

УДК 697.91

Техніко-економічне та екологічне обґрунтування використання систем зі змінною витратою повітря для адміністративних будівель

А. С. Москвітін¹, М. О. Шишина², М. С. Корчмінський³

¹асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646

²асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, shyshyna.mo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9384-7662

³магістр каф. ТГПіВ, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, mykolaworkdes@gmail.com. Менеджер проєктів ПрАТ "Вентиляційні системи".

Анотація. Використання енергії в будівлях має значний вплив на глобальний попит на енергію та навколишнє середовище. Серед усіх будівельних систем опалення, вентиляція та кондиціонування повітря є найбільш енерговитратними з точки зору їхньої загальної потреби в енергії. Виробництво та експлуатація систем формування мікроклімату мають істотний вплив на навколишнє середовище. Ці системи також є одними з найбільших споживачів природних ресурсів та матеріалів у будівельному секторі. Кількість систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, що встановлюються, різко зросла за останні кілька років. Це головним чином спричинено підвищенням вимог до теплової енергії, комфорту й змін клімату. Постійне зростання уваги до споживання енергії та палива породжує питання, які системи формування мікроклімату мають кращі екологічні показники. У цій роботі виконано порівняння двох систем кондиціонування повітря: з постійною витратою повітря (Constant Air Volume – CAV) та зі змінною витратою повітря (Variable Air Volume – VAV). Визначено викиди шкідливостей до навколишнього середовища при забезпеченні роботи цих двох систем.

Ключові слова: система з постійною витратою повітря, система зі змінною витратою повітря, система кондиціонування повітря, система вентиляції, тепонадходження, теплове навантаження.

Постановка проблеми. Забудова навколишнього середовища є основним фактором, що сприяє викидам парникових газів [1]. Одним з найбільш потужних споживачів енергії в будівлях і спорудах є системи формування мікроклімату. Вентиляція та кондиціонування повітря відіграє в цьому споживанні одну з основних ролей.

Вибір найбільш придатної та економічної системи кондиціонування серед безлічі доступних варіантів – одна з важливих проблем будівництва. Система, яка заощаджує експлуатаційні витрати, зазвичай вимагає більших початкових інвестицій. При цьому прийняття рішень [2] (Kreider J. F., 1994) потребує обґрунтування.

Переміщення повітря є одним з найбільш енергоємних процесів у цих системах. Витрати ресурсів на підготовку повітря також залежать від його витрати, м³/год. Тому окрім традиційних систем з постійною витратою повітря (за англійською класифікацією “Constant Air Volume” або CAV) широко впроваджуються системи зі змінною витратою витратою повітря (за англійською класифікацією “Variable Air Volume” або VAV). Перші використовуються з моменту появи кондиціонерів. Другі ж почали застосовувати у 60-х роках минулого століття.

За допомогою цих систем подача повітря зменшується разом зі зменшенням експлуата-

ційного навантаження порівняно з максимальним проєктним [2,3]. Впровадження цих суттєво більш дорогих систем вимагає додаткових досліджень їхньої ефективності.

Актуальність дослідження. На глобальному рівні будівлі формують 30...40 % використаної енергії та 40...50 % глобальних викидів вуглекислого газу [3](Zabalza, Aranda-Usón, & Scarpellini, 2009). У Європейському Союзі будівельний сектор викидає забруднювачів приблизно на 40 % від загального екологічного навантаження [4](UNEP, 2003). Як результат, Європейська комісія встановила завдання зменшити викиди парникових газів щонайменше на 20 % до 2020 року і щонайменше на 40 % до 2030 р. Через це зниження енергоспоживання будівель і споруд та викидів парникових газів набуває особливої актуальності.

Останні дослідження та публікації. Порівняно з рівнями викидів 1990 р [5] (Європейська комісія, 2019) серед усіх систем у будинках – системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря на сьогодні є найбільш енергоємними, що становить приблизно 50 % загальної енергії споживаної будівлями [6] (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008).

Тим не менше, системи формування мікроклімату є одними із важливих систем, що обслуговують сучасні будівлі [7] (Chen, 2011). Кількість цих систем, що встановлюються, рі-

зко зросла за останні кілька років [8, 9]. Це відбувається головним чином через підвищення вимог до теплової енергії, комфорту і змін клімату.

Для зменшення споживання енергії протягом експлуатації при забезпеченні високої якості повітря в приміщенні розроблено нові системи формування мікроклімату, серед яких охолоджені балки [7]. Однак велику енергопотребу та значний вплив на навколишнє середовище чинять і інші фази життєвого циклу систем кондиціонування повітря:

- обробка або виготовлення матеріалів;
- виробництво елементів;
- монтування та збирання компонентів;
- утилізація.

Більше того, видобуток мінералів, таких як залізна руда, алюміній і мідь, які зазвичай використовуються в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, спричиняє значне зменшення природних ресурсів планети [3].

Загалом, підвищена обізнаність щодо екологічних проблем змусила суспільство суворо дотримуватися будівельних норм та енергетичних критеріїв [10]. Розроблено декілька стандартизованих методів екологічної оцінки для кращого розуміння та оцінки впливу протягом життєвого циклу систем [11] (Prek, 2004).

Одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності та екологічних показників систем кондиціонування повітря є змінна витрата повітря в них. Постає питання аналізу їхньої енергоефективності та впливу на навколишнє середовище порівняно з традиційними рішеннями.

Попередні дослідження [5-9] щодо порівняння економічної доцільності термін окупності систем зі змінною витратою становить близько 10...11 років. При цьому навантаження на холодильне обладнання скорочуються на 33 %, а затрати електричної енергії на вентилятори зменшується на 56 %. Капітальні вкладення зростають приблизно на 6 %.

Хоча ці системи мають невисоку інвестиційну привабливість, вони скорочують кількість викидів парникових газів та зменшують витрати енергетичних ресурсів на обслуговування комерційного сектору. Оскільки металоемність таких систем значно менша, затрати на переробку металу також скорочуються.

Формулювання цілей статті. Метою цього дослідження є порівняння систем з постійною та змінною витратою повітря з урахуванням капітальних та експлуатаційних витрат на прикладі офісної будівлі в м. Києві.

Дослідження режимів роботи вентиляції. Для розрахунку вибрана будівля в м. Києві, Україна.

Координати розташування об'єкта 50° північної широти та 30° східної довготи. Будівля заввишки 10 м має два майже однакові поверхи. Загальна площа будівлі становить 2481 м². Режим роботи – з 9:00 до 18:00. Зовнішні поверхні стіни мають світлий колір.

Будівля має офісні приміщення, конференц-залу, приміщення для персоналу та для обслуговування будівлі. Довгі сторони будівлі виходять на північ і південь. Центральний вхід орієнтований на північ. Прийнято такі параметри повітря в приміщенні:

- температура 24 °C;
- відносна вологість 50 %.

Розраховано теплонадходження, що потрапляють до приміщення за рахунок сонячної радіації щогодини за методикою [12]. Теплонадходження від людей, техніки та освітлення визначено за [13]. Будівля теплостійка для літнього періоду року згідно з чинними нормами України (табл. 1).

Таблиця 1.

Теплотехнічні показники огорожувальної конструкції

Тип огорожувальної конструкції	Термічний опір теплопередачі огорожень R , м ² ·°C/Вт	Теплова інерція огорожень D .
Зовнішні стіни	3,59	6,45
Світлопрозорі конструкції	0,75	8,1
Перекриття	4,95	4,7

Проведено розрахунок теплового навантаження будівлі залежно від її характеристик, умов у приміщенні, які мають дотримуватись, а також зовнішніх погодних умов.

Годинні теплові навантаження будівлі розраховано для вибору обладнання системи кондиціонування повітря з використанням зовнішніх даних про погоду [14]. Проведено розрахунки навантаження за кліматичними показниками для періоду охолодження будівлі (з червня по серпень місяць). На годинне теплове навантаження будівлі може впливати нестійкість графіку надходжень теплоти від внутрішніх джерел (тобто експлуатаційний період будівлі).

Визначено чотири сценарії роботи систем вентиляції. Перший сценарій відповідає варіанту системи з постійною витратою повітря, яка дорівнює проектній (табл. 2).

Таблиця 2

Витрата повітря за різними сценаріями роботи систем

Режим витрати	Витрата повітря, м ³ /год, при сценарії			
	1	2	3	4
максимальна	39397	39147	39147	39147
мінімальна	17728	7879	7879	7879

Другий сценарій – робота системи зі змінною витратою повітря при теплонадходженнях від персоналу, обладнання та сонячної радіації у відповідні проміжки часу.

Третій сценарій аналогічний до другого за винятком непостійності роботи конференцзали та копіювальної кімнати. Один день на тиждень проводиться конференція з заповненістю зали 100 % протягом 6 годин. Для інших робочих днів тижня навантаження дорівнює 50 %, а період роботи становить 4 години на день. Копіювальна кімната працює по 2 години протягом робочого дня. Теплове навантаження для копіювальної кімнати прийняте максимальним.

Четвертий сценарій аналогічний до третього з долученням ще одного випадку. У літній період більшість персоналу йде у відпустку. Тому спостерігається часткова заповненість офісів. Відомо, що протягом третини робочих днів спостерігається заповненість приміщень людьми від 30 до 75 %. Тому присутність людей прийнято в середньому 50 % для цього періоду часу. Період відпусток прийнято 10 днів щомісяця.

Розрахунок проводився для роботи приміщень з 9:00 до 18:00, а також для умов в період похмурої погоди для сценаріїв 2-4. У період похмурої погоди враховано всі теплонадходження окрім сонячної радіації. При цьому кількість присутніх у приміщенні знижена до 30 %. У неробочий час центральні установки для обробки повітря для всіх сценаріїв вимикаються.

Розрахунок теплонадходжень до приміщення виконано для найжаркішого місяця, тобто липня. Проаналізовано показники NASA щодо середньомісячного рівня сонячної радіації, кВт·год/(м² діб), на добу, за останні 22 роки у містах України [15]. На підставі цього аналізу введено поправковий коефіцієнт на надходження сонячної радіації порівняно з липнем:

- для червня – 0,994;
- для серпня – 0,889.

Обидва варіанти систем (рис. 1) мають припливно-витяжну установку з холодильною машиною та повітроводи. Система зі змінною витратою передбачає додатково:

- частотні регулятори двигунів вентиляторів,

які керуються за датчиками тиску у відповідних повітроводах;

- регулятори змінної витрати повітря, які керують подачею припливного повітря до зони обслуговування (робочої зони) кожного приміщення окремо за даними датчика у приміщенні.

При розрахунку проєктного значення для потужності системи охолодження прийнято температуру припливного повітря 22 °С.

Система зі змінною витратою повітря працює ідентично системі з постійною витратою при піковому навантаженні, коли центральний агрегат працює при максимальній витраті повітря. Потік припливного повітря зменшується в умовах часткового навантаження.

Максимальна (проєктна) витрата припливного повітря (табл. 2) для системи зі постійною витратою перевищує дані для варіанта зі змінною витратою. У першому випадку приймається сума максимальних теплових навантажень для кожного приміщення. У другому варіанті вибирається сумарне максимальне теплове навантаження за робочий день. Оскільки фасади будівлі мають різну орієнтацію, то неможливий варіант, коли в один період буде максимальне навантаження на кожне приміщення.

