

УДК 697.9:620.9:628.8

к.т.н., доц. **Анна Москвітін**,

moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646,

PhD, доц. **Дар'я Вакуленко**,

vakulenko_di@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2960-9659,

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.76-93>

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ РЕВЕРСИВНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КЛАСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ТА ЗМЕНШЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ

***Анотація.** В умовах зростання вимог до енергоефективності будівель, особливо житлових, все більшої актуальності набувають інноваційні рішення у сфері вентиляції, які поєднують якісне забезпечення повітрообміну з мінімальними втратами теплоти та зниженням експлуатаційних витрат. Одним із перспективних напрямів розвитку сучасних інженерних систем є використання децентралізованих реверсивних вентиляційних пристроїв з регенерацією теплоти, зокрема стінових провітрювачів типу TwinFresh, виробництва компанії Vents, Україна. Такі пристрої забезпечують ефективний повітрообмін у приміщеннях без необхідності влаштування розгалужених повітропроводів, що робить їх особливо зручними для застосування у житловому секторі. Основними перевагами децентралізованих реверсивних провітрювачів є компактність, простота монтування та обслуговування, висока енергоощадність та значна ефективність утилізації теплоти, що дозволяє суттєво скоротити теплові втрати під час вентиляції приміщень у холодний період року. Крім того, застосування таких систем позитивно впливає на мікроклімат житлових будівель, підвищуючи комфорт проживання та знижуючи ризики появи надмірної вологості й утворення конденсату. У статті розглянуто техніко-економічну доцільність упровадження реверсивних вентиляційних пристроїв із регенерацією теплоти в умовах новобудов та під час термореновації наявного житлового фонду. Наведено аналіз енергетичної ефективності, показників зниження споживання теплової енергії та можливого скорочення витрат на опалення. Особливу увагу приділено оцінюванню економічних показників, строків окупності інвестицій та перспектив інтегрування таких систем у сучасні стандарти енергоефективного будівництва. Таким чином, результати дослідження підтверджують, що децентралізовані реверсивні пристрої з регенерацією теплоти є ефективним інженерним рішенням, яке поєднує високий рівень*

енергоефективності з комфортними умовами проживання, і можуть стати важливим інструментом у реалізації програм підвищення енергоефективності житлового сектору.

Ключові слова: регенеративні реверсивні пристрої; енергоефективність; термореновація; регенерація теплоти; термомодернізація; техніко-економічний аналіз; децентралізована вентиляція.

Вступ. В Україні на законодавчому рівні продовжується посилення вимог щодо енергоефективності будівель. Відповідно до наказу Міністерства розвитку громад та територій № 168 від 6 лютого 2025 р. «Вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» клас енергоефективності новобудов має відповідати рівню «А», а будівель, що реконструюються – класу «В». При цьому згідно з чинним ДБН В.2.2-15-2019 "Житлові будинки. Основні положення" клас енергоефективності житлової будівлі має бути не нижче ніж «С» [1]. Впровадження у законодавчу та нормативну базу вимог до підвищення енергоефективності об'єктів житлово-комунального господарства є інструментом впливу на зниження споживання ресурсів та зменшення енергетичної залежності держави [2, 3]. Це створює необхідність застосування сучасних енергоефективних інженерних рішень, які забезпечують оптимальну організацію повітрообміну, утилізацію теплоти та залучення додаткових джерел енергії [4-9]. Також, згідно з вимогами [10] та [11] необхідно підвищувати клас енергетичної ефективності систем автоматизації, моніторингу та управління систем опалення, вентиляції та охолодження.

На практиці більшість житлових будинків економ-, комфорт- та бізнес-класів оснащуються природною вентиляцією або механічною витяжною системою з неорганізованим природним припливом зовнішнього повітря [12-17]. Така вентиляція характеризується підвищеним навантаженням на системи опалення та охолодження через необхідність підігрівання або охолодження зовнішнього повітря, відсутністю ефективного використання теплоти витяжного повітря, нерегульованим повітрообміном, який залежить від зовнішніх метеоумов та забруднення, а також недостатнім очищенням припливного повітря [18-23]. При цьому неможливо зробити вентиляцію відповідно до потреб або забрудненості повітря, що могло би підвищити енергетичну ефективність системи управління та зменшує експлуатаційні затрати на роботу системи вентиляції [24-27].

Особливо складним є забезпечення ефективної природної вентиляції у щільній міській забудові, де забруднення повітря та температурні градієнти суттєво погіршують внутрішні умови в будівлях [28-30]. Дослідження показують, що ці фактори знижують ефективність природної вентиляції та

внутрішній комфорт [31 - 36].

Сучасні дослідження та досвід практичного впровадження свідчать про перспективність застосування децентралізованих реверсивних регенеративних вентиляційних пристроїв, які забезпечують стабільний повітрообмін незалежно від зовнішніх умов та дозволяють ефективно використовувати теплоту витяжного повітря [37-39]. Такі рішення підвищують енергоефективність і комфорт житлових будівель, що є ключовим для дотримання сучасних нормативних вимог. Також вони дозволяють зробити вентиляцію за потребою, тобто саме в зоні, де перебувають люди, при цьому зони без людей не обслуговуються.

Актуальність дослідження. Природна вентиляція не забезпечує необхідні умови комфортності, санітарно-гігієнічні вимоги та енергоефективні вимоги в приміщеннях [40]. Були проведені дослідження з підвищення енергетичної ефективності природних систем вентиляції, однак такі заходи не завжди можливо реалізувати, особливо в умовах висотної забудови та холодного клімату [41,42]. Використання систем вентиляції з утилізуванням теплоти витяжного повітря дозволяє досягнути вимог щодо класу енергетичної ефективності при новому будівництві та реконструкції житлових будівель. Регенеративні реверсивні пристрої децентралізованої вентиляції мають високий температурний коефіцієнт ефективності теплоутилізації, не потребують зменшення простору приміщень і значних капітальних витрат при встановленні.

