

УДК 622.741.3.022;622.7;620.133

доцент. **Богдан Гулай**,

bogdan.i.gulai@lpnu.ua, **ORCID:** 0000-0001-6951-6994,

аспірант **Олег Кузь**,

oleh.f.kuz@lpnu.ua, **ORCID:** 0009-0007-5235-2517,

аспірант **Володимир Бундзило**,

volodymyr.p.bundzylo@lpnu.ua, **ORCID:** 0009-0005-4256-4191,

Національний Університет «Львівська політехніка»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ

***Анотація.** Дана стаття присвячена дослідженню децентралізованих припливно-витяжних систем вентиляції (ДПВСВ) із рекуперацією теплоти, які є важливим елементом для забезпечення енергоефективного повітрообміну в сучасних герметичних будівлях. Вивчено проблематику природної вентиляції, яка в сучасних умовах не може забезпечити належний рівень повітрообміну без втрат теплоти, особливо взимку та влітку, і підведено до обґрунтування ефективності механічних систем вентиляції. Проведено порівняння централізованих та децентралізованих систем, підкреслюючи переваги останніх у простоті монтування, економії простору та можливості встановлення в уже відремонтованих приміщеннях. У роботі аналізуються три зразки ДПВСВ, оснащені мідними теплообмінниками, що забезпечують високу теплопередачу. Основна мета дослідження — виявлення сильних та слабких сторін наявних пристроїв і розроблення рекомендацій для їх удосконалення, враховуючи кліматичні особливості регіонів України та Європи. Дослідження підтверджує ефективність протиточних систем, що працюють на одночасний приплив і витяжку, як оптимальних рішень для енергоефективного підтримання комфортного мікроклімату.*

Ключові слова: децентралізовані системи вентиляції; рекуператор; енергозбереження; якість повітря; повітрообмін.

Вступ. Сьогодні люди проводять значну частину часу в закритих приміщеннях, тому якість повітря всередині приміщень суттєво впливає на їхнє здоров'я. Проте за останні двадцять років цей показник погіршився. Основна причина полягає в зростанні вимог до енергозбереження та підвищенні енергоефективності, через що будівлі стали значно герметичнішими. Як наслідок, природного повітрообміну стає недостатньо для забезпечення оптимальної вентиляції. Це підвищило актуальність розробки енергоефективних припливно-витяжних вентиляційних систем для будівель. Одним із можливих рішень є створення і впровадження децентралізованих

припливно-витяжних систем вентиляції (ДПВСВ) з використанням рекуперативних або регенеративних теплообмінників.

Тому випробування існуючих децентралізованих вентиляційних пристроїв, виявлення сильних і слабких їх сторін та розробка рекомендацій для виробництва нового енергозберігаючого регенеративного теплообмінника з урахуванням кліматичних умов регіонів України та Європи є важливим і актуальним завданням, оскільки такі пристрої формують ключову роль у забезпеченні енергоефективності будівель та покращенні якості повітря в умовах сучасної екології.

Актуальність дослідження. Актуальність даного дослідження обумовлена перевагами децентралізованих систем вентиляції, які дозволяють ефективно вирішувати питання повітрообміну в умовах сучасного будівництва та експлуатації будівель [1]. Основними перевагами є їх відносно невисока вартість, що робить такі системи доступнішими в порівнянні з централізованими установками. Крім того, компактність децентралізованих систем дозволяє мінімізувати необхідний простір для їх монтажу, оскільки не потребує використання повітропроводів, решіток та інших фасонних елементів мережі повітропроводів. Важливою перевагою також є можливість встановлення в будівлях з уже завершеним ремонтом, оскільки такі системи не вимагають суттєвих змін у конструкції чи дизайні приміщень. Таким чином, децентралізовані системи вентиляції це один з варіантів для забезпечення вентиляювання приміщень.

Останні дослідження та публікації. Аналіз останніх публікацій охоплює різні аспекти використання децентралізованих систем вентиляції, дослідження їх ефективності та порівняння з іншими типами систем вентиляції, до прикладу, за способом створення тиску, призначенням, конструкцією тощо.

