

УДК 004.94:697.94:628.518

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-7>

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ УТОЧНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЄКТУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МЕТАЛООБРОБНОЇ МАЙСТЕРНІ

Чеберячко Юрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-7307-1553

Максимова Наталія Миколаївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-1684-7479

Подобний Антон Дмитрович,

студент
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0000-5277-1163

У роботі розглянуто можливості комбінації розрахунково-аналітичних методів та підходів до сучасного цифрового 3D-моделювання на прикладі програмного комплексу SolidWorks для оперативної оптимізації проєктних рішень щодо встановлення параметрів вентиляційних систем виробничих приміщень. На прикладі металообробної майстерні, де передбачається зміна конфігурації обладнання для виконання ремонтних робіт та модернізації устаткування, розглянуто можливість оптимізації робочого простору з огляду забезпечення якості повітря робочої зони. Як джерела викиду розглянуто токарний, свердлильний і шліфувальний верстати. Розрахунково визначено параметри вентиляційної системи: визначено сумарні тепловиділення від обладнання, розраховано необхідну витрату повітря для асиміляції тепла та для видалення шкідливих викидів – пилу та аерозолі. На основі максимальної потреби у повітрообміні розраховано діаметри повітропроводів для різних ділянок мережі (від 355 мм до 700 мм) та сумарні втрати тиску (670,9 Па), що дало змогу обґрунтувати параметри примусового вентилявання робочої зони. На підставі створення тривимірної моделі майстерні та її вентиляційної системи у програмному комплексі SolidWorks із використанням CFD-аналізу проведено моделювання розподілу повітряних потоків, що дало змогу візуалізувати рух повітря, виявити зони нерівномірного розподілу та перевірити раціональність проєктного рішення. Співставлення результатів аналітичних розрахунків та цифрового моделювання показало добру збіжність параметрів швидкості потоку. Моделювання підтвердило, що зміна конфігурації повітропроводів та розташування обладнання дадуть змогу досягти більш рівномірного розподілу потоків та знизити загальний опір системи. На підставі аналітичних досліджень виявлено, що використання комплексного підходу значно спрощує та прискорює процес вибору оптимальної конфігурації вентиляційної системи, особливо в умовах модернізації виробництва.

Ключові слова: вентиляційна система, майстерня, швидкість потоку, 3D-моделювання, SolidWorks, підбір оптимальної конфігурації повітропроводів.

Cheberiyachko Yuriy, Maksymova Nataliia, Podobnyi Anton. Digital modelling as a tool for refining the design parameters of a metalworking workshop ventilation system

The paper considers the possibilities of combining calculation and analytical methods and approaches of modern digital 3D modelling, using the example of the SolidWorks software package, for the operational optimisation of design solutions for setting the parameters of ventilation systems in production facilities. On the example of a metalworking workshop, where it is planned to change the configuration of equipment for repair work and equipment modernisation, the possibility of optimising the workspace in terms of ensuring the air quality of the working area is considered. Lathes, drilling and grinding machines are considered as emission sources. The parameters of the ventilation system were calculated: the total heat emissions from the equipment were determined, and the required air flow rate for heat assimilation and for the removal of harmful emissions such as dust and aerosol was calculated. Based on the maximum air exchange demand, the diameters of air ducts for different sections of the network (from 355 mm

to 700 mm) and the total pressure loss (670.9 Pa) were calculated, which made it possible to justify the parameters of forced ventilation of the working area. Based on the creation of a three-dimensional model of the workshop and its ventilation system in the SolidWorks software package, the distribution of air flows was modelled using CFD analysis, which made it possible to visualise air movement, identify areas of uneven distribution, and verify the rationality of the design solution. Comparison of the results of analytical calculations and digital modelling showed good convergence.

Keywords: ventilation system, workshop, flow rate, 3D modelling, SolidWorks, selection of the optimal air duct configuration.

Вступ. Ефективна вентиляція є ключовим чинником забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов, промислової безпеки та енергоефективності на виробництві. Під час обґрунтування технічних рішень багато дослідників використовують як експериментальні, так і чисельні методи.

