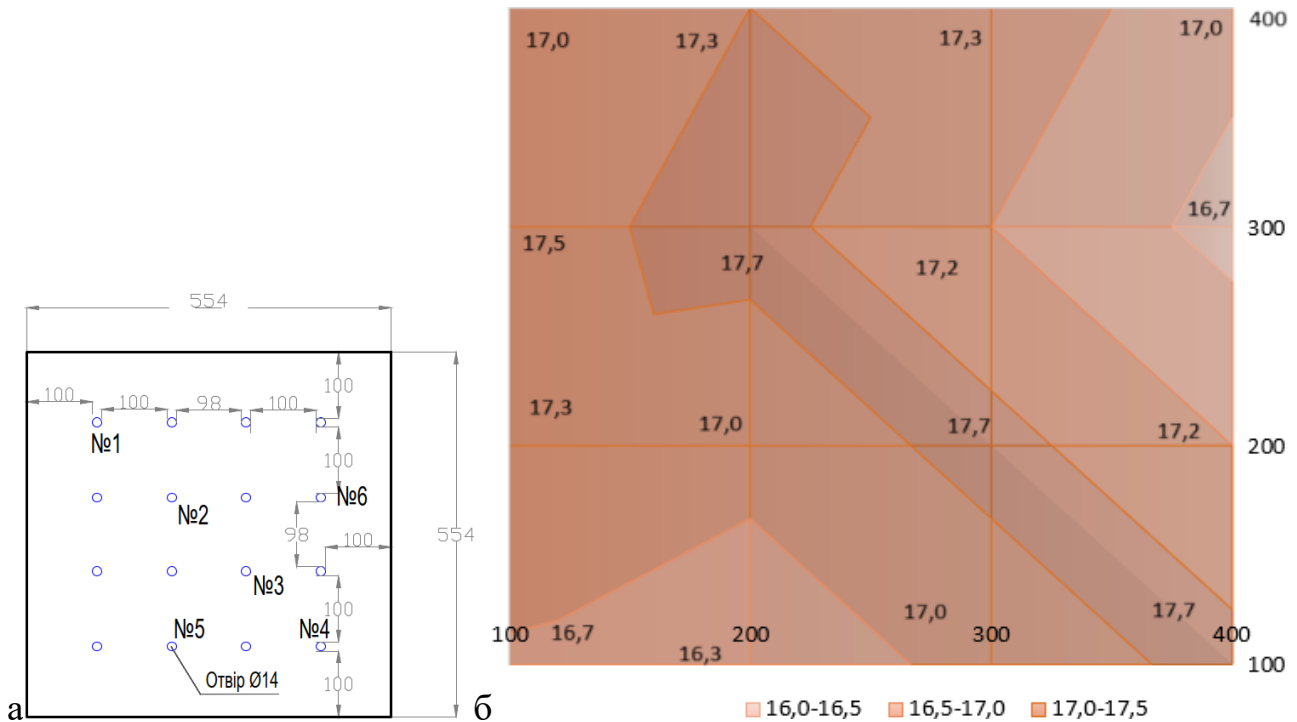


Рис. 5. Градієнт температур на поверхні:

а – схема розташування вимірних точок стенду; б – діаграма ізотерм.

$$W_{2,x} = v \cdot T / 273,15; \quad (2)$$

Для визначення фізичних параметрів повітря при середній розрахунковій температурі гарячого теплоносія $t_1 = 18,4$ °C скористаємося методом апроксимації через відомі значення наближених параметрів. Для розрахунку необхідні фізичні параметри сухого повітря при парціальному тиску $P_{атм} = 101325$ Па.

