

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40>

УДК 697.91

Москвітін А.С., Шишина М.О.

Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР У ПРИМІЩЕННІ ПРИ РОБОТІ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПРИ ЗМІННИХ ТЕПЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ ПРИМІЩЕННЯ

Анотація. Раціональне та економне використання природних ресурсів, скорочення шкідливих викидів в атмосферу та ефективне використання електричної та теплової енергії набувають виключно важливого значення у сучасному суспільстві. В рамках підвищення енергоефективності систем забезпечення мікроклімату у статті розглянуто особливості застосування систем вентиляції/кондиціонування повітря зі змінною витратою для комплексу приміщень офісного типу. Проведено комп'ютерне моделювання, за допомогою САПР SolidWorks з модулем Cosmos FlowWorks, розподілу температур в об'ємі приміщення, що при однакових внутрішніх умовах та змінних теплових навантаженнях обслуговується системами кондиціонування повітря: з постійною та змінною витратою. Отримано та проаналізовано поля температур по висоті та в плані приміщення у характерних площинах. Результати аналізу дають змогу оцінити можливість забезпечення нормативних температурних умов у приміщенні та виявити наявність застійних зон. На основі отриманих результатів надано висновки щодо ефективності застосування систем зі змінною витратою повітря.

Ключові слова: температура повітря у приміщенні, поле температур, динамічний мікроклімат, змінне теплове навантаження, витрата повітря, VAV-система, CAV-система.

Moskvitina Anna, Shyshyna Mariia

Kyiv National University of Construction and Architecture

ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELD IN THE ROOM WITH VARIABLE THERMAL LOADS DURING THE AIR CONDITIONING SYSTEMS OPERATION

Summary. As effectively and efficiently as possible usage of natural resources, reduction of harmful emissions into the atmosphere and efficient use of electric and thermal energy become extremely important in the modern society. Ventilation and air-conditioning systems are an essential element to create standard internal environment conditions for both people and process flow. Within the framework of improving energy efficiency of artificial microclimate's system, special aspects of the variable air volume ventilation/air conditioning systems usage in business premises are reviewed in the article. The general air heat balance in the office facilities with respect to heat gains from different sources (office personnel, office equipment and hardware, artificial lighting, solar radiation income) is analyzed and the dependence between the temperature in the working area and the excess heat in room (taking into account the air exchange efficiency) is determined. The computer CFD modeling (Computational Fluid Dynamics) allowing to predict the distribution of temperatures in the room volume is carried out: this has similar internal conditions and variable thermal loads during CAV (Constant Air Volume) and VAV (Variable Air Volume) air conditioning system operation. Modeling was performed using SolidWorks, a solid modeling computer-aided design (CAD) and computer-aided engineering (CAE) computer program by SolidWorks Flow Simulation add, a general parametric flow simulation tool using the Finite Volume Method (FVM). Temperature fields in characteristic cross-sections in height and in plan have been obtained and specified. The results of the analysis allows to evaluate the normative indoor temperature conditions provision and the presence and location of stagnant areas. Organizational and technical measures aiming to reduce their size or to make their formation impossible are proposed. Based on the obtained results, the conclusions concerning the effective usage of variable air volume air conditioning systems are given. It means, that the adaptation of the ventilation / air conditioning system to actual needs can significantly reduce the energy consumption.

Keywords: indoor temperature, temperature field, dynamic microclimate, variable thermal load, air flow, VAV-system, CAV-system.

Постановка проблеми. В сучасному світі люди перебувають на робочому місці значну кількість часу. Для підтримки високого рівня продуктивності та гарного самопочуття дуже важливо, щоб у робочому просторі підтримувалися нормовані параметри внутрішнього повітряного середовища. Розумова праця, як довела дослідження, найбільш продуктивна при температурі 22...24°C. У той же час, при нестачі повітрообміну в кабінеті для кількох людей повітря нерідко прогрівається до 30°C. При одночасному підвищенні рівня вологості і дефіциті кисню це призводить до швидкої втоми співробітників. Завдяки правильно функціонуючій вентиляції, підвищиться ефективність використання робочого часу, комфорт для працівників і відвідувачів.