В. Дж. Тромпеттер та ін. [1] експериментально виявили зменшення на 66 % умісту твердих суспендованих частинок з аеродинамічним діаметром менше 10 мкм (PM10) у повітрі шкільного приміщення за умови оснащення даху класної кімнати сонячною вентиляційною установкою. Дослідники звернули увагу на необхідність постійного моніторингу якості атмосферного повітря у приміщеннях, зокрема за допомогою запропонованого ними модифікованого пробовідбірника повітряних частинок Streaker™.

Сучасні міжнародні політики особливу увагу приділяють питанням підвищення енергоефективності. Енерговитрати, спрямовані на забезпечення примусового вентилявання приміщень, поступово збільшуються, але водночас якість повітря в деяких будівлях останніми роками погіршилася [2]. У своїй роботі Х. Б. Авбі [2] навів короткий огляд типів механічної вентиляції та систем розподілу повітря, що використовуються в будівлях. Він описав ефективність традиційних та деяких нових типів вентиляційних систем із погляду забезпечення якості повітря у приміщеннях (IAQ), із використанням діджитальних можливостей запропонував метод оцінки ефективності систем розподілу повітря, який використовує вентиляцію та енергоефективність.

У роботі [3] показано ефективність поєднання цифрового моделювання та даних експериментальних досліджень на прикладі майстерні з кількома джерелами тепла. Зокрема, показано добру збіжність експериментальних даних та даних цифрового моделювання зміни прогнозованої температури і швидкості повітря у приміщенні. Розташування вентиляційної системи та встановленого обладнання всередині майстерні суттєво впливає на необхідну силу всмоктування потоку, що, як наслідок, призводить до зміни теплового навантаження

та параметрів транспортування забрудненого повітря.

Г. Фенг та ін. [4] на підставі цифрового моделювання обґрунтували раціональну локацію обладнання для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату у палаті медичного закладу, при цьому було досягнуто зменшення кількості панелей на 33,8 % у запропонованій авторами системі. В аналітичних дослідженнях ураховано контроль за температурою та вологістю.

С. Лу та ін. [5] ефективно використали можливість цифрового моделювання для дослідження розподілу повітря за трьома різними схемами подачі повітря для платформи метро: змішувальна вентиляція, стратифікована вентиляція та вентиляція з повітряною завісою. Під час моделювання враховано різні чинники, у тому числі швидкість і температура повітря. Автори відзначили доцільність використання подібного моделювання для проектування вентиляції з повітряною завісою, що підходить для платформи метро.

Таким чином, дослідження вентиляційних систем для підбору оптимальних параметрів їх конструкції та експлуатації залишаються незмінно актуальними. Наприклад, за необхідності проведення ремонтних робіт, удосконалення існуючих виробничих ліній та/або реконструкції виробничого середовища може виникнути потреба у зміні конфігурації обладнання, його місця розташування в майстерні та аспіраційної системи. Як наслідок, це призведе до зміни її експлуатаційних параметрів. Цифрове моделювання може сприяти оптимізації проектування існуючих вентиляційних систем, які потребують удосконалення.

Як приклад розглянемо виробниче середовище, а саме майстерні, де передбачається зміна конфігурації обладнання для виконання ремонтних робіт та модернізації устаткування.

Метою роботи є вибір оптимального варіанту розташування системи штучної вентиляції та визначення швидкості повітряних потоків у приміщенні для забезпечення комфортних умов робочого середовища.

Методи та методики дослідження. Оптимізація процесів проектування вентиляційних систем, які потребують уточнення внаслідок

ведення ремонтних робіт у майстерні, розглянута на підставі комплексного поєднання розрахунково-аналітичних методів, як основних, так 3D-моделювання в програмі SolidWorks як інструменту деталізації проєкту.

Як об'єкт дослідження розглянуто металообробну майстерню площею 56 м² та висотою 3 м. Устаткування майстерні включає токарний (11,75 кВт), свердлильний (0,55 кВт) та шліфувальний (0,55 кВт) верстати, які, своєю чергою, виступають як джерела забруднення повітря робочої зони. Місцеві витяжні зонти передбачені над кожним джерелом забруднення повітря для ефективного видалення пилу та аерозолі.

