

УДК 628.4.047:621.039

к.т.н., доц. **Олександра Череднікова**,
al.chered108@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4684-9870,

к.т.н., доц. **Дмитро Гузик**,
guzikd64@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2130-951X,

к.т.н., доц. **Володимир Чередніков**,
cherednikov@nupp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1857-3942,

**Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»**

студент **Микола Чередніков**,
nikola.cherednikov@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3498-8614,
Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.55-82>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ЯКОСТІ ВНУТРІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В НЕОПАЛЮВАЛЬНИЙ ПЕРІОД

Анотація. У статті представлено результати експериментально-комп'ютерного дослідження енергоефективності децентралізованої припливно-витяжної установки з пластинчастим рекуператором перехресного типу в навчальному приміщенні в неопалювальний період за відсутності централізованого опалення. Метою роботи є порівняльна оцінка чотирьох режимів експлуатації («Нагрівання», «Охолодження», «Авто», «Вентиляція») за показниками температурного коефіцієнта ефективності рекуперації $\eta_{рек}$, кількості зрекуперованої теплоти $Q_{рек}$, інтегральної енергетичної ефективності E_{eff} , а також параметрами якості повітря (CO_2) та теплового комфорту (PMV , PPD , частка комфорту). Експеримент проводився в комп'ютерному класі університету об'ємом $90,8 \text{ м}^3$ у жовтні 2025 року за температури зовнішнього повітря t_m від $+3$ до $+17$ °C. Моніторинг температури, відносної вологості повітря та концентрації CO_2 здійснювався з дискретністю 2–5 хв із подальшою агрегацією даних до 10 хв для статистичної обробки та кореляційного аналізу. Встановлено, що зі зростанням температури зовнішнього повітря t_m показники $\eta_{рек}$, $Q_{рек}$ і E_{eff} зменшуються ($r = -0,593 \div -0,947$). Найвищу частку комфортних умов забезпечує режим «Авто» ($\approx 44,7\%$), тоді як режими без електродогрівання не забезпечують прийняттого комфорту при $t_m < +12$ °C. Визначено температурні межі ефективної експлуатації установки та сформовано практичні рекомендації для навчальних закладів у перехідний сезон.

Ключові слова: енергоефективність, рекуперація теплоти, вентиляція, тепловий комфорт, якість повітря, комп'ютерний аналіз даних, статистичне оброблення, кореляційний аналіз.

Скорочення, використані в даній роботі:

PMV (Predicted Mean Vote) – прогнозована середня оцінка теплового комфорту;

PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) – прогнозований відсоток незадоволених тепловими умовами;

MVHR (Mechanical Ventilation with Heat Recovery) – механічна вентиляція з рекуперацією теплоти;

MV (Measured Value) – значення вимірної величини;

IAQ (Indoor Air Quality) – якість внутрішнього повітря;

ТКЕ – температурний коефіцієнт ефективності

Вступ. Перехідний (неопалювальний) період експлуатації навчальних закладів характеризується поєднанням змінних зовнішніх температур, відсутності централізованого опалення та високої інтенсивності використання аудиторій, що створює складні умови для одночасного забезпечення нормативної якості повітря та прийняттого теплового комфорту при обмежених енергетичних ресурсах. У таких умовах особливого значення набувають децентралізовані припливно-витяжні установки з рекуперацією теплоти, які здатні зменшувати вентиляційні тепловтрати та частково компенсувати вплив зовнішнього середовища на мікроклімат приміщення. Разом з тим, ефективність їхньої роботи залежить від температурного режиму, алгоритмів керування та використання електричного догрівання, що потребує кількісного експериментального перевіряння в реальних умовах навчального процесу. У статті представлено комплексне експериментально-комп'ютерне дослідження енергоефективності рекуператора, якості повітря (за концентрацією CO₂) та показників теплового комфорту (PMV/PPD) за різних режимів роботи установки з рекуперацією теплоти витяжного повітря, що видяляється з навчальної аудиторії, з метою визначення оптимальних параметрів експлуатації в неопалювальний період.

Актуальність дослідження. Перехідний (неопалювальний) період у навчальних будівлях України (вересень–листопад, квітень–травень) характеризується одночасним зростанням потреби у вентиляції (висока заповнюваність аудиторій) та обмеженням можливостей підтримувати тепловий комфорт через відсутність центрального опалення. У таких умовах подавання зовнішнього повітря може суттєво знижувати температуру в приміщенні, тоді як обмеження повітрообміну призводить до накопичення CO₂ та погіршення якості повітря. Вимоги до підвищення енергоефективності будівель та технічних

систем, включно з інженерними системами, закріплені на рівні ЄС у директиві EPBD та її змінах, а також імплементуються в Україні через законодавчу та нормативну базу [1-5].

Додатково актуальність зумовлена тим, що для освітнього середовища якість повітря (зокрема CO₂ як індикатор достатності вентиляції) пов'язана з навчальною працездатністю та результативністю виконання завдань, що підтверджено узагальненими даними для класів [6]. Водночас, забезпечення комфортних умов має спиратися на стандартизовані критерії теплового середовища [7], що враховують температуру, вологість, швидкість повітря та персональні параметри (одяг, активність).

Отже, актуальним є комплексне експериментально-комп'ютерне дослідження, яке дозволяє в реальних умовах неопалювального періоду кількісно оцінити компроміс між енергоефективністю рекуперації, якістю повітря (CO₂), тепловим комфортом (PMV /PPD) та енергетичною доцільністю режимів керування, особливо для децентралізованих установок з рекуперацією теплоти та електричним догріванням повітря.

Останні дослідження та публікації. Останніми роками наукові публікації активно розглядають MVHR як інструмент зниження енергоспоживання та покращення параметрів внутрішнього середовища, зокрема для будівель освітнього призначення. Так у [8] і [9] показано потенціал MVHR щодо зменшення первинної енергії та впливу на вентиляційні стратегії в класах, а також відзначено, що фактична ефективність рекуперації залежить від змінних параметрів зовнішнього та витяжного повітря і може відрізнитися від «номінальних». Паралельно збільшується кількість польових досліджень, які одночасно аналізують тепловий комфорт і IAQ з опитуваннями/моніторингом у шкільних будівлях [10], що підкреслює необхідність комплексної оцінки, а не аналізу лише одного показника.

Водночас огляд публікацій показує наявність невирішених частин проблеми, критичних саме для України: недостатньо робіт, що сфокусовані на неопалювальному (перехідному) періоді в навчальних приміщеннях за відсутності центрального опалення, коли необхідно підтримувати допустимі рівні CO₂ без погіршення теплового комфорту при сидячій активності та демісезонному одязі. Друга прогалина – обмежена кількість порівняльних досліджень різних режимів керування однієї й тієї самої установки в реальних умовах експлуатації, із високою дискретністю вимірювань та статистичним перевірянням зв'язків (кореляції, тренди, розподіли).

Формулювання цілей статті. Метою статті є комплексне експериментально-комп'ютерне оцінювання ефективності роботи децентралізованої вентиляційної установки з рекуперацією теплоти в

навчальному приміщенні в неопалювальний період за відсутності центрального опалення. Дослідження спрямоване на порівняльний аналіз чотирьох режимів роботи («Нагрівання», «Охолодження», «Авто», «Вентиляція») з урахуванням параметрів одягу та рівня активності користувачів за показниками:

- енергоефективності:
 - $\eta_{рек}$ – ефективність рекуперації);
 - $Q_{рек}$ – кількість теплоти, що утилізується в рекуператорі, Вт,
 - E_{eff} – питома енергетична ефективність рекуперації як відношення кількості зрекуперованої теплоти до спожитої електричної потужності;
 - P_{el} (електроспоживання вентиляційної установки);
- якості повітря:
 - концентрація CO₂;
 - витрата повітря;
 - показники теплового комфорту (PMV, PPD).

Додатково робота спирається на комп'ютерні методи оцінювання теплового комфорту в навчальному середовищі, представлені в публікації [11], що забезпечує методичну узгодженість дослідження та посилює його прикладний характер.

Об'єкт та умови експерименту. Об'єктом дослідження є комп'ютерний навчальний клас Полтавської політехніки (рис. 1), розрахований на 10–15 робочих місць, розташований у одноповерховій частині будівлі масивного типу. Геометричні параметри приміщення становлять:

- довжина – 5,3 м;
- ширина – 5,1 м;
- висота – 3,36 м;
- загальна площа – 27 м²;
- об'єм – 90,8 м³.



Рис. 1. Комп'ютерний навчальний клас з механічною вентиляцією з рекуперацією теплоти

Планування приміщення передбачає розміщення комп'ютерних столів уздовж стін та в центральній зоні, що формує додаткові внутрішні тепловиділення від обладнання та користувачів.

Особливістю приміщення є відсутність стін, що межують з зовнішнім повітрям) та наявність лише внутрішніх стін з вікном у коридор. Така конфігурація ускладнює природний повітрообмін і практично унеможливорює провітрювання відкриванням вікон до навколишнього середовища. Відсутність прямого контакту із зовнішнім повітрям підвищує залежність мікроклімату від роботи механічної вентиляції та створює ризик швидкого накопичення CO₂ при недостатній кратності повітрообміну.

Приміщення використовується для проведення лекційних і практичних занять із переважно сидячою діяльністю користувачів, що відповідає рівню метаболічної активності 1,0÷1,2 met. У період проведення експерименту типовим був демісезонний одяг із опором теплопередачі 1,2 clo. Додатковими внутрішніми джерелами тепловиділення є персональні комп'ютери та монітори, що формують сталий тепловий фон навіть за відсутності централізованого опалення. Таким чином, приміщення є характерним прикладом навчального середовища з обмеженими можливостями природної вентиляції та високою залежністю параметрів мікроклімату від режиму роботи децентралізованої вентиляційної установки.

Для контролю параметрів внутрішнього мікроклімату та якості повітря в приміщенні використовувався багатофункціональний прилад Xintest HT-501 (табл. 1), який здійснював вимірювання температури повітря в приміщенні, а також концентрації CO₂ та відносної вологості повітря з інтервалом 2 хвилини. Така періодичність фіксування дозволила отримати детальну динаміку змін параметрів мікроклімату в різних режимах роботи вентиляційної установки.

Таблиця 1.