Унаслідок високих тепловтрат, зумовлених природною вентиляцією, і необхідності отримання значного обсягу чистого повітря у великих офісних будівлях і ділових центрах раціональніше забезпечувати організацію повітрообміну механічними системами. Але системи, в яких відбувається тепловологісна обробка повітря, є одними із значних споживачів енергоресурсів в Україні. Енергоаудит таких будівель показав, що системи вентиляції та кондиціонування повітря споживають до 50% енергоресурсів від загальної їх кількості в громадських будівлях. Угода про асоціацію з ЄС висуває ряд вимог щодо зменшення рівня споживання енергетичних ресурсів, у зв'язку з чим прийнято, оновлено та адаптовано ряд законодавчих актів [1; 2]. Разом з цим по-

требує вирішення проблема викидів парникових газів і забруднювальних речовин у атмосферне повітря. Підвищення енергоефективності будівель і споруд, а також питання використання акумулювання енергії з метою її подальшого використання для теплопо-, холодопостачання [3] – основний шлях вирішення вищевказаних питань. Наприклад, при визначенні необхідного повітрообміну і, відповідно, кількості теплоти/холоду, необхідної для тепловологоснісної обробки повітря за певний проміжок часу, потрібно враховувати нестационарний режим надходження теплоти за рахунок сонячної радіації через світлопрозорі та масивні огорождження. Таким чином, сучасні системи інженерного забезпечення будівель і споруд із систем зі стаціонарними режимами експлуатації перетворюються в системи, що активно регулюються.

Аналіз попередніх досліджень. В нормативних документах [4; 5] основну увагу щодо енергозбереження в системах вентиляції та кондиціонування повітря акцентують на утилізації використаної теплоти/ холоду, а не на зниженні енергозатрат в цих системах. Однак, дослідження, проведені Банном Р., Позіним Г. М., Джеджулою В.В. та Сотником А.Г. [6–10], показали, що при застосуванні системи вентиляції/ кондиціонування зі змінною витратою повітря (VAV-система) на об'єктах, де в різний час доби наповнюваність людьми може бути від 0 до 100% та враховується можливість пофасадного регулювання, річну енергопотребу на обробку повітря можна знизити приблизно в 2 рази за рахунок зменшення кількості повітря, яке обробляється.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Численні дослідження, присвячені аналізу роботи VAV-систем, в основному ставили за мету визначення економічного ефекту від роботи VAV-систем у порівнянні з системами з постійною витратою повітря (CAV – системи). Достатньої уваги щодо впливу їх роботи на забезпечення рівномірності заданих параметрів повітряного середовища робочої зони, водночас, не приділялося.

Формулювання цілей статті. Дана робота присвячена дослідженню температурних полів шляхом математичного моделювання роботи CAV- та VAV-систем засобами SolidWorks FlowSimulation, інтерфейсу SolidWorks API.

Виклад основного матеріалу дослідження. Однією з особливостей приміщень офісного типу є постійний рух людей в межах приміщень. Це викликає постійні зміни теплового режиму приміщення, що у поєднанні з добовою амплітудою коливання температури зовнішнього повітря та змінним потоком сонячної радіації дає суттєву різницю у тепловому навантаженні протягом робочого часу [8; 9]. Управління системою вентиляції слід здійснювати за фактичними потребами.

Запишемо тепло-повітряний баланс приміщення у загальному вигляді:

$$G_{\text{пов.}} \cdot c_{\text{пов.}} \cdot t_{\text{in}} + \Delta Q = G_{\text{пов.}} \cdot c_{\text{пов.}} \cdot t_p \quad (1)$$

де $G_{\text{пов.}}$ – кількість повітря, що подається та видаляється з приміщення, кг/год.;

$c_{\text{пов.}}$ – теплоємність повітря, $c_{\text{пов.}} = 1,005$ кДж/(кг · °С);

t_{in} – температура припливного повітря, °С;

ΔQ – теплонадлишки в приміщенні, Вт;

t_p – температура повітря, що видаляється, °С.

Для приміщень офісного типу в теплий період року теплонадлишки ΔQ дорівнюють:

$$\Delta Q = q_{\text{люд.}} \cdot n_{\text{люд.}} + q_{\text{об.}} \cdot n_{\text{об.}} + \Sigma(q_{\text{с.р.}} \cdot F_{\text{о.к.}}) + Q_{\text{шт.осв.}} \quad (2)$$

де $q_{\text{люд.}}$ – питома виділення теплоти однією людиною, Вт/люд.;

$n_{\text{люд.}}$ – кількість осіб у приміщенні, люд.;

$q_{\text{об.}}$ – питома виділення теплоти однією одиницею офісного обладнання, Вт/од.;

$n_{\text{об.}}$ – кількість одиниць обладнання, од.;

$\Sigma(q_{\text{с.р.}} \cdot F_{\text{о.к.}})$ – теплонадлишки за рахунок сонячної радіації через світлопрозорі та масивні огорожджуючі конструкції;

$Q_{\text{шт.осв.}}$ – теплонадлишки від штучного освітлення, Вт.