Вентиляційна система представлена трьома розподільчими трубопроводами (ділянки I–III), які від джерел утворення викиду забруднюючих речовин примусово вентилюють повітряний потік та транспортують до магістрального трубопроводу (ділянка IV), а далі – до газоочисного устаткування і точки викиду до атмосферного повітря. Трубопровідна мережа характеризується такими параметрами: розподільчі трубопроводи на центральній ділянці II мають діаметр $\varnothing 500$ мм, довжину $L_2 = 1,5$ м, на ділянках I і III, які представлено бічними відгалуженнями, – $\varnothing 355$ мм, 2,5 м кожний відповідно, а магістральний трубопровід, ділянка IV, – $\varnothing 700$ мм, 6 м.

За результатами визначення параметрів механічної вентиляції для майстерні, виконаного з урахуванням рекомендацій [6; 7], виявлено необхідність забезпечення витрати повітря

не менше ніж 20 000 м³/год. за сумарних утрат тиску в системі 670,9 Па.

Для перевірки розрахунку побудовано 3D-модель виробничого простору та визначено швидкість розподілу потоків повітря. Під час моделювання із використанням SolidWorks виявлено нерівномірний розподіл потоку. Для усунення недоліку запропоновано збільшити довжину L_2 , зробивши їх рівними $L_1 = L_2 = L_3$, що відображено на рис. 1. Зробивши однаковими відстані від трійника до повітрязабірника, досягнуто рівномірний розподіл потоку, зниження опору потоку, а отже, й зменшення енерговитрат на експлуатацію системи.

Візуалізація представлена вигляді кольорової схеми (рис. 1), де градієнти кольорів відображають області швидкостей від 0 до 1 м/с. Максимальні значення швидкості, позначені червоним кольором (0,88–1,0 м/с), спостерігаються у центральній частині повітропроводу. У міру віддалення від центру потоку до стінки каналу швидкість прогресує, що відображається переходом кольору через жовтий та зелений до синього (0–0,111 м/с).

У конструкції системи чітко видно основний вентиляційний канал із характерним поворотом на 90 градусів, витяжний патрубок із нижнім напрямком та горизонтальний магістральний повітропровід (рис. 1). У зоні повороту потоку формування вихрової структури, що є типовим для такої геометрії каналу.