Метрологічні характеристики приладу Xintest HT-501

Параметр	Діапазон вимірювання	Допустимі межі похибки	Роздільна здатність
Мольна частка CO ₂ в повітрі, ppm	0÷9999	± 70ppm ± 3%	1
Температура повітря, °C	- 10 ÷ +10	± 1,2 °C	0,1
	- 10 ÷ +50	± 0,3 °C	
	+ 10 ÷ +70	± 1,2 °C	
Відносна вологість повітря, %	0,1 ÷ 99,9	± 3 %	0,1

Температура зовнішнього повітря та відносна вологість зовнішнього повітря фіксувалися метеостанцією Sencor SWS 12500 WIFI (табл. 2), яка була розташована на даху одноповерхової будівлі університету. Розміщення датчика у відкритій зоні забезпечувало репрезентативність показників навколишнього середовища та їхню відповідність фактичним кліматичним умовам під час проведення експерименту. Отримані дані використовувалися для аналізу впливу зовнішньої температури на показники рекуперації, тепловий комфорт та якість повітря в навчальному приміщенні.

Таблиця 2.

Метрологічні характеристики метеостанції Sencor SWS 12500 WIFI

Параметр	Діапазон вимірювання	Допустимі межі абсолютної похибки	Роздільна здатність
Атмосферний тиск, гПа	540÷696	± 8	1
	697-698*	± 7	
	699*	± 6	
	700÷1100	± 5	
Температура зовнішнього повітря, °С	- 40,0 ÷ - 20,0	± 1,5	0,1
	- 19,0 ÷ +5,0	± 1,0	
	+ 5,1 ÷ +60	± 0,4	
Відносна вологість повітря, %	1 ÷ 20	± 6,5	1
	21 ÷ 80	± 3,5	
	81 ÷ 99	± 6,5	
Швидкість вітру, м/с	0 ÷ 50	± max(0,5, 0,06·MV)	0,1
Напрямок вітру, °	0 ÷ 360	–	1 або 16 румбів
Опади, мм, мм/год	0 ÷ 19999	0,07·MV, 1 тип	0,4
Ультрафіолетовий індекс	0 ÷ 16	–	0,1
Інтенсивність сонячної радіації, люкс	0 ÷ 200	–	0,01

* – визначено інтерполюванням паспортних даних

У дослідженні застосовано децентралізовану припливно-витяжну установку ВУТ 300 ПБЕ ЕС П А21 DTV виробництва ПрАТ «Вентиляційні системи» (рис. 2), оснащену пластинчастим рекуператором теплоти та електричним повітрянагрівачем для догрівання припливного повітря. Установка забезпечує механічне подавання та видалення повітря з рекуперацією теплоти витяжного повітря. Повітрянагрівач активується лише в режимах «Нагрівання» та «Авто», тоді як у режимах «Вентиляція» та «Охолодження» робота відбувається без додаткового догрівання, лише за рахунок теплообмінника. Така схема дозволяє оцінити як ефективність рекуперації в чистому вигляді, так і сумарний ефект від використання електричного догрівання в умовах неопалювального періоду.



Рис. 2. Розташування вентиляційної установки ВУТ 300 ПБЕ ЕС П А21 DTV

Установка оснащена системою керування А21, що підтримує віддалене керування та моніторинг параметрів через мобільний застосунок Vents Home (рис. 3). За допомогою системи керування забезпечується перемикання режимів роботи, регулювання швидкостей вентиляторів та контролювання температурних параметрів. У режимі моніторингу відображаються основні температури повітря в характерних точках системи: t_1 – температура припливного повітря після рекуператора; t_2 – температура зовнішнього повітря на вході в рекуператор; t_4 – температура витяжного повітря з приміщення на вході в рекуператор; t_5 – температура витяжного повітря після рекуператора. Наявність цих вимірюваних параметрів дозволяє розраховувати ТКЕ рекуперації та кількість зрекуперованої теплоти.

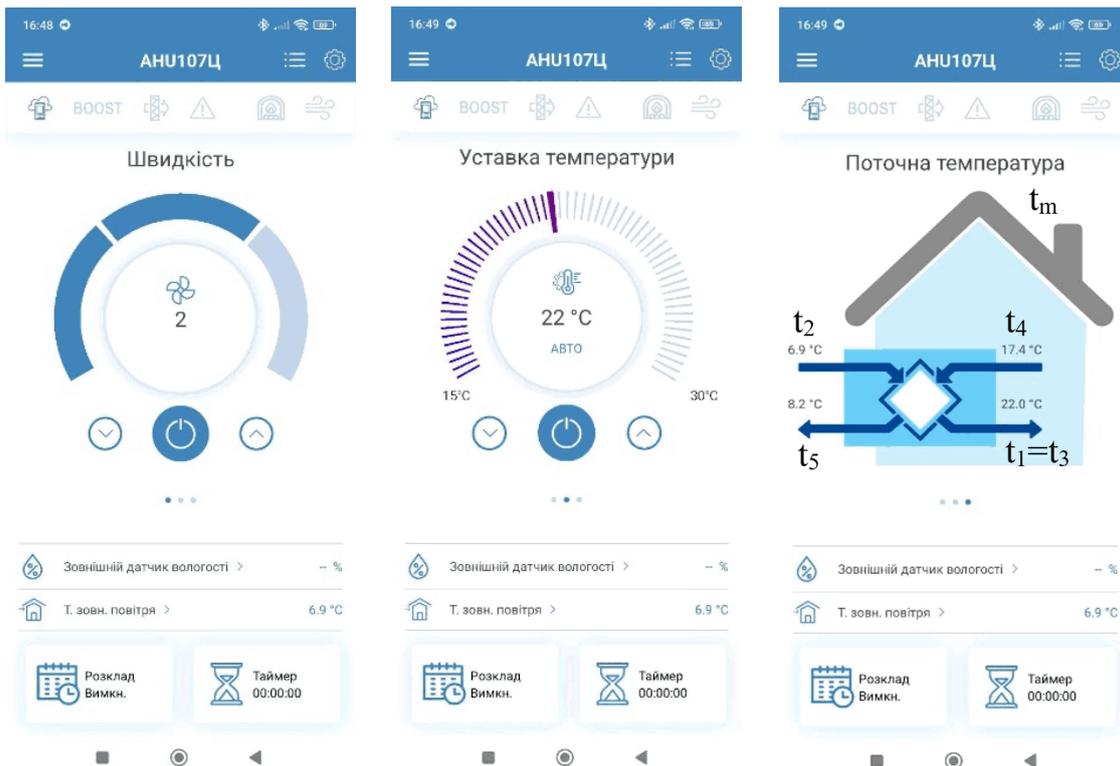


Рис. 3. Додаток Vents Home.

Для автоматизованого збирання експериментальних даних було розроблено програмний застосунок ModbusReader, який здійснює зчитування температур через інтерфейс Modbus із періодичністю що 5 хвилин. Отримані значення зберігалися у файл OutputData.csv (рис. 4) разом із часовими мітками вимірювань. Програму було встановлено на планшеті, розміщеному безпосередньо в досліджуваному приміщенні, що забезпечувало безперервний локальний моніторинг температурних параметрів протягом усього періоду експерименту. Такий підхід дозволив отримати деталізований масив даних для подальшого статистичного та енергетичного аналізу роботи установки в різних режимах експлуатації.

```

ModbusReader.exe — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<configuration>
  <appSettings>
    <add key="Path" value="C:/Users/Vlad/Desktop/OutputData.csv"/>
    <add key="TimeoutMilliseconds" value="120000"/>
  </appSettings>
  <startup>
    <supportedRuntime version="v4.0" sku=".NETFramework,Version=v4.7.2"/>
  </startup>
</configuration>
    
```

Рис. 4. Файл налаштувань для програмного застосунку ModbusReader

Експериментальні дослідження проводилися в період з 09.10.2025 до 26.10.2025 у реальних умовах експлуатації навчального приміщення в неопалювальний період. Протягом усього часу центральне опалення в будівлі було відсутнє, що дозволило оцінити вплив лише роботи децентралізованої вентиляційної установки на формування параметрів мікроклімату та теплового комфорту. Температура зовнішнього повітря в період експерименту змінювалася в діапазоні від +3 °С до +17 °С, що відповідає типовим умовам жовтня та створює характерні для перехідного сезону нестабільні теплові умови.

У межах зазначеного періоду послідовно реалізовувалися чотири режими роботи установки: «Нагрівання», «Охолодження», «Авто» та «Вентиляція». Режими змінювалися орієнтовно кожні 12÷24 години відповідно до затвердженого графіка, що дозволило отримати репрезентативні масиви даних для кожного режиму в зіставних кліматичних умовах. У нічний час частину періодів установка не працювала, що дало змогу оцінити фонову динаміку температури приміщення без механічної вентиляції.

Для режимів «Нагрівання» та «Авто» встановлена температура підтримання припливного повітря становила 22 °С при другій швидкості роботи вентиляторів. У режимах «Охолодження» та «Вентиляція» електрокалорифер догрівання не використовувався, а температура припливного повітря підтримувалася лише за рахунок рекуперації теплоти. Така організація експерименту забезпечила можливість порівняльного аналізу енергетичної ефективності, якості повітря та теплового комфорту в умовах відсутності центрального опалення та змінних зовнішніх температур.

Методика дослідження передбачала безперервний моніторинг температурних, гігрометричних, аеродинамічних та енергетичних параметрів роботи децентралізованої вентиляційної установки в умовах реальної експлуатації навчального приміщення. Вимірювання здійснювалися з інтервалом 5 хв протягом усього періоду експерименту, що забезпечило отримання деталізованого масиву даних для подальшого статистичного та кореляційного аналізу.

До температурних параметрів, °С, належали (рис. 3):

- t_1 – температура припливного повітря після рекуператора;
- t_2 – температура зовнішнього повітря на вході в рекуператор;
- t_4 – температура витяжного повітря з приміщення на вході в рекуператор;
- t_5 – температура витяжного повітря після рекуператора;
- t_m – температура зовнішнього повітря;
- $t_{прим}$ – температура повітря в приміщенні.

Сукупність зазначених температур дозволила визначати ТКЕ рекуперації, кількість утилізованої теплоти та оцінювати вплив зовнішніх умов на тепловий

стан приміщення.

Слід зазначити, що первинні дані, отримані з різних джерел, мали різну періодичність зчитування. Зокрема, програмний застосунок ModbusReader здійснював зчитування температурних параметрів через інтерфейс Modbus що 5 хв, при цьому періодично виникали пропуски записів, пов'язані з тимчасовою відсутністю доступу до файлу збереження або нестабільністю мережевого з'єднання. Водночас дані з датчика НТ-501 (температура в приміщенні, концентрація CO₂ та відносна вологість) реєструвалися з інтервалом 2 хвилини.

З метою уніфікації часових рядів і забезпечення коректності подальшого порівняльного аналізу весь масив експериментальних даних (4976 первинних записів) було агреговано до єдиного кроку дискретизації - 10 хвилин. У результаті сформовано узгоджену вибірку обсягом 1977 записів, розподілених за режимами роботи установки:

- «Охолодження» - 446 записів;
- «Нагрівання» - 479 записів;
- «Авто» - 638 записів;
- «Вентиляція» - 414 записів.