Природна вентиляція забезпечує повітрообмін за рахунок природних фізичних процесів — різниці температур та тиску всередині та зовні будівлі. Однак її ефективність суттєво змінюється залежно від пори року. Влітку, коли різниця температур між приміщенням і зовнішнім середовищем мінімальна, повітрообмін значно знижується, що часто призводить до зменшення необхідного повітрообміну. Взимку ж, навпаки, різка різниця температур збільшує інтенсивність вентиляції, що призводить до надмірних тепловтрат і підвищення витрат на опалення [2].

Коливання ефективності природної вентиляції створює додаткове навантаження на інші системи вентиляції, особливо в герметичних приміщеннях, які потребують стабільного повітрообміну для підтримки здорового мікроклімату. У таких умовах природна вентиляція не здатна забезпечити належний рівень контролю за якістю повітря, особливо в сучасних

будівлях з високим рівнем енергоефективності[3].

Ці недоліки роблять механічні системи вентиляції, особливо децентралізовані, більш ефективним рішенням, оскільки вони забезпечують стабільний і контрольований повітрообмін незалежно від зовнішніх умов, підтримуючи як комфорт, так і енергоефективність приміщення.

Існують два основні типи механічних систем вентиляції: централізовані та децентралізовані. Централізовані системи вентиляції є складними й багатокомпонентними інженерними рішеннями. Їх монтаж займає значний час і вимагає великої кількості додаткових елементів, таких як повітропроводи, анемостати, дефлектори, решітки, перехідники, кабельно-провідникова продукція та кріпильні елементи, що значно підвищує загальну вартість проекту та монтажних робіт [4]. Оскільки повітропроводи з часом накопичують пил, їх обслуговування є досить трудомістким і потребує регулярного втручання для забезпечення чистоти та належної роботи. У житлових приміщеннях повітропроводи централізованої вентиляції зазвичай монтує у конструкціях стелі, що часто призводить до необхідності ремонтних робіт після їх встановлення та заниження конструкції стель. У випадку поломки вентиляційного блоку потрібне залучення спеціаліста для відключення вентиляційної системи від повітропроводів, що створює додаткові витрати для користувача.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є удосконалення конструкції децентралізованих систем вентиляції шляхом попереднього аналізу на основі досліджень температурного коефіцієнта ефективності наявних децентралізованих вентиляційних пристроїв, виявлення сильних і слабких сторін представлених систем, створення рекомендацій для виробників даних систем з урахуванням кліматичних умов регіонів України, а також, визначення напрямку подальших досліджень.

Основна частина. У сучасних забудованих середовищах більшість новозбудованих або модернізованих будівель обладнані повною або частковою механічною вентиляційною системою: від гібридних варіантів і повноцінних припливно-витяжних систем до локальних персоналізованих рішень вентиляції. Вентиляційні системи мають ключове значення для підтримки належної якості повітря в приміщенні та енергоефективності будівель. Сучасний підхід до проектування, особливо в розвинених країнах, значною мірою залежить від механічних систем вентиляції, щоб поліпшити якість внутрішнього повітря при мінімальних енергетичних втратах. У добре ізольованих будівлях, розташованих у регіонах із помірним кліматом, наприклад у Європі чи Україні, комбінація інфільтрації та вентиляції може становити близько 50% загальних втрат теплоти. Дослідження [5] показали, що впровадження енергоефективних

заходів, таких як системи утилізації теплоти, підвищення рівня теплоізоляції та оптимізація режимів роботи, дозволяє зменшити енергоспоживання приблизно на 50% як на опалення, так і на охолодження. Ці заходи не тільки сприяють енергозбереженню, але й відповідають підвищеному попиту на тепловий комфорт, що є важливим у процесах модернізації та реконструкції будівель. Таким чином, системи механічної вентиляції з утилізацією теплоти є однією з ключових стратегій для оптимізації енергоспоживання і забезпечення високої якості внутрішнього середовища, особливо в добре ізольованих будівлях, де теплові втрати через природну вентиляцію є істотною проблемою [6].