Останні дослідження та публікації. У попередніх дослідженнях цих пристроїв [43, 44] мала місце проблема коректного вибору методики для визначення коефіцієнту тепловіддачі у тонких каналах реверсивного регенератора теплоти. Було проведено експериментальні дослідження і отримано авторську експериментальну формулу числа Нуссельта для тонких каналів перетином 3-8 мм [45]. На основі цієї формули було створено авторську програму у SciLab і проведено моделювання роботи регенеративного реверсивного пристрою та визначено його температурний коефіцієнт ефективності.

Формулювання цілей статті. Метою даної статті є висвітлення результатів техніко-економічного аналізу застосування регенеративних реверсивних пристроїв енергоефективної децентралізованої вентиляції у житловому будинку.

Основна частина. У даному дослідженні розглядається 10-поверховий житловий будинок на 40 квартир. Загальна площа та об'єм якого становлять відповідно 3255,1 м² та 9557,6 м³.

Розрахунки енергоспоживання будівлі виконано відповідно до вимог національного стандарту ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель».

Методи розрахунку енергетичних характеристик» [46], із урахуванням рекомендацій щодо визначення питомих витрат енергії, споживання первинної енергії та обсягів викидів парникових газів [10, 47]. Проєкт теплозахисної оболонки будівлі, систем опалення, гарячого водопостачання, приєднання систем до теплових мереж виконувався згідно з вимогами [1, 3, 10, 48, 49].

Для проведення аналізу енергоспоживання будівлі з середнім рівнем герметичності було сформовано сертифікат енергетичної ефективності будівлі із використанням програмного забезпечення Audytor OZC 7.0 Pro.

Розглядалися три варіанти систем вентиляції:

- природна вентиляція;
- механічна вентиляція із реверсивними регенеративними децентралізованими пристроями із великими комірками теплоутилізатора;
- механічна вентиляція із запропонованими удосконаленими реверсивними регенеративними децентралізованими пристроями з тонкими каналами теплоутилізатора.

У результаті проведеного аналізу побудовано гістограму розподілу втрат теплоти через огорожувальні конструкції (рис. 1), яка наочно демонструє відсоткове співвідношення тепловтрат за основними джерелами.

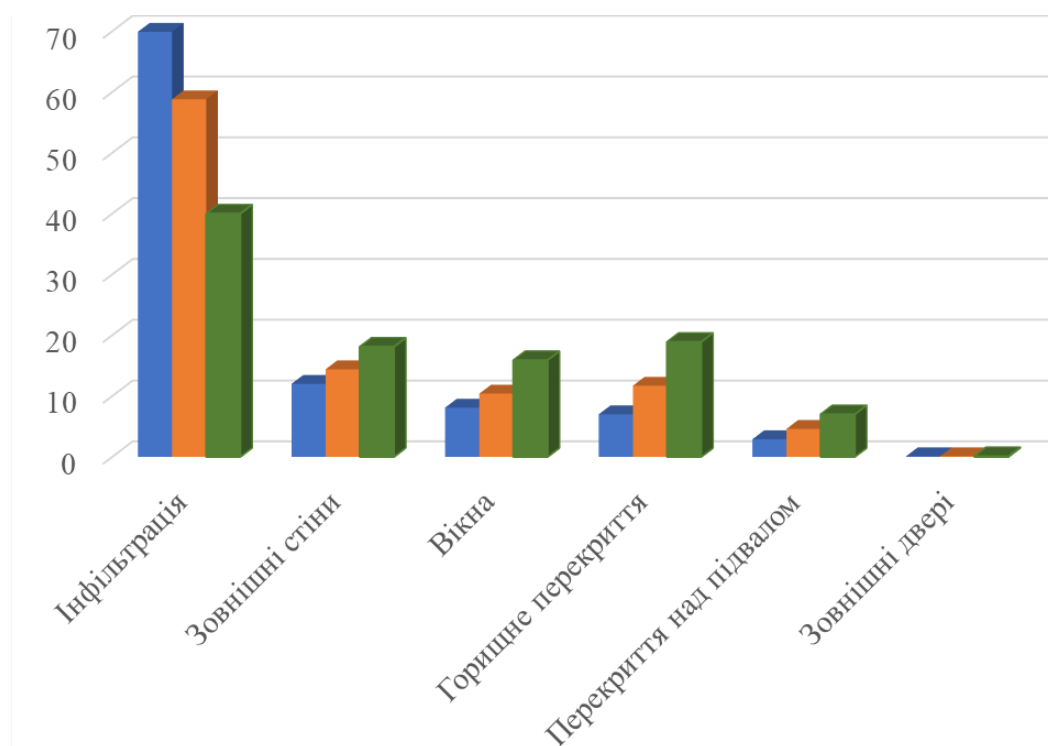


Рис. 1. Розподіл втрат теплоти через огорожувальні конструкції, %:
блакитний – природна вентиляція; помаранчевий – реверсивний регенератор з великими комірками; зелений – запропонований удосконалений реверсивний регенератор з тонкими каналами

Згідно з результатами моделювання, впровадження реверсивних регенеративних децентралізованих вентиляційних пристроїв дозволяє зменшити тепловтрати на підігрів припливного зовнішнього повітря від 11,1 % до 29,9 % залежно від типу пристрою (таблиця 1).