Надалі дані було структуровано за окремими режимами та впорядковано в порядку зростання температури зовнішнього повітря. Такий підхід дозволив виконати коректний кореляційний та регресійний аналіз залежностей енергетичних показників, параметрів якості повітря та теплового комфорту від температури навколишнього середовища, що стало основою для подальших розрахунків і побудови аналітичних графіків.

Для комплексного оцінювання роботи вентиляційної установки були визначені енергетичні показники, що характеризують ефективність утилізації теплоти та доцільність використання електродогрівання. ТКЕ рекуперації $\eta_{рек}$, %, розраховувався як відношення фактичного приросту температури повітря в рекуператорі до максимально можливого температурного напору між витяжним та зовнішнім повітрям. Кількість зрекуперованої теплоти $Q_{рек}$, кВт, визначалася на основі витрати повітря, питомої теплоємності повітря та різниці температури між потоками. Потужність електричного нагрівання (Нагрів ел., кВт) враховувалася лише для режимів «Нагрівання» та «Авто», де активувався електрокалорифер. Узагальненим показником енергетичної доцільності слугував коефіцієнт енергоефективності $E_{eff} = Q_{рек} / P_{ел}$, що відображає співвідношення корисно утилізованої теплоти до спожитої електричної потужності установки.

Оцінка теплового комфорту здійснювалася відповідно до моделі Фангера з визначенням показників PMV та PPD. Розрахунки виконувалися з урахуванням температури повітря, відносної вологості, швидкості руху повітря, рівня

метаболічної активності, met , та опору теплопередачі одягу, clo . Для узагальнення результатів додатково визначалась частка комфорту, %, як відсоток інтервалів часу, у яких виконувалася умова $|PMV| \leq 0,5$, що відповідає категорії прийняттого теплового комфорту. Такий підхід дозволив провести синхронне оцінювання енергетичної ефективності роботи рекуператора та якості мікроклімату в приміщенні за різних режимів експлуатації в неопалювальний період.

Статистичне оброблення експериментальних даних передбачало визначення середніх значень параметрів для кожного режиму роботи установки, що дозволило отримати узагальнені характеристики енергетичних і комфортних показників у досліджуваному діапазоні зовнішніх температур. Для аналізу залежностей від температури зовнішнього повітря t_m будувалися лінії тренду з оцінкою характеру зміни показників (лінійна апроксимація). Варіативність показників теплового комфорту в межах кожного режиму оцінювалася за допомогою діаграм розмаху (boxplot) для PMV та PPD, що дало змогу виявити медіанні значення, інтерквартильний розмах та можливі викиди. Для кількісної оцінки взаємозв'язків між параметрами обчислювалися коефіцієнти лінійної кореляції Пірсона для пар показників $\eta_{рек-t_m}$, $Q_{рек-t_m}$, E_{eff-t_m} , $PMV-t_m$, $PMV-t_{нрум}$, $PPD-t_m$, $RH_{нрум-t_m}$, $t_{нрум-t_m}$, а також температурних параметрів t_1-t_m , t_2-t_m , t_4-t_m та t_5-t_m , що дозволило оцінити ступінь впливу зовнішніх кліматичних умов на ефективність рекуперації та параметри мікроклімату приміщення.

Часова динаміка температури. У результаті обробки вимірних даних отримано фрагменти добових графіків зміни температури повітря для кожного режиму роботи вентиляційної установки (рис. 5÷8).

У режимі «Вентиляція» (без електродогрівання) рис. 5 простежується чітка залежність температури припливного повітря від температури зовнішнього середовища: t_2 та t_m змінюються синхронно в межах $6,4 \div 12,7$ °C, тоді як температура припливу після рекуператора t_1 коливається у вузькому діапазоні $13,9 \div 16,2$ °C, що свідчить про ефект рекуперації. Температура витяжного повітря з приміщення $t_4 = 15,3 \div 17,4$ °C демонструє демпфувальний вплив теплової інерції приміщення, тоді як $t_5 = 7,2 \div 13,1$ °C відображає інтенсивність теплообміну. Приріст температури припливу за рахунок рекуперації ($t_1 - t_2$) змінюється від $3,3$ до $7,5$ °C, а різниця $t_4 - t_5$ залишається відносно стабільною ($6,5 \div 8,0$ °C). Отже, пластинчастий рекуператор забезпечує суттєвий тепловий ефект, однак за відсутності догрівання температура припливного повітря залежить від зовнішніх коливань, що обмежує підтримання стабільного комфортного режиму в приміщенні.

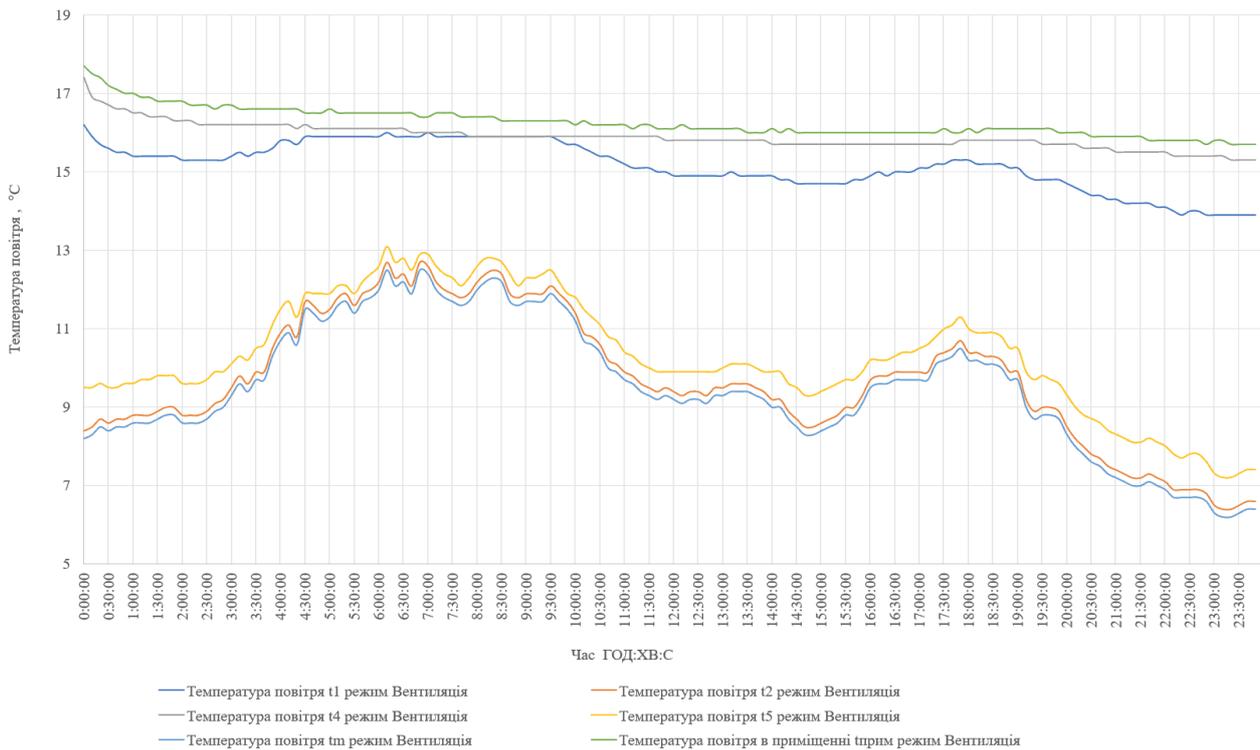


Рис. 5. Добова динаміка температур повітря в режимі «Вентиляція»

У режимі «Авто» (рис. 6) забезпечується найбільш стабільний температурний режим у приміщенні завдяки автоматичному керуванню та періодичному використанню повітрянагрівача. Температура припливного повітря після рекуператора t_1 підтримується майже постійною на рівні $21,7 \div 22,2$ °С (амплітуда $\approx 0,5$ °С), тоді як температура витяжного повітря з приміщення t_4 змінюється лише в межах $16,9 \div 18,2$ °С.

За значних коливань зовнішньої температури t_2 і t_m ($12,8 \div 4,1$ °С) амплітуда змін температури припливу залишається у 7–8 разів меншою, що свідчить про ефективну компенсацію тепловтрат. Температура $t_5 = 13,3 \div 5,7$ °С відображає зміну інтенсивності теплообміну, а приріст $t_1 - t_2$ зростає до $17 \div 18$ °С при зниженні t_2 . Отже, режим «Авто» мінімізує вплив зовнішніх коливань на мікроклімат і забезпечує максимальну температурну стабільність у неопалювальний період.

У режимі «Нагрівання» (рис. 7) забезпечується найвища стабільність температурного режиму за рахунок роботи електрокалорифера, який мінімізує вплив зовнішніх коливань на мікроклімат приміщення. Температура припливного повітря t_1 підтримується практично незмінною в межах $21,9 \div 22,2$ °С (амплітуда $\approx 0,3$ °С), тоді як зовнішня температура t_2 знижувалася з $8,9$ до $4,6$ °С.