Найбільш ефективними серед систем механічної вентиляції вважаються ДПВСВ з рекуператорами протиточного типу, які оснащені двома вентиляторами та забезпечують одночасний приплив і витяжку повітря (рис. 1). Така конструкція дозволяє досягти високого рівня енергоефективності, оскільки припливне повітря нагрівається або охолоджується за рахунок відпрацьованого, мінімізуючи тепловтрати, та, водночас, має сталу ефективність порівняно з системами реверсивного типу. Системи, розглянуті в даній статті, оснащені теплообмінниками з однакового матеріалу — міді.

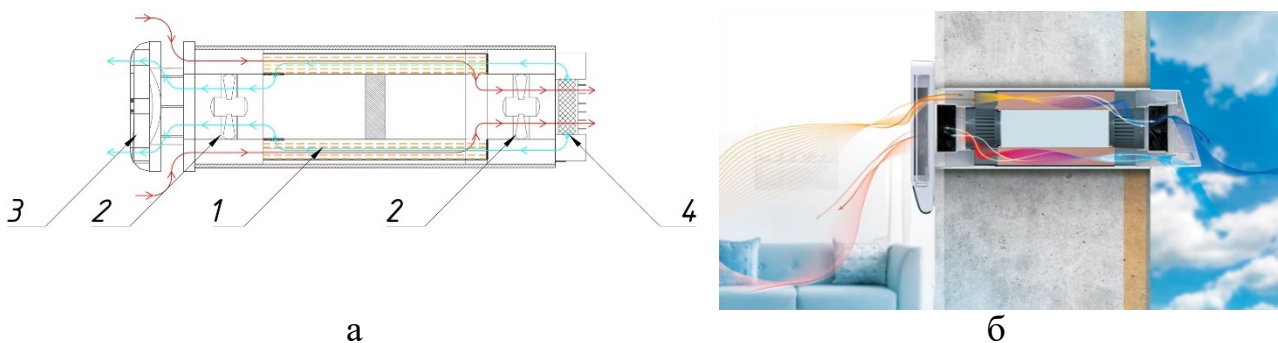


Рис. 1. ДПВСВ протиточного типу:

а – принципова схема ДПВСВ протиточного типу на основі конструкції

«Прана-150 Стандарт»:

1 – теплообмінник; 2 – вентилятори; 3 – решітка витоку та забору повітря з приміщення; 4 – решітка витоку та забору повітря з зовні;

б – принцип дії ДПВСВ протиточного типу на основі конструкції

«Вентс Брізі 160-Е Сمارт»

Методика випробувань. Випробування проведено на випробувальному стенді (рис. 2), що складається з двох окремих приміщень, розділених між собою перегородкою, в яких підтримуються різні параметри мікроклімату.