Таблиця 1

Розподіл тепловтрат будинку, %

Джерело тепловтрат	Природна вентиляція	Регенератор з великими комірками	Удосконалений реверсивний регенератор з тонкими каналами
Інфільтрація	69,9	58,8	40,0
Зовнішні стіни	12,0	14,4	18,1
Вікна	8,1	10,4	15,9
Горищне перекриття	7,0	11,7	18,9
Перекриття над підвалом	2,9	4,6	7,0
Зовнішні двері	0,1	0,1	0,1

Варто зазначити, що навіть за умови встановлення реверсивних регенеративних пристроїв, інфільтрація зовнішнього повітря через конструктивні нещільності (зокрема стики панелей, монтажні шви тощо) продовжує мати місце. Це зумовлює збереження певного рівня неконтрольованих тепловтрат, що впливає на загальний енергетичний баланс будівлі. Крім того, впровадження децентралізованої вентиляції змінює структуру тепловтрат, що проявляється у перерозподіленні відсоткових часток інших джерел втрат теплоти. Візуально спостерігається зростання частки втрат через огорожувальні конструкції, хоча їхнє абсолютне значення залишається незмінним. Зміни відбуваються винятково у відносному (процентному) вираженні.

Спостерігається зниження енергоспоживання системою опалення внаслідок зменшення тепловтрат на підігрівання припливного повітря (таблиця 2). Водночас з'являється додаткове енергоспоживання, пов'язане з роботою вентиляційної системи (рис. 2).

На рис. 3 наведено порівняльний аналіз змін структури відсоткового розподілу енергоспоживання між основними інженерними системами життєзабезпечення будівлі, зокрема системами опалення, вентиляції, гарячого водопостачання, охолодження та освітлення, у результаті впровадження різних типів вентиляційного обладнання та технологічних рішень.

Таблиця 2

Енергоспоживання систем життєзабезпечення будівлі

Вид енергоспоживання	Значення річного енергоспоживання, тис. кВт·год		
	Природна вентиляція	Регенератор з великими комірками	Удосконалений реверсивний регенератор з тонкими каналами
Опалення	192	130,1	53,17
Охолодження	21,49	21	21
ГВП	125,3	125,3	125,3
Вентиляція	0	4,7	4,7
Освітлення	48,03	48,03	48,03
Всього	386,82	329,13	252,2
Відповідний клас енергетичної ефективності будівлі	C	B	A

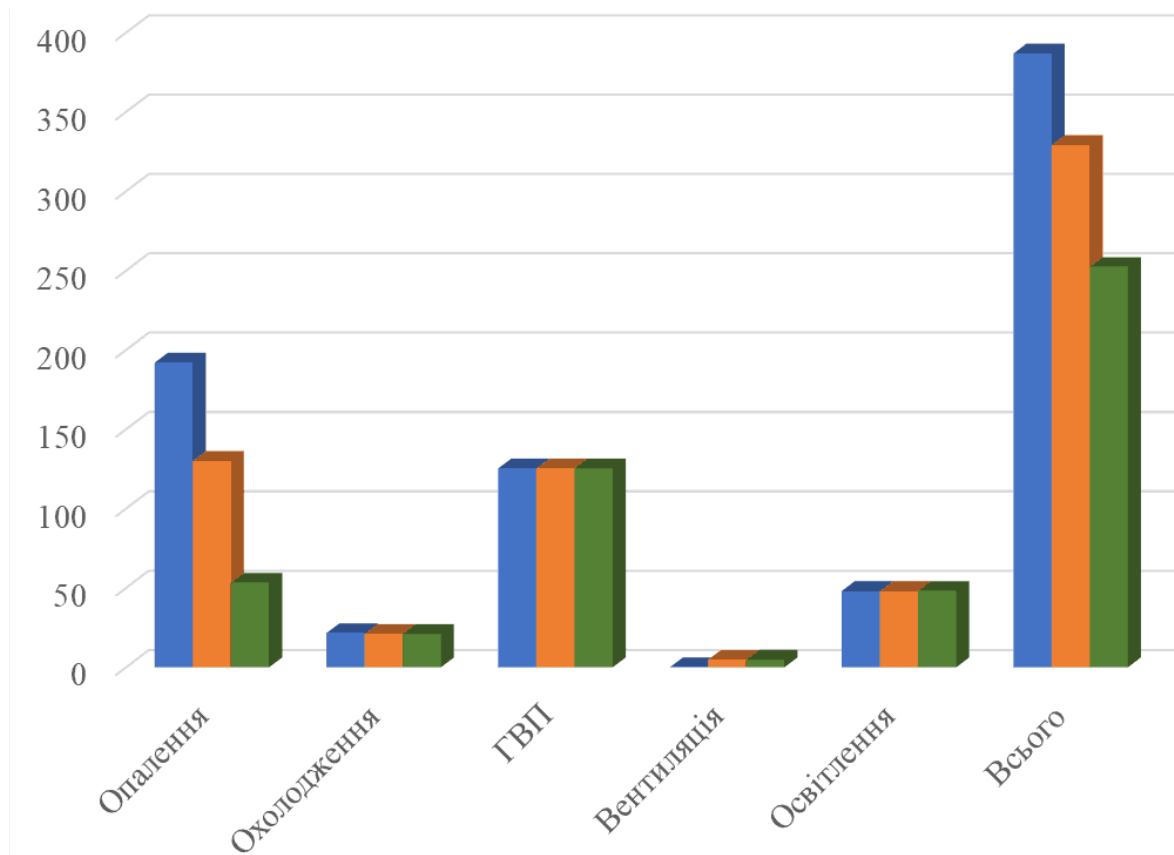


Рис. 2. Розподіл енергоспоживання, тис. кВт·год: блакитний – природна вентиляція; помаранчевий - регенератор з великими комірками; зелений - запропонований удосконалений реверсивний регенератор з тонкими каналами