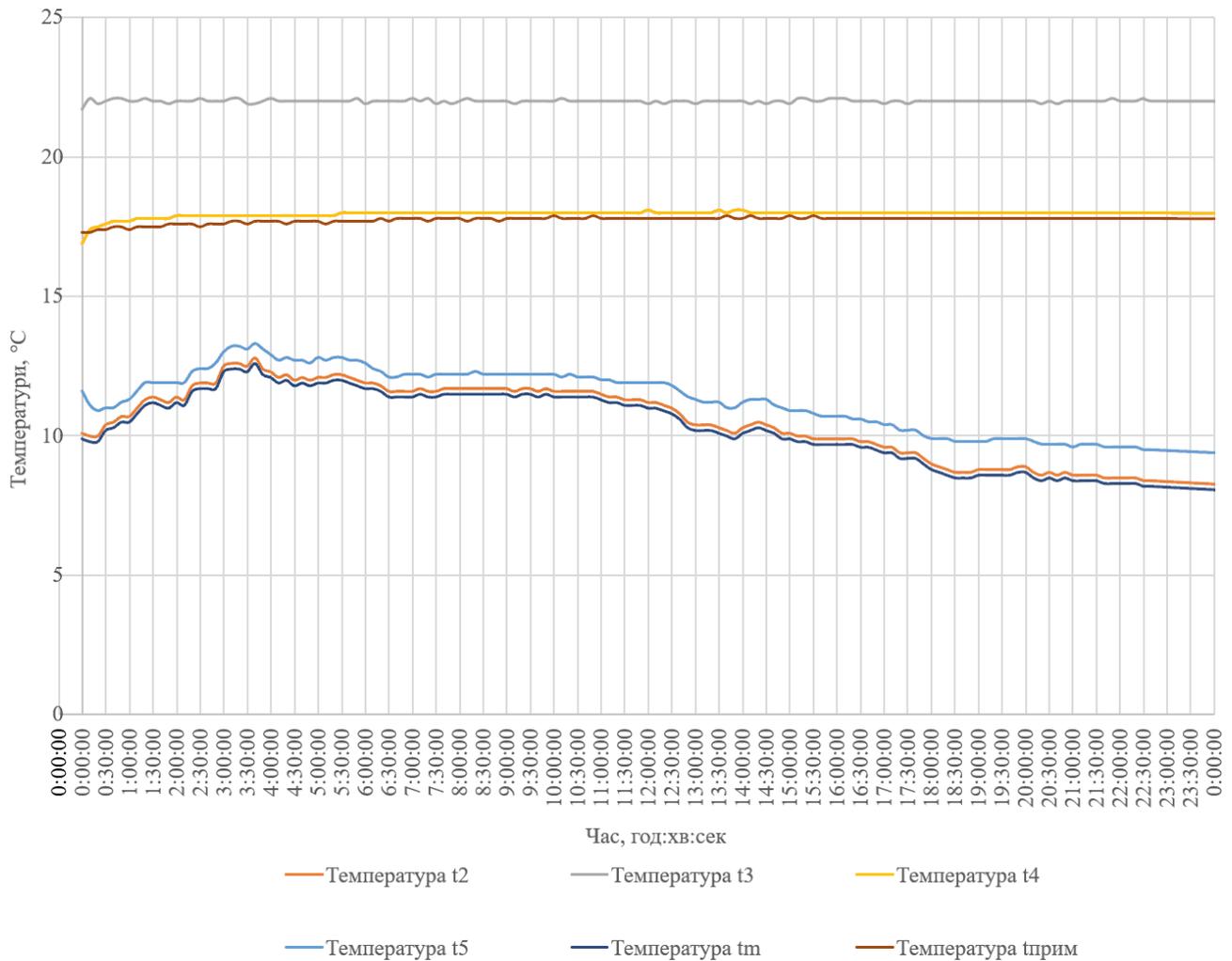


Рис. 6. Добова динаміка температур повітря в режимі «Авто»

Температура витяжного повітря з приміщення t_4 змінювалася незначно ($16,6 \div 18,5$ °C), що підтверджує теплову інерційність приміщення та компенсуючу роль підігріву. Температура $t_5 = 6,1 \div 9,9$ °C) відображає інтенсивність теплообміну, а приріст температури припливу відносно зовнішнього повітря ($t_1 - t_2$) зростає до $17,5$ °C при зниженні t_2 . Отже, у цьому режимі активне догрівання у поєднанні з рекуперацією, що забезпечує найбільш стійкі умови підтримання температури в неопалювальний період.

У режимі «Охолодження» (рис. 8) електродогрівання не використовується, тому формування температури припливного повітря визначається переважно ефективністю рекуператора та зовнішніми умовами. При зниженні зовнішньої температури t_2 ($14,9 \div 11,1$ °C) відповідно зменшується температура витяжного повітря після рекуператора t_5 ($15,1 \div 11,7$ °C), тоді як температура припливу t_1 змінюється у вузькому діапазоні $17,3 \div 15,9$ °C, що свідчить про стабілізаційний ефект теплообміну та теплової інерції приміщення.

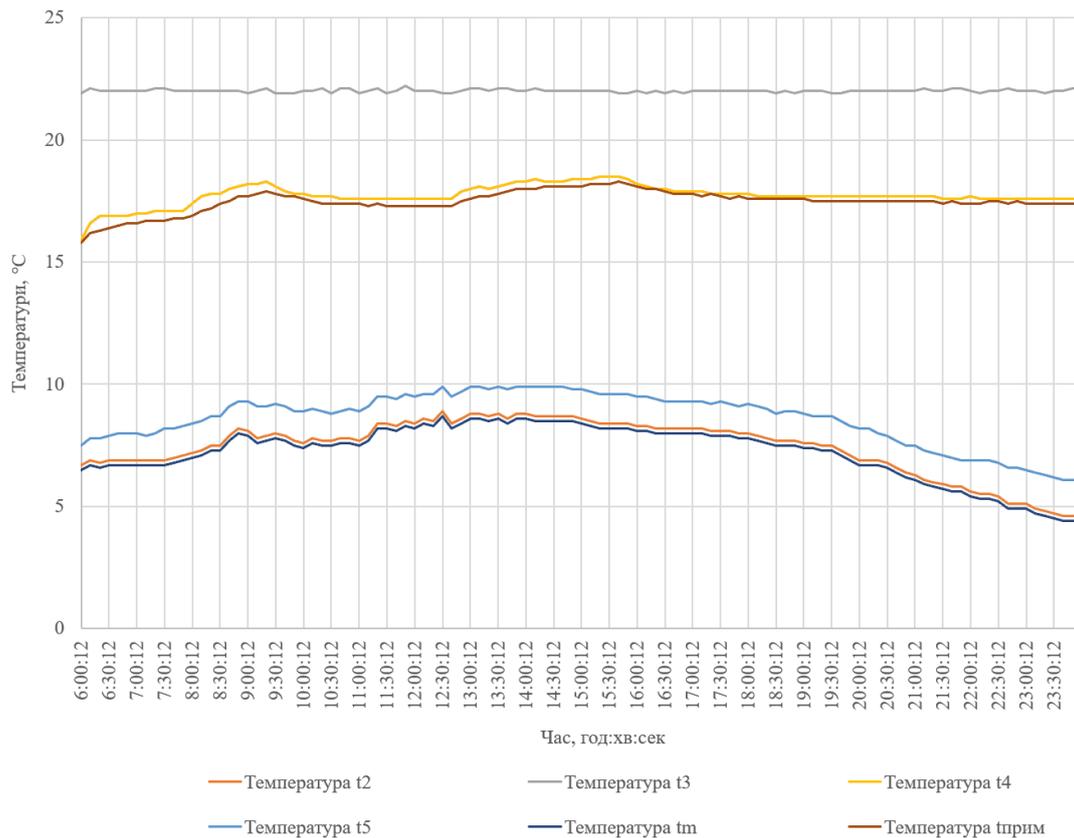


Рис. 7. Добова динаміка температур повітря в режимі «Нагрівання».

Температура витяжного повітря з приміщення t_4 залишається майже сталою – $17,1 \div 16,5$ °C. Приріст температури припливного повітря за рахунок рекуперації ($t_1 - t_2$) становить $2,4 \div 4,8$ °C і зростає зі зниженням t_2 , однак без активного догрівання внутрішній мікроклімат зберігає залежність від зовнішніх коливань.

Загалом порівняння отриманих графіків свідчить про суттєвий вплив режиму роботи установки на динаміку температурних параметрів. Найбільш стабільні умови формуються в режимах «Нагрівання» та «Авто», тоді як режими без електродогрівання характеризуються більшою чутливістю до зовнішніх температурних коливань.

Порівняльний аналіз чотирьох режимів роботи за енергоефективністю. На підставі графіка залежності ТКЕ рекуперації від температури зовнішнього повітря встановлено, що для всіх чотирьох режимів (рис. 9) спостерігається виражена тенденція зниження ТКЕ із підвищенням t_m , що узгоджується зі зменшенням температурного напору між витяжним та зовнішнім повітрям.

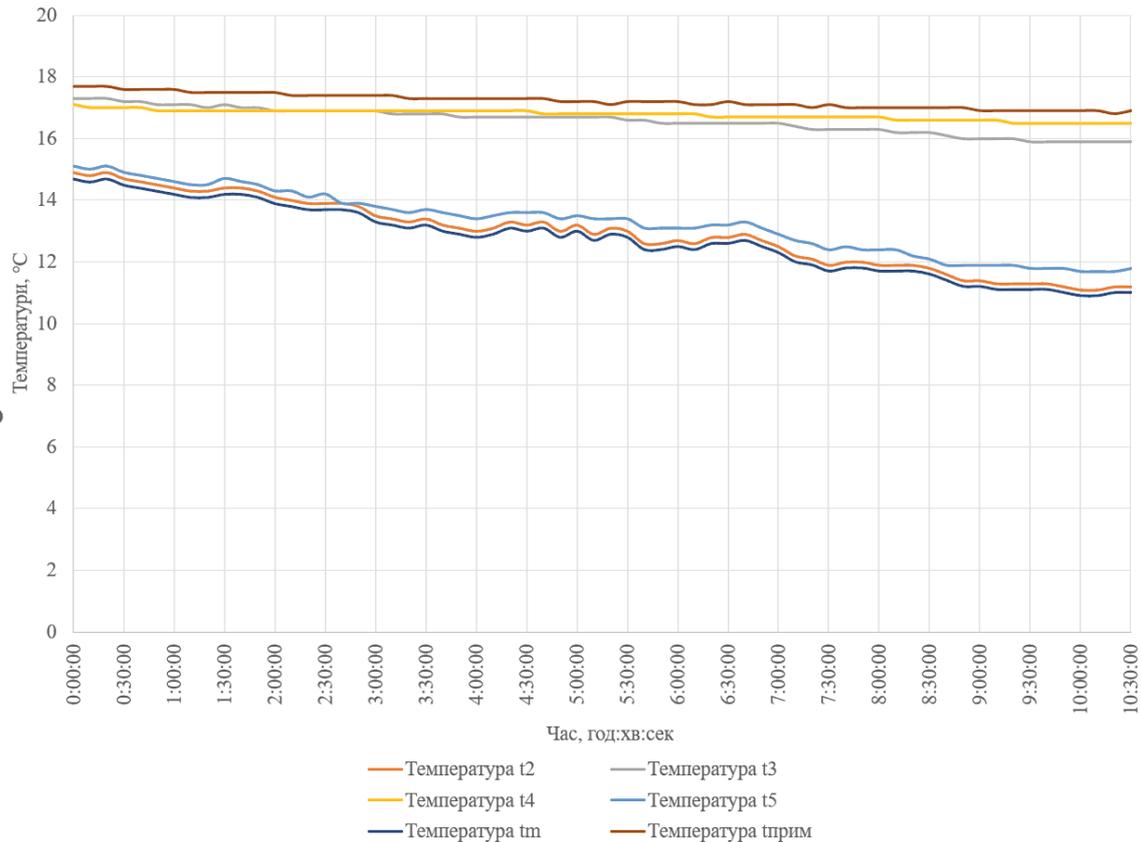


Рис. 8. Добова динаміка температур повітря в режимі «Охолодження».