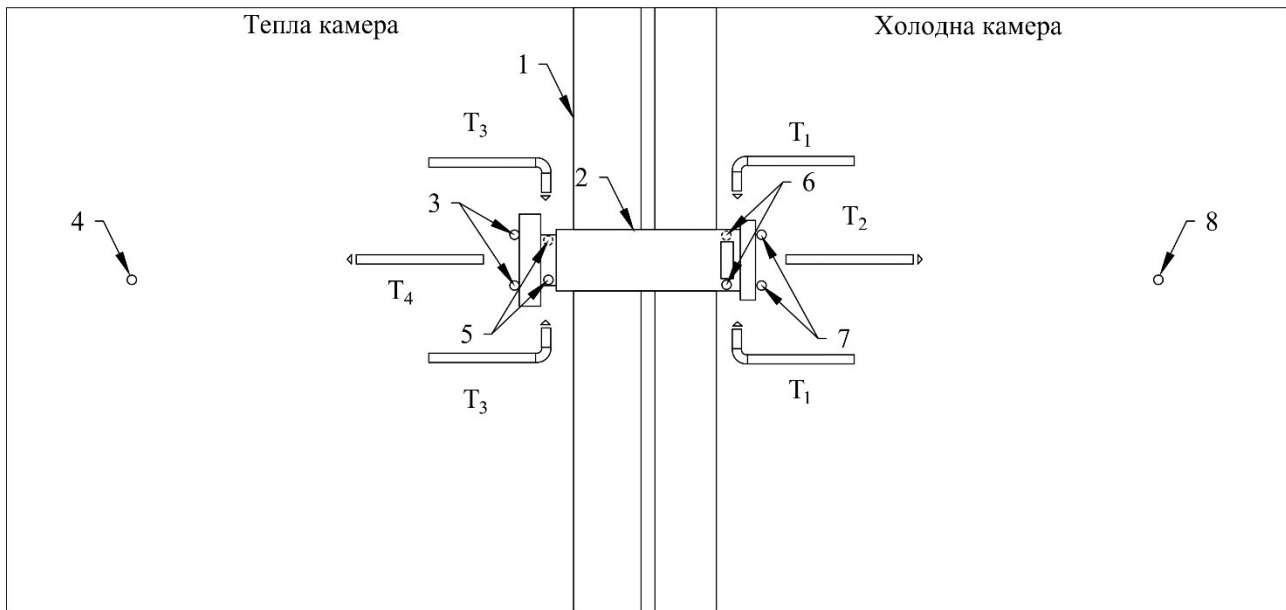


Рис. 2. Схема експериментальної установки:

- 1 – перегородка; 2 – ДПВСВ; 3 – датчики температури припливного повітря після рекуперації T_4 ; 4 – датчик температури та вологості повітря в теплій камері; 5 – датчики температури витяжного повітря до рекуперації T_3 ; 6 – датчики температури припливного повітря до рекуперації T_1 ; 7 – датчики температури витяжного повітря після рекуперації T_2 ; 8 – датчик температури та вологості повітря в «холодній» камері

Дослідження проведено для трьох зразків ДПВСВ: «Прана-150 Стандарт», Кліматронік 160 Бейсік» та «Вентс Брізі 160-Е Сمارт» (рис. 3-5), що містили усі компоненти та були встановлені згідно паспортів та інструкцій виробника [7-9].

Масові витрати повітря вимірювались в стаціонарних умовах одночасно. Дослідження проводились при напрузі 230 В, яка підтримувалась стабілізаторами напруги протягом усього часу експерименту.

Основною метою даних досліджень є визначення ефективності в однакових умовах тестування при мінімальній, середній та максимальній витраті повітря згідно з даними в технічних паспортах приладів.

Ефективність утилізації теплоти визначається температурним коефіцієнтом ефективності, %,

$$\eta = (T_4 - T_1) / (T_3 - T_1) \times 100 \quad (1)$$

де T_1 і T_4 – температури припливного повітря, відповідно, до та після рекуперації, К, а T_3 – початкова температура витяжного повітря, К.

При виконанні даної роботи випробування ДПВСВ проводилися в близьких до натурних умов (табл. 1).



Рис.3. Процес дослідження ДПВСВ «Вентс Брізі 160-Е Смарт»



Рис.4. Процес дослідження ДПВСВ «Кліматронік 160 Бейсік»



Рис.5. Процес дослідження ДПВСВ «Прана 150 Еко Лайф»

Таблиця 1. Опалювальні та охолоджувальні прилади

Обладнання	Приміщення	
	«Тепла» камера	«Холодна» камера
Охолодження	Кондиціонер Cooper&Hunter CH-S12FTXF2-NG	Холодильний агрегат Bitzer AA-BK-64/2EES-3Y
	-	Охолоджувач повітря Eco GCE 312F8 ED
Нагрівання	Конвекторний нагрівач Noveen CH9000 LCD SMART	-

Усі вимірювання виконувалися за допомогою набору вимірювального обладнання (табл. 2), приєднаного до пристрою реєстрації даних. Параметри температурно-вологісного режиму наведено в табл. 3.