Розрахунок енергозатрат на охолодження вентиляційного повітря без осушення (рис. 2) у липні виконано за формулою [16]:

$$Q_{\text{енер}} = c_{p,\text{нов}} G_{\text{нов}} (t_{\text{ext}} - t_{\text{in}}), \text{ Вт}, \quad (1)$$

де $G_{\text{нов}}$ – витрата повітря кг/с; $c_{p,\text{нов}}$ – питома теплоємність повітря, що приймається 1005 Дж/(кг·К); t_{in} – температура припливного повітря, °С; t_{ext} – температура зовнішнього повітря, °С.

Для інших місяців (рис. 2) розрахунок проводився з поправкою на сонячну радіацію та різницю температури, К, між зовнішнім повітрям та повітрям у приміщенні. Результати розрахунків за сценаріями 2-4 мають однакові показники (рис. 3).

За потужністю секції охолодження можна розрахувати витрати енергії при обробці повітря. Унаслідок нестаціонарності навантажень у сценаріях 2-4 визначено режим роботи протягом місяця (рис. 4).

У кожному з розрахункових місяців є дні з похмурою погодою. Їхню кількість визначено на основі статистичних даних [17]. У середньому на кожен місяць припадає сім днів похмурої погоди. Прийнято, що чотири з них робочі, а три – вихідні.

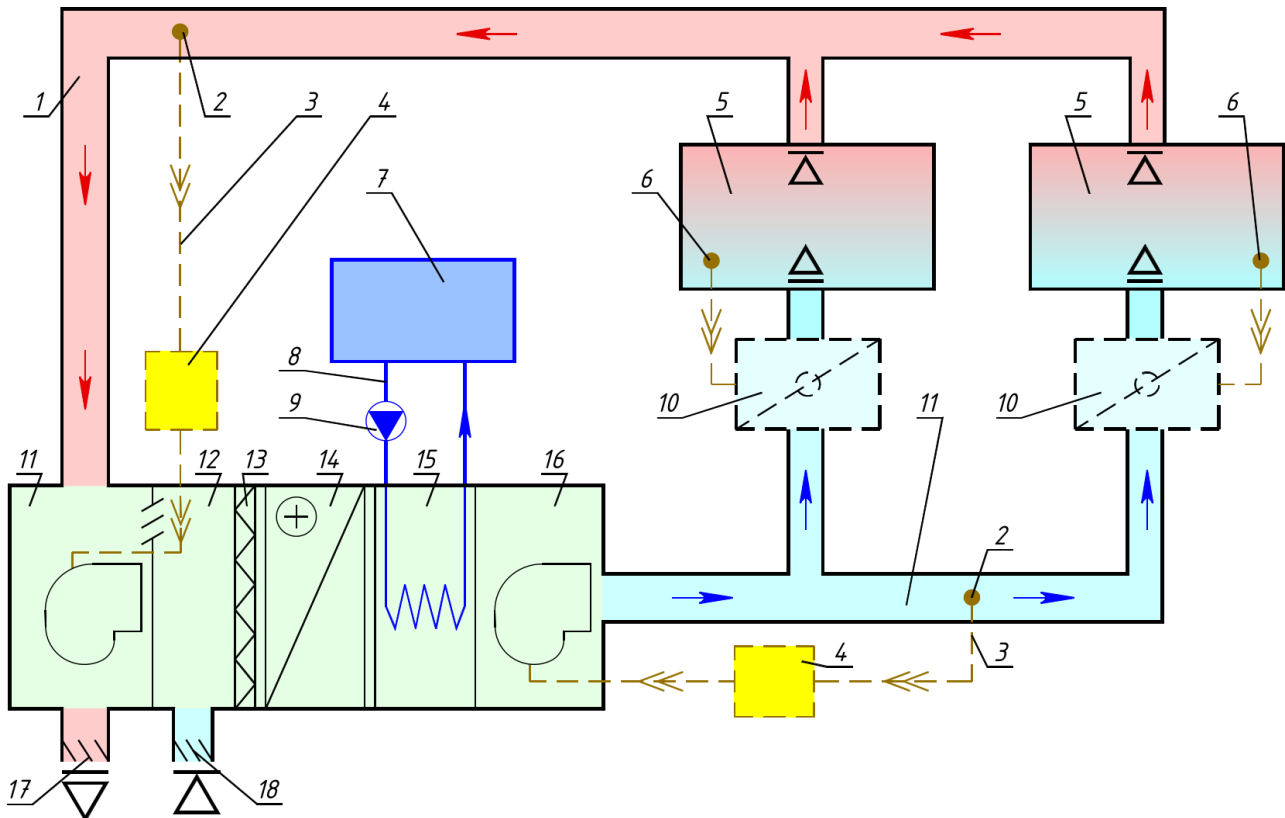


Рис.1. Принципова схема варіантів системи вентиляції [2]:

суцільні лінії – з постійною та змінною витратою; пунктир – зі змінною витратою:

- 1 – витяжний повітровід; 2 – датчик тиску; 3 – лінія передачі сигналу; 4 – частотний регулятор двигуна вентилятора; 5 – приміщення; 6 – датчик у приміщенні; 7 – холодильна машина; 8 – трубопровід холодопостачання; 9 – циркуляційний насос холодопостачання; 10 – регулятор змінної витрати повітря; 11 – припливний повітровід; 12-17 – припливно-витяжна установка; 12 – витяжний вентилятор; 13 – камера змішування; 14 – фільтр; 15 – повітряонагрівач; 16 – повітроохолодувач; 17 – припливний вентилятор; 18 – викид повітря; 19 – повітрязабір

Розрахуємо витрату електроенергії на охолодження повітря (рис. 5) за формулою [16]:

$$W_{\text{енер}} = \frac{Q_{\text{енер}} \tau_{\text{роб}} n}{\eta_x}, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{енер}}$ – розрахункові витрати енергії на холодопостачання, кВт, які прийнято як суму щогодинних теплонадходжень протягом дня; n – кількість днів роботи системи; $\tau_{\text{роб}}$ – кількість годин роботи системи на день, год; η_x – ефективність системи охолодження, який прийнято $\eta_x = 0,89$.

Також розраховано споживання енергії вентиляторів (на основі даних каталогу виробника в робочій точці) та витрати повітря (рис. 6) за весь період роботи для чотирьох сценаріїв (рис. 7).

На основі проведених розрахунків можна зробити порівняння сценаріїв роботи систем відносно найбільш енерговитратного сценарію 1. (рис. 8).

Розглянемо характерні приміщення (табл. 3) у даній будівлі за другим сценарієм роботи.

Побудуємо графік погодинних теплонадходжень у липні для цих приміщень (рис. 9-11) відповідно до методики [18].

Пікові навантаження для трьох приміщень припадають на період з 15 до 18 години. Така закономірність спричинена значними теплонадходженнями від людей та обладнання в цей період.

Теплонадходження за рахунок сонячної радіації досить незначні. Одним з факторів, що впливає на даний показник, є правильне архітектурне планування приміщень і масивні огорожі, які пропускають тепловий потік із запізненням.

Також виконано розрахунок щогодинного повітрообміну за асиміляцією надлишку теплоти (рис. 12). Найбільша різниця між системами протягом сонячної доби в липні становить 13,2 %. Вона припадає на період з дев'ятої до десятої години.

Під час похмурої погоди перевага системи зі змінною витратою зростає до понад 2,6 разів, що дозволяє набагато зменшити споживання енергоресурсів.

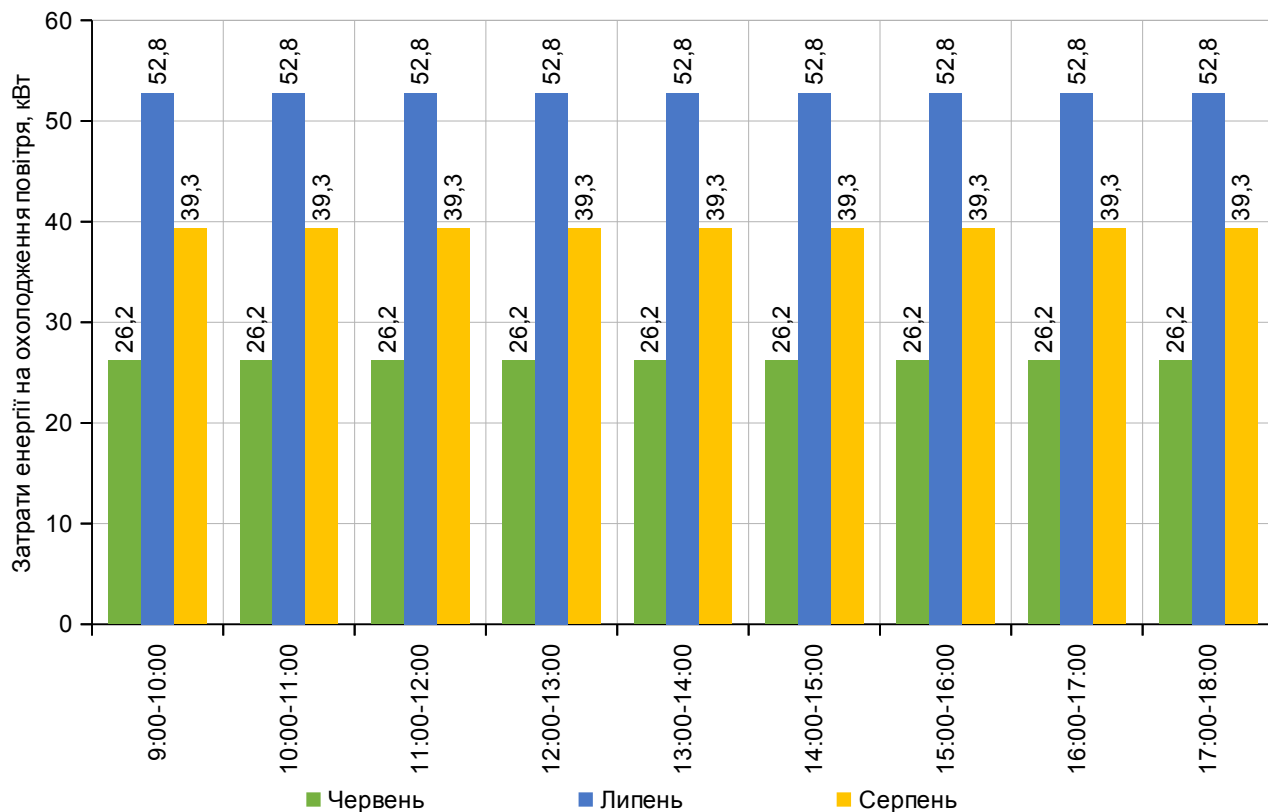


Рис. 2. Погодинні енергозатрати на охолодження повітря з червня по серпень для першого сценарію