Найвищі значення у всьому досліджуваному діапазоні температур (+3 ÷ +14 °C) демонструє режим «Авто». При низьких температурах ($\approx 3 \div 5$ °C) $\eta_{рек}$ становить близько 63÷65 %, а при зростанні t_m до 13÷14 °C знижується до $\approx 38 \div 40$ %. Дещо нижчі, але близькі результати характерні для режиму «Нагрівання», де ТКЕ рекуперації змінюється приблизно від 62÷64 % до 35÷38 %. У режимі «Вентиляція» ефективність помітно нижча: від $\approx 42 \div 43$ % при $t_m \approx 6 \div 7$ °C до $\approx 14 \div 16$ % при 13÷14 °C, що пояснюється відсутністю активного догрівання та менш інтенсивним використанням температурного потенціалу.

Найменші значення $\eta_{рек}$ спостерігаються в режимі «Охолодження» – від ≈ 45 % при $t_m \approx 4$ °C до ≈ 15 % при 14÷15 °C. Поліноміальні лінії тренду підтверджують нелінійний характер залежності, причому для режимів із активним нагріванням (Авто, Нагрівання) зниження ТКЕ є більш плавним, тоді як у пасивних режимах (Вентиляція, Охолодження) спад ефективності з підвищенням зовнішньої температури є більш інтенсивним. Таким чином, з огляду енергоефективності рекуперації теплоти в неопалювальний період найбільш стабільним і результативним є режим «Авто», тоді як режими без активного догрівання демонструють суттєве падіння $\eta_{рек}$ при наближенні зовнішньої температури до внутрішньої.

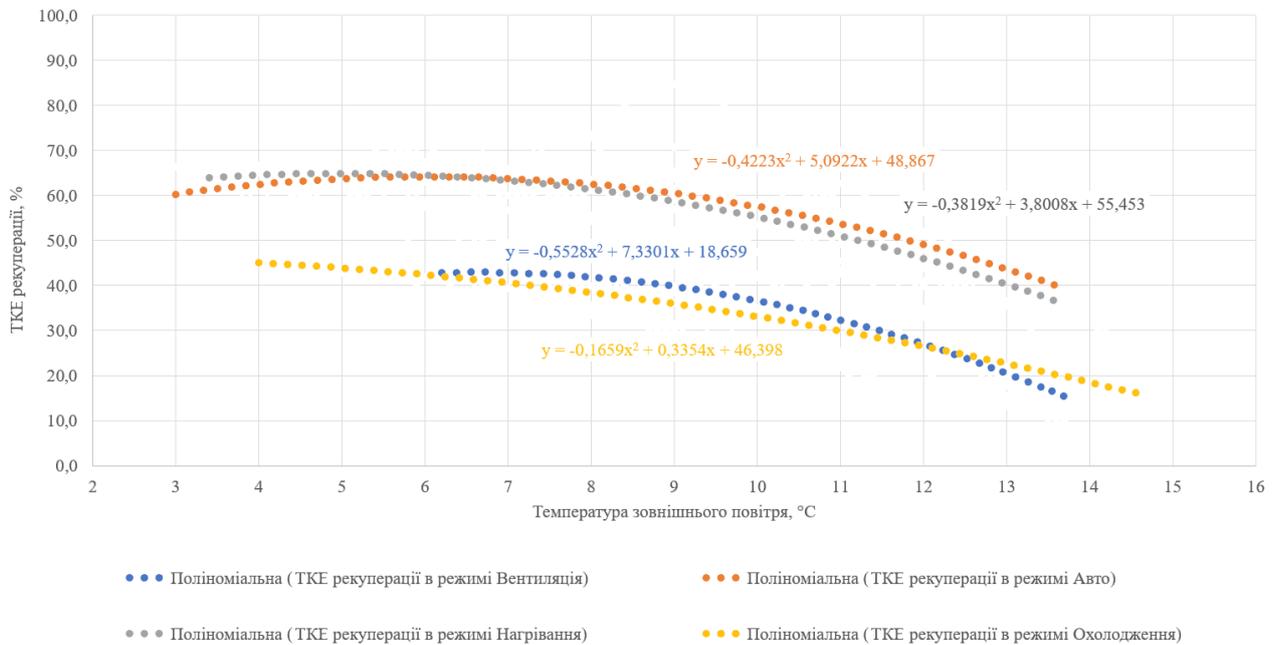


Рис. 9. ТКЕ рекуперації в 4 режимах

Аналіз графіка залежності кількості зрекуперованої теплоти $Q_{рек}$ від температури зовнішнього повітря показує, що для всіх чотирьох режимів (рис. 10) спостерігається чітка тенденція зменшення $Q_{рек}$ із підвищенням t_m , що зумовлено зниженням температурного напору між внутрішнім і зовнішнім повітрям. Найбільші значення $Q_{рек}$ характерні для режиму «Нагрівання», де при $t_m \approx 3 \div 4$ °C величина досягає близько $0,80 \div 0,82$ кВт і поступово зменшується до $\approx 0,20 \div 0,23$ кВт при $13 \div 14$ °C. Дещо нижчі, але близькі показники має режим «Авто»: від $\approx 0,78 \div 0,80$ кВт при низьких температурах до $\approx 0,20$ кВт при максимальних значеннях t_m . У режимі «Вентиляція» $Q_{рек}$ змінюється в межах приблизно $0,46 \div 0,08$ кВт, тоді як у режимі «Охолодження» – від $\approx 0,55$ кВт до $\approx 0,07$ кВт у досліджуваному температурному діапазоні. Таким чином, режими з активним нагріванням (Нагрівання, Авто) забезпечують найбільшу кількість утилізованої теплоти в усьому діапазоні зовнішніх температур, тоді як у пасивних режимах (Вентиляція, Охолодження) теплопродуктивність рекуператора є суттєво нижчою і більш чутливою до зростання температури зовнішнього повітря.

На рис. 11 представлено залежність узагальненого показника енергетичної ефективності $E_{eff} = Q_{рек}/P_{ел}$ від температури зовнішнього повітря для чотирьох режимів роботи установки. Для всіх режимів спостерігається тенденція зниження E_{eff} зі зростанням t_m , що пояснюється одночасним зменшенням температурного напору та кількості зрекуперованої теплоти при відносній стабільності або зростанні електроспоживання.

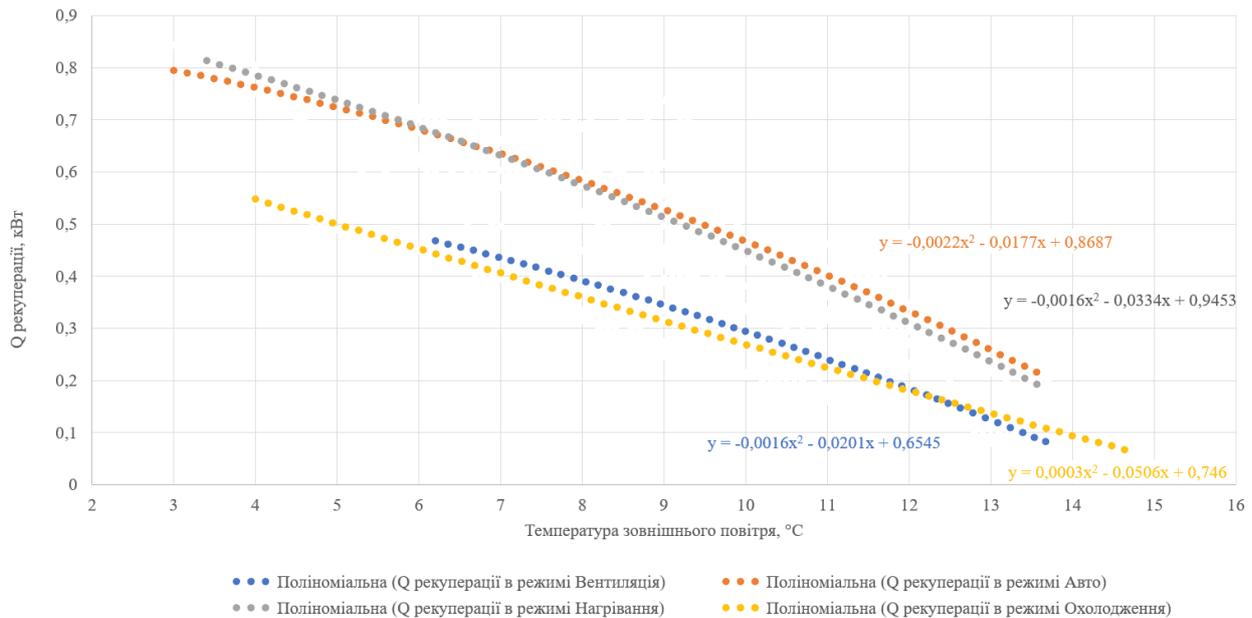


Рис. 10. Залежність кількості зрекуперованої теплоти $Q_{рек}$ від температури зовнішнього повітря в різних режимах роботи установки

Найвищі значення E_{eff} характерні для режиму «Охолодження»: при $t_m \approx 4$ °C показник досягає $8,4 \div 8,6$ та поступово зменшується до $\approx 1,0 \div 1,2$ при $14 \div 15$ °C. Близькі, але дещо нижчі значення демонструє режим «Вентиляція», де E_{eff} змінюється приблизно від $7,2 \div 7,4$ до $1,3 \div 1,5$ у досліджуваному діапазоні температур. Натомість у режимах з активним електродогрівом («Авто» та «Нагрівання») значення E_{eff} істотно нижчі: у режимі «Авто» показник змінюється орієнтовно від $1,4 \div 1,6$ до $0,4 \div 0,5$, а в режимі «Нагрівання» - від $1,5 \div 1,7$ до $0,4 \div 0,6$. Це свідчить про те, що з огляду відношення отриманої теплоти до спожитої електроенергії найбільш енергетично «вигідними» є режими без активного догрівання, тоді як у режимах із увімкненням повітрянагрівача зростання електричних витрат суттєво знижує інтегральну ефективність, особливо при підвищенні температури зовнішнього повітря.

Порівняльний аналіз чотирьох режимів роботи за тепловим комфортом. На графіку рис. 12 представлено залежність прогнозованої середньої оцінки теплового комфорту PMV від температури зовнішнього повітря для чотирьох режимів роботи установки. У всьому досліджуваному діапазоні температури $+3 \div +15$ °C значення PMV є від'ємними, що свідчить про переважання відчуття прохолоди в неопалювальний період. Найбільш сприятливі умови спостерігаються в режимі «Авто», де PMV змінюється приблизно від мінус 0,75 при $t_m \approx 3$ °C до $-0,48 \div -0,50$ при $9 \div 10$ °C, після чого несуттєво зменшується, залишаючись у межах мінус 0,55 при вищих температурах.