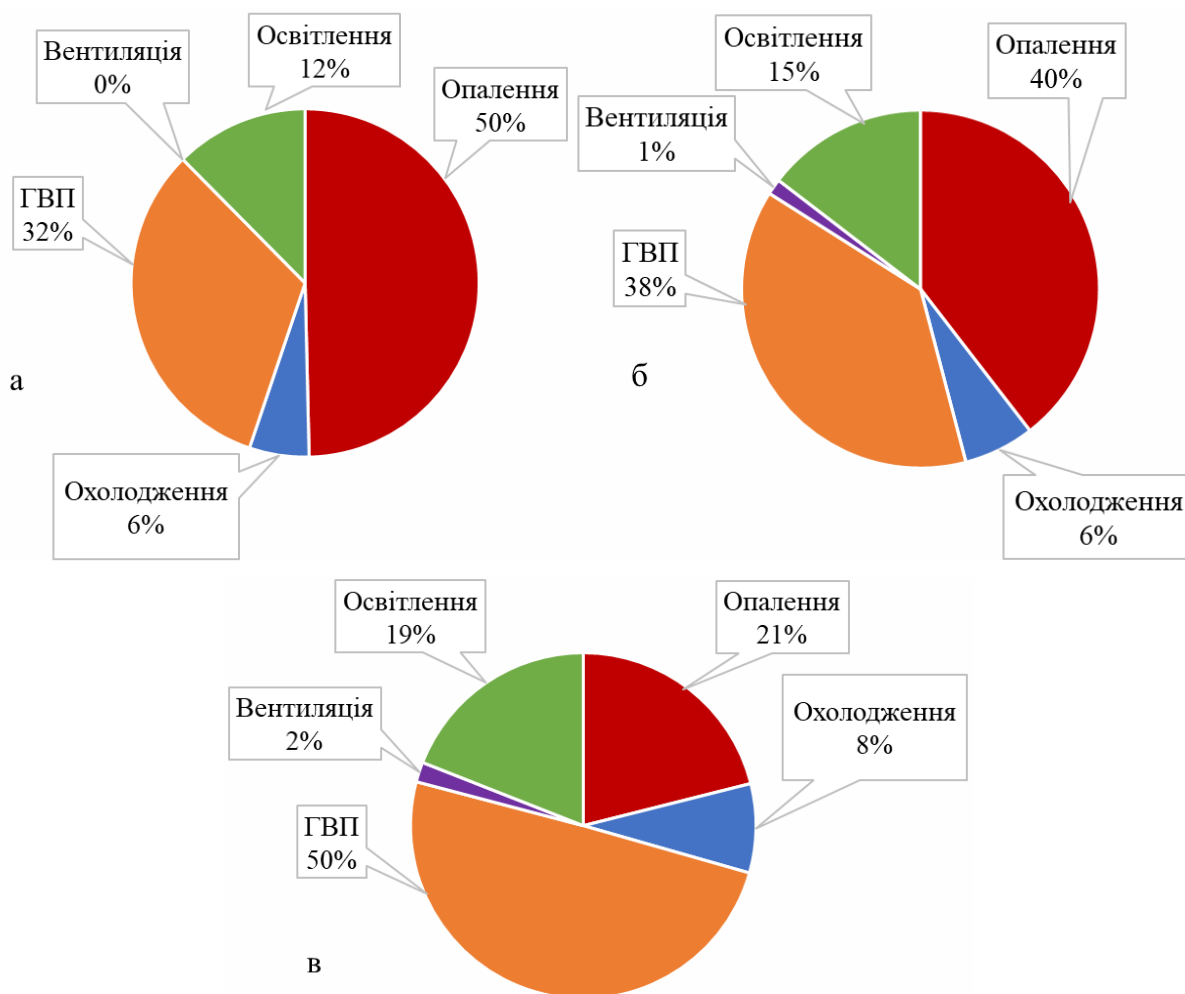


Рис. 3. Розподіл енергоспоживання між системами, %: а – природна вентиляція, б - регенератор з великими комірками; зелений - регенератор з тонкими каналами

Зміни, зафіксовані на графічній залежності, дозволяють оцінити вплив модернізації вентиляційної системи на загальний енергетичний баланс будівлі та визначити доцільність впровадження енергоефективних рішень.

У загальному підсумку впровадження регенеративних пристроїв сприяє зниженню сумарного енергоспоживання будівлі, віднесеного до одиниці первинної енергії (рис. 4) та зниженню викидів парникових газів (рис. 5) до 35 %.

Для розрахунку строку окупності визначено річні витрати на придбання енергоресурсів будівлі (таблиця 3) при природній вентиляції (ПР) та із використанням запропонованих удосконалених реверсивних децентралізованих вентиляційних пристроїв (РП). На основі річних витрат розраховано річну економію бюджету будинку.

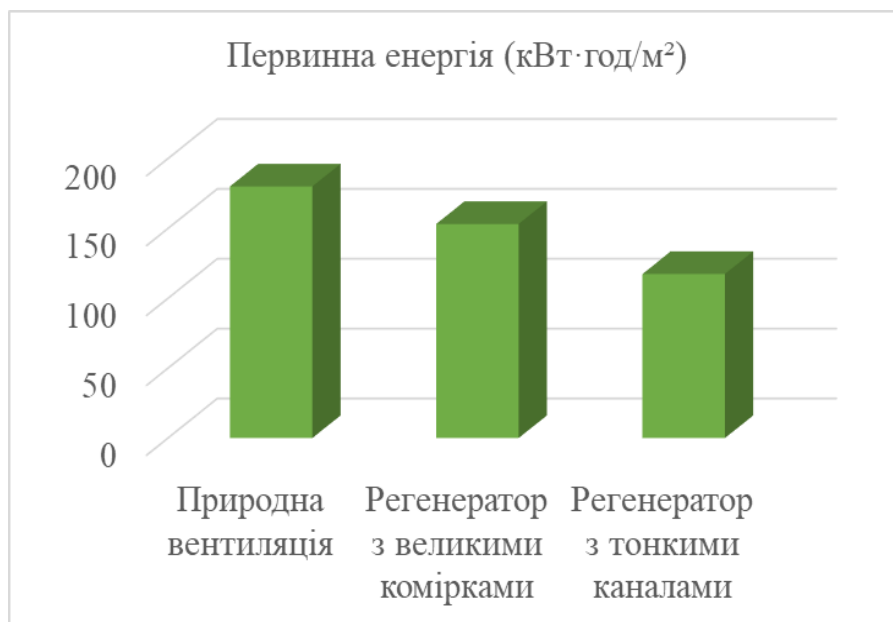


Рис. 4. Сумарне енергоспоживання будівлі, віднесене до одиниці первинної енергії, кВт·год/м²