Таблиця 2. Вимірювальні прилади

Вимірювана змінна	Вимірювальний прилад
Температура сухого термометра	Резистивні датчики температури PT 100
Температура мокрого термометра	Цифровий датчик температури, вологості та атмосферного тиску
Різниця статичного тиску	П'єзорезистивний датчик тиску
Відносна вологість повітря	Цифровий датчик температури, вологості та атмосферного тиску
Управління даними	Система збору даних
Споживання електроенергії	Ватметр амперметр вольтметр Intertek 3680W

Таблиця 3. Параметри температурно-вологісного режиму

Параметри	Приміщення	
	«Тепла» камера	«Холодна» камера
Температура, °C	19-21	6-8
Вологість, %	45-55	65-75

Забезпечення температури внутрішнього повітря в теплій та холодній камерах приймається згідно ДСТУ EN 13141-8:2019 «Вентиляція в будівлях. Випробування експлуатаційних характеристик компонентів/виробів для вентиляції житлових приміщень. Частина 8. Випробування експлуатаційних

характеристик неканальних установок припливно-витяжної вентиляції (охоплюючи регенерацію тепла) для систем вентиляції з механічною спонудою, призначених для окремої кімнати» [10].

На основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень (табл. 4) було побудовано графічну залежність температурного коефіцієнта ефективності ДПВСВ від зміни витрат повітря (рис. 6).

Таблиця 4. Результати досліджень ДПВСВ

Параметр	Позначення	Од.виміру	Значення показників для ДПВСВ		
			Вентс Брізі 160-Е Смарт	Кліматронік 160 Бейсік	Прана 150 Еко Лайф
Температурний коефіцієнт ефективності	η	%	78-56	89-53	88-52
Споживання*	N	Вт*год	4,4-9,2	3,4-22,5	3,2-15,6
Витрата повітря**(згідно паспорту виробника)	L	м ³ /год	15-57	20-70	5-52

* – споживання електроенергії вказано згідно з замірами при проведенні досліджень;

** – витрата повітря вказана в діапазоні проведення замірів, без врахування максимальної витрати повітря (режиму boost).

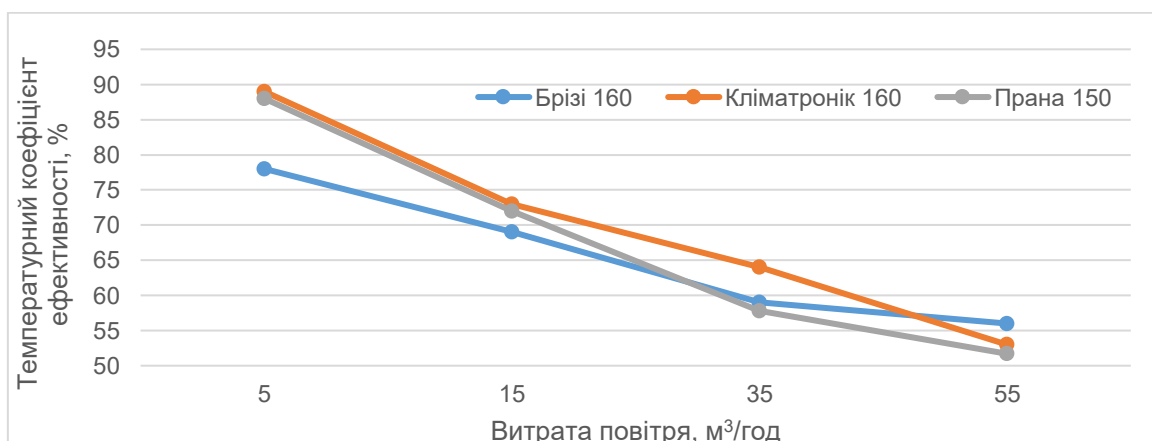


Рис. 6. Ефективність децентралізованих припливно-витяжних систем вентиляції (ДПВСВ) із рекуперацією тепла

Як показує аналіз отриманих результатів, ефективність досліджуваних ДПВСВ є досить схожою, так як у всіх моделей спостерігається зниження

ефективності зі збільшенням витрати повітря. Найвищу ефективність на всьому діапазоні витрат повітря, особливо при низькій його витраті, показала система «Кліматронік 160 Бейсік», тоді як найнижчу ефективність серед трьох моделей на кожному етапі зафіксовано для системи «Вентс Брізі 160-Е Смарт». Зі збільшенням витрати повітря до 55 м³/год температурний коефіцієнт ефективності всіх трьох моделей наближається до 60-65%, вирівнюючи розбіжності між ними.