Температуру видаляемого повітря t_p можна виразити з відомої залежності [10]:

$$K_l = \frac{t_p - t_{\text{in}}}{t_{\text{wz}} - t_{\text{in}}} \quad (3)$$

де t_{wz} – температура повітря в робочій зоні, °С; K_l – коефіцієнт ефективності повітрообміну, який являє собою безрозмірний симплекс та зв'язує різні температури повітря (t_{wz} , t_{in} , t_p) у приміщенні.

Шляхом математичних перетворень виразу (3) отримаємо:

$$t_p = t_{\text{in}} + K_l (t_{\text{wz}} - t_{\text{in}}) \quad (4)$$

З урахуванням (2) і (4) рівняння балансу (1) приймає вигляд:

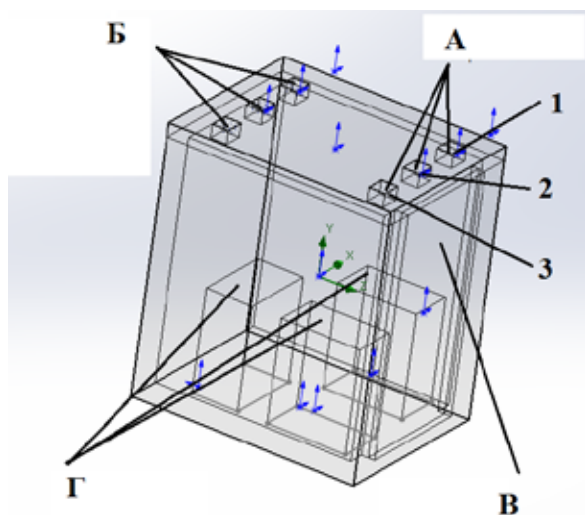
$$\frac{q_{\text{люд.}} \cdot n_{\text{люд.}} + q_{\text{об.}} \cdot n_{\text{об.}} + \Sigma(q_{\text{с.р.}} \cdot F_{\text{о.к.}}) + Q_{\text{шт.осв.}}}{G_{\text{пов.}} \cdot c_{\text{пов.}}} = K_l (t_{\text{wz}} - t_{\text{in}}) \quad (5)$$

З залежності (5) виразимо температуру робочої зони:

$$t_{\text{wz}} = \frac{q_{\text{люд.}} \cdot n_{\text{люд.}} + q_{\text{об.}} \cdot n_{\text{об.}} + \Sigma(q_{\text{с.р.}} \cdot F_{\text{о.к.}}) + Q_{\text{шт.осв.}}}{G_{\text{пов.}} \cdot c_{\text{пов.}} \cdot K_l} + t_{\text{in}} \quad (6)$$

Проаналізувавши вираз (6) можна зробити висновок, що множник $\frac{1}{c_{\text{пов.}} \cdot K_l} = \text{const}$, оскільки коефіцієнт K_l є постійною величиною, яка залежить тільки від способу організації повітрообміну [10], а t_{in} залишається незмінним, виходячи з розрахунку повітророзподілення. Тобто, вираз (6) відображає залежність температури повітря у робочій зоні від теплонадлишків у приміщенні та витрати припливного повітря.

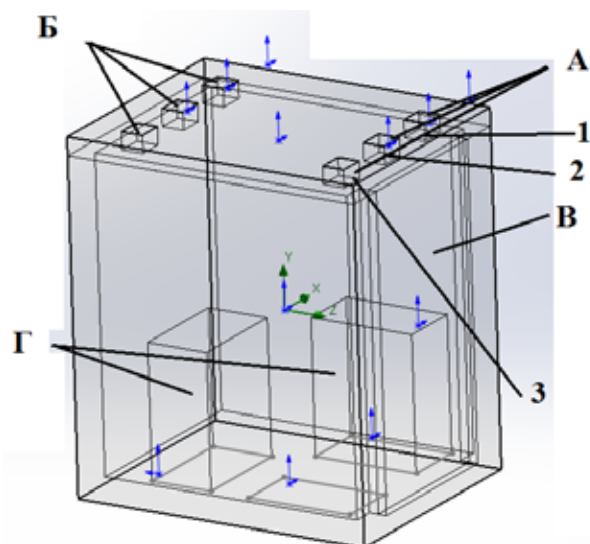
Для аналізу розподілу температурних полів у робочій зоні спроектовано тривимірну геометричну модель офісу площею 6,9 м² та висотою 3,5 м, площа застосування 6,3 м², в якому працюють 3 людини (див. рис. 1, 2). Температура робочої зони прийнята $t_{\text{wz}} = 24^\circ\text{C}$, температура повітря, яке подається в приміщення – $t_{\text{in}} = 20^\circ\text{C}$. Враховуємо вплив сонячної інфільтрації через скління і тепловідлілення від людей та офісної техніки на повітрообмін в приміщенні. У програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation (COSMOSFloWorks) [11] змодельовано розподіл температур у приміщенні офісу при роботі систем кондиціонування повітря з постійною витратою та змінною витратами і різних теплонадлишках.