Аналіз розподілу швидкостей підтверджує працездатність спроектованої системи

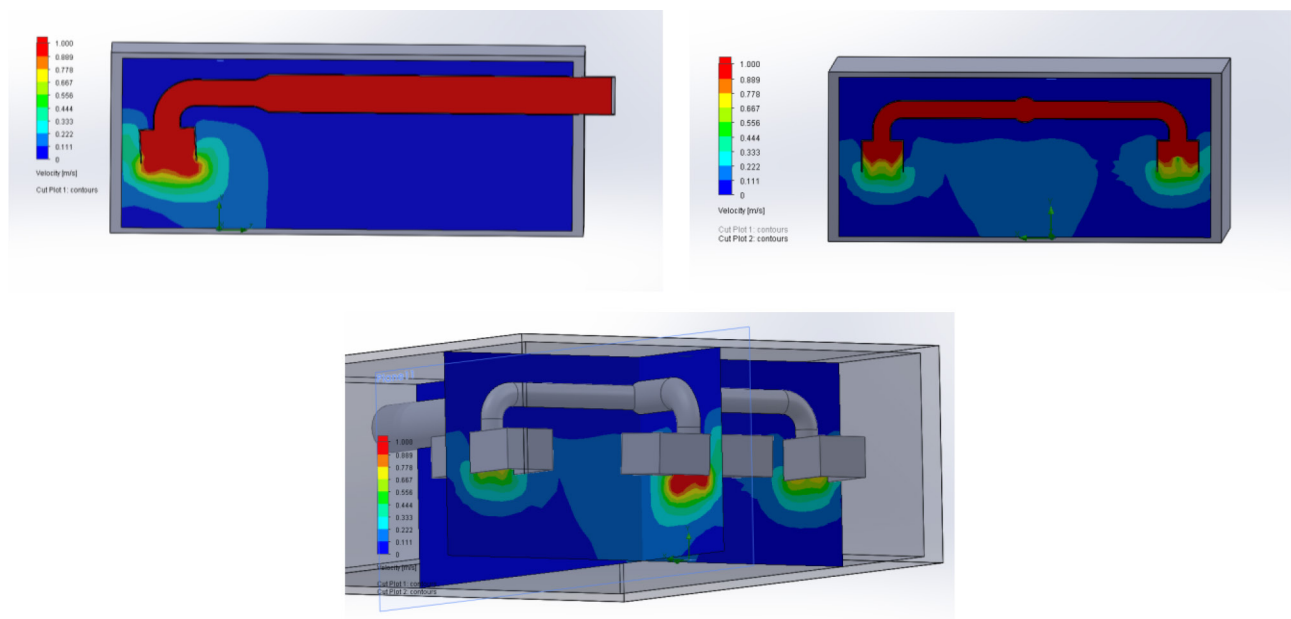


Рис. 1. Результати аналізу CFD-моделювання системи вентиляції з просторовим розподілом швидкостей повітряного потоку в поперечному перерізі приміщення майстерні

вентиляції. Хоча в зоні повороту присутня певна нерівномірність потоку, це є нормальним явищем для такого типу конфігурації і не впливає критично на загальну ефективність системи. Основний потік зберігає достатню швидкість для забезпечення ефективного видалення пошкоджень із робочої зони.

Результати моделювання не дають змоги зробити висновок про коректність вибраних конструктивних рішень та відповідність систем вентиляції проєктним вимогам щодо повітрообміну в усій майстерні.

На першому графіку (рис. 2, а) швидкість повітря починається приблизно з 14 м/с і поступово знижується до 12 м/с на відрізку по довжині трубопроводу. Після цього різке зростання швидкості, що досягає пікового значення близько 26 м/с. Далі відбувається різке падіння швидкості приблизно до 13 м/с, після чого вона залишається стабільною до кінця ділянки.

На другому графіку (рис. 2, б). початкова швидкість стає близько 14 м/с і залишається майже незмінною. Потім один різкий пік швидкості до 18 м/с, після чого швидкість різко падає до 13 м/с і поступово знижується до кінця ділянки, досягаючи приблизно 12,5 м/с.

Обидва графіки демонструють характерні зміни швидкості повітря, пов'язані з особливостями конструкції повітропроводів, які можна побачити на відповідних схематичних зображеннях над та під графіками. Різні зміни швидкості найбільш імовірно пов'язані зі звуженнями, розширеннями та поворотами в системі вентиляції.

Тому було запропоновано змістити станки до центру приміщення, за рахунок цього зменшився опір потоку (рис. 3).

Результати. На підставі моделювання із використанням програмного комплексу SolidWorks виявлено, що система вентиляції майстерні потребує удосконалення, оскільки швидкість потоку повітря не стала по довжині мережі. Зокрема, наявні складні моделі повітряного потоку у розподільчому вузлі вентиляційної системи – трійнику.

За умови вдосконалення конфігурації робочого обладнання в майстерні будуть отримані кращі аеродинамічні характеристики за рахунок зменшення коливань повітряного потоку, зокрема у трійнику. Тому пропонується оптимізація дасть змогу зменшити втрати на опір повітряного потоку.

Отже, перевірка параметрів вентиляційної системи майстерні, отриманих розрахунково та за рахунок використання 3D-моделювання виробничого простору, надає можливість візуалізувати розподіл потоків повітря, перевірити проєкт та уточнити параметри системи для швидкого вибору оптимальних варіантів.

Висновки. На підставі співставлення розрахункової частини та 3D-моделювання проєкту вентиляційної системи майстерні виявлено, що співставлення параметрів, а саме швидкості потоку, показало добру збіжність.