Висновки. У статті представлені результати досліджень ефективності децентралізованих систем вентиляції з рекуперацією теплоти. Особлива увага приділялась забезпеченню однакових умов проведення експериментів, включаючи параметри мікроклімату «теплої» та «холодної» камер. На основі проведених досліджень було отримано результати ефективності кожної з систем, які виявились досить близькими через використання теплообмінників з однакового матеріалу — міді.

Однак ефективність теплообмінника залежить не лише від матеріалу, але й від багатьох інших факторів: товщини матеріалу, площі поверхні теплообміну, аеродинамічних характеристик потоків повітря, балансу припливного та витяжного повітря тощо. У ході тестувань також було визначено потребу в підвищенні герметичності систем, що потенційно може покращити їхню ефективність.

Дослідження встановили, що одна з систем продемонструвала найвищий температурний коефіцієнт ефективності. Однак в процесі досліджень встановлено, що витрата витяжного повітря перевищувала витрату припливного повітря, що вплинуло на результати. Це вказує на необхідність у подальшому більш точно визначати реальні витрати припливного та витяжного повітря крізь систему для кожного пристрою.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції децентралізованих вентиляційних систем з рекуперацією, їх інтеграції з природними або механічними системами вентиляції, а також для розробки рекомендацій виробникам. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення теплообмінників, зокрема щодо їх конструктивних характеристик, та адаптацію систем до специфічних кліматичних умов різних регіонів.

Перспективи подальших досліджень. Після проведення тестувань та аналізу результатів, сформовано напрямки та перспективи подальших досліджень, що допоможуть краще визначити детальну проблематику конструкцій даних ДПВСВ та сформувані кроки їх оптимізації. Першочерговим наступними дослідженнями є визначення реальних витрат повітря кожної із ДПВСВ, і, якщо, результати будуть відрізнятись від даних, що вказані в

технічному паспорті, необхідно провести повторні тестування ефективності при однакових витратах повітря та балансі повітряних мас припливного та витяжного повітря. Після цього, перспективою подальших досліджень є тестування при змінах тиску в кожній з камер та отримання повторних результатів.

References

1. Mansurov R. Sh., Mansurov A. R., Rafalska T.A. “Enerhozberihaiuchi tekhnolohii ventyliatsii zhylykh budivel iz zastosuvanniam detsentralizovanykh rekuperatoriv.” Enerho- ta resursoefektyvnist malopoverkhovykh zhytlovykh budivel, 2017, pp. 142-151. (in Russian)
2. Kuz O. F., Hulai B. I. “Suchasni tendentsii rozvytku detsentralizovanykh system ventyliatsii.” Tradytsii ta novi naukovi stratehii u Tsentralnii ta Skhidnii Yevropi. Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 28–29 chervnia 2024 r., Kyiv, HO «Instytut innovatsiinoi osvity», Naukovo-navchalnyi tsentr prykladnoi informatyky NAN Ukrainy. Zaporizhzhia : AA Tandem, 2024, pp. 76-88. (in Ukrainian)
3. Zhukovskyi S. “Efektyvnist hravitatsiinoi ventyliatsii prymishchen.” Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, Iss.17, no.7, 2007, pp. 142–147. (in Ukrainian)
4. Merzkirch A. et al. “Field tests of centralized and decentralized ventilation units in residential buildings – Specific fan power, heat recovery efficiency, shortcuts and volume flow unbalances.” Energy and Buildings, vol. 116., 2016, pp. 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.008>.
5. Buyak N. et al. “Dynamic interdependence of comfortable thermal conditions and energy efficiency increase in a nursery school building for heating and cooling period.” Energy Elsevier, vol. 283. 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129076>
6. Savin V., Zhelykh V. “Recuperators as an important element for energy efficiency in building ventilation systems.” Construction of Optimized Energy Potential, vol. 12, no. 1, 2023, pp. 71-78. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.08>**Помилка! Неприпустимий об’єкт гіперпосилання.**
7. “Detsentralizovani pryplyvno-vytyazhni systemy ventyliatsii z rekuperatsiieiu tepla «Prana»: Tekhnichniy pasport prykladu modelei Prana-150, Prana-200G, Prana-200C.” <https://prana.ua/products-cat/recuperators/>. (in Ukrainian)
8. “Detsentralizovani pryplyvno-vytyazhni systemy ventyliatsii z rekuperatsiieiu tepla «Venst Brizi 160E»: Tekhnichniy pasport prykladu modelei «Brizi 160 E».” <https://vents-shop.com.ua/provitryuvach-vents-breezy-160-e/>. (in Ukrainian)