А – отвори приточного повітря;
 Б – отвори витяжного повітря;
 В – вікно;
 Г – робочі місця з комп'ютерами;
 1, 2, 3 – нумерація отворів.

Рис. 1. Модель офісного приміщення (варіант 1, 3)

Джерело: розроблено авторами



А – отвори приточного повітря;
 Б – отвори витяжного повітря;
 В – вікно;
 Г – робочі місця з комп'ютерами;
 1, 2, 3 – нумерація отворів.

Рис. 2. Модель офісного приміщення (варіант 2)

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо перший варіант роботи систем (модель приміщення зображена на рис. 1) – максимальна витрата повітря при максимальних теплонадлишках. Сумарні теплонадлишки становлять – 2178 Вт, і включають в себе пікові теплонадходження від сонячної радіації в період з 13 до 14 годин та від трьох працівників. Згідно з розрахунками витрата повітря на асиміляцію теплонадлишків при даних умовах становить 1161 м³/год. Ця витрата є розрахунковою для САУ-системи кондиціонування повітря. Оскільки при такому варіанті системи кондиціонування повітря з постійною та змінною витратами повітря будуть працювати з однаковими параметрами, то доцільно здійснити одне загальне моделювання процесу повітрообміну.

При другому варіанті теплонадлишки становлять 1290 Вт і включають в себе теплонадходження від сонячної радіації в період з 9 до 10 години ранку та від двох працівників. При таких умовах повітрообмін системи кондиціонування повітря з постійною витратою становить 1161 м³/год., а зі змінною витратою – 690 м³/год. Модель приміщення зображена на рис. 2.

При третьому варіанті теплонадлишки становлять – 870 Вт і враховують тільки теплонадходження від трьох працюючих та офісного обладнання при відсутності прямої сонячної радіації (хмарна погода), модель приміщення зображена на рис. 1. Для системи кондиціонування з постійною витратою повітря кількість повітря залишається не змінною – 1161 м³/год., а для системи кондиціонування повітря зі змінною витратою – 420 м³/год.

Результати математичного моделювання зведено в табл. 1.

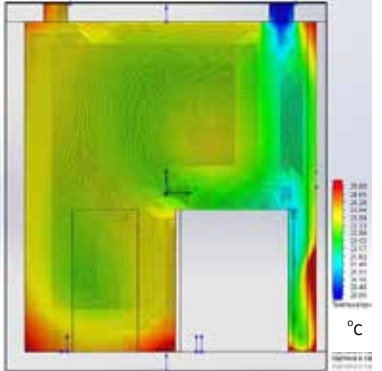
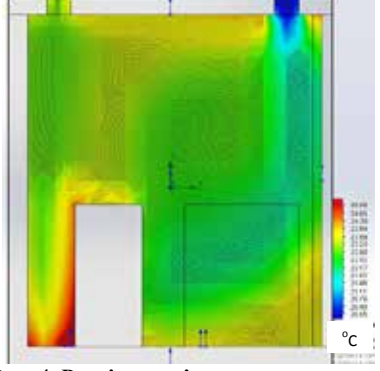
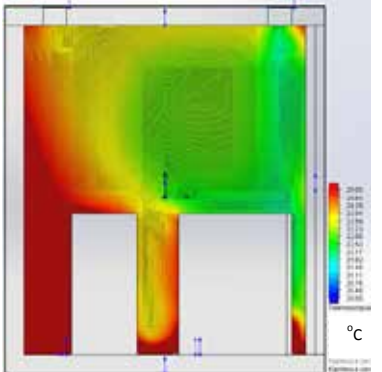
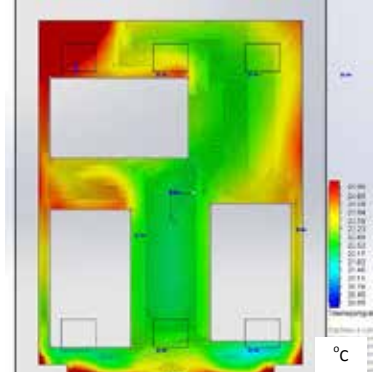
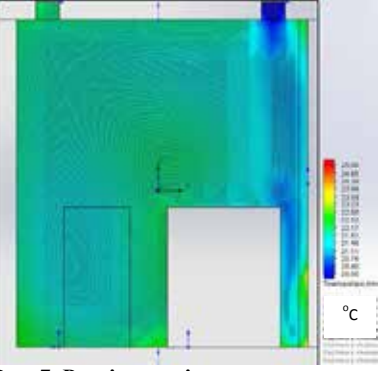
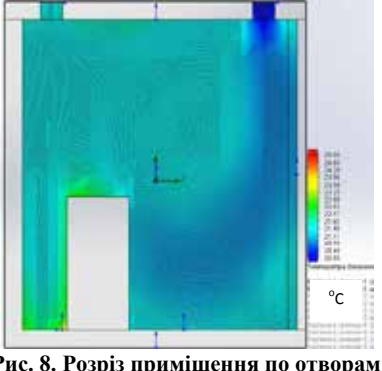
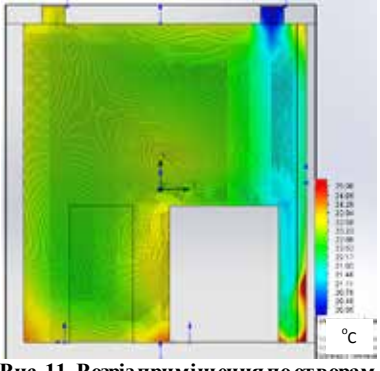
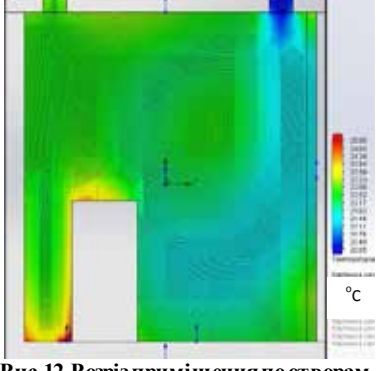
Аналізуючи результати моделювання (рис. 3–22), можна зробити висновок, що при режимі роботи, який описаний в варіанті 1,