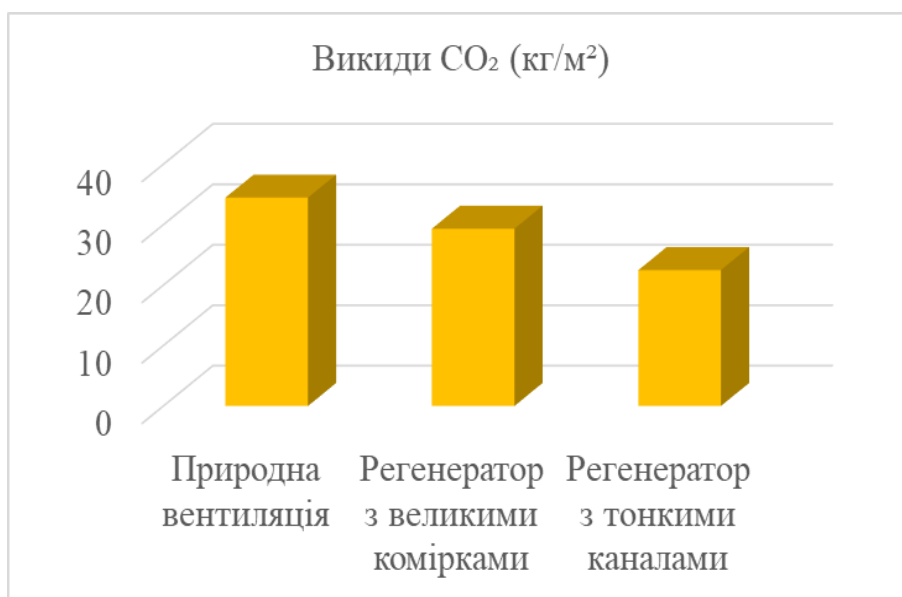


Рис. 5. Викиди вуглекислого газу, кг/м²

Розраховано капітальні вкладення на улаштування регенеративних пристроїв децентралізованої вентиляції з урахуванням їхньої кількості (160 шт.), вартості пристрою (8 000 грн./шт.) і монтування (1 500 грн./шт.) та визначено строк окупності – 8,5 років (таблиця 4). Це значення отримано без урахування заощадження коштів на лікування наслідків синдрому хворого будинку при недостатній вентиляції. На рис. 3 можна відмітити зміни навантаження на систему опалення будівлі, оскільки інфільтраційні та вентиляційні тепловтрати в житловому будинку покриває система опалення.

Таблиця 3

Річне енергоспоживання та витрати

Категорія	Споживання (ПВ), тис. кВт·год	Споживання (РП), тис. кВт·год	Тариф (грн/кВт·год)	Вартість (ПВ), грн	Вартість (РП), грн
Опалення	192,00	53,17	1,422	273 024	75 620
Охолодження	21,49	21,00	4,32	92 837	90 720
Гаряче водопостачання	125,30	125,30	1,422	178 670	178 670
Вентиляція	0,00	4,70	4,32	0	20 304
Освітлення	48,03	48,03	4,32	207 166	207 080
Разом	—	—	—	751 697	572 394

Таблиця 4

Визначення строку окупності

Показник	Значення
Річна економія, грн	179 304
Інвестиції в проект, грн	1 520 000
Строк окупності, років	8,48

Тому аналізувати строк окупності влаштування регенеративних пристроїв децентралізованої вентиляції без урахування зменшення капітальних затрат на монтування системи опалення є некоректним.

У таблиці 5 наведено порівняння розрахункових потужностей для систем опалення при природній вентиляції, встановленні регенераторів з великими комірками та встановленні реверсивних регенераторів з тонкими каналами. За даними таблиці 5, можна відмітити, що при встановленні удосконаленого реверсивного регенератора з тонкими каналами можна досягти зменшення встановленої потужності ІТП/котельні на 58,38%, встановленої потужності циркуляційного насоса системи опалення на 70% та зменшення діаметрів стояків системи опалення й вартості насоса на 40% та експлуатаційних затрат на роботу циркуляційного насоса системи опалення. У таблиці 6 наведено проєктні дані щодо вибору опалювальних приладів для типового поверху житлового будинку.

Таблиця 5

Аналіз проєктних потужностей системи опалення

Параметр	Природна вентиляція	Регенератор з великими комі- рками	Удосконалений реверсивний ре- генератор з тонкими канала- ми
Потужність системи опалення, кВт	167,293	129,865	69,635
Витрата теплоносія в системі опалення кг/ год	7194	5585	2995
Зменшення потуж- ності ІТП/котельні, %	0	22,37	58,38
Діаметр трубо- проводу після ІТП	Ду65 (76x3)	Ду65 (76x3)	Ду 50(60x3,3)
Насос системи опале- ння	MAGNA3 50- 80 F	MAGNA3 32- 100 F	MAGNA3 25-80
Потужність насосу системи опалення, кВт	0,327	0,161	0,0967
Витрата електричної енергії на роботу насосу системи опалення за опалю- вальний період, кВт·- год/рік	1174,06	578,05	347,19
Вартість насосу си- стеми опалення, грн	76381	64061	45582
Вартість роботи насосу системи опалення, грн	5072	2497	1500

Сучасна система опалення повинна бути динамічною, малоінерційною (швидко реагувати на зміни), щоб не було непродуктивних втрат теплоти та підтримувалися задані температури [3, 11, 46, 48]. Опалювальні прилади в такій системі повинні бути малометалоємними та маловодоемними [50]. За даними таблиці 6, вентиляція з удосконаленим реверсивним регенератором з тонкими каналами дозволяє зменшити типорозміри опалювальних приладів, що знижує їхню водо/металоємність.