9. “Detsentralizovani pryplyvno-vytiazhni systemy ventyliatsii z rekuperatsiieiu tepla «Klimatronik 160 Beisik»: Tekhnichniy pasport prykladu modelei «Klimatronik 160 Beisik».” <https://klimatronik.com.ua/> (in Ukrainian)

10. DSTU EN 13141-8:2019. “Ventyliatsiia v budivliakh. Vyprobuvannia ekspluatatsiinykh kharakterystyk komponentiv/vyrobiv dlia ventyliatsii zhytlovykh pry-mishchen. Chastyna 8. Vyprobuvannia ekspluatatsiinykh kharakterystyk nekanalnykh ustanovok pryplyvno-vytiazhnoi ventyliatsii (okhopliuiuchy reheneratsiiu tepla) dlia system ventyliatsii z mekhanichnoiu sponukoio, pryznachenykh dlia okremoi kimnatty” (EN 13141-8:2014, IDT). Chynnyi vid 2020-01-01. (in Ukrainian)

UDC 622.741.3.022;622.7;620.133

Associate Professor **Bohdan Hulai**,

bogdan.i.gulai@lpnu.ua, [ORCID: 0000-0001-6951-6994](#),

Postgraduate **Oleh Kuz**,

oleh.f.kuz@lpnu.ua, [ORCID: 0009-0007-5235-2517](#),

Postgraduate **Volodymyr Bundzylo**,

volodymyr.p.bundzylo@lpnu.ua, [ORCID: 0009-0005-4256-4191](#),

Lviv Polytechnic National University

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DECENTRALIZED VENTILATION SYSTEMS WITH HEAT RECOVERY

Abstract. *This article is devoted to studying of decentralized supply-exhaust ventilation systems (DSEVS) with heat recovery, which are an important element for ensuring energy-efficient air exchange in modern hermetic buildings. The problems of natural ventilation, which in modern conditions cannot provide an adequate level of air exchange without heat loss, especially in winter and summer, have been studied, and the effectiveness of mechanical ventilation systems has been substantiated. A comparison of centralized and decentralized systems is made, highlighting the advantages of decentralized systems in terms of ease of installation, space saving and the possibility of installation in already renovated premises. In the work, three samples of DSEVS equipped with copper heat exchangers, which provide high heat transfer, were analysed. The main goal of the study was to identify the strengths and weaknesses of the existing devices and develop recommendations for their improvement, taking into account the climatic features of the regions of Ukraine and Europe. On the basis of the conducted research, the results of the efficiency of each of the systems, which are sufficiently close to each other, were obtained. This, accordingly, was expected, since the heat exchangers of these systems are made of the same material - copper. During the tests, the need for better tightness of each of the*

systems was determined, which can improve the results of their efficiency in the future. At the same time, the results of these studies may vary depending on the determination of the real air consumption of each of the devices, as well as the mass balance of the supply and exhaust air flows, which may differ. The study confirms the effectiveness of countercurrent systems working on simultaneous inflow and extraction as optimal solutions for maintaining a comfortable and energy-efficient microclimate. The obtained results can be directed to the optimization of the design of the DSEVS and the possibility of operation of such systems in combination with natural or other mechanical ventilation systems.

Keywords: decentralized ventilation systems; recuperator; energy saving; air quality; air exchange