температура в робочій зоні в основному знаходиться в допустимих межах [4]: 23,5-24,5°C. Водночас є зона з температурою 22°C, яка знаходиться під повітророзподільником, та є застійна зона, яка утворюється в межах робочого місця ($t > 24^\circ\text{C}$). При роботі системи кондиціонування повітря з постійною витратою, описаної у варіанті 2, видно, що температура в робочій зоні змінюється в діапазоні 21-23°C. Як наслідок виникають зони переохолодження, що може викликати локальний тепловий дискомфорт. А при роботі системи кондиціонування зі змінною витратою повітря в умовах, описаних у варіанті 2, при менших теплонадлишках й меншій витраті повітря, температура повітря в робочій зоні знаходиться в межах 23,3-24,1°C. Зона переохолодження – 21,8°C – знаходиться в зоні розміщення повітророзподільника. При хмарній погоді, коли майже відсутні теплонадходження від сонячної радіації, а враховується тільки виділення теплоти працюючими людьми та офісним обладнанням, робота системи з постійною витратою змодельована у варіанті 3. Відповідно, температура в робочій зоні знаходиться в діапазоні 21,0-22,2°C, при розрахунковій температурі робочої зони – 24°C. Так само, як і при роботі системи з постійною витратою у варіанті 2, виникають зони переохолодження і відхилення від заданих параметрів мікроклімату. Застосування при цих умовах (варіант 3) систем кондиціонування зі змінною витратою забезпечує температуру повітря в робочій зоні в межах 23,3-24,8°C, але зона підвищеної температури ($t > 24^\circ\text{C}$) знаходиться вище на 0,2 м від рівня підлоги, що не викликає значного теплового дискомфорту.

