

УДК 697.9

аспір. Любов Макаренко,
2222555@ukr.net, ORCID: 0009-0005-9024-8521,
д.т.н., проф. Олександр Приймак,
02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057,
Київський національний університет будівництва і архітектури

КРАТНІСТЬ ПОВІТРООБМІНУ ЯК ЗАСІБ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМОГ ДО ЧИСТОТИ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

В умовах постійного підвищення забруднення повітря постає питання створення безпечних повітряних зон з контролем якості повітряного середовища в місцях перебування людей. Погіршення якості атмосферного повітря спричинене військовими діями та їх наслідками, а також необхідність скорочення споживання наявних енергоресурсів вимагає вивчення рекомендацій щодо оптимальної кратності повітрообміну наявних європейських та американських вимог до якості повітря в житлових та офісних будівлях для досягнення необхідної якості повітря при мінімальному енергоспоживанні. Цілями дослідження було отримати дані щодо ефективності очищення повітря в заданому об'ємі при різних кратностях повітрообміну. Окремим завданням була перевірка заявлених виробником даних щодо перепаду тисків на фільтри при збільшенні об'єму повітря, що через нього проходить. Було розглянуто фільтраційні системи CleanZone5300, з фільтром класу F9 та фільтром класу HEPA H12/13, які можуть забезпечити кратність повітрообміну від 2 до 10 крат. В об'ємі приміщення 225,9 м³, при температурі 18 °С, відносній вологості 57-59 % та початковій кількості частинок в повітрі приміщення 533440 частинок/фут³ (15105 частинок/м³) досліджувалась здатність фільтраційних установок очищувати повітря при різних кратностях. Було зроблено висновок, що навіть при кратності 2 фільтраційна система може забезпечити очищення повітря до 40 % при використанні фільтру F9 та до 60 % при використанні фільтру HEPA H12/13 за незначний проміжок часу. Висновки дослідження потребують перевірки в офісних приміщеннях з існуючою системою вентиляції для визначення оптимальної кратності досягнення заданої якості повітря при використанні фільтрів або переносних фільтрувальних установок.

Ключові слова: кратність повітрообміну; фільтрування повітря; очищення повітря; рециркуляційна установка.

Вступ. За даними ресурсу IQAir [1] місто Київ входить до топ-40 міст з найбруднішим повітрям у світі. Дані ресурсу SaveEcoBot [2] відображають дані 280 станцій моніторингу стану атмосферного повітря в місті Київ, встановлені як мешканцями міста так і різними організаціями, включаючи органи місцевого самоврядування. За цими даними, що відображаються в застосунку Kyiv Smart City, в період з 9 листопада 2019 року по 8 листопада 2022 року середній індекс якості повітря в місті Київ становив від 83 до 130 AQI в залежності від районів, що трактується як помірний (від 51 до 100 AQI) та шкідливий рівень для чутливих груп населення (від 101 до 130 AQI). На ранок 8 листопада 2022 року індекс якості повітря в місті Київ відображався як середній 75 пунктів AQI, з перевищенням рівня концентрації дрібнодисперсного пилу фракції PM2.5 в 4,7 (PM 2.5 23.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) від рівнів рекомендованих Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) від 22 вересня 2021 року, що регламентують порогові рівні для шести поширених забруднювачів повітря (твердих частинок (PM 2.5, PM 10), озону (O₃), діоксиду азоту (NO₂), діоксиду сірки (SO₂) і оксиду вуглецю (CO)). Рекомендаціями по охороні здоров'я в цьому випадку є зачинення вікон для запобігання забруднення зовнішнім повітрям та обмеження фізичних навантажень при перебуванні на зовні чутливих груп населення. Такі рекомендації легко виконати, але чи є можливість забезпечувати вимоги ВООЗ не обмежуючи себе та гарантувати безпечні рівні забруднювачів в повітрі в місцях перебування людей. Звідси постає питання забезпечення заданих значень якості повітря в приміщеннях інженерними мережами, як системи вентиляції та окремі очисні установки, наприклад стаціонарні чи переносні рециркуляційні фільтраційні установки.