Таблиця 6

**Аналіз опалювальних приладів при проектування різних систем
вентиляції в житловому будинку**

№ прим.	Природна вентиляція		Регенератор з великими комітками			Удосконалений реверсивний регенератор з тонкими каналами		
	Встановлена потужність О.П., Вт	Тип, розмір О.П.	Встановлена потужність О.П., Вт	Тип, розмір О.П.	Зменшення потужності О.П. в приміщенні, %	Встановлена потужність О.П., Вт	Тип, розмір О.П.	Зменшення потужності О.П. в приміщенні, %
01	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	711	11 тип 900х500	51,5
02	1390	22 тип 900х500	1081	22 тип 700х500	22,2	554	11 тип 700х500	57,4
03	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	711	11 тип 900х500	50,2
04	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	711	11 тип 900х500	52,9
05	1390	22 тип 900х500	1081	22 тип 700х500	22,2	554	11 тип 700х500	58,4
06	1698	22 тип 1100х500	1390	22 тип 900х500	18,1	790	11 тип 1000х500	49,2
07	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	632	11 тип 800х500	55,1
08	1390	22 тип 900х500	1081	22 тип 700х500	22,2	474	11 тип 600х500	62,5
09	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	711	11 тип 900х500	51,3
10	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	711	11 тип 900х500	53,0
11	1235	22 тип 800х500	1081	22 тип 700х500	12,5	474	11 тип 600х500	61,0
12	1544	22 тип 1000х500	1235	22 тип 800х500	20,0	711	11 тип 900х500	51,5
Середнє значення	1493		1197		19,8	645		54,5

Техніко-економічний ефект від впровадження регенеративних пристроїв:

1. Зниження тепловтрат будівлі до 30 % та споживання енергоносіїв до 35%;
2. Зменшення експлуатаційних витрат завдяки забезпеченню нормативного повітрообміну;
3. Підвищення класу енергетичної ефективності будівлі;
4. Зменшення встановленої потужності ІТП/котельні на 58,38%, встановленої потужності циркуляційного насоса системи опалення на 70% та зменшення діаметрів стояків системи опалення, вартості насоса на 40%, типорозміру опалювальних приладів, а отже, і зменшення загальних капітальних затрат на встановлення системи опалення;
5. Зменшення експлуатаційних витрат на роботу циркуляційного насоса системи опалення на 70%;
6. Підвищення екологічної ефективності (біосферосумісності) за рахунок зменшення викидів вуглекислого газу до 35%.

На підставі вищезазначеного можна зробити висновок, що впровадження децентралізованих вентиляційних пристроїв з реверсивними регенеративними теплоутилізаторами є технічно обґрунтованим рішенням, що поєднує екологічну доцільність, економічну ефективність і високий рівень санітарно-гігієнічної безпеки. Це відповідає принципам сталого розвитку та підвищення енергоефективності будівель у довгостроковій перспективі.

Висновки. У результаті техніко-економічного аналізу встановлення запропонованих удосконалених реверсивних децентралізованих вентиляційних пристроїв у житловому будинку отримано зниження сумарних тепловтрат будівлі на 30 % та енергоспоживання на 35%, а також підвищення екологічної ефективності (біосферосумісності) за рахунок зменшення викидів вуглекислого газу на 35%. Також отримано підвищення класу енергетичної ефективності будівлі та зменшення загальних капітальних затрат на встановлення системи опалення, зменшення експлуатаційних витрат на роботу циркуляційного насоса системи опалення на 70%. Ці результати отримано на підставі визначеного температурного коефіцієнта ефективності реверсивного регенератора за авторською програмою. Строк окупності запропонованих рішень становить 8,5 років. Це значення отримано без урахування заощадження коштів на лікування наслідків синдрому хворого будинку при недостатній вентиляції та повного кошторису на капітальні затрати на улаштування системи опалення.

References

1. Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia. DBN V.2.2-15:2019, Ukrarkhbudinorm, 2019. (In Ukrainian)
2. Kabinet Ministriv Ukrayiny. Deyaki pytannya stratehichnoho rozvytku enerhetychnoyi efektyvnosti budivel'. Rozporyadzhennya № 1228-r, 29 hrudnya 2023. Kyiv. <https://ips.ligazakon.net/document/KR231228?an=1>
3. DBN V.1.2-11:2021. Basic requirements for buildings and structures. Energy saving and energy efficiency. Effective from 2022-09-01. Ministry of Community and Territories Development of Ukraine, 2021.
4. Dovhaliuk V., Mileikovskiy V. "New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization." International Journal of Engineering and Technology (UAE), vol. 7, no. 3.2, 2018, pp. 591–596. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14596>
5. Petrash V., Khomenko A., Polomannyi O., Visotska M. "Integration of ground and ventilation air energy for heating buildings." Construction of Optimized Energy Potential (CoOEP), vol. 10, no. 1/2021, 2021, pp. 7–17. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2021.1.01>
6. Moskvitina A., Shyshyna M., Korchmins'kyy M. "Feasibility, economic and environmental justification of the use of variable air flow systems for administrative buildings. " Ventilation, Lighting and Heat-Gas Supply, vol. 36, 2021, pp. 62-79. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.62-79>
7. Moskvitina A., Shyshyna M. "Research of the temperature field in a room during operation of air conditioning systems under variable thermal loads in the room. " Young Scientist, vol. 3 no. 79, 2020, pp. 186-192. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40>
8. Al-Zubaydi A.Y.T., Hong G. "Experimental investigation of counter flow heat exchangers for energy recovery ventilation in cooling mode." International Journal of Refrigeration, vol. 93, 2018, pp. 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.07.008>
9. Koziol S., Zacharski S. "Methodology of Comparative Studies on Air-Handling Units with Heat Recuperation." Solid State Phenomena, vol. 237, 2015, pp. 148–153. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.237.148>
10. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izolyatsiya budivel'. Chynni vid 2022-04-01. Ministerstvo rozvytku hromad ta terytoriy Ukrayiny, 2021.
12. DSTU-N B A.2.2-12:2017. Nastanova z rozrobky dostupnosti dlya malomobil'nykh hrup naselennya. Al'bom skhematychnykh rishen' universal'noho dyzaynu budivel' (ASMUB). Chynni vid 2017-10-01. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2017.
13. Romanska-Zapala A., Furtak M., Fedorczyk-Cisak M., Dechnik M. "Cooperation