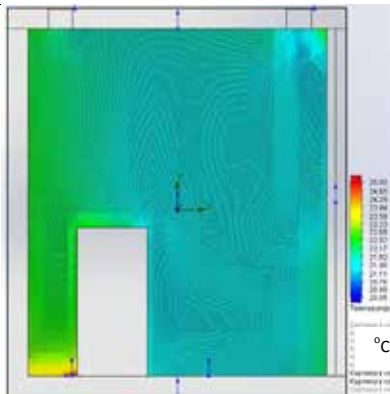
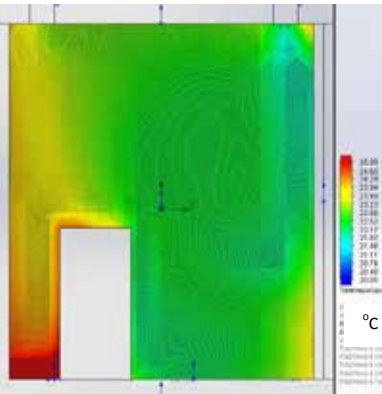
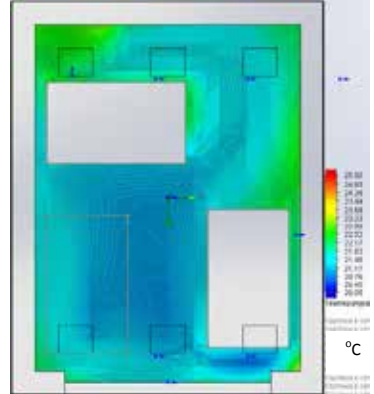
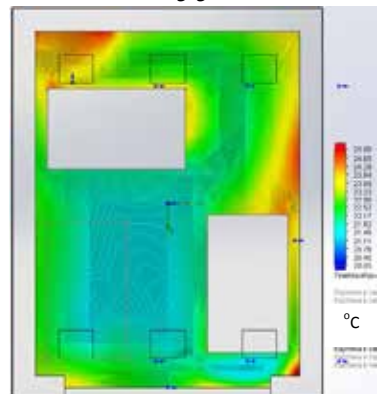
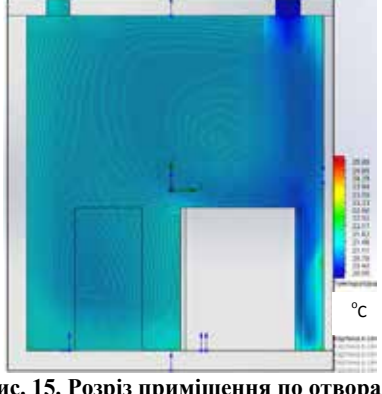
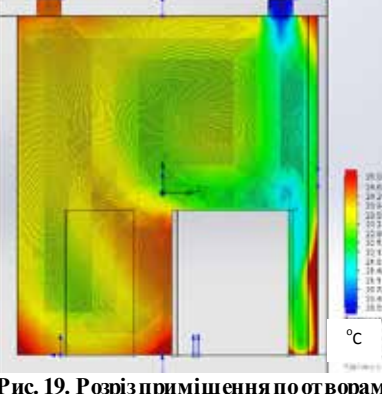
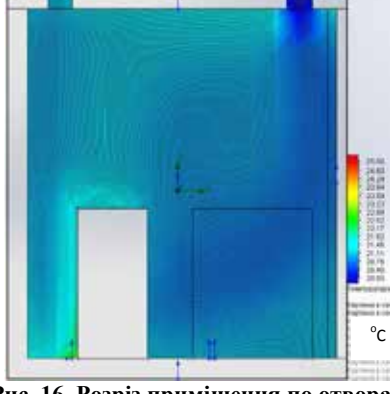
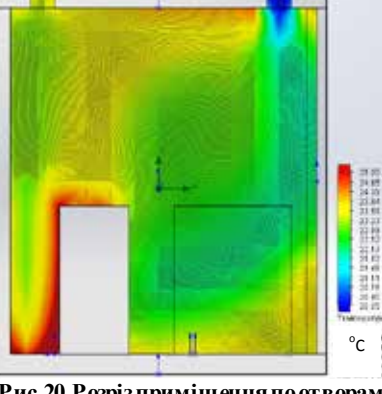
Загалом при роботі систем як з постійною, так і змінною витратою повітря у приміщенні можуть виникати зони з підвищеною температурою

Таблиця 1

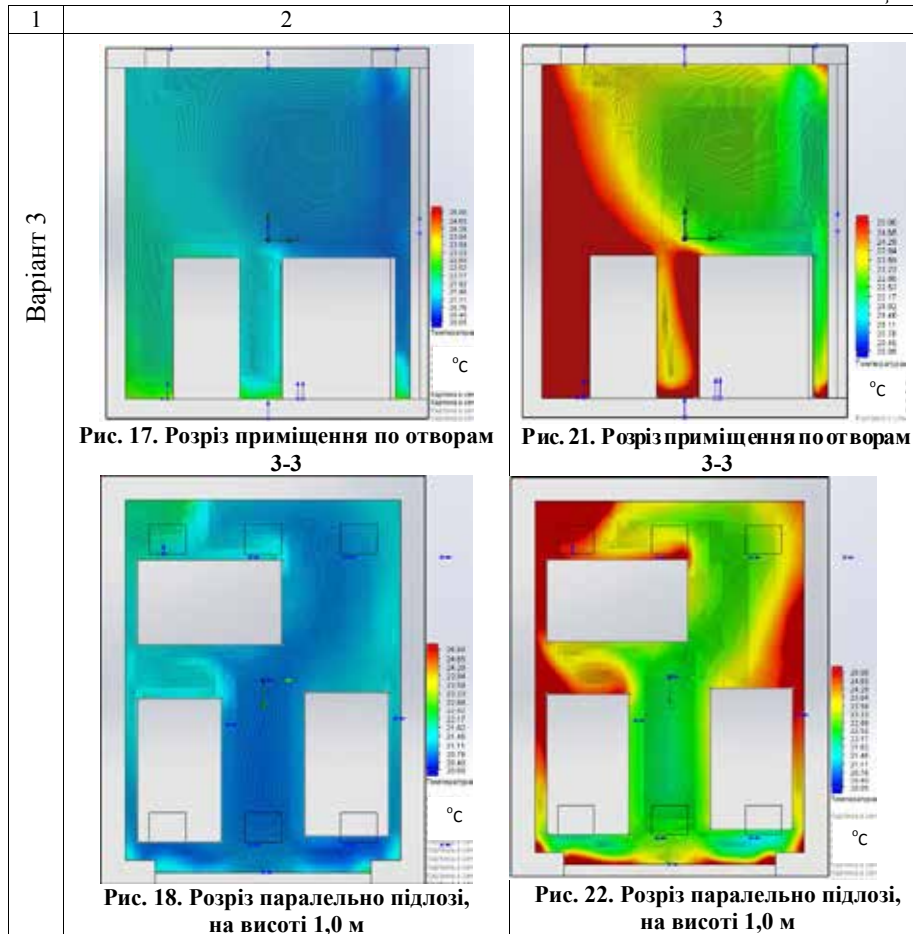
Результати математичного моделювання розподілу температур у приміщенні при роботі CAV і VAV систем в характерних розрізах