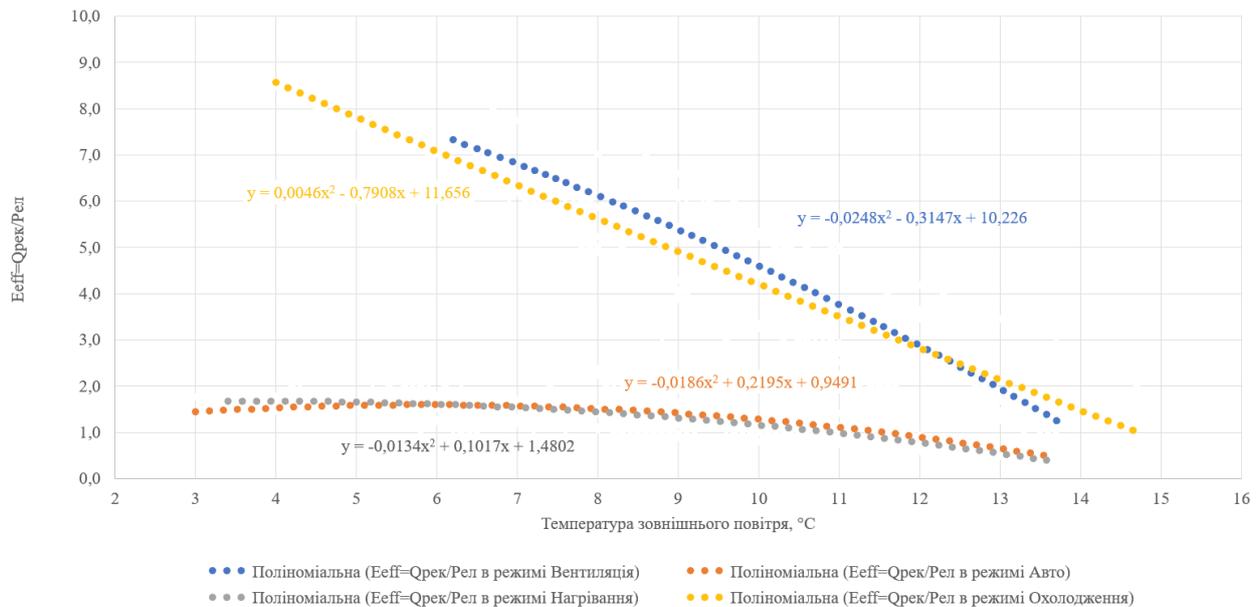


Рис. 11. Залежність $E_{eff}=Q_{рек}/P_{ел}$ від температури зовнішнього повітря в різних режимах роботи установки

Близькі результати демонструє режим «Нагрівання», у якому PMV варіюється в інтервалі $-0,62 \div -0,66$, що відповідає помірному тепловому дискомфорту з невеликим відхиленням від нейтрального стану. У режимі «Вентиляція» значення PMV є більш від'ємними: від близько мінус 1,10 при нижчих температурах до $-0,88 \div -0,90$ при $12 \div 13$ °С, що характеризує відчуття помітної прохолоди. Найнижчі значення PMV фіксуються в режимі «Охолодження», де показник змінюється приблизно від мінус 1,25 при $t_m \approx 4$ °С до мінус 0,70 при $14 \div 15$ °С, тобто умови є найменш комфортними серед досліджених режимів. Загалом із підвищенням температури зовнішнього повітря спостерігається тенденція до наближення PMV до нульового значення (нейтрального теплового стану), однак навіть при максимальних значеннях t_m повної компенсації теплового дискомфорту без центрального опалення досягти не вдається. Оптимальним за показником теплового комфорту в умовах неопалювального періоду є режим «Авто», що забезпечує найменше відхилення PMV від нейтральної зони.

На графіку рис. 13 представлено залежність прогнозованого відсотка незадоволених температурними умовами (PPD) від температури зовнішнього повітря для чотирьох режимів роботи установки. Загалом із підвищенням температури зовнішнього повітря спостерігається тенденція до зменшення частки незадоволених, що узгоджується з наближенням показника PMV до нейтральної зони.

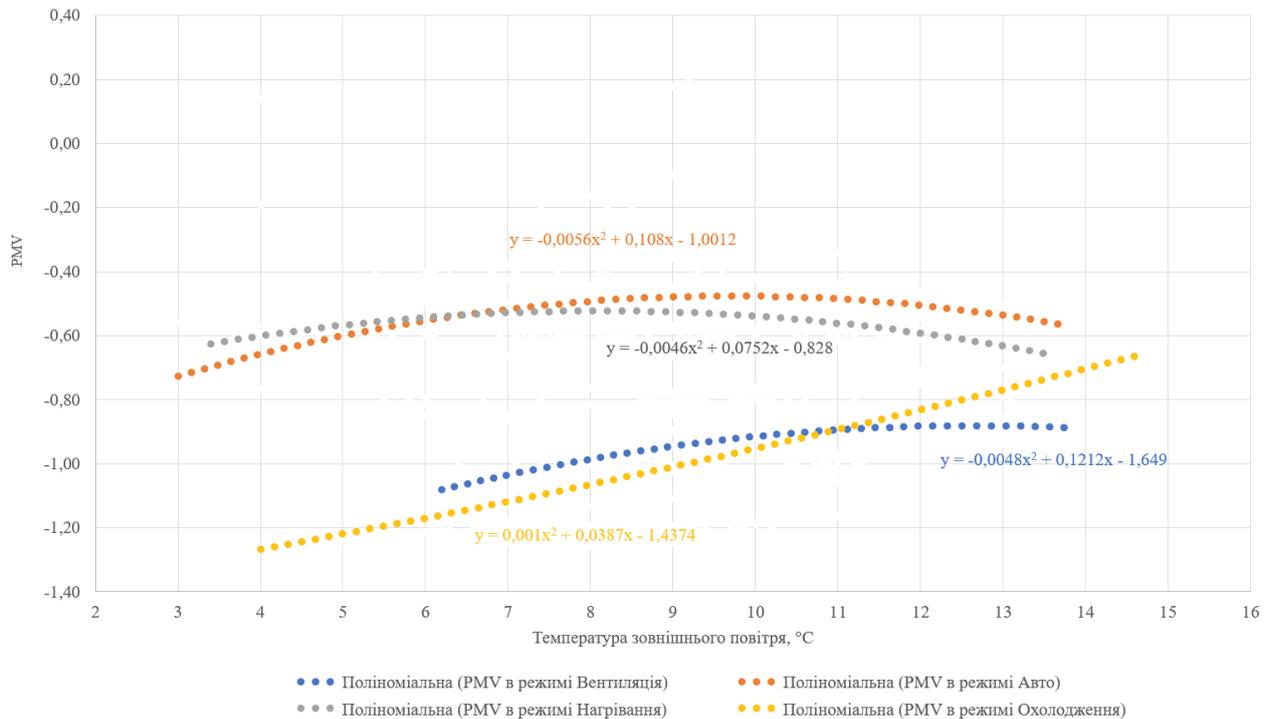


Рис. 12. Залежність прогнозованої середньої оцінки комфорту PMV від температури зовнішнього повітря в різних режимах роботи установки

Найгірші показники комфорту фіксуються в режимі «Охолодження»: при $t_m \approx 4$ °C значення PPD становить близько 39 %, а зі зростанням температури до 14÷15 °C зменшується до 15÷17 %. У режимі «Вентиляція» PPD змінюється приблизно від 30 % при нижчих температурах до 21÷22 % при 12÷13 °C, після чого стабілізується. Це свідчить про відчутний тепловий дискомфорт у холодніші періоди за відсутності догрівання припливного повітря.

Найменша частка незадоволених спостерігається в режимах «Авто» та «Нагрівання». У режимі «Авто» значення PPD зменшується з ≈ 15 % при 3 °C до мінімуму близько 10÷11 % при 9÷10 °C, після чого незначно зростає до 11÷12 %. У режимі «Нагрівання» показник перебуває в межах 12÷13 % у всьому діапазоні температури. Таким чином, у неопалювальний період найбільш комфортним за показником PPD є режим «Авто», який забезпечує мінімальну частку незадоволених і найстабільніші умови мікроклімату.

Аналіз коробкової (boxplot)-діаграми PMV для чотирьох режимів на рис. 14 показує суттєві відмінності у тепловому сприйнятті середовища. У режимах «Нагрівання» та «Авто» медіанні значення PMV зосереджені поблизу $-0,55 \div -0,60$, що відповідає легкому відчуттю прохолоди та перебуває близько до межі комфортної зони ($\pm 0,5$). Режим «Авто» демонструє дещо вищі (менш від'ємні) значення PMV та наявність окремих позитивних викидів (до +0,2), що свідчить про періодичне наближення до нейтрального або навіть злегка теплого стану.

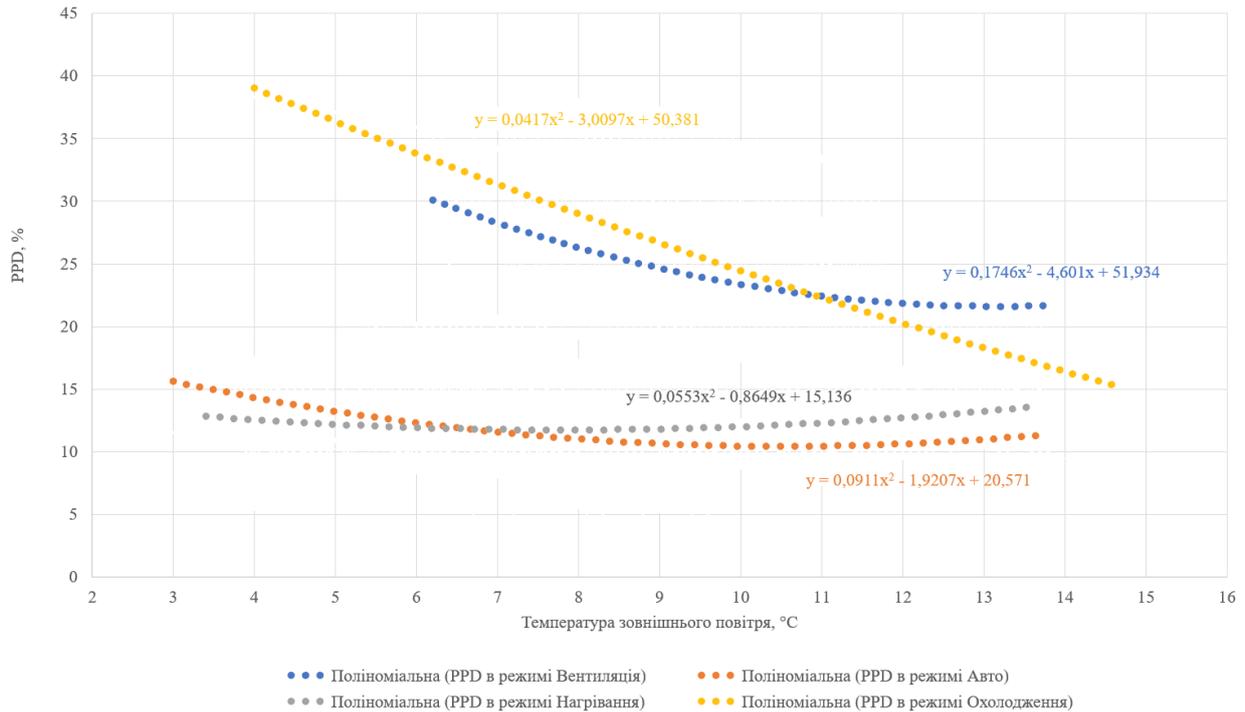


Рис. 13. Прогнозований відсоток незадоволених температурою середовища PPD в залежності від температури зовнішнього повітря в 4 режимах

Розмах міжквартильного інтервалу для цих режимів є помірним, що характеризує відносну стабільність теплових умов.