Актуальність дослідження. Постало питання яким чином отримати необхідні показники повітря вказані в рекомендаціях ВООЗ. Нормативних документів чи рекомендацій на використання обладнання для очищення повітря в офісних приміщеннях України наразі не опубліковано. Цим дослідженням здійснено спробу дослідити можливі варіанти забезпечення якості повітря, застосовуючи в даному випадку рециркуляційні фільтрувальні установки з можливістю змінювати об'єм повітря, що може обробити установка, в межах від 2 до 10 крат.

Останні дослідження та публікації. Щоб досягти необхідної якості повітря, що вказана в рекомендаціях WHO (ВООЗ) необхідно звернутись до досвіду європейських та американських настанов, що вже пройшли випробувані та довели свою ефективність.

В методичних рекомендація Центру з контролю та профілактики захворювань у США (CDC) [3] та в Керівництві американського інституту архітекторів (AIA) [4] вказана рекомендована кратність повітрообміну в закладах

охорони здоров'я для досягнення необхідного класу очищення за допомогою портативного пристрою з HEPA фільтром складає від 6 до 12 крат. Подібні дані вказані в нормах Китаю [7], США [8], Великобританії [9] та Бельгії [10].

Рекомендована кратність повітрообміну в учбових приміщеннях: 1 крат для подачі свіжого повітря за допомогою систем загальнообмінної вентиляції та 2 - 4 крати за рахунок рециркуляційних установок, як вказує Kirkman (PhD, Штутгарт, Німеччина) та ін. [5] в своєму огляді: "Ефективність очисників повітря для видалення вірусомісних респіраторних крапель: Рекомендації щодо вибору очищувача повітря для приміщень кампусу".

В звіті №23 ЄСА (Європейська спільна дія щодо «Міського повітря, внутрішнього середовища та впливу на людину») [6] передбачається, що в офісних будівлях, рівень вентиляції, який підтримується на рівні та вище 10 л/с·на людину, в середньому призведе до значного зменшення симптомів «хвороби будівлі» у мешканців і кращої якості повітря. Якщо інженер-проектувальник не має доступних вимірних даних концентрації CO₂, рекомендується використовувати витрату свіжого повітря в офісному приміщенні на людину ($q_v = 12,5$ л/с·на людину).

Дослідження організації WHO, США [11] показують, що можливість заразитися через 15 хвилин після перебування в приміщенні з джерелом інфекції з кратністю повітрообміну 12 крат становить 4 %, а з кратністю 24 - становить 2 %.

Тож, виходячи з усього наведеного вище, можна зробити висновок, що найменша рекомендована кратність для якісного очищення повітряного середовища становить 5-6 крат. З подальшим накопичувальним ефектом: чим довше працюють рециркуляційні очисні установки тим більший ефект буде отримано з часом.

Отримання необхідної кратності за допомогою рециркуляційних установок з низьким енергоспоживанням дає можливість попередити забруднення та контролювати якість повітряного середовища в місцях постійного перебування людей та уникнути значних енергетичних втрат на нагрів та охолодження центральними системами обробки повітря.

Формулювання цілей статті. Отримання даних щодо ефективності очищення повітря в виробничому приміщенні від часток в заданому об'ємі при різних кратностях повітрообміну фільтрувальними установками PreMax500Filter Drum F9 Art.№: 202112002 та HyperHEPA300Filter Drum H12/13 Art.№:202212002. Окремим завданням є перевірка заявлених виробником даних щодо перепаду тисків на фільтрі при роботі установки.

Основна частина. Дослідження проводилось в виробничому приміщенні в м. Київ. Висота приміщення 3,485 м, довжина 11,462 м, ширина 5,655 м.

Розрахунковий об'єм приміщення таким чином склав 225,9 м³. Вимірювання проводилися 21 вересня 2022 року при внутрішній температурі +18,6 °С, відносній вологості в приміщенні 57-59 % при вимкнених системах вентиляції та опалення. В приміщенні перед початком роботи фільтрувальних установок зафіксовано 15105 частинок на 1 м³. Фільтрувальна установка складається з вентилятора обладнаного ЕС-двигуном та фільтрувального елемента в корпусі з фільтрами двох типів : класу F9 тонкої очистки та з вискоефективним фільтром твердих частинок класу HEPA H12/13.