№	CAV-система	VAV-система
Варіант 1	<p data-bbox="603 331 772 360">2</p>  <p data-bbox="411 734 807 786">Рис. 3. Розріз приміщення по отворам 1-1</p>	<p data-bbox="1018 331 1187 360">3</p>  <p data-bbox="826 734 1222 786">Рис. 4. Розріз приміщення по отворам 2-2</p>
Варіант 1	 <p data-bbox="411 1160 807 1227">Рис. 5. Розріз приміщення по отворам 3-3</p>	 <p data-bbox="826 1160 1222 1227">Рис. 6. Розріз паралельно підлозі, на висоті 1,0 м</p>
Варіант 2	 <p data-bbox="411 1601 807 1653">Рис. 7. Розріз приміщення по отворам 1-1</p>  <p data-bbox="411 2022 807 2078">Рис. 8. Розріз приміщення по отворам 2-2</p>	 <p data-bbox="826 1601 1222 1653">Рис. 11. Розріз приміщення по отворам 1-1</p>  <p data-bbox="826 2022 1222 2078">Рис. 12. Розріз приміщення по отворам 2-2</p>

Продовження таблиці 1

Варіант 2	<p>1</p> <p>2</p>  <p>Рис. 9. Розріз приміщення по отворах 3-3</p>	<p>3</p>  <p>Рис. 13. Розріз приміщення по отворах 3-3</p>	
	 <p>Рис. 10. Розріз паралельно підлозі, на висоті 1,0 м</p>	 <p>Рис. 14. Розріз паралельно підлозі, на висоті 1,0 м</p>	
	Варіант 3	 <p>Рис. 15. Розріз приміщення по отворах 1-1</p>	 <p>Рис. 19. Розріз приміщення по отворах 1-1</p>
	 <p>Рис. 16. Розріз приміщення по отворах 2-2</p>	 <p>Рис. 20. Розріз приміщення по отворах 2-2</p>	

Закінчення таблиці 1



Джерело: розроблено авторами

повітря – так звані застійні зони. Їх утворення пов'язане з об'ємно-планувальними рішеннями, розміщенням меблів та робочих місць у приміщенні, а також з обраною схемою організації повітрообміну у приміщенні та конструкціями повітророзподільних пристроїв. Як видно з результатів моделювання, при організації повітрообміну за схемою «зверху-вверх», застійні зони утворюються біля стін за робочими місцями, а найбільша – у куті за робочим столом, над яким розміщені витяжні отвори. Для запобігання утворення таких зон рекомендовано:

- 1) не розміщувати робочі місця під витяжними отворами;
- 2) подачу повітря виконувати вздовж будівельних конструкцій настиляючими струминами;
- 3) розташовувати повітророзподільники для подачі повітря рівномірно по площі приміщення.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку в цьому напрямку. Система кондиціонування повітря зі змінною витратою більш ефективна для забезпечення параметрів мікроклімату в офісних приміщеннях, оскільки теплонадходження динамічні впродовж робочого дня, і це потребує постійної реакції системи. Серед переваг застосування сис-

тем зі змінною витратою повітря можна виділити наступні:

- 1) зниження розрахункової витрати багатозональних систем;
- 2) зниження загальної холодопродуктивності установок. При якісному регулюванні в системах кондиціонування повітря, тобто зміні температури повітря, що подається в приміщення, розрахункове навантаження на систему холодопостачання визначається як сума максимальних навантажень протягом доби без урахування різниці максимумів у часі. При застосуванні кількісного регулювання, тобто зміні витрати повітря, що подається в приміщення, розрахункове навантаження на систему холодопостачання розраховується, як найбільше значення з сумарних погодинних навантажень. Це може суттєво скоротити капітальні та експлуатаційні затрати на систему в цілому та холодильне обладнання і вивільнити площі, які слід корисно використати для інших потреб.