- of a Horizontal Ground Heat Exchanger with a Ventilation Unit During Winter: A Case Study on Improving Building Energy Efficiency.” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 471, 2019, Paper 092075. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092075>
14. Papakonstantinou, K. A., et al. “Numerical Simulation of Air Flow Field in Single-Sided Ventilated Buildings.” *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 1, Jan. 2000, pp. 41–48, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00063-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00063-3).
 15. Wong, N. H., et al. “Thermal Comfort Evaluation of Naturally Ventilated Public Housing in Singapore.” *Building and Environment*, vol. 37, no. 12, Dec. 2002, pp. 1267–1277, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00103-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00103-2).
 16. Priyadarsini, R., et al. “Enhancement of Natural Ventilation in High-Rise Residential Buildings Using Stack System.” *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 1, Jan. 2004, pp. 61–71, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00076-8).
 17. Gan, Guohui. “Effective Depth of Fresh Air Distribution in Rooms with Single-Sided Natural Ventilation.” *Energy and Buildings*, vol. 31, no. 1, Jan. 2000, pp. 65–73, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00006-7).
 18. Wilson, D. J., and D. E. Kiel. “Gravity Driven Counterflow through an Open Door in a Sealed Room.” *Building and Environment*, vol. 25, no. 4, 1990, pp. 379–388, [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90012-G](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90012-G)
 19. Dascalaki, E., et al. “On the Combination of Air Velocity and Flow Measurements in Single Sided Natural Ventilation Configurations.” *Energy and Buildings*, vol. 24, no. 2, July 1996, pp. 155–165, [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(96\)00973-5](https://doi.org/10.1016/0378-7788(96)00973-5).
 20. Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R., et al. “Transfer Rates in Single-Sided Ventilation.” *Building and Environment*, vol. 25, no. 2, 1990, pp. 155–161, [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90028-P](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90028-P).
 21. Etheridge, David. “A Perspective on Fifty Years of Natural Ventilation Research.” *Building and Environment*, vol. 91, Sept. 2015, pp. 51–60, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>.
 22. Heiselberg, Per, et al. “Characteristics of Airflow from Open Windows.” *Building and Environment*, vol. 36, no. 7, Aug. 2001, pp. 859–869, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00012-9).
 23. Dąbrowski P., Andrzejczyk R., Waclawik M., Mikielewicz D. “Window frame integrable air recuperation minichannel/minigap heat exchanger.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 247, 2024, Paper 123116. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123116>
 24. Yurzhenko A., Pikh I., Kostenko D., Borysenko O. “Research of natural ventilation in a thermally modernized building.” *Municipal Economy of Cities*, vol. 3 (191), 2025, pp. 314–320. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191->

314-320

25. Chovniuk, Yurii, et al. "Synthesis of Physical and Mathematical Model of Energy-Efficient Microclimate Management of Rural Area Gym, Taking into Account Indicators of Comfort and Air Quality." *Engineering for Rural Development*, vol. 23, May 2024, pp. 623–629, <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF147>.
26. Chovniuk, Yurii, et al. "Optimization of Heat Transfer Processes in Enclosing Structures of Architectural Monuments Located outside Urban Agglomeration." *Engineering for Rural Development*, vol. 23, May 2024, pp. 615–622, <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF156>.
27. Chovniuk, Yurii, et al. "Innovative Method of Researching the Dynamics of Changes in Air Pollution and Humidity in Sports Facilities: Gyms and Swimming Pools." *Town Planning and Territorial Planning*, no. 83, Apr. 2023, pp. 374–385, <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.83.374-385>.
28. Chovniuk, Yurii, et al. "Modeling and Calculation Algorithm of Microclimate Control System Parameters of Premises with Artificial Intelligence Elements." *Town Planning and Territorial Planning*, no. 79, Apr. 2022, pp. 446–462, <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.79.446-462>.
29. Ai Z.T., Mak C.M. "From street canyon microclimate to indoor environmental quality in naturally ventilated urban buildings: Issues and possibilities for improvement." *Building and Environment*, vol. 96, 2016, pp. 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.00>
30. Zhang X., Li H., Wang Y. "Failure of natural ventilation strategy in a sustainable house in China." *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 10, no. 3, July 2013. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt035>
31. Lin B., Xie C., Chen Y., Xu X. "Natural Ventilation Potential of Residential Buildings in China Considering the Combined Effect of Indoor and Outdoor Air Pollution." *Buildings*, vol. 14, no. 2, 2024, p. 363. <https://doi.org/10.3390/buildings14020363>
32. Allocca, Camille, et al. "Design Analysis of Single-Sided Natural Ventilation." *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 8, Sept. 2003, pp. 785–795, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6).
33. Larsen, Tine S., and Per Heiselberg. "Single-Sided Natural Ventilation Driven by Wind Pressure and Temperature Difference." *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 6, 2008, pp. 1031–1040, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.012>.
34. Aynsley, Richard. "Estimating Summer Wind Driven Natural Ventilation Potential for Indoor Thermal Comfort." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 83, no. 1–3, Nov. 1999, pp. 515–525, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00098-7).