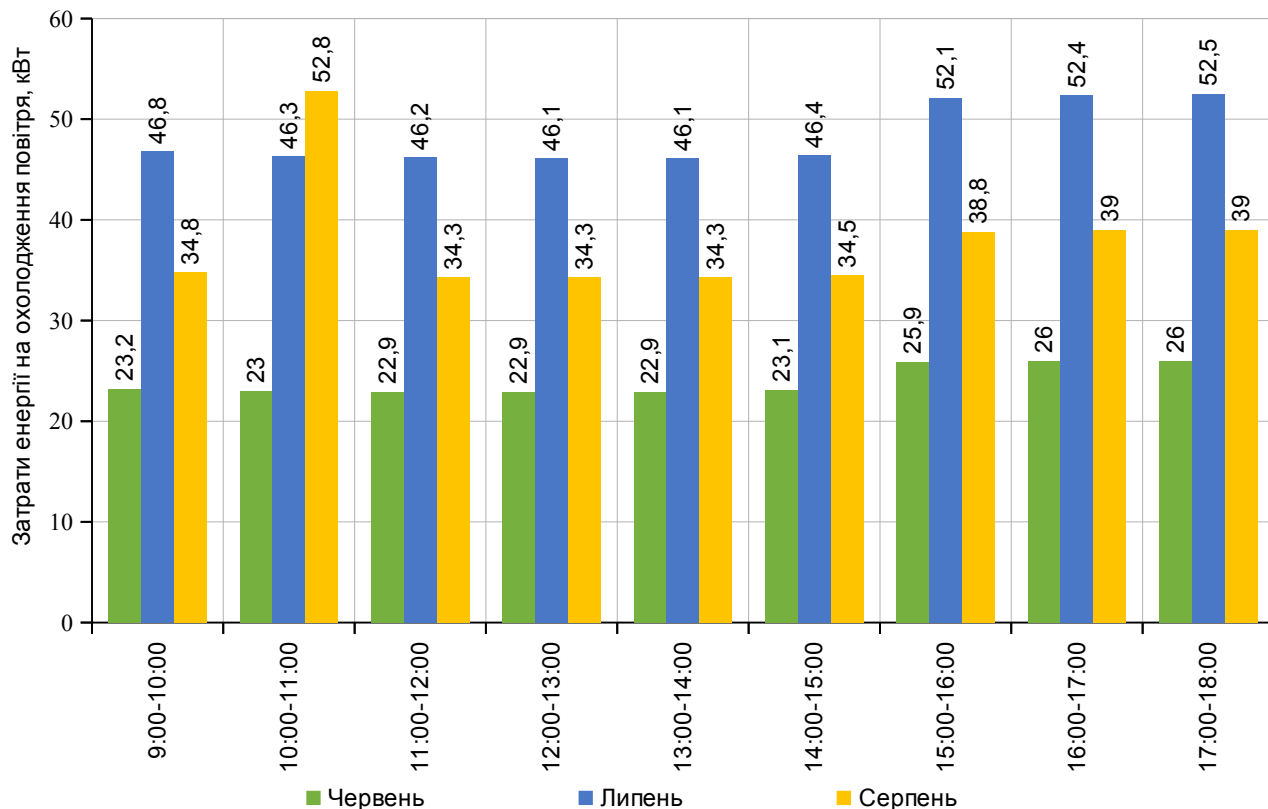


Рис. 3. Погодинні енергозатрати на охолодження повітря з червня по серпень для першого сценаріїв 2-4

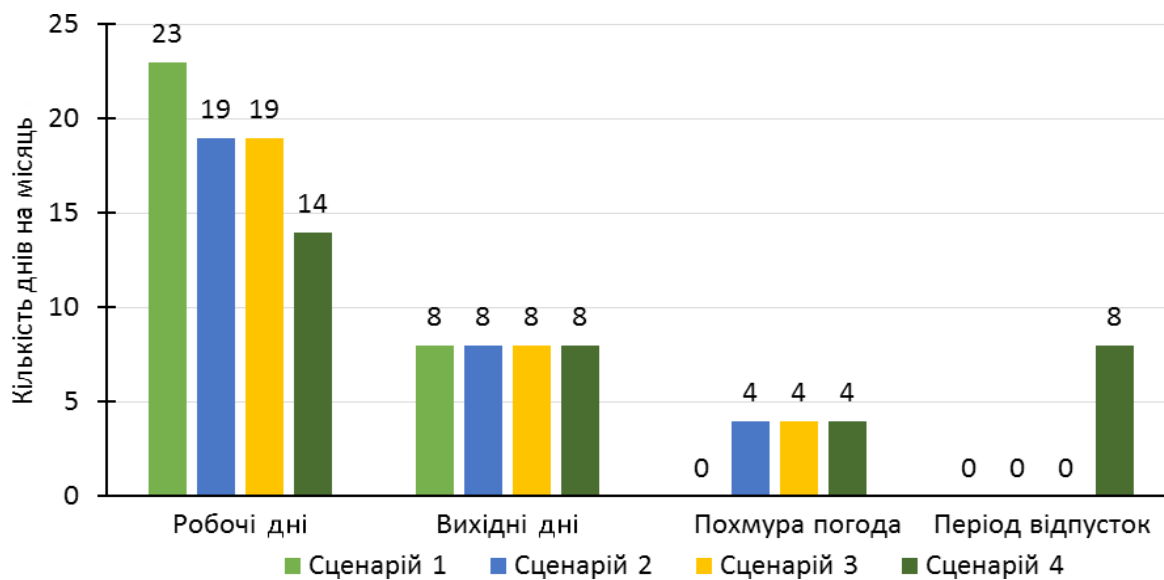


Рис. 4. Режим роботи системи протягом місяця

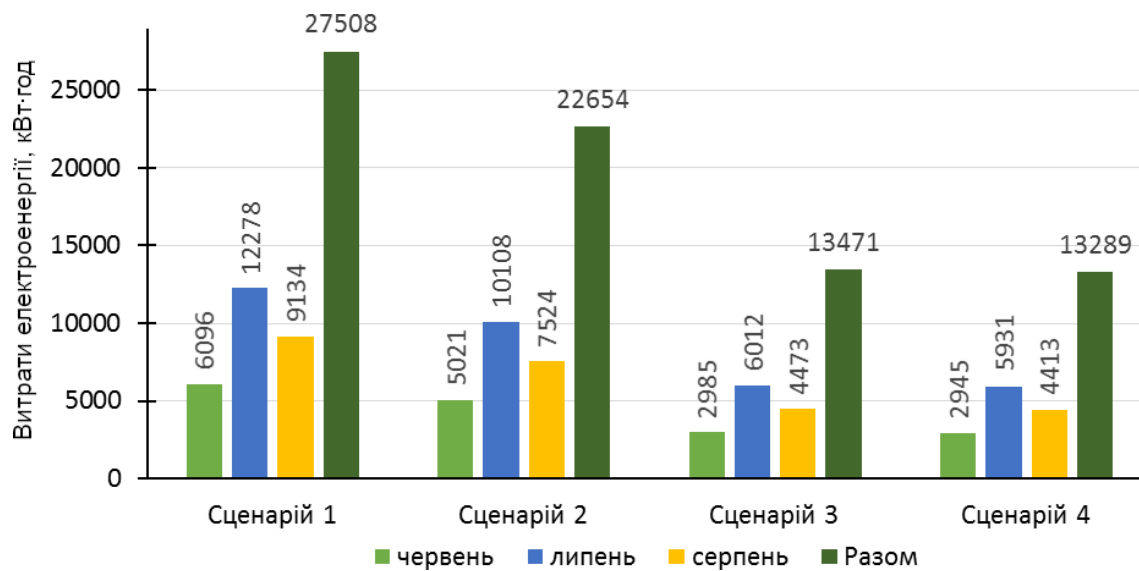


Рис. 5. Витрати електроенергії на охолодження повітря.

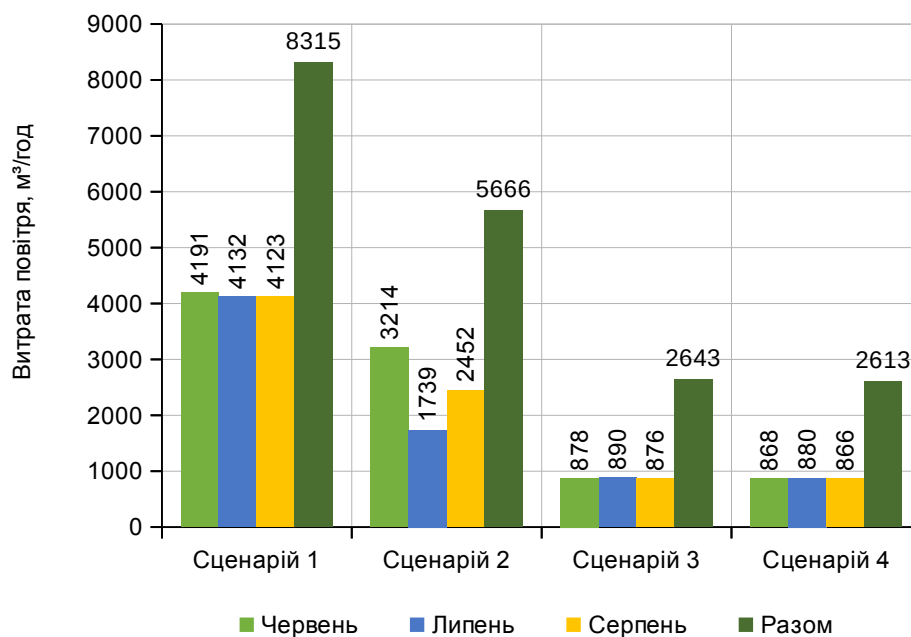


Рис. 6. Витрата повітря припливно-витяжної установки

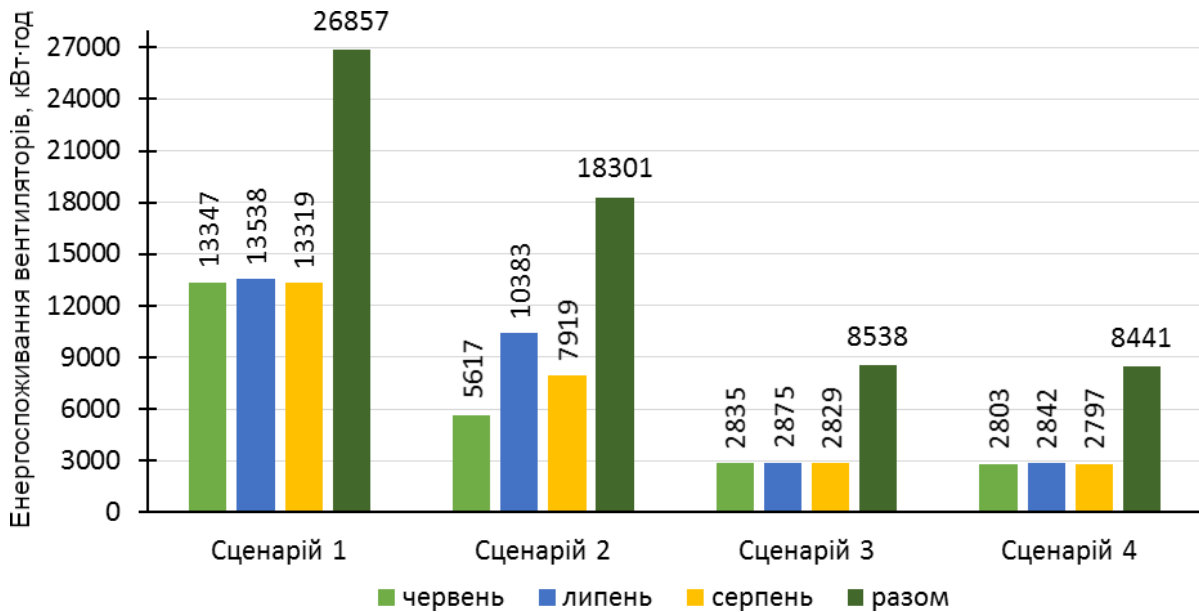


Рис. 7. Споживання електроенергії вентиляторами

Таблиця 3

Характеристика розрахункових приміщень

Номер приміщення	Орієнтація зовнішньої стіни	Кількість людей
101	Північний захід	2
123	Схід	4
124	Північ	5

Генерація електроенергії для потреб вентиляції. З метою порівняння затрат тепло-електроцентралі на генерацію енергії для забезпечення систем вентиляції було проведено розрахунок викидів забруднювальних речовин та затрат палива для всіх сценаріїв використання систем вентиляції.