Перспективою подальшого дослідження є визначення економічного ефекту від застосування систем зі змінною витратою повітря та дослідження ефективності організації повітрообміну для таких систем.

Список літератури:

1. ДСТУ ISO 50001:2014 Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT). Київ, 2015. 19 с.
2. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19> (дата звернення: 11.06.2019).
3. Любарець О.П., Москвітїна А.С. Вибір форми і розрахунок об'єму сезонного теплоакумулятора. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2016. № 20. С. 24–38.
4. ДБН В.2.5-67: 2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ, 2013. 149 с.
5. ДСТУ Б А. 3.2 – 12: 2009. Системи вентиляційні. Загальні вимоги. Київ, 2010. 8 с.
6. Примеры и правила проектирования систем вентиляции с переменным расходом воздуха (VAV-систем). Москва : Breezart, 2013. 13 с.
7. R. Bunn. Системы кондиционирования воздуха, предпочитаемые инвесторами. *АВОК*. 2001. № 5. С. 16–29.
8. Сотников А.Г. Системы кондиционирования и вентиляции с переменным расходом воздуха. Ленинград, 1984. 148 с.
9. Дзеджула В.В. Системи вентиляції зі змінною витратою повітря: особливості проектування та експлуатації. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2017. Том 22, № 1. С. 106–111.
10. Позин Г.М. О точности определения коэффициента воздухообмена. *Вестник МГСУ*. 2011. № 7. С. 319–325.
11. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. Санкт-Петербург, 2012. 445 с.

References:

1. DSTU ISO 50001:2014 Enerhozberezhennya. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova shchodo vykorystannya (ISO 50001:2011, IDT) [ISO 50001:2011 Energy management systems — Requirements with guidance for use]. Kyiv: Mineconomic Transport of Ukraine, 2015, 19 p. (in Ukrainian)
2. Pro enerhetychnu efektyvnist' budivel': Zakon Ukrayiny vid 22.06.2017 r. №2118-VIII / Verkhovna Rada Ukrayiny. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19> (data zvernennya: 11.06.2019) [On the energy efficiency of buildings: Law of Ukraine dated 22.06.2017 №2188-VIII / The Verkhovna Rada of Ukraine].
3. Liubarets, O., & Moskvitina, A. (2016). Vybir formy i rozrakhunok obyemu sezonnoho akumulatora teplyoty. [The choice of form and volume calculation of seasonal heat accumulator]. *Ventilation, lighting and heat supply*, vol. 20, pp. 24–38.
4. Opalennya, ventylyatsiya ta kondytsionuvannya: DBN V.2.5-67:2013 [Heating, ventilation and conditioning]. Kyiv: State Enterprise "Ukrainbudinform" Minregion of Ukraine, 2013, 149 p.
5. Systemy ventylyatsiyini. Zahal'ni vymohy: DSTU B A. 3.2 – 12: 2009 [Ventilation systems.General requirements]. Kyiv: Minrehionbud of Ukraine, 2010, 8 p.
6. Breezart (2013). *Prymery y pravyla proektyrovannya system ventylyatsyy s peremennym rashodom vozdukh (VAV-system)* [Examples and rules for the design of ventilation systems with variable air flow (VAV-systems)]. Moscow: Breezart. (in Russian)
7. Bunn, R. (2001). Systemy kondytsyonyrovannya vozdukha, predpochytaemye ynvestoramy [Air conditioning systems preferred by investors]. *AVOK*, vol. 5, pp. 16–29.
8. Sotnykov, A.H. (1984). *Systemy kondytsyonyrovannya y ventylyatsyy s peremennym rashodom vozdukha* [Air-conditioning and ventilation systems with variable air flow]. Leningrad: Stroyzdat. (in Russian)
9. Dzhedzhula, V.V. (2017). Systemy ventylyatsiyi zi zminnoyu vytratoyu povitrya: osoblyvosti proektuvannya ta ekspluatatsiyi [Ventilation systems with variable air flow: features of design and operation]. *Modern technologies, materials and constructions in building*, vol. 22, no. 1, pp. 106–111.
10. Pozyn, H.M. (2011). O tochnosti opredeleniya koэфfitysyenta vozdukhoobmena [On the accuracy of determining the coefficient of air exchange]. *Vestnik MGSU*, vol. 7, pp. 319–325.
11. Alyamovskiy, A.A. (2012). *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi* [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. St. Petersburg: BHV-Petersburg. (in Russian)