Для вимірювання даних використовувалися такі прилади:

- датчик перепаду тиску SPS-G-2КО;
- монітор якості повітря AirVisualPro;
- датчик вологості DCMFG-2R Serial nr.: FN5X-713E-DB2G (T, rH, CO₂);
- анемометр ET-965;
- датчик частинок Particle Scan Lite, IQAir. Serial nr.:2005.30837. Flow 0,025 cfm;
- дальномір лазерний DLE40 Profesional, Bosch.

Вимірювання проводились в два етапи. Спочатку досліджувалась фільтрувальна установка CleanZone5300 з фільтром PreMax500Filter Drum F9 Art.№: 202112002, а потім на її місце була встановлена CleanZone5300 з фільтром HyperHEPA300Filter Drum H12/13 Art.№:202212002.

Установка з HEPA фільтром навмисне використовувалась після того, як повітря очищалося установкою з фільтром F9, щоб запобігти надмірному забрудненню HEPA фільтра. Виконуючи принцип встановлення черговості фільтрів за напрямом руху повітряного потоку: від фільтрів попередньої очистки , які відбирають значні забруднення в повітрі (такі як листя дерев, пир'я і т.д) до фільтрів тонкої очистки типу F9, а вже потім до вискоефективних фільтрів HEPA.

Вимірювання проводились при роботі установки на 5 різних швидкісних режимах зміни обертів вентилятора з можливих 10, що відповідає можливості установок фільтрувати повітря від 400 м³/годину до 2400 м³/годину. Результати вимірювань наведені в таблицях №1 та №2.

Окремо цікавили дані щодо перепаду тисків до та після фільтру при роботі фільтрувальної установки. В аналогічних виробників початковий перепад тиску на фільтрах HEPA вказується 150 Па. Кінцевий перепад при забрудненні фільтру складає понад 450 Па. В даному випадку заміри вказують на значно нижчі показники: при роботі фільтрувальної установки на 10 швидкості (що відповідає спроможності фільтрувати повітря в кількості 2400 м³/годину) перепад тиску, який створюється на фільтрі - лише 97 Па, що відповідає заявленим характеристикам від виробника, і очевидно, залежить від фільтруючого

середовища та структури повітряного фільтра (виробник заявляє фільтрувальну площу фільтра 17 м²). Це надає широкі можливості для використання даного фільтра навіть з звичайних системах вентиляції. Наприклад, встановлення в існуючу систему вентиляції без зміни вентилятора на потужніший, щоб компенсувати втрати потужності на «продавлювання» фільтра з перепадом тиску в 450 Па.

Прогнозований час очищення повітря в об'ємі приміщення надано в вигляді діаграм на рис. 1 та рис. 2. Потрібно зазначити, що дані діаграми мають прогнозований характер опираючись на отримані дані в приміщенні з великою кратність повітрообміну (10 крат) при відсутності будь яких навантажень в вигляді перебування великої кількості людей чи будь яких інших джерел забруднення повітряного середовища. Дані потрібно перевірити при врахуванні цих факторів.

Ефективність видалення забруднюючих речовин за допомогою фільтрів розраховується за рівнянням за методом стандарту Eurovent 4/9:1997, % :

$$Ef = (C_b + C_a)/C_b \cdot 100\%, \quad (1)$$

де C_b – концентрація забруднювачів перед фільтром, частинок/м³;
 C_a – концентрація забруднювачів після фільтра, частинок/м³.

За одну хвилину фільтрувальна установка CleanZone5300 з фільтром PreMax500Filter Drum F9 Art.№:202112002 потужністю очищення потоку повітря, що проходить крізь неї, в 2400м³/годину в приміщенні площею 225,9м² може забезпечити повітрообмін в 10 крат з середньою швидкістю очищення повітря в об'ємі на 16 % за хвилину.