Кінцевий варіант вибору оптимальної конфігурації вентиляційної системи можливий за комплексного підходу, а саме поєднання розрахункової частини із цифровим моделюванням. Саме такий комплексний підхід допомагає

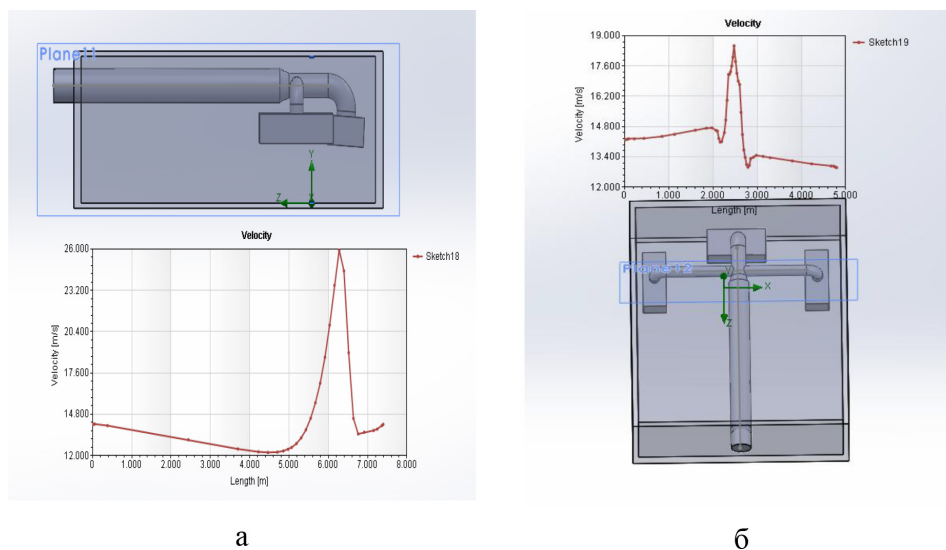


Рис. 2. Проєкції проєктованої системи вентиляції цеху із зазначенням розподілу швидкості повітряного потоку по довжині мережі за даними CFD-моделювання: а – вид збоку; б – вид згори