35. Chen, Qingyan. "Ventilation Performance Prediction for Buildings: A Method Overview and Recent Applications." *Building and Environment*, vol. 44, no. 4, Apr. 2009, pp. 848–858, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>.
36. Mahdavi, Ardeshir, and Claus Pröglhöf. "A Model-Based Approach to Natural Ventilation." *Building and Environment*, vol. 43, no. 4, Apr. 2008, pp. 620–627, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.023>.
37. Chenvidyakarn, T., and A. Woods. "Stratification and Oscillations Produced by Pre-Cooling during Transient Natural Ventilation." *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, Jan. 2007, pp. 99–112, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.007>.
38. Hetun, Galina, et al. "The Impact of Indoor Air Exchange on the Energy Efficiency of Multi-Apartment Residential Buildings. " *Energy Efficiency in Construction and Architecture* 13 (2019): 58-68. DOI: <https://doi.org/10.32347/2310-0516.2019.13.58-68>
39. L. M. Vilinska, G. M. Burlak, and A. V. Gurska. "Energy Efficiency of Multi-Apartment Residential Buildings. " *Ukrainian Journal of Construction and Architecture* 3 (015) (2023): 28-33. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.28.951>
40. Sergeychuk, O., and S. Kozhedub. "Development of criteria-based assessment of energy efficiency and environmental friendliness of buildings. " *Energy Efficiency in Construction and Architecture*, No. 11, 2018, pp. 61–68, doi:10.32347/2310-0516.2018.11.61-68.
41. Etheridge, David. *Review of Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*, by David Etheridge. *International Journal of Ventilation*, vol. 10, no. 4, 2012, pp. 405–406, doi:10.1080/14733315.2012.11683965.
42. Weerasuriya, Asiri Umenga, et al. "A holistic framework to utilize natural ventilation to optimize energy performance of residential high-rise buildings. " *Building and Environment* 153 (2019): 218-232.
43. Tong, Zheming, Yujiao Chen, and Ali Malkawi. "Estimating natural ventilation potential for high-rise buildings considering boundary layer meteorology. " *Applied energy* 193 (2017): 276-286.
44. Vakulenko D., Mileikovskiy V. "Modeling the efficiency of heat recovery in a regenerative device using different approaches." *Ventilation, Lighting and Heat-Gas Supply*, vol. 41, April 2022, pp. 32–38. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.41.32-38>
45. Mileikovskiy V., Vakulenko D.5 "Simulation of the efficiency of improved regenerative decentralised ventilators Vents TwinFresh." *Construction of Optimized Energy Potential (CoOEP)*, vol. 9, no. 1/2020, pp. 61–67, 2020.

<https://doi.org/10.17512/bozpe.2020.1.07>

46. Vakulenko D., Mileikovskiy V. “The Experimental Determination of the Heat Transfer Coefficient in Thin Channels of a Regenerative Heat Exchanger.” FME Transactions, vol. 53, 2025, pp. 173–183. <https://doi.org/10.5937/fme2501173V>
47. Enerhetychna efektyvnist' budivel. Metody rozrakhunku enerhetychnykh kharakterystyk. DSTU 9190:2022, Ukrarkhbudininform, 2022. (in Ukrainian)
48. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny. Metodyka vyznachennya enerhetychnoyi efektyvnosti budivel'. Nakaz № 169 vid 11 lypnya 2018 r. Zareyestrovano v Ministerstvi yustytseyi Ukrayiny 16 lypnya 2018 r. za № 822/32274.
49. DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventylyatsiya ta kondytsionuvannya. Chynni vid 2013-10-01. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2013.
50. DBN V.2.5-64:2012. Vnutrishniy vodoprovod ta kanalizatsiya. Chynni vid 2013-07-01. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2012.
51. Moskvitina, A. S., et al. “Methodology of Technical and Economic Comparison of Heating Devices for Use in Modern Dynamic Water Heating Systems.” Upravlinnia Rozvytkom Skladnykh System [Management of Development of Complex Systems], no. 37, 2019, pp. 210–218, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783254>.

UDC 697.9:620.9:628.8

PhD, Assoc. Prof. **Anna Moskvitina**,

moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646,

PhD, Assoc. Prof. **Daria Vakulenko**,

vakulenko_di@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2960-9659,

Kyiv national University of Construction and Architecture

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.76-93>

TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF THE USE OF REGENERATIVE REVERSIBLE DEVICES TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY CLASS OF RESIDENTIAL BUILDINGS AND DECREASE THE LOADING ON HEATING SYSTEMS

***Abstract.** With the growing requirements for building energy efficiency, especially in the residential sector, innovative ventilation solutions that combine high-quality air exchange with minimal heat losses and reduced operating costs are gaining increasing relevance. One of the promising directions in the development of*

modern engineering systems is the application of decentralized reversible ventilation devices with heat recovery, in particular wall-mounted ventilators of the TwinFresh type, manufactured by Vents Ukraine. Such devices ensure effective air exchange in rooms without the need for extensive ductwork, which makes them particularly convenient for residential applications. The key advantages of decentralized reversible ventilators include compact design, ease of installation and maintenance, high energy efficiency, and a significant heat recovery rate, which allows substantial reduction of heat losses during ventilation in the cold season. Moreover, the use of such systems has a positive effect on the indoor microclimate, enhancing living comfort and reducing the risks of excessive humidity and condensation. This article examines the techno-economic feasibility of implementing reversible ventilation devices with heat recovery in both new residential buildings and during the thermal renovation of the existing housing stock. The analysis covers energy efficiency, reduction of heat consumption, and potential savings in heating costs. Special attention is paid to the evaluation of economic indicators, payback periods of investments, and prospects for integrating such systems into modern standards of energy-efficient construction. The results of the study confirm that decentralized reversible devices with heat recovery represent an effective engineering solution that combines a high level of energy savings with improved indoor comfort and can become an important tool in the implementation of energy efficiency programs in the residential sector.

Keywords: regenerative reversible devices, energy efficiency, thermal renovation, heat recovery, regeneration, thermal modernization, techno-economic analysis, decentralized ventilation.

Received/Надійшла до редакції 18.11.2025

Reviewed/Рецензована 01.12.2025

Accepted/Прийнята 08.12.2025