Спостерігалось поступове зниженням забруднення повітря в об'ємі приміщення з 15105 частинок/м³ до 6026 частинок/м³ – в такому разі фільтр F9 забезпечив вловлювання 60 % забруднення з повітря в приміщенні частинок розміром >0,4мкм.

За одну хвилину фільтрувальна установка CleanZone5300 з фільтром CleanZone5300 з фільтром HyperHEPA300Filter Drum H12/13 Art.№:202212002 при тих же умовах має середню швидкість очищення повітря в об'ємі на 10 % за хвилину.

Спостерігалось поступове зниженням забруднення повітря в об'ємі приміщення з 8027 частинок/м³ до 4747 частинок/м³ – в такому разі фільтр H12/13 забезпечив вловлювання 40 % забруднення з повітря в приміщенні частинок розміром >0,3 мкм. Зниження показника ефективності відносно, його слід розглядати в поєднанні з даними передочищення в фільтрі F9.

Таблиця 1. Фільтрувальна установка CleanZone5300
з фільтром PreMax500Filter Drum F9 Art.№: 202112002

Режим роботи установки по швидкості	1	3	5	8	10
Проведені заміри частинок до ввімкнення установки, частинок/м ³ :	15105	14826	14379	10129	7805
Об'єм повітря в установці, м ³ /годину	400	800	1200	1800	2400
Час досліду, с	60	60	60	60	60
Площа потоку повітря, м ²	0,2079	0,2079	0,2079	0,2079	0,2079
Швидкість потоку повітря в цьому перерізі, м/с:	0,53	1,06	1,6	2,4	3,2
Перепад тиску до та після фільтру, Па	10	16	25	45	66
Проведені заміри частинок після вимкнення установки, частинок /м ³ :	14825	14379	10129	7805	6026
Ефективність очищення за хвилину, % за методом Eurovent 4/9:1997	1,85	3,0	30,0	23,0	23,0

Таблиця 2. Фільтрувальна установка CleanZone5300
з фільтром HyperHEPA300Filter Drum H12/13 Art.№:202212002

Режим роботи установки по швидкості	1	3	5	8	10
Проведені заміри частинок до ввімкнення установки, частинок/м ³ :	8027	6628	6165	5609	5195
Об'єм повітря в установці, м ³ /годину	400	800	1200	1800	2400
Час досліду, с	60	60	60	60	60
Площа потоку повітря, м ²	0,2079	0,2079	0,2079	0,2079	0,2079
Швидкість потоку повітря в перерізі, м/с:	0,53	1,06	1,6	2,4	3,2
Перепад тиску до та після фільтру, Па	14	25	37	67	97
Проведені заміри частинок після вимкнення установки, частинок /м ³ :	6628	6165	5609	5195	4747
Ефективність очищення за хвилину, % за методом Eurovent 4/9:1997	17,4	6,5	9,5	7,4	8,6

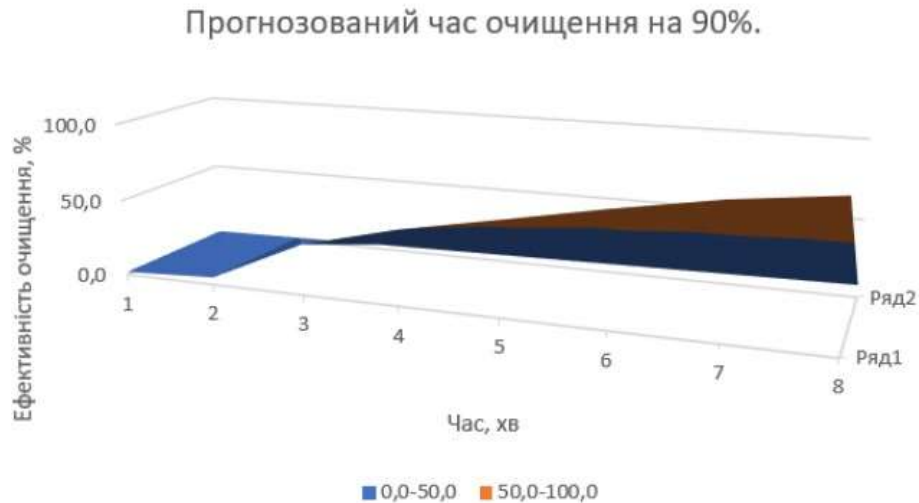


Рис.1 . Прогнозований час очищення повітря фільтрувальною установкою PreMax500Filter Drum F9 Art.№: 202112002 на 90 % від забруднення з повітря в приміщенні частинок розміром $>0,4$ мкм у даному приміщенні 8 хвилин