У режимах «Вентиляція» та «Охолодження» значення PMV є значно більш від’ємними. Для «Вентиляції» медіана становить приблизно $-0,9 \div -1,0$, а мінімальні значення досягають $-1,2 \div -1,25$, що відповідає відчуттю помірного холоду. У режимі «Охолодження» PMV також знаходиться в межах $-0,95 \div -1,05$ із меншим розмахом варіації, однак більшість значень залишаються в зоні вираженого теплового дискомфорту. Таким чином, за розподілом PMV найбільш сприятливими режимами є «Авто» та «Нагрівання», тоді як режими без активного догріву припливного повітря не забезпечують прийняттого теплового стану в неопалювальний період.

Аналіз графіка частки комфорту на рис. 15 показує суттєву різницю між режимами роботи установки в неопалювальний період. Найвищу частку комфортних умов ($|PMV| \leq 0,5$) забезпечує режим «Авто» - 44,7 %, що свідчить про найкращу здатність системи адаптуватися до змін зовнішньої температури та підтримувати наблизений до нейтрального тепловий стан. Друге місце посідає режим «Нагрівання» з показником 33,3 %, який забезпечує прийнятний рівень теплового комфорту, однак поступається автоматичному керуванню.

У режимі «Охолодження» частка комфорту становить лише 4,5 %, що вказує на виражений холодний дискомфорт без центрального опалення.

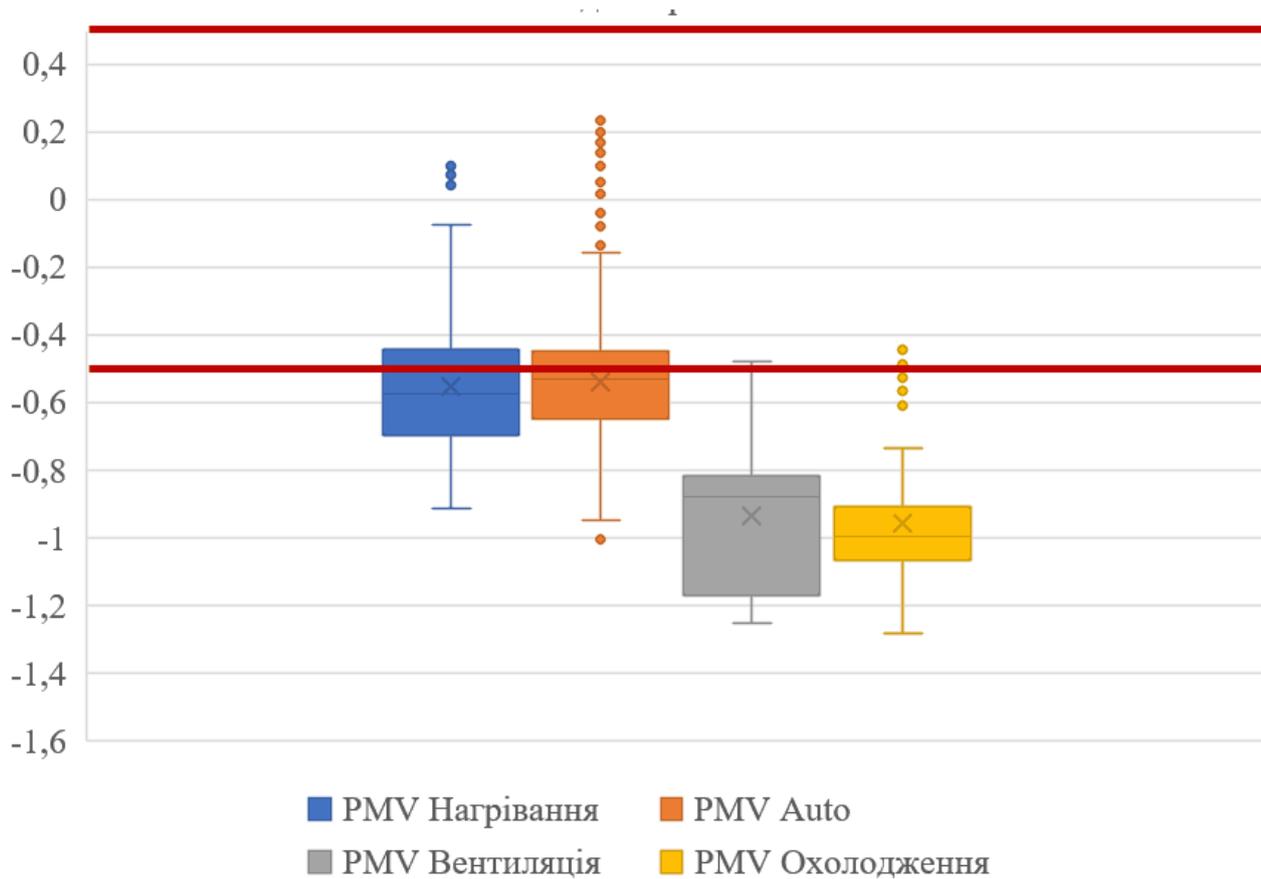


Рис.14. PMV для 4 режимів

Найнижчий результат демонструє режим «Вентиляція» – лише 0,2 %, тобто практично весь період супроводжувався відчуттям прохолоди. Таким чином, за інтегральним показником теплового комфорту найбільш ефективним є режим «Авто», тоді як режими без активного догрівання припливного повітря не забезпечують нормативно комфортних умов у демісезонний період.

Аналіз коефіцієнтів кореляції. Аналіз коефіцієнтів кореляції r (таблиця 3) показує чітко виражені закономірності впливу температури зовнішнього повітря t_m на енергетичні та комфортні показники в різних режимах роботи установки. В усіх режимах спостерігається сильний обернений зв'язок між $Q_{рек}$ і t_m ($r = -0,828 \div -0,947$), що свідчить про закономірне зменшення кількості зрекуперованої теплоти зі зростанням зовнішньої температури. Аналогічно для $\eta_{рек}$ фіксується помірний та сильний від'ємний зв'язок ($r = -0,593 \div -0,757$). Показник E_{eff} також має виражену обернену кореляцію з t_m , найбільш сильну в режимі «Охолодження» ($r = -0,943$), що підтверджує зниження енергетичної доцільності роботи установки при підвищенні температури зовнішнього повітря.

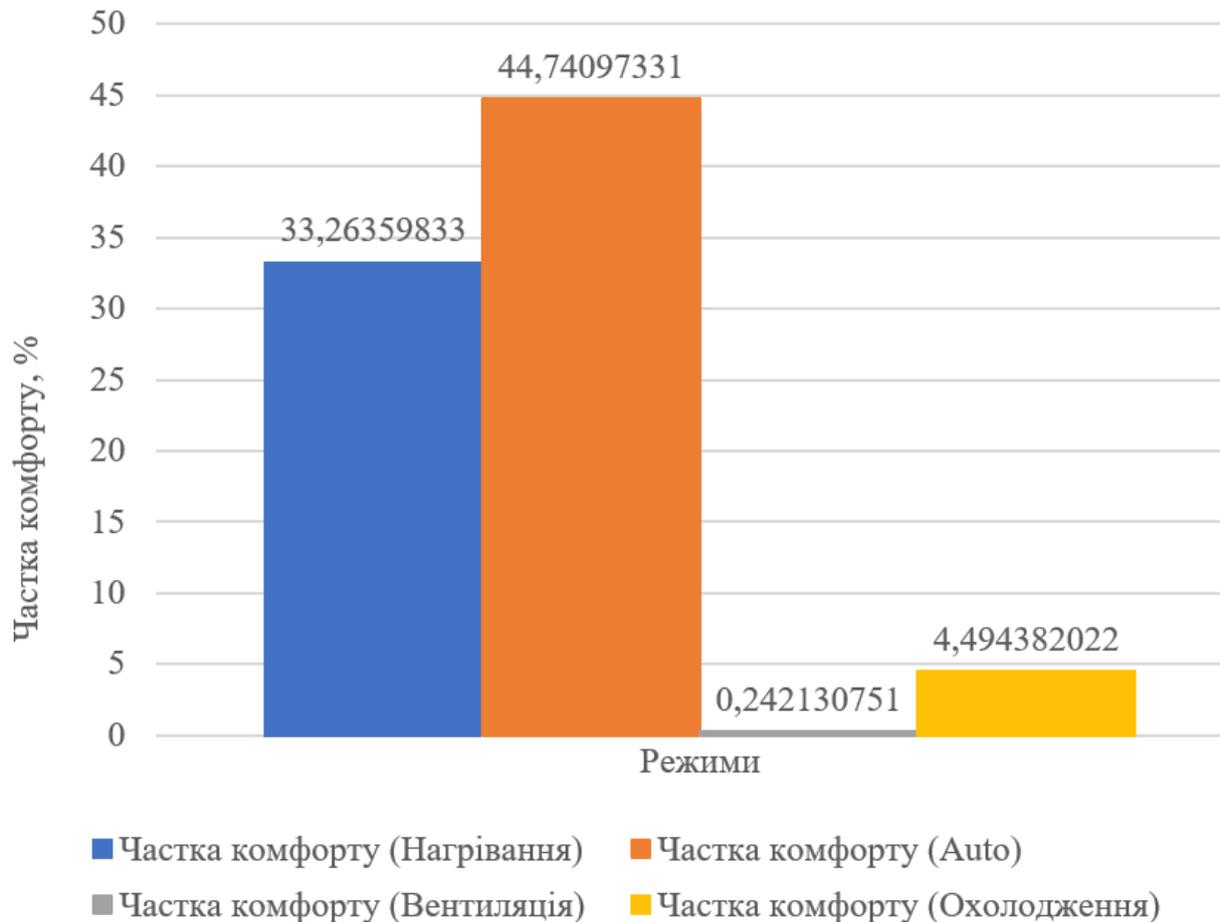


Рис. 15. Частка комфорту для 4 режимів

Температура t_2 (зовнішнє повітря на вході) практично функціонально пов'язана з t_m ($r = 1,000$), що підтверджує коректність вимірювань. Температура після рекуператора t_5 також має майже ідеальну пряму кореляцію з t_m ($r = 0,992 \div 0,999$), що свідчить про значний вплив зовнішніх умов на тепловий баланс витяжного повітря. Зв'язок температури приміщення $t_{прим}$ з t_m загалом слабкий або помірний ($r = -0,118 \div 0,696$), причому найбільш залежним від зовнішніх умов приміщення є в режимі «Охолодження».