Для розрахунку обрано кам'яне вугілля марки ОС та природний газ як варіанти палива для теплоелектроцентралі (табл. 4).

Розрахунок передбачає такі етапи:

1. Розрахунок палива необхідного для генерації енергії;
2. Розрахунок викидів твердих часток в атмосферу (стосується лише твердого палива);
3. Розрахунок викидів вуглецю (CO), оксидів азоту (NO₂), оксидів сірки (SO₂). Для газоподібного палива розрахунок викидів від оксидів сірки не враховується, тому що не містить сірки в своєму складі;
4. Розрахунок сумарних викидів.

Розрахунок всіх етапів проведений для теплоелектроцентралі з коефіцієнтом корисної дії $\eta = 0,34$.

На першому етапі розрахуємо кількість палива (рис. 14) для генерації необхідної кількості енергії W , кВт·год, на теплоелектроцентралі за формулою

$$B = \frac{3,6 \cdot 10^{-3} W}{Q_p \eta}, \text{ т вугілля або тис. м}^3 \text{ газу.} \quad (3)$$

На другому етапі розглянемо викиди твердих часток до атмосфери. Вони відбуваються лише при спалюванні вугілля. Кількість летючої золи (рис. 15)

$$M_{\text{рик}}^{\text{зола}} = B A^r \chi (1 - \eta_{\text{зв}}), \text{ т/рік} \quad (4)$$

де χ – параметр залежно від виду палива і топ-ки котлоагрегату, $\chi = 0,0019$; $\eta_{\text{зв}}$ – частка твердих речовин, які затримуються в золо-ловлювачі, $\eta_{\text{зв}} = 0,8$.

На третьому етапі визначаємо викиди монооксиду вуглецю в атмосферу, що над-ходить при спалюванні вугілля та газу (рис. 15)

$$M_{\text{рик}}^{\text{CO}} = 0,001 C_{\text{CO}} B \left(1 - \frac{q_4}{100} \right), \text{ т/рік,} \quad (5)$$

де C_{CO} – вихід оксиду вуглецю при згорянні палива:

$$C_{\text{CO}} = q_3 R Q_n^p; \quad (6)$$

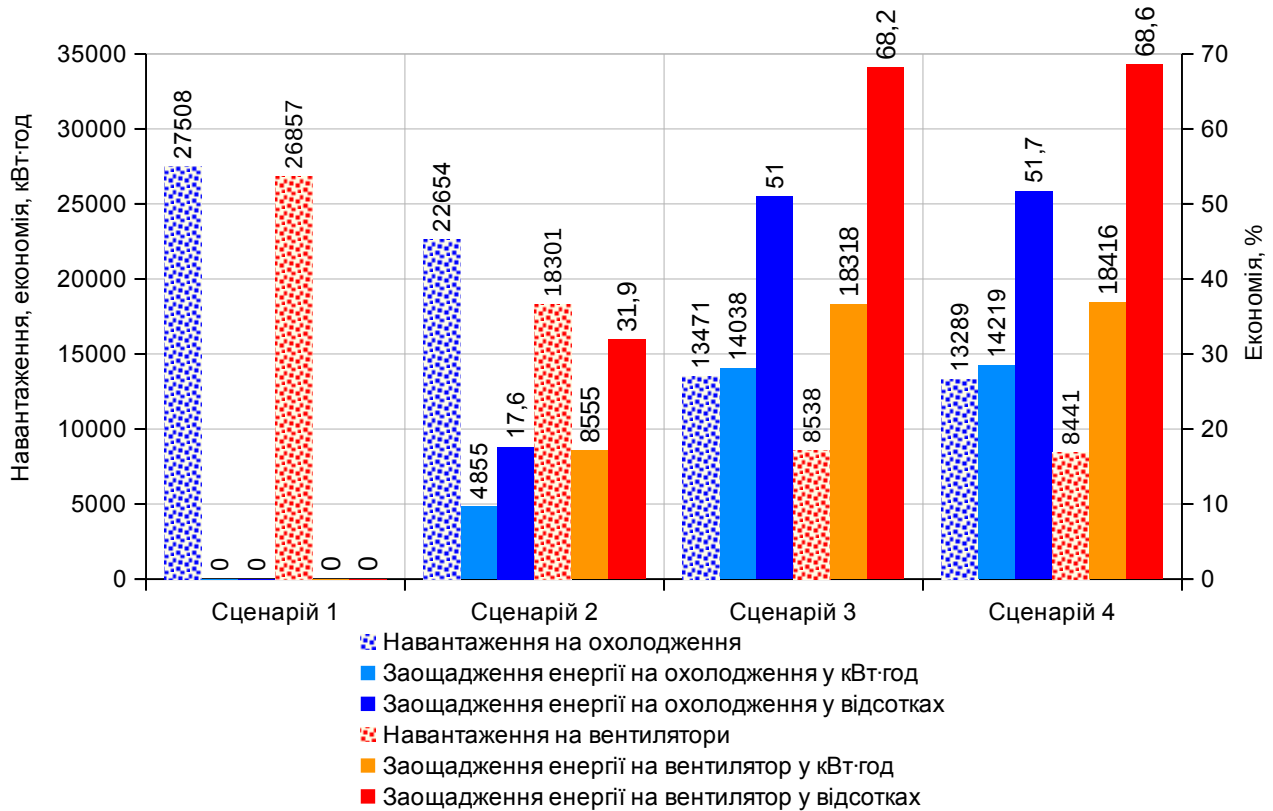


Рис. 8. Порівняння сценаріїв роботи систем за заощадженням електричної енергії

R – коефіцієнт, який враховує втрату теплоти внаслідок хімічної неповноти згоряння палива, обумовленою наявністю в продуктах спалювання оксиду вуглецю (для вугілля $R = 1$, а для природного газу $R = 0,5$); q_3 – втрати теплоти внаслідок хімічної неповноти згоряння палива, % (для вугілля $q_3 = 1$, а для природного газу $q_3 = 0,5$); q_4 – втрати теплоти через механічну неповноту згоряння палива, % (для вугілля $q_4 = 3,5$ %, а для природного газу $q_4 = 0,5$ %).

На четвертому етапі визначаємо викиди оксидів азоту (рис. 16) до атмосфери в пере-рахунку на діоксид азоту при спалювання при-родного газу й вугілля

$$M_{\text{рік}}^{\text{NO}_2} = 0,001 B Q_p K_{\text{NO}_2} (1 - \beta), \text{ т/рік}, \quad (7)$$

де K_{NO_2} – параметр, який характеризує кількість оксидів азоту, що утворюються на 1 ГДж тепло-ти, кг/ГДж; β – коефіцієнт, який залежить від ступеня зниження викидів оксидів азоту внаслідок прийняття технічних рішень, а за їхньої відсутності $\beta = 0$.

Забруднення атмосферного повітря окси-дами сірки відбувається лише при спалюванні вугілля. Викиди оксидів сірки (рис. 18) у пере-рахунку на SO_2

$$M_{\text{рік}}^{\text{SO}_2} = 0,02 B S'' (1 - \eta'_{\text{SO}_2}) (1 - \eta''_{\text{SO}_2}), \text{ т/рік}, \quad (8)$$

де η'_{SO_2} – частка SO_2 , яка зв'язується летючою золою, прийнята 0,1; η''_{SO_2} – частка SO_2 , яка утримується в золовловлювачі, за відсутності такого приймається 0.

На останньому етапі визначаємо сумарні викиди забруднювальних речовин в атмо-сферне повітря з продуктами згоряння (рис. 19). При спалюванні природного газу в атмосферу надходять лише оксиди азоту й вуглецю. При використанні вугілля атмосферне повітря забруднюватиметься газоподібними оксидами азоту, вуглецю, сірки, а також тверди-ми частками – летючою золою.

На основі даних [19] вартість кам'яного вугі-лля марки ОС становить 2721 грн/т. Вартість природного газу – 8,82 грн/м³. На основі цих даних розраховано вартість палива необхідного для спалювання на теплоелектроцентралі (рис. 20). Як видно на рис. 20, генерація електроенергії при використанні газу на 37 % дорожча ніж при спалюванні вугілля. За сценарієм 4 заощадження палива досягає 60 % порівняно зі сценарієм 1.

Згідно зі статтею 243 Податкового кодексу України [20] визначено ставки податку на вики-ди до атмосферного повітря забруднювальних речовин стаціонарними джерелами забруднен-ня. Ставка податку нараховується на одну тон-ну викидів. Податки на викиди в атмосферне повітря (рис. 21-22) слід урахувати у вартості генерації електроенергії.

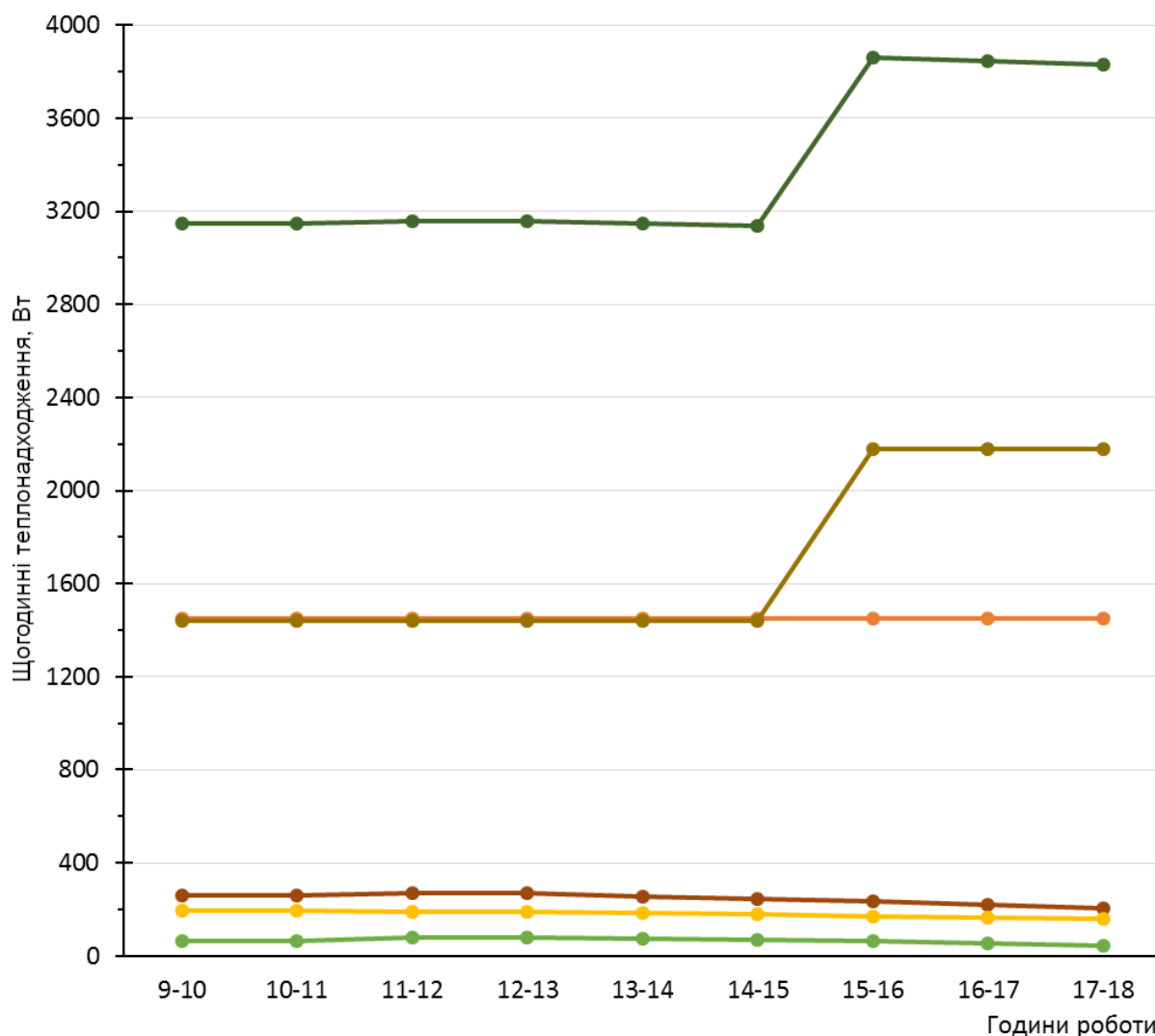


Рис. 9. Щогодинні тепловідходження у приміщення №101 орієнтованого на північ та захід:

- сумарний щогодинний тепловий потік, Вт;
- сумарний щогодинний тепловий потік за рахунок сонячної радіації, Вт;
- сумарний щогодинний тепловий потік через світлопрозорі конструкції, Вт;
- тепловідходження від людей, Вт;
- тепловідходження через масивні конструкції;
- тепловідходження від обладнання

Кількість викидів до атмосфери при спалюванні газу на 82 % менша порівняно з викидами при спалюванні вугілля. Податок для теплоелектроцентралі на газовому паливі скорочується на 75 %. Разом з цим зменшується витрата палива на виробництво електроенергії і, як наслідок, зменшуються викиди забруднювальних речовин до атмосфери.

Постійне використання таких систем за кордоном і показники, досягнуті в цій роботі, доводять високу ефективність систем зі змінною витратою повітря з економічної та екологічної точок зору.

Аналіз результатів роботи. Використання сучасних систем дозволяє розширити можливості управління будівлями й оцінки ефективності роботи систем за статистичними показниками. На основі виконаних порівнянь можна зробити висновок, що зменшення

експлуатаційних витрат і полегшення пусконаладжувальних робіт при застосуванні систем вентиляції та кондиціонування повітря зі змінною витратою сприяє розширенню гнучкості інженерних рішень. Швидка реакція на зміну параметрів мікроклімату дозволяє підвищити комфорт людей і оптимізувати систему для забезпечення необхідних показників.

Системи вентиляції та кондиціонування повітря зі змінною витратою досить поширені за кордоном. Проте через малу присутність таких систем на ринку України та малий досвід фахівців у роботі з такими системами, динаміка використання VAV систем є досить низькою. Крім цього, малий обсяг інформації щодо проектування та застосування систем зі змінною витратою знижують популярність цих систем.

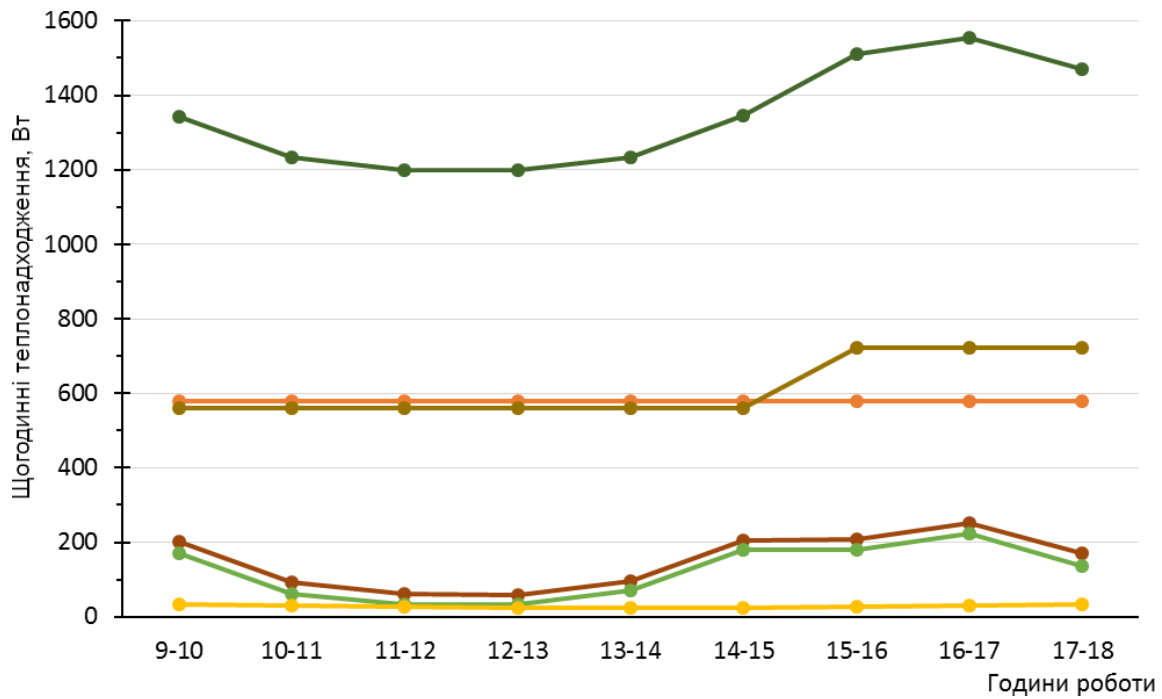


Рис. 10. Щогодинні тепловідходження у приміщення №123 орієнтованого на схід:

- сумарний щогодинний тепловий потік, Вт;
- сумарний щогодинний тепловий потік за рахунок сонячної радіації, Вт;
- сумарний щогодинний тепловий потік через світлопрозорі конструкції, Вт;
- тепловідходження від людей, Вт;
- тепловідходження через масивні конструкції;
- тепловідходження від обладнання

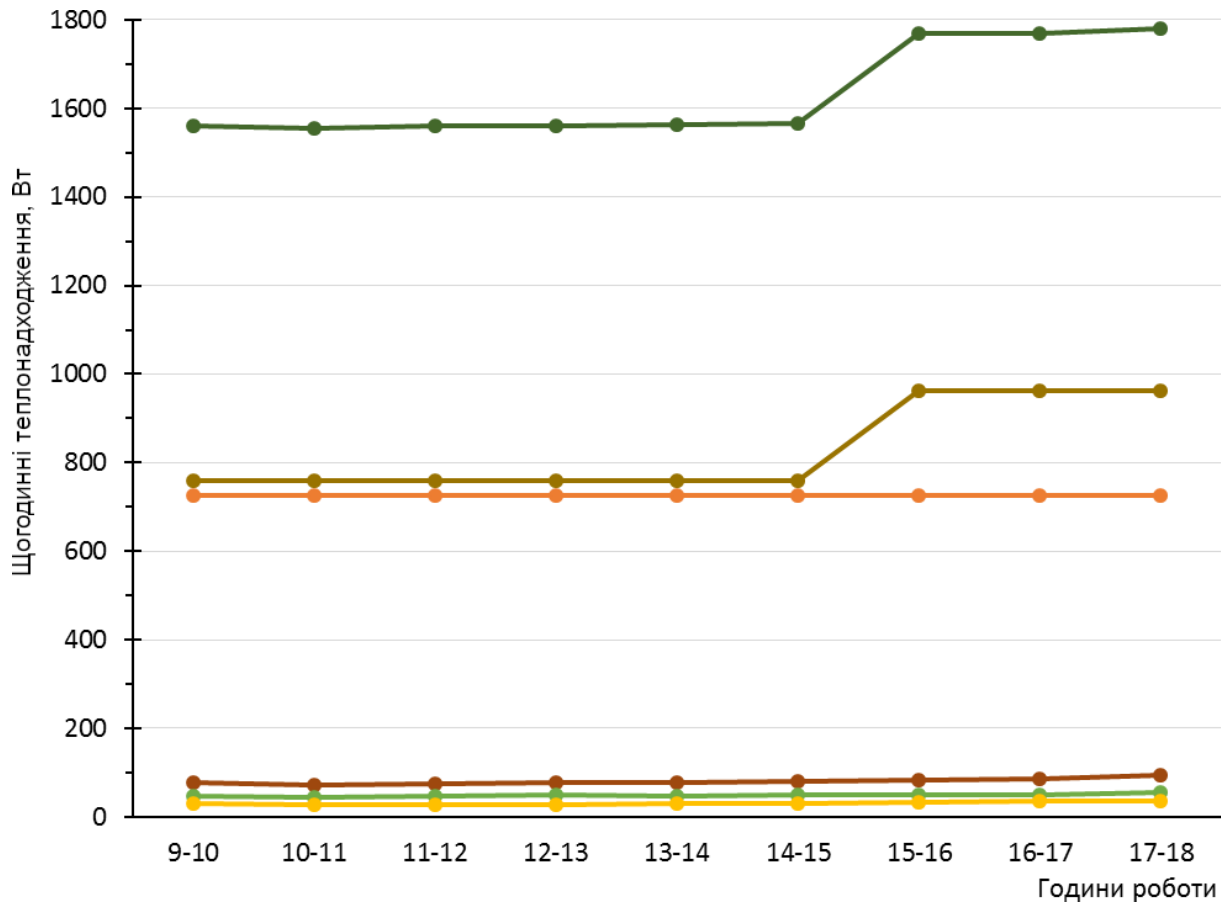


Рис. 11. Щогодинні тепловідходження у приміщення №124 орієнтованого на північ:

- сумарний щогодинний тепловий потік, Вт;
- сумарний щогодинний тепловий потік за рахунок сонячної радіації, Вт;
- сумарний щогодинний тепловий потік через світлопрозорі конструкції, Вт;
- тепловідходження від людей, Вт;
- тепловідходження через масивні конструкції;
- тепловідходження від обладнання

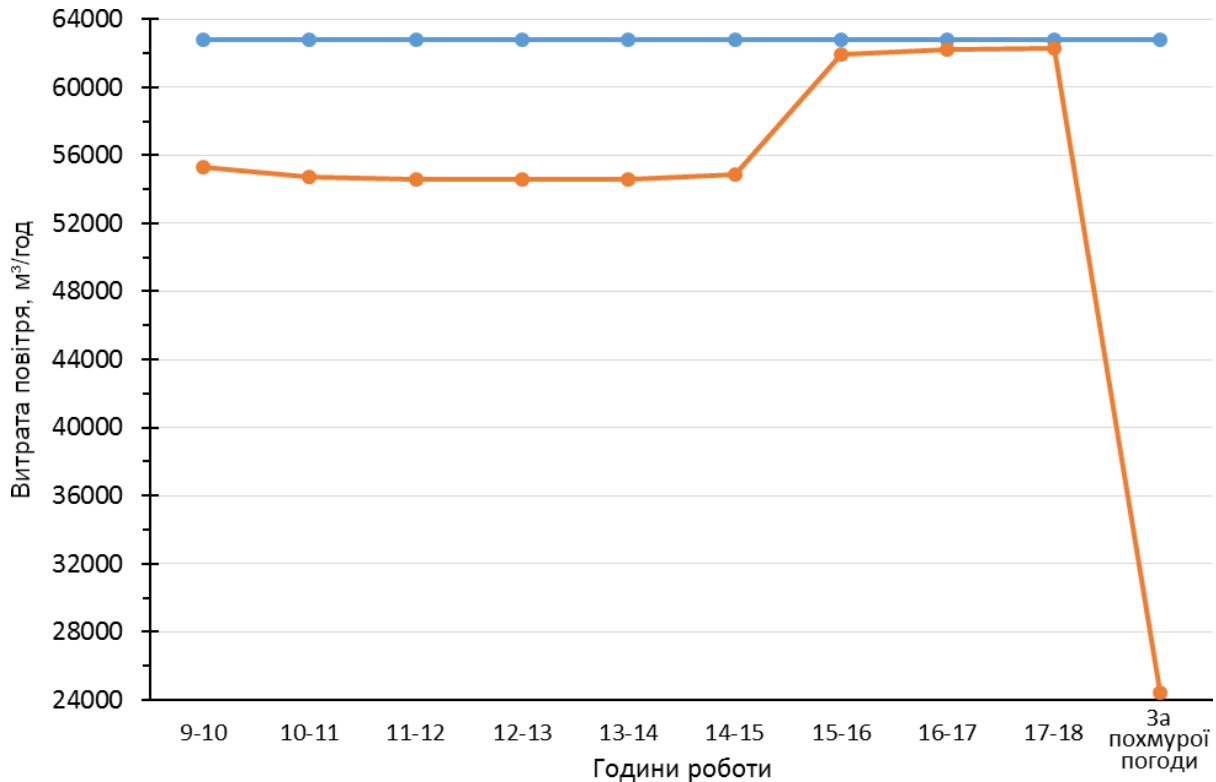


Рис. 12. Щогодинна витрата систем вентиляції всієї будівлі за першим та другим сценарієм роботи для асиміляції теплонадлишків:

— система з постійною витратою повітря;
— система зі змінною витратою повітря

Таблиця 4

Характеристики палива		
Характеристика	Кам'яне вугілля марки ОС	Природний газ
Одиниця вимірювання обсягу (од. вим.)	кг	м³
Нижча теплота згоряння Q_p^H , МДж/од. вим.	23,24	34
Густина ρ , кг/м³	—	0,73
Зольність палива в робочому стані A^r , %	28	Немає
Вміст сірки в робочому стані S^r , %	2,8	Немає
Вологість у робочому стані W^r , %	50	Не враховано

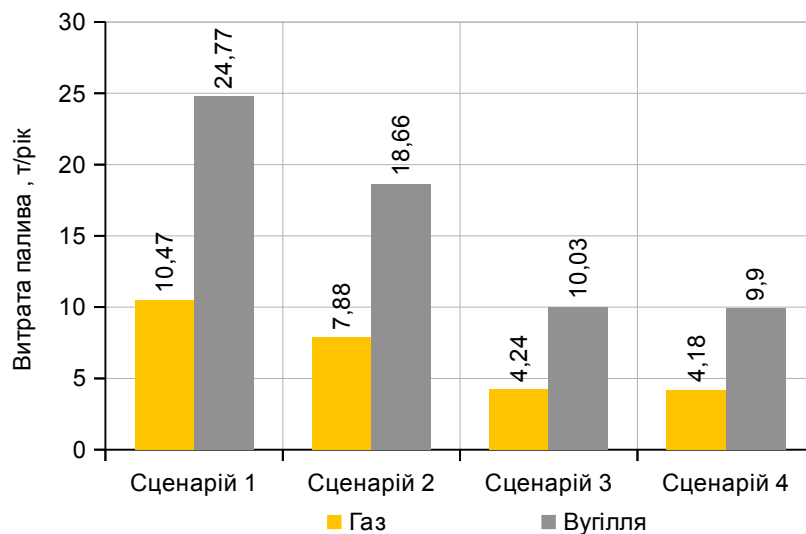


Рис. 13. Витрата палива для генерації енергії на теплоелектроцентралі

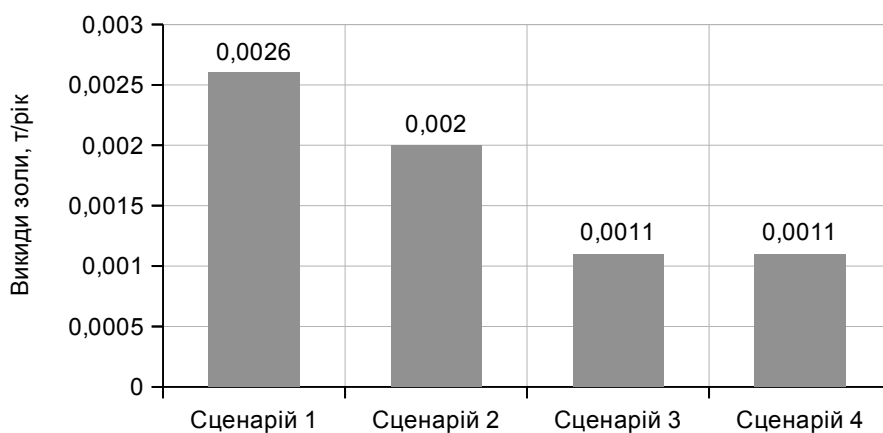


Рис. 14. Викиди золи до атмосфери при спалюванні вугілля

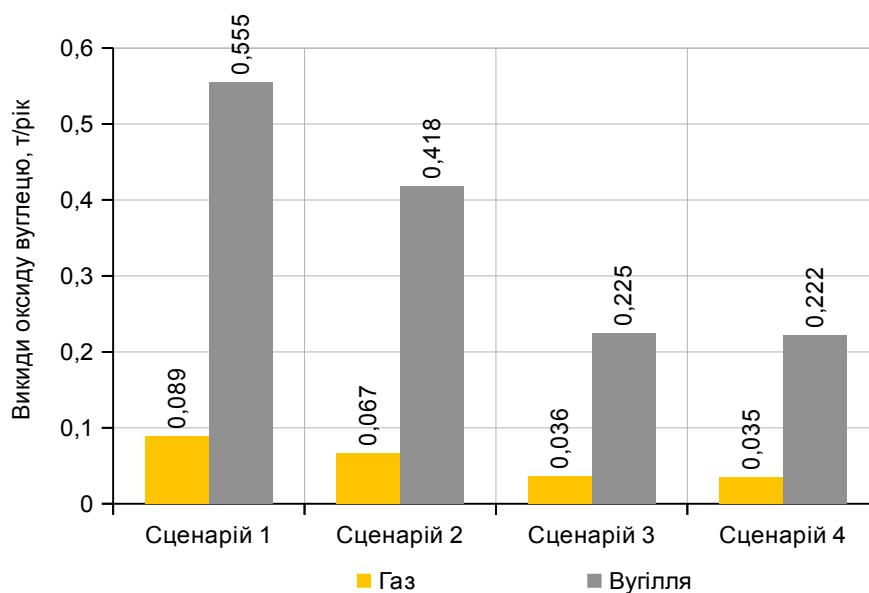


Рис. 15. Викиди оксиду вуглецю до атмосфери

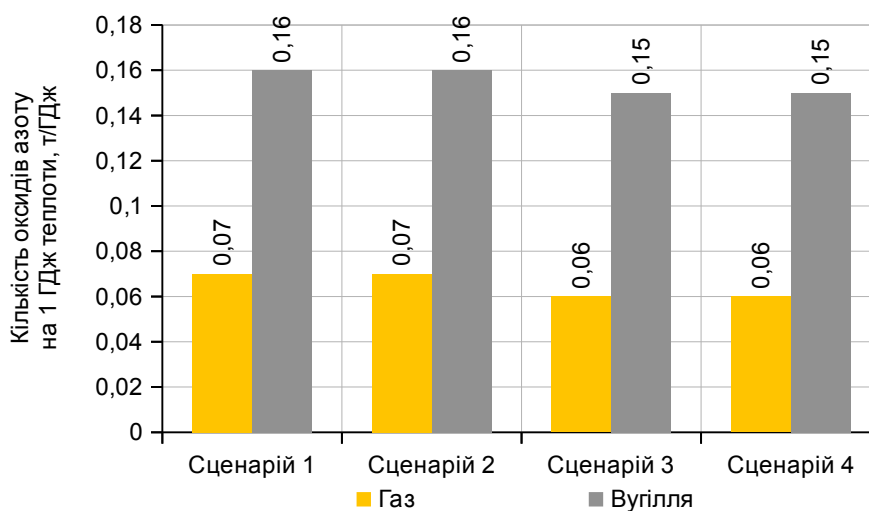


Рис. 16. Кількість оксидів азоту на на 1 ГДж теплоти

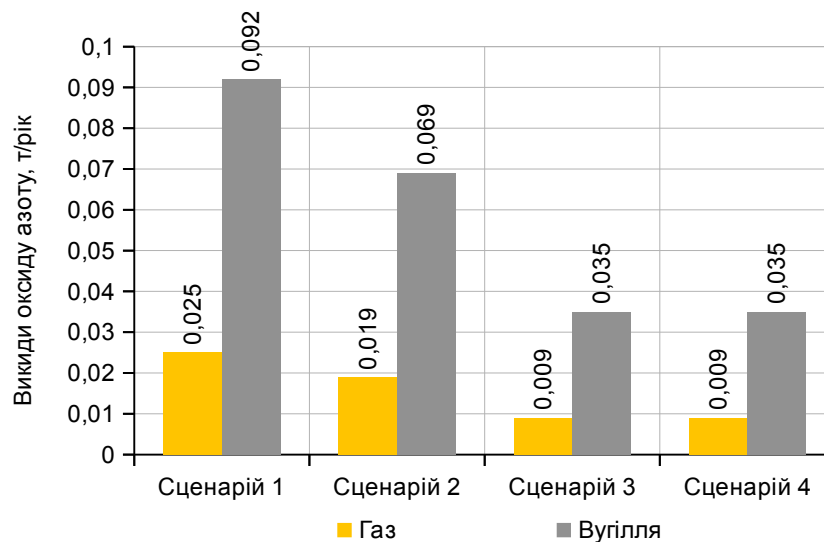


Рис. 17. Викиди оксидів азоту до атмосфери

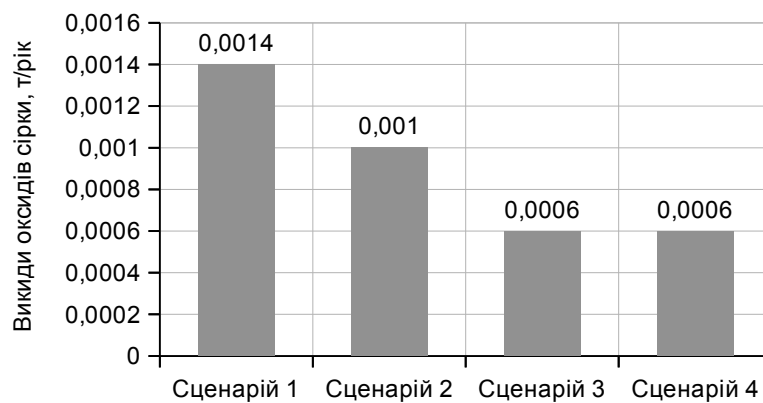


Рис. 18. Викиди оксидів сірки до атмосфери при спалюванні вугілля

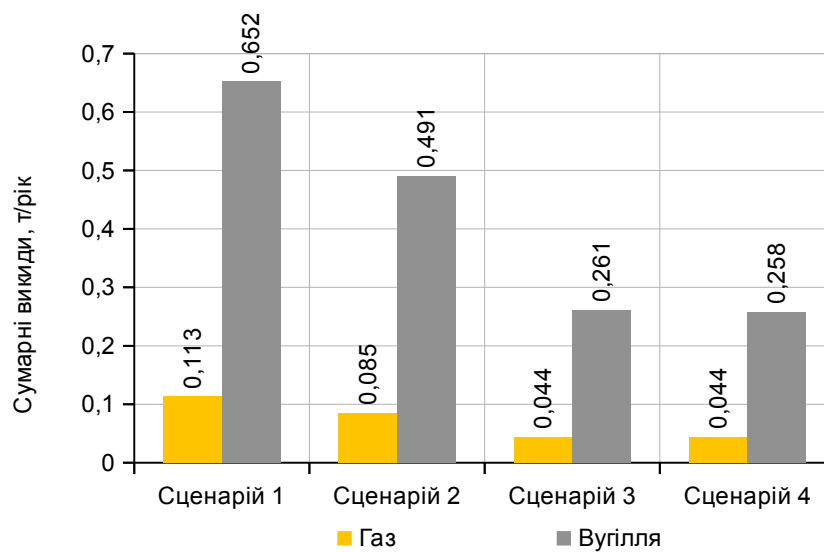


Рис. 19. Загальні викиди шкідливих речовин

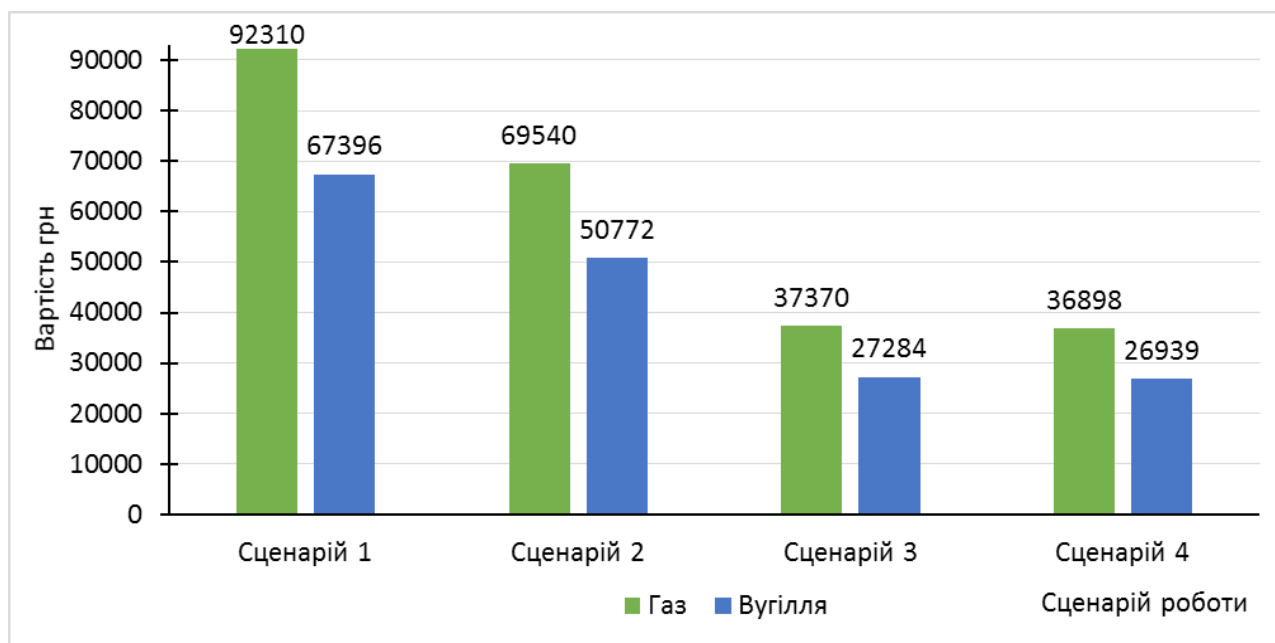


Рис.20. Вартість палива для генерації енергоресурсів на потреби вентиляції.

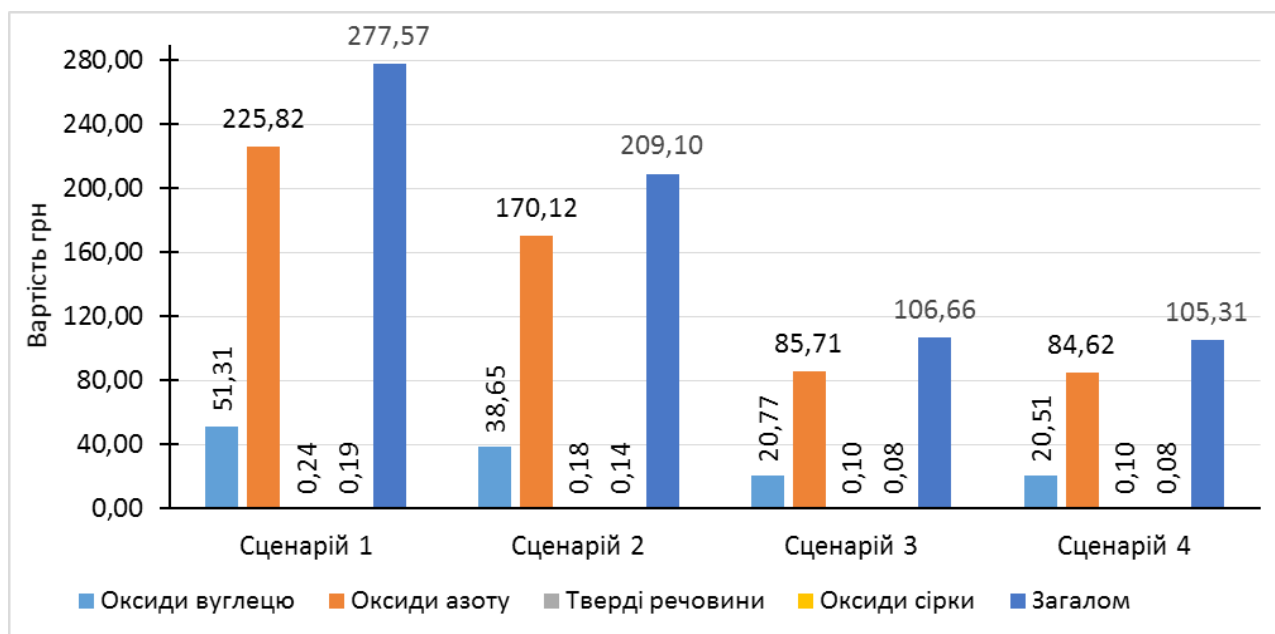


Рис. 21. Податки на викиди забруднюючих речовин при спалюванні вугілля

Результати даної роботи та [16,21-25] дозволяють стверджувати, що системи зі змінної витратою доцільні для всіх адміністративних будівель. Системи дозволяють заощаджувати енергію протягом усього життєвого циклу. Проте вони недостатньо економічно привабливі з точки зору початкових інвестицій.