Приймаємо середньологарифмічний температурний напір для перехресної схеми відносного руху теплоносія за формулою, °C

$$\Delta T = \frac{(t_{r2} - t_{x1}) - (t_{r1} - t_{x2})}{\ln \frac{t_{r2} - t_{x1}}{t_{r1} - t_{x2}}}; \quad (3)$$

Число Рейнольдса для гарячого Re_2 та холодного Re_x теплоносія визначено за формулою:

$$Re_{2,x} = W_{2,x} \cdot d_{3,6} / \nu, \quad (4)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості відповідного теплоносія. Оскільки гарячий теплоносій рухається зовні впоперек труб, то приймаємо як характерний розмір зовнішній діаметр. Оскільки холодний теплоносій

рухається всередині труб, то характерним є внутрішній діаметр труб

Визначаємо залежність числа Нуссельта Nu_x при русі холодного теплоносія всередині труб з середньою температурою $-2,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $Re_x = 3592$ і $Pr \approx \text{const}$:

$$Nu_x = 0,018 \cdot Re^{0,8}, \quad (5)$$

За числом Нуссельта визначимо середнє значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією α_x , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha_x = Nu \cdot \lambda / d_B, \quad (6)$$

Три основні параметри, які впливають на тепловий потік Q , Вт : площа поверхні теплообміну F , м^2 , коефіцієнт теплопередачі k , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ та різниця середніх температур між теплоносіями Δt , $^{\circ}\text{C}$. У стаціонарного режимі теплообміну дійсний коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$k = Q / (F \cdot \Delta t) = 1 / ((1/\alpha_z) + (\delta/\lambda) + (1/\alpha_x)), \quad (7)$$

де δ – товщина стінки, м , а λ – її коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Права частина рівняння (7) застосовна лише для тонкостінних труб при $d_3/d_6 < 2$.

За формулою (7) коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від гарячої стінки α_z , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha_z = 1 / ((1/k) - (\delta/\lambda) - (1/\alpha_x)). \quad (8)$$

Дійсне число Нуссельта для гарячого теплоносія визначено через значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією α_z , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для першого ряду труб:

$$Nu = \alpha_z \cdot d_3 / \lambda. \quad (9)$$

Експериментально отримані дані щодо залежності числа Нуссельта від числа Рейнольдса в розрахунку на один рад коридорного пучка труб зображено на рис.6 та описано рівнянням у формі степеневої залежності числа Нуссельта від числа Рейнольдса з достатньо високим значенням $R^2 > 0,98$.