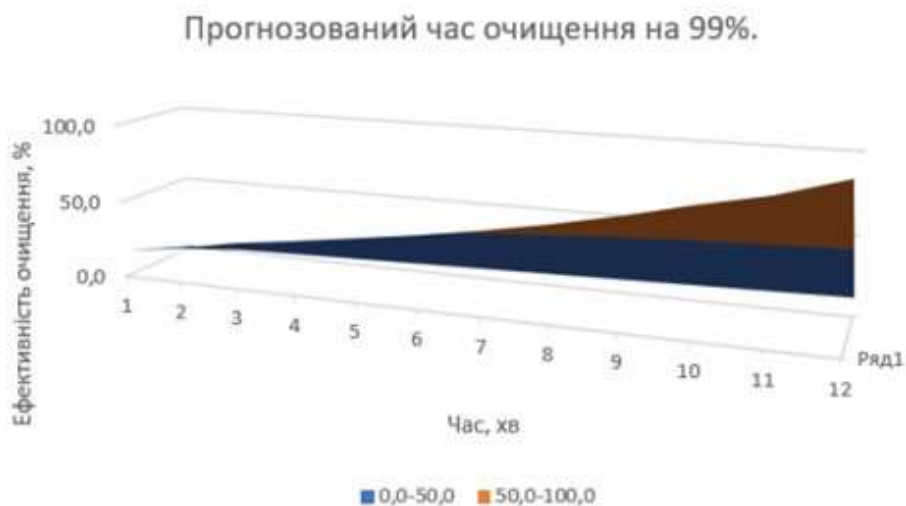


Рис.2 . Прогнозований час очищення повітря фільтрувальною установкою HyperHEPA300Filter Drum H12/13 Art.№:202212002 на 99 % від забруднення з повітря в приміщенні частинок розміром $>0,3$ мкм у даному приміщенні 12,5 хвилин

Висновки. Дослідження не може претендувати на оголошення загального правила для організації приміщень з безпечними повітряними зонами, все таки воно має вибірковий характер, але загальні риси вже окресленні в європейських та американських нормах воно підтверджує – кратності повітря безперечно може виступати засобом для можливості контролювати концентрацію забруднюючих речовин в повітряному середовищі приміщень.

В установках, що використовувалися в дослідженні, електрична споживана потужність вентиляторів складає 300 Вт за годину. В порівнянні це потужність, яку споживає звичайний офісний принтер. При такому незначному електричному споживанню при роботі фільтрувальної установки на 10 швидкості, що відповідає спроможності фільтрувати повітря в кількості 2400 м³/годину, вдалося досягти очищення повітря в об'ємі приміщення площею 225,9 м³ на 60 % від забруднення частинками розміром >0,4 мкм та на 40 % від забруднення частинками розміром >0,3 мкм.

Окремий інтерес викликає характеристика фільтрів, використаних в дослідженні, по показниках перепаду тиску до та після фільтру – максимум 97 Па, що дає можливість встановлювати ці фільтри майже в будь яку центральну систему вентиляції, по принципу організації систем вентиляції в медичних установах з вимогами категорій чистоти ISO 5 - ISO 8, не змінюючи потужність вентиляторів у цих системах, для компенсування значних опорів створених фільтрами типу HEPA.

Перспективи подальших досліджень. Необхідні подальші дослідження в функціонуючих офісних приміщеннях врахуванням кількості присутніх в приміщеннях людей. Визначення оптимальних кратностей повітрообміну: досягнення безпечних рівнів очищення повітря при мінімальних кратностях. Дослідження можливості встановлення фільтрувальних систем на вже існуючі вентиляційні системи.