Також потрібно зважати на забруднення навколишнього середовища. За використання систем зі змінною витратою повітря можна досягти економії електроенергії від 25 до 60 % за різними сценаріями роботи порівняно з першим сценарієм роботи.

Витрата енергії на механічне спонукання повітря вентиляторами скорочується від 32 до

68 % порівняно з постійною витратою. З точки зору генерації енергії на сьогодні більш економічно вигідним є використання вугілля. Економія палива на генерацію енергії для потреб вентиляції в середньому скорочується на 48 %. Кількість викидів скорочується в такому же відсотковому відношенні як і витрата палива. Затрати коштів на енергоресурси скорочуються на 60 % за найбільшої оптимізації системи.

Регулювання витрати повітря заощаджує енергію та зменшує викиди забруднювальних речовин до атмосферного повітря, тобто сповільнює зміни клімату. Тому для держави було б доцільно сприяти субсидіюванню екологічно чистих систем.

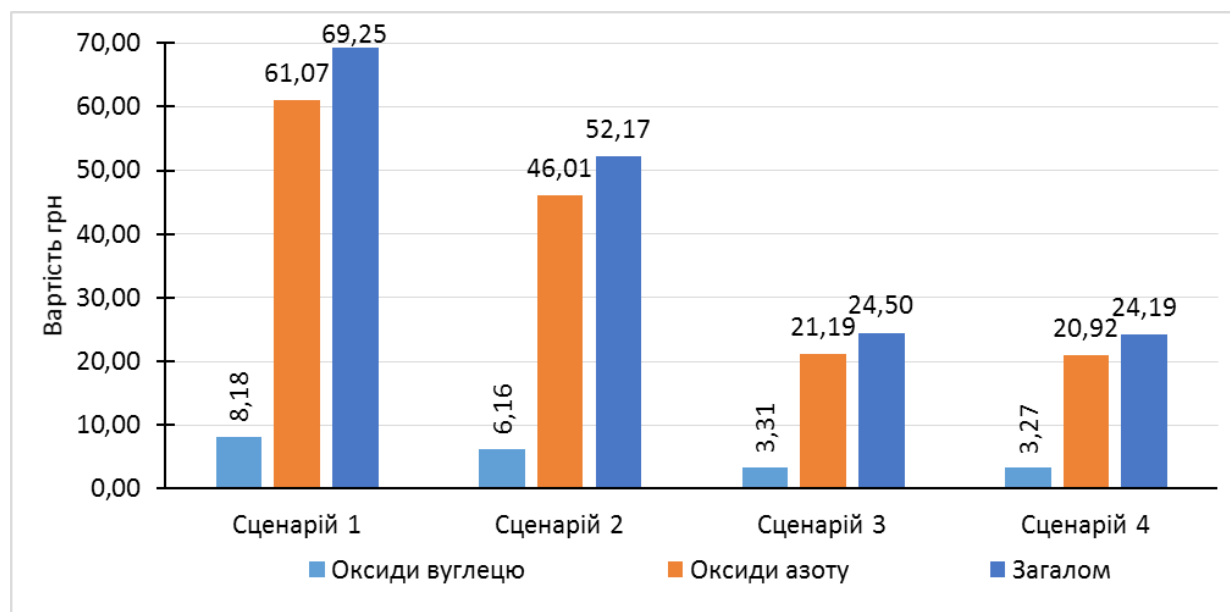


Рис. 22. Податки на викиди забруднюючих речовин при спалюванні газу.

Висновки. Системи вентиляції та кондиціонування повітря зі змінної витратою доцільні для всіх адміністративних будівель через заощадження електроенергії на 25...60 %, зменшення витрати палива викидів до атмосфери у середньому на 48 %. Відповідно, уповільнюються зміни клімату. За найбільшою

оптимізації системи затрати коштів на енергоресурси може зменшитися на 60 %. Однак через високі капітальні вкладення ці системи не мають високої інвестиційної привабливості. Тому в державі доцільно прийняти програми субсидіювання таких екологічних та енергоощадних систем.