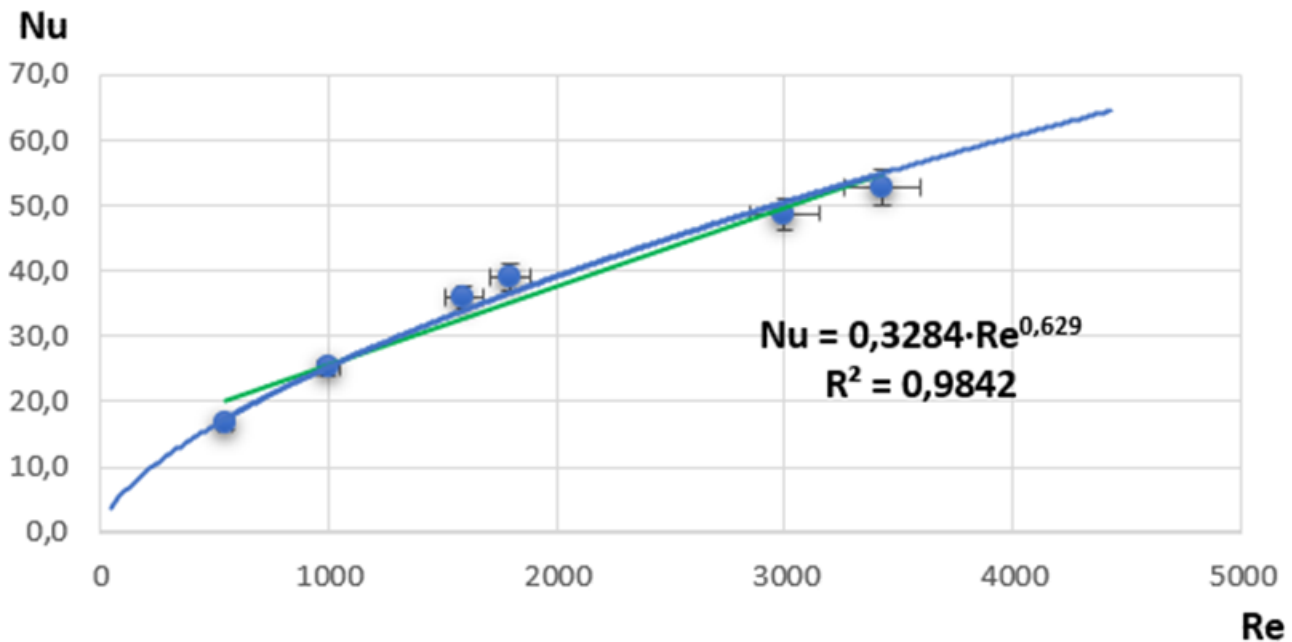


Рис. 6. Експериментальні значення числа Нуссельта та числа Рейнольдса для коридорного пучка труб. Швидкість повітряного потоку перед коридорним пучком змінювалась в діапазоні 1...3,5 м/с, , при числах $Re\ 700 \div 3500$ і $Pr=0,73$: сині точки – результати авторських досліджень; синя лінія – апроксимація за рівнянням на рис., зелена лінія – лінійна апроксимація

Це рівняння застосовується для пучка труб з коридорним розташуванням при швидкості повітряного потоку перед пучком в межах 1...3,5 м/с, за чисел Рейнольдса від 700 до 3500 та числа Прандтля 0,73.

Для більш точного визначення характеристик теплообміну необхідно провести додаткові експерименти з різними швидкостями руху гарячого теплоносія. Результати розрахунків середнього теплообміну для пучка гладких труб (представлені на рис. 6) добре узгоджуються з даними, отриманими професором Горобцем В.Г. [28], з максимальною розбіжністю в межах 20 %, що може бути пояснено різницею у швидкості теплоносія, використаною в дослідженнях.

Висновки. Запропонована модель «фільтр-теплообмінника» дозволяє нагрівати зовнішнього повітря з одночасним забезпеченням приміщення необхідною кількістю зовнішнього повітря, що відповідає санітарній нормі для дихання однієї людини, з компенсуванням рівня викидів CO_2 людьми. Використання фільтра HEPA H11 в поєднанні з високою кратністю повітрообміну забезпечує мінімальну ефективність очищення повітря в приміщенні до 95 % від початкового забруднення респіраторними та іншими забруднювачами повітря.

Збільшення об'єму повітря, що обробляється агрегатом, при незначному зростанні енергоспоживання, значно підвищує швидкість очищення повітря. Це дозволяє ефективно реагувати на зміни якості повітря та підтримувати його на належному рівні.

Узагальнюючи результати, можна сказати, що кожне збільшення кратності повітрообміну крізь фільтр на 1 год^{-1} скорочує час очищення приблизно на 20 хв при низькому рівні забруднення та на одну годину при високому. Важливо зазначити, що кратність повітрообміну для ефективного очищення не повинна бути менше 2 год^{-1} .

Дослідження процесів теплообміну в теплообміннику «повітря-повітря» пристрою, де передача тепла відбувається без додаткового нагрівання зовнішнього повітря надало експериментальну формулу визначення числа Нуссельта для теплообмінників даного типу при швидкості повітряного потоку перед пучком у межах $1 \dots 3,5 \text{ м/с}$, за чисел Рейнольдса від 700 до 3500 та числа Прандтля 0,73. Дослідження підтверджує ефективність повітроочищувачів у покращенні якості повітря в приміщенні та його ефективність при інтегруванні теплообмінника типу «повітря-повітря» в його очисну частину.