References

1. Website IQAir . <https://www.iqair.com>. Accessed 27 August 2023.
2. Website SaveEcoBot. <https://www.saveecobot.com/maps/kyiv#days-7>. Accessed 27 August 2023.
3. “Guidelines for environmental infection control in health-care facilities” U.S. Department of Health and Human Services Centers for Disease Control and Prevention (CDC) Atlanta, GA 30329, 2023, updated July 2019 <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/index.html>. Accessed 27 August 2023.
4. “Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities” The American Institute of Architects Academy of Architecture for Health, The Facilities Guidelines Institute, 2006. <https://www.fgiguide.org/wp-content/uploads/2015/08/2001guidelines.pdf>. Accessed 27 August 2023.
5. Sophie Kirkman, John Zhai, Shelly L. Miller. “Effectiveness of Air Cleaners for Removal of Virus-Containing Respiratory Droplets: Recommendations for Air Cleaner Selection for Campus Spaces.” 2020. <https://shellym80304.files.wordpress.com/2020/06/air-cleaner-report.pdf>. Accessed 27 August 2023.
6. “Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy”, European Commission Joint Research Centre-Institute for Health & Consumer Protection Physical & Chemical Exposure Unit, 2023 https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Inive/ECA/ECA_Report23.pdf. Accessed 27 August 2023.
7. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. GB 15982-2012 Hygienic standard for disinfection in hospitals. Beijing: Standards Press of China, 2012. (In Chinese). <http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=4DA7977F7EFBF4B3181E3EE674DC82C8>. Accessed 27 August 2023.
8. Ventilation of Health Care Facilities; American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017, New York, NY, USA. 2017.
9. Specialised ventilation for healthcare premises: part A – design and validation. HTM 03-01, Department of Health/Estates and Facilities Division, 2007.
10. Ventilation in hospitals – coherent hierarchic structure and common terms and definitions for a standard related to ventilation in hospitals. CEN/TS 16244:2018, Comite Europeen de Normalisation, 2018.
11. Atkinson, James. Natural ventilation for infection control in health-care settings. World Health Organization, 2009.

UDC 697.9

PG. Liubov Makarenko,
2222555@ukr.net, ORCID: 0009-0005-9024-8521,
Dr Hab., Prof. Oleksandr Priymak,
02opriymak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3081-6057,
Kyiv national University of Construction and Architecture

AIR EXCHANGE RATE AS A MEANS OF ENSURE REQUIREMENTS TO AIR PURITY ON THE BASIS OF HIGH-EFFICIENCY FILTERS

In the context of a constant increase in air pollution, the question arises of creating safe air zones with quality control of the air environment in places where people stay. The constant deterioration of air quality caused by military operations and their consequences, as well as the need to reduce the consumption of available energy resources, requires studying the recommendations on the optimal air exchange rate of existing European and American air quality requirements in residential and office buildings to achieve the required air quality with minimal energy consumption. The objectives of the study were to obtain data on the efficiency of air purification in a given volume at different air exchange rates. A separate task was to check the data declared by the manufacturer on the pressure drop across the filter with an increase in the volume of air passing through it. CleanZone5300 filtration systems with F9 class filter and HEPA H12/13 class filter were considered, which can provide an air exchange rate of 2 to 10 times. In a room volume of 225.9 m³, at a temperature of 18 °C, a relative humidity of 57-59 % and an initial number of particles in the room air of 533,440 particles/ft³ (15105 particles/m³), the ability of filtration units to purify the air at different rates was studied. It was concluded that even with a factor of 2, the filtration system can provide air purification up to 40 % when using the F9 filter and up to 60 % when using the HEPA H12/13 filter in a short period of time. Recirculation filter units are considered as the easiest way to increase the air exchange rate in the room, in our climatic conditions. With the possibility of avoiding the processing of air for heating or cooling when using outside atmospheric air. In the installations used in the study, the electrical power consumption of the fans is 300 W per hour. The conclusions of the study need to be tested in office premises with an existing ventilation system to determine the optimal multiplicity of achieving a given air quality when using filters or portable filter units.

Keywords: air exchange rate; air filtration; air purification; recirculation plant.