Література

1. Khasreen M. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review / M. Khasreen, P. F. G. Banfill, G. Menzies // Sustainability. - 2009. - Vol. 1. - Iss. 3. P. 674-701. - doi:10.3390/su1030674
2. Kreider J. F, Heating and cooling of buildings / J. F. Kreider, A. Rabl. - New York: McGraw Hill, 1994, 315c.
3. Zabalza B. I., Aranda-Usón A., Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification / I. Zabalza, A. Aranda-Usón, S. Scarpellini // Building and Environment. - 2009. - Vol. 44. - Iss. 12. - P. 2510-2520
4. UNEP Annual Evaluation Report 2003 [Electronic resource] / UN Environment Evaluation Office. - URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/187?show=full> . - Access date: 11.03.2021
5. Climate change and you [Electronic Resource] / European Commission. - URL: https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_en. - Access Date: 18.12.2020
6. Pérez-Lombard L. Creation of Zero CO2 A Review on Buildings Energy Consumption Information / Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C. // Energy and Buildings. - 2008. - Vol. 40. - Iss. 3. - 394-398.
7. Chen S. System dynamics-based models for selecting HVAC systems for office buildings: A life cycle assessment from carbon emissions perspective / S. Chen. - Thesis for Master degree. - RMIT University, 2011. - 179 p.
8. World Air Conditioning 2018 [Electronic Resource] / BSRIA. - URL: <https://www.bsria.com/download/asset/chillers-world-market-for-air-conditioning-2018.pdf>. - Published March 2018
9. Coletti M. AC&R facts and figures / M. Coletti, E. Fano // Refrig World. - 2008. - No. 4. - P. 8-11.
10. Sartori I. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article / Sartori I., Hestnes A. G. Energy and Buildings. - 2007. - Vol. 39, Iss. 3. - P. 249-257. - <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
11. Prek M. Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study / M. Prek // Energy and Buildings. - 2004. - Vol. 36 Iss. 10. - P. 1021-1027. - <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.008>
12. Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения. - Промстройпроект. - 1993 г. - 42 с.
13. Зінич П. Л. Вентиляція громадських будівель. Навчальний посібник / П. Л. Зінич. - Київ: КНУБА, 2002. - 256 с.
14. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. - Чинні від 1.11.2011 р. - Київ: Мінрегіонбуд, 2011. - 127 с.

15. Средний месячный уровень солнечной радиации в городах Украины. URL: <https://www.atmosfera.ua/ru/stati-geliosistemy/solar-insulation-ukraine/>
16. Москвітін А. С. Дослідження поля температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях приміщення / А. С. Москвітін, М. О. Шишина // Молодий вчений. – 2020. – №3.
17. Погода в Києві. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/ukraine/kyiv/>
18. Баркалов Б. В. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / Б. В. Баркалов, Н. Н. Павлов, С. С. Амирджанов и др.; Под ред. Н. Н. Павлова и Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1992. – 416 с.
19. Інформація про вугільну продукцію. URL: <https://data.gov.ua/dataset/19a376c7-90a3-40d2-a9da-2df2c354646e/resource/28ebc80a-d156-4721-9598-e2be45481acd>
20. Податковий кодекс України від 02.12.2010 №2755-VI [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
21. Pan Y, Measurement and simulation of indoor air-quality and energy consumption in two Shanghai office buildings with Variable-Air-Volume systems / Y, Pan, H, Zhou, Z, Huang, Y, Zeng, W. Long // Energy Build, 2003. – Vol.35. – p. 77–91.
22. Kapalo P. Effect of the variable air volume on energy consumption – case study / P. Kapalo, N. Spodyniuk // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. – Vol. 415. – p. 012-027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/415/1/012027>
23. Hassan N. Comparative life-cycle assessment of constant air volume, variable air volume and active climate beam systems for a Swedish office building / N. Hassan, S. Javed // From Energy crisis to sustainable indoor climate – 40 years of AIVC. Proceedings. Het Pand, Ghent, Belgium, 15-16 October 2019. – p. 627-636.
24. Mehmet Azmi Aktacir. Life-cycle cost analysis for constant-air-volume and variable-air-volume air-conditioning systems / Mehmet Azmi Aktacir, Orhan Büyükalaca, Tuncay Yılmaz // Applied Energy, 2006. – Vol. 83. – Iss. 6. – p. 606–627. doi:10.1016/j.apenergy.2005.06.002
25. Джеджула В. В. Системи вентиляції зі змінною витратою повітря: особливості проектування та експлуатації / В. В. Джеджула // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2017. – № 1. – С. 106-111.

References

1. Khasreen M., Banfill P. F. G., Menzies G. “Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review”. *Sustainability*. 2009. Vol. 1. Iss. 3. P. 674-701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>
2. Kreider J. F., Rabl A. *Heating and cooling of buildings*. McGraw Hill, 1994
3. Zabalza B. I., Aranda-Usón A., Scarpellini S. “Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification.” *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Iss. 12. P. 2510-2520.
4. UNEP Annual Evaluation Report 2003. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/187?show=full>
5. *Climate change and you*. URL: https://ec.europa.eu/clima/citizens/eu_en.
6. Pérez-Lombard L. Ortiz, J., Pout, C. “Creation of Zero CO₂ A Review on Buildings Energy Consumption Information”. *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40. Iss. 3. P. 394-398.
7. Chen S. *System dynamics-based models for selecting HVAC systems for office buildings: A life cycle assessment from carbon emissions perspective*. Thesis for Master degree. RMIT University, 2011.
8. *World Air Conditioning 2018*. <https://www.bsria.com/download/asset/chillers-world-market-for-air-conditioning-2018.pdf>
9. Coletti M., Fano E. “AC&R facts and figures.” *Refrig World*. 2008. No. 4. P. 8-11.
10. Sartori I., Hestnes A. G. “Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article”. *Energy and Buildings*. 2007. Vol. 39, Iss. 3. P. 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
11. Prek M. “Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study” *Energy and Buildings*. 2004. Vol. 36 Iss. 10. P. 1021–1027. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.008>
12. *Posobie 2.91 k SNiP 2.04.05-91. Raschet postupleniia teploty solnechnoi radiatsii v pomeshcheniia*. Promstroyproekt. 1993.
13. Zynych P. L. *Ventyliatsiia hromadskykh budivel*. KNUBA. 2002,
14. *Budivelna klimatolohiia*. DSTU-N B V.1.1-27:2010. Minrehionbud, 2011.
15. *Srednii mesiachnyi uroven solnechnoi radiatsii v gorodakh Ukrainy*. URL: <https://www.atmosfera.ua/ru/stati-geliosistemy/solar-insulation-ukraine/>
16. Moskvitina A. S., Shyshyna M. O. “Doslidzhennia polia temperatur u prymishchenni pry roboti system kondytsionuvannia pry zminnykh teplovykh navantazhenniakh prymishchennia.” *Molodyy vchenyy*. 2020. №3.
17. *Pogoda v Kieve*. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/ukraine/kyiv/>
18. Barkalov B. V., Pavlov N. N., Amyrdzhanov S. S. i dr. *Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroistva. V 3 ch. Ch.3. Ventyliatsiia i konditsionirovanie vozdukha. Kn. 2*. Pod red. N. N. Pavlova i Yu. I. Shillera. Stroiizdat, 1992.
19. *Informatsiia pro vuhilnu produktsiiu*. URL: <https://data.gov.ua/dataset/19a376c7-90a3-40d2-a9da-2df2c354646e/resource/28ebc80a-d156-4721-9598-e2be45481acd>

2df2c354646e/resource/28ebc80a-d156-4721-9598-e2be45481acd

20. *Podatkovyi kodeks Ukrainy* vid 02.12.2010 №2755-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>

21. Pan Y, Zhou H, Huang Z, Zeng Y, Long W. "Measurement and simulation of indoor air-quality and energy consumption in two Shanghai office buildings with Variable-Air-Volume systems". *Energy Build*, 2003. Vol. 35. p. 77–91.

22. Kapalo P., Spodyniuk N. "Effect of the variable air volume on energy consumption – case study". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 415. p. 012-027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/415/1/012027>

23. Hassan N., Javed S. "Comparative life-cycle assessment of constant air volume, variable air volume and active climate beam systems for a Swedish office building". *From Energy crisis to sustainable indoor climate – 40 years of AIVC. Proceedings. Het Pand, Ghent, Belgium, 15-16 October 2019*. p. 627-636.

24. Mehmet Azmi Aktacir, Orhan Büyükalaca, Tuncay Yılmaz. "Life-cycle cost analysis for constant-air-volume and variable-air-volume air-conditioning systems". *Applied Energy*, 2006. Vol. 83. Iss. 6. p. 606–627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.002>

25. Dzhedzhula V. V. "Systemy ventylyatsiyi zi zminnoyu vytratoyu povitrya: osoblyvosti proektuvannya ta ekspluatatsiyi". *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktсии v budivnytstvi*. 2017. № 1. P. 106-111.

УДК 697.91

Технико-экономическое и экологическое обоснование использования систем с переменным расходом воздуха для административных зданий

А.С. Москвитина¹, М.О. Шишина², М.С. Корчминский³

²асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

³асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

¹магистр каф. ТГСйВ. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, mykolaworkdes@gmail.com. Менеджер проектов ЧАО "Вентиляционные системы".

Аннотация. Использование энергии в зданиях может влиять на глобальный спрос на энергию и окружающую среду. Среди всех строительных систем отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха является наиболее энергозатратными с точки зрения их общей потребности в энергии. Производство и эксплуатация систем формирования микроклимата оказывают существенное влияние на окружающую среду. Эти системы также являются одними из крупнейших потребителей природных ресурсов и материалов в строительном секторе. Количество устанавливаемых систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха резко возросло за последние несколько лет. Это главным образом вызвано повышением требований к тепловой энергии, комфорту и изменению климата. Постоянный рост внимания к потреблению энергии и топлива порождает вопрос, какие системы формирования микроклимата имеют лучшие экологические показатели. В этой работе выполнено сравнение двух систем кондиционирования воздуха: с постоянным расходом воздуха (Constant Air Volume - CAV) и с переменным расходом воздуха (Variable Air Volume - VAV). Определены выбросы вредных веществ в окружающую среду при обеспечении работы этих двух систем.

Ключевые слова: система с постоянным расходом воздуха, система с переменным расходом воздуха, система кондиционирования, система вентиляции, теплоступления, тепловая нагрузка на систему вентиляции и кондиционирования воздуха.

UDC 697.91

Feasibility study for the use of variable air volume systems for office buildings

A. Moskvitina¹, M. Shyshyna², M. Korchminskyi³

¹ Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

² Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662¹

³ Masters degree, dep. HGSV. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,
mykolaworkdes@gmail.com, Project Manager. Ventilation System, PrJSC.

Abstract. The main factor contributing to greenhouse gas emissions is the building up of the surrounding area. Studies have shown that buildings globally consume 30-40 % of energy use and release 40-50 % of global carbon dioxide emissions. Among all systems in houses, heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems are by far the most energy intensive. They consume approximately 50 % of the total energy demand of buildings. However, the systems are some of the most important systems in today's buildings. The number of these systems that are being installed has increased dramatically over the past few years. This is mainly due to the increasing demands for thermal energy, comfort and climate change. This paper presents a feasibility and ecology study between two ventilation or air-conditioning systems: constant air volume (CAV) and variable air volume (VAV). One of the purposes of this work is to determine the energy costs for each of the systems. An air conditioning system that saves operating costs usually requires a large initial investment. In this case, engineers must decide whether it is worth paying the additional upfront costs for a system that has lower operating costs. Despite the low attractiveness from the point of view of the investor, the VAV systems reduce the amount of greenhouse gas emissions and the amount of energy resources for servicing the commercial sector. Such system have less metal consumption. Thus, the cost of metal processing is also reduced. The results of this study can contribute to the future selection of ventilation systems, as well as contribute to the design and improvement of the systems under study. Energy saving is one of the main reasons why VAV systems are very popular today for the design of ventilation and air conditioning systems for office buildings and in many industries abroad. With these systems, the volume of transported air is reduced as soon as the operating load falls below the maximum projected load. The calculation of emissions of harmful substances into the environment was made while ensuring the operation of CAV and VAV systems.

Keywords: constant air volume system, variable air volume system, air conditioning system, ventilation system, heat input, heat load on ventilation and air conditioning system.

Надійшла до редакції / Received 20.12.2020