Подяки. Роботу виконано за консультативного супроводу доктора технічних наук, професора Олександра Приймака

References

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017: Ventilation of Health Care Facilities. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2017.
6. HTM 03-01: Specialised ventilation for healthcare premises: part A – design and validation. London: Department of Health/Estates and Facilities Division, 2007.
7. CEN/TS 16244:2018. Ventilation in hospitals – coherent hierarchic structure and

- common terms and definitions for a standard related to ventilation in hospitals. Brussels: Comite Europeen de Normalisation, 2018
8. L. Makarenko, O. Priymak.(2023). Ensuring normal air quality in office premises with the existing ventilation system. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 44, 17-22. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.17-22> [in Ukrainian].
 9. L. Makarenko, O. Priymak (2023). Air exchange rate as means of ensure requirements to air purity on the basis of high-efficiency filters. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 46, 18-27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.18-27> [in Ukrainian].
 10. 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.
 11. DBN V.2.5-67:2013 "Heating, Ventilation, and Air Conditioning" *Minregion of Ukraine* [in Ukrainian].
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Alekseik, Y., & Alekseik, O. (2022). DESIGNS OF HEAT EXCHANGER DEVICES ON TWO-PHASE HEAT TRANSFER ELEMENTS FOR AIR HEAT DISPOSAL IN VENTILATION SYSTEMS: OVERVIEW. *KPI Science News*, 135(1-2), 11-25. [in Ukrainian].
 16. Schiavon, S., & Melikov, A. (2008). Energy analysis of a personalized ventilation system in a cold climate: influence of the supplied air temperature.
 17. 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.
 18. Terkildsen, S. (2013). Development of mechanical ventilation system with low energy consumption for renovation of buildings.
 19. Schiavon, S. (2008). Energy saving with personalized ventilation and cooling fan. Thesis PhD
 20. 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.
21. Diez Maroto, M. (2011). Filtration efficiency of intermediate ventilation air filters on ultrafine and submicron particles.
 22. 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.
 23. Alavy Ghahfarrokhy, S. M. (2019). *In-situ Measurement of Ventilation and Impacts of Filtration on IEQ and Energy use of Residential Buildings* (Doctoral dissertation).
 24. 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.
 25. 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.
 26. Makarenko, L. (2024). An air cleaner model with HEPA 11 filter inserts and a heat exchanger for heating the outside air in the recirculation section. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(2), 67-77. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240302.05> [in Ukrainian].
 27. 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
 28. Gorobets V.G., Bohdan Yu.O., & Trokhaniak V.I. Heat-exchange equipment for cogeneration plants: [Monograph].– Kyiv: «PC «Komprint», 2017. – 198 p . ISBN 978-966-929-674-0 . [in Ukrainian].

UDC 628.86: 621.184.54.

Postgraduate Student. **Liubov Makarenko**,

2222555@ukr.net

ORCID: 0009-0005-9024-8521

Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

EFFICIENT AIR VENTILATION WITH COMBINED CLEANING OF POLLUTANTS

Abstract. *The results of a study aimed at developing a comprehensive solution for creating a safe air environment in residential and office premises are presented. An algorithm of actions has been developed, including administrative and hardware components, to ensure high efficiency of air purification and energy saving. The results of the study of the effectiveness of the "filter-heat exchanger" model aimed at simultaneously improving the quality of indoor air and reducing energy consumption are presented. A device has been developed and experimentally tested that provides savings of more than 500 watts per hour by using an air-to-air heat exchanger, where heat transfer occurs without additional heating of external air. A new method for determining the Nusselt number for heat exchangers of this type is proposed, based on the study of heat exchange during the transverse flow of both a separate pipe and a bundle of pipes in the range of Reynolds number $700 < Re < 3500$. The study confirms the high efficiency of the air purification system, based on the use of a HEPA H11 filter and high air exchange rate, providing a minimum air purification efficiency of up to 95% of the original pollution. It is shown that increasing the volume of treated air significantly increases the cleaning speed, and each increase in the air exchange rate per unit reduces the cleaning time.*

Keywords: *filter-heat exchanger, HEPA, efficiency, mechanical air filtration, air purification.*