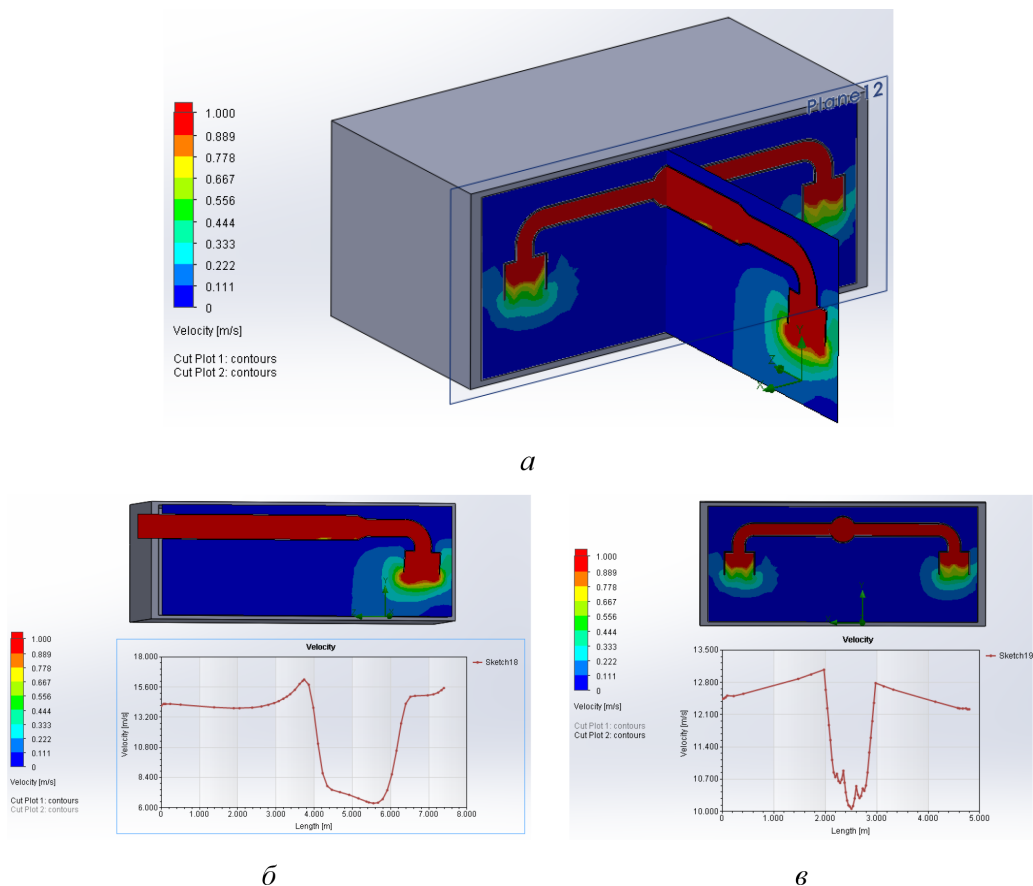


Рис. 3. Проекції проектованої системи вентиляції із зазначенням розподілу швидкості повітряного потоку по довжині мережі за даними CFD-моделювання (за умови вдосконалення співрозміщення робочого обладнання в майстерні): а – загальний вигляд вентиляційної системи; б – центральний повітропровід; в – два бічні розподільчі повітропроводи

швидко підібрати оптимальні розміри вентиляційної системи, а за потреби уточнити їх та дещо відкорегувати та/або змінити.

Використання 3D-моделювання значно пришвидшує та спрощує підбір оптимальних

розмірів вентиляційної системи виробничих приміщень, наприклад за виникнення необхідності перенесення обладнання, і, як наслідок, визначення його оптимального місцезнаходження.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Trompetter W. J., Boulic M., Ancelet T., Garcia-Ramirez J. C., Davy P. K., Wang Y., Phipps R. The effect of ventilation on air particulate matter in school classrooms. *Journal of Building Engineering*. 2018. Volume 18. Pages 164–171. DOI: 10.1016/j.job.2018.03.009
2. Awbi H. B. Ventilation for Good Indoor Air Quality and Energy Efficiency. *Energy Procedia*. 2017. Volume 112. Pages 277–286. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1098
3. Wiriyasart S., Naphon P. Numerical study on air ventilation in the workshop room with multiple heat sources. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Volume 13. 100405. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100405
4. Feng G., Xie H., Huang K., Li K. The Optimization of the personalized fresh air ventilation and individualized radiation in the hospital ward. *Procedia Eng.* 121(2015). pp. 1582–1589. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.09.182
5. Lui C., Li A., Yang C., Zhang W. Simulating air distribution and occupants' thermal comfort of three ventilation schemes for subway platform. *Building and Environment*. 2017. Volume 125. Pages 15–25. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.08.036
6. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Дата початку дії: 01.01.2014. Київ : Мінрегіон України, 2013.
7. Гузик Д. В., Федяй Б. М. Сучасні вентиляційні системи : навчальний посібник. Полтава: ПолтНТУ, 2016. 183 с.

REFERENCES:

1. Trompetter, W. J., Boulic, M., Ancelet, T., Garcia-Ramirez, J. C., Davy, P., Wang, Y. & Phipps, R. (2018). The effect of ventilation on air particulate matter in school classrooms. *Journal of Building Engineering*, 18, 164–171. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.03.009
2. Awbi, H. B. (2017). Ventilation for Good Indoor Air Quality and Energy Efficiency. *Energy Procedia*, 112, 277–286, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1098
3. Wiriyasart, S. & Naphon, P. (2019). Numerical study on air ventilation in the workshop room with multiple heat sources. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100405. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100405
4. Feng, G., Xie, H., Huang, K. & Li, K. (2015) The Optimization of the personalized fresh air ventilation and individualized radiation in the hospital ward. *Procedia Eng.*, 121, 1582–1589. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.09.182
5. Lui, C., Li, A., Yang, C. & Zhang, W. (2017). Simulating air distribution and occupants' thermal comfort of three ventilation schemes for subway platform. *Building and Environment*, 125, 15–25. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.08.036
6. DBN V.2.5-67:2013 Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia. [Heating, ventilation and air conditioning]. Data pochatku dii: 01.01.2014. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2013. [in Ukrainian].
7. Huzyk, D. V., & Fediai, B. M. (2016). Suchasni ventyliatsiini systemy : navchalnyi posibnyk. [Modern ventilation systems]. Poltava : PoltNTU, 183 p. [in Ukrainian].