Показники комфорту демонструють різну чутливість до t_m . Для PMV у режимі «Охолодження» спостерігається сильний прямий зв'язок ($r = 0,755$), тоді як у режимах «Нагрів» і «Авто» він слабкий. PPD має помірний або сильний обернений зв'язок із t_m у режимі «Охолодження» ($r = -0,794$), що узгоджується зі зменшенням частки незадоволених при підвищенні зовнішньої температури. Найстабільнішим і водночас найсильнішим зв'язком у всіх режимах є кореляція PMV – $t_{прим}$ ($r = 0,969 \div 0,998$), що підтверджує визначальну роль температури повітря в приміщенні у формуванні теплового комфорту порівняно з впливом зовнішніх умов.

Таблиця 3.

Аналіз коефіцієнтів кореляції

Залежність	«Нагрів»	«Вентиляція»	Охолодження	Авто
$\eta_{рек} - t_m$	-0,721	-0,660	-0,757	-0,593
$Q_{рек} - t_m$	-0,947	-0,828	-0,943	-0,944
$t_2 - t_m$	1,000	1,000	1,000	1,000
$t_3 - t_m$	-0,009	0,612	0,899	-0,009
$t_4 - t_m$	-0,080	0,200	0,672	0,218
$t_5 - t_m$	0,997	0,996	0,999	0,992
$t_{прим} - t_m$	-0,118	0,211	0,696	0,219
$E_{eff} - t_m$	-0,689	-0,828	-0,943	-0,438
$RH_{прим} - t_m$	0,540	-0,085	0,895	0,387
PPD - t_m	0,040	-0,232	-0,794	-0,318
PMV - t_m	-0,034	0,217	0,755	0,265
PMV - $t_{прим}$	0,969	0,998	0,995	0,984

Умовні позначення:

	сильна кореляція
	помірна кореляція
	слабкий зв'язок кореляції

Визначення меж ефективної експлуатації. Аналіз отриманих експериментальних і розрахункових даних дозволяє визначити межі ефективної експлуатації децентралізованої установки в неопалювальний період. За результатами оцінки PMV, PPD та частки комфорту встановлено, що за відсутності догрівання припливного повітря (режими «Вентиляція» та «Охолодження») прийнятні умови мікроклімату не забезпечуються при температурі зовнішнього повітря нижче приблизно $11 \div 12$ °С. У цьому діапазоні $PMV = -0,9 \div -1,1$, а частка комфорту не перевищує $0,2 \div 4,5$ %, що відповідає вираженому відчуттю прохолоди при сидячій активності ($met \approx 1,0 \div 1,2$) та демісезонному одязі ($clo \approx 1,2$). Таким чином, гранична температура зовнішнього повітря для експлуатації без догрівання може бути прийнята на рівні близько $+12$ °С; нижче цього значення виникає стійкий тепловий дискомфорт.

У діапазоні $t_m \approx 8 \div 12$ °С забезпечення комфортних умов можливе лише за умови використання повітрянагрівача (режими «Нагрівання» або «Авто»). Найвищу частку комфортних станів (44,7 %) та мінімальні значення PPD ($\approx 10 \div 12$ %) забезпечує режим «Авто», який адаптує роботу догрівання до зміни зовнішніх умов і демонструє кращу енергетичну доцільність порівняно з

постійним режимом «Нагрівання». З урахуванням показників $\eta_{рек}$, $Q_{рек}$, E_{eff} та розподілу PMV рекомендованим режимом для навчальних приміщень у вересні-листопаді та квітні-травні є режим «Авто» з активованим повітрянагрівачем, тоді як експлуатація без догрівання є доцільною лише при відносно високих температурах зовнішнього повітря та невисоких вимогах до теплового комфорту.

Практичні рекомендації для закладів освіти На основі отриманих експериментальних даних та аналізу показників $\eta_{рек}$, $Q_{рек}$, E_{eff} , PMV, PPD і частки комфорту сформовано алгоритм експлуатації децентралізованої вентиляційної установки в неопалювальний період (вересень-листопад, квітень-травень). При температурі зовнішнього повітря вище $+12 \div +14$ °C допускається робота в режимі «Вентиляція» за умови, що температура в приміщенні не опускається нижче $20 \div 21$ °C і PMV перебуває в межах $-0,5 \div 0$. У діапазоні $+8 \div +12$ °C рекомендовано використовувати режим «Авто», який забезпечує найвищу частку комфортних умов (≈ 45 %) та мінімальні значення PPD ($\approx 10 \div 12$ %), але автоматично вмикає догрівання лише за необхідності. При t_m нижче $+8 \div +10$ °C доцільно переходити на режим «Нагрівання», оскільки без догрівання припливного повітря виникає стійкий тепловий дискомфорт ($PMV < -0,8$). Режим «Охолодження» в неопалювальний період є недоцільним, оскільки характеризується найнижчою часткою комфорту ($\approx 4 \div 5$ %).

Рекомендоване значення повітрообміну для навчальних приміщень із заповненістю $10 \div 15$ осіб має відповідати нормативному повітрообміну (не менше $20 \div 30$ м³/год на одну особу), що при дослідженій установці реалізовувалося на 2-й швидкості вентилятора. Зниження швидкості можливе лише за умови стабільного рівня CO₂ у межах нормативних значень (< 1000 ppm) та збереження допустимих показників теплового комфорту.

Використання повітрянагрівача є обов'язковим, коли температура зовнішнього повітря опускається нижче приблизно до $+10 \div +12$ °C або коли значення PMV стає меншим за $-0,7$, а PPD перевищує $15 \div 20$ %. Таким чином, для забезпечення балансу між енергоефективністю та комфортом у навчальних аудиторіях рекомендовано пріоритетне застосування режиму «Авто» з контрольованим догріванням та постійним моніторингом температури приміщення й концентрації CO₂.

Висновки. На основі експериментальних вимірювань і розрахункової обробки даних встановлено, що найбільш енергоефективним у досліджуваному діапазоні температур зовнішнього повітря є режим «Авто». Він забезпечує високі значення $\eta_{рек}$ при помірному електроспоживанні та найкращий інтегральний показник E_{eff} у робочому інтервалі температури зовнішнього повітря $+8 \div +12$ °C. Режим «Нагрівання» також демонструє стабільні

енергетичні характеристики, проте через постійну роботу повітрянагрівача має дещо нижчу енергетичну доцільність порівняно з автоматичним керуванням. Режими «Вентиляція» та «Охолодження» характеризуються зниженням $Q_{рек}$ і E_{eff} із підвищенням температури зовнішнього повітря та не забезпечують оптимального співвідношення енерговитрат і отриманого теплового ефекту.

За показниками теплового комфорту (PMV, PPD та частка комфорту) найкращі результати також продемонстрував режим «Авто» (частка комфорту $\approx 44,7\%$, мінімальні значення PPD $\approx 10 \div 12\%$). Режим «Нагрівання» забезпечує прийнятний рівень комфорту ($\approx 33,3\%$), тоді як режими без активного догрівання практично не формують комфортних умов у демісезонний період. Експлуатація навчального приміщення без центрального опалення є можливою лише за умови використання рекупераційної установки з керованим догріванням повітря. При температурі зовнішнього повітря нижче $+10 \div +12\text{ }^\circ\text{C}$ робота без догрівання призводить до стійкого дискомфорту та переохолодження.

References

1. European Parliament and Council. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union, 2018, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/eng>.
2. Verkhovna Rada Ukrainy. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy No. 2118-VIII vid 22.06.2017. Zakonodavstvo Ukrainy, <https://zakon.rada.gov.ua/go/2118-19>.
3. Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel: Nakaz No. 260 vid 27.10.2020 (reiestr. 18.12.2020 No. 1257/35540). Zakonodavstvo Ukrainy, <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1257-20>.
4. Derzhavne pidpriemstvo "Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstruktsii". DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel. e-Construction (reiestr normatyvnykh dokumentiv), https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996.
5. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel (ofitsiine vydannia). Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy, 2022, https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_6-31-2021.pdf.
6. Wargocki, Pawel, et al. "The Relationships between Classroom Air Quality and Children's Performance in School." Building and Environment, vol. 173, 2020,

- p. 106749, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749>.
7. ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, 2023.
 8. Ferrari, Simone. “Heat Recovery Ventilation in School Classrooms Within Mediterranean Europe: A Climate-Sensitive Analysis of the Energy Impact Based on the Italian Building Stock.” *Energies*, vol. 18, no. 19, 2025, p. 5069, <https://doi.org/10.3390/en18195069>.
 9. Prozuments, A., et al. “Analysis of Heat Recovery Efficiency in Ventilation Systems.” *Energies*, vol. 16, no. 22, 2023, p. 7483, <https://doi.org/10.3390/en16227483>.
 10. Alonso, A., et al. “Students’ Thermal and Indoor Air Quality Perception in Secondary Schools: A Field Study” *Energy and Buildings*, 2025, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825002099>.
 11. Cherednikova, O. V., et al. “Computer-Based Methods for Assessing Thermal Comfort (PMV) Using a C# Module and Comparison with Survey Data in an Educational Environment.” *Tavriiskyi Naukovyi Visnyk. Serii: Tekhnichni Nauky*, no. 4, pt. 1, 2025, pp. 336–349, <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.1.33>.

UDC 628.4.047: 621.039

PhD, Assoc. Prof. **Oleksandra Cherednikova**,
al.chered108@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4684-9870,

PhD, Assoc. Prof. **Dmytro Guzyk**,
guzikd64@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2130-951X,

Assoc. Prof. **Volodymyr Cherednikov**,
Cherednikov@nupp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1857-3942,
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

Stud. **Mykola Cherednikov**,
nikola.cherednikov@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3498-8614

Kharkiv National University of Radio Electronics

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.55-82>

EXPERIMENTAL AND COMPUTER-BASED ANALYSIS OF THE ENERGY PERFORMANCE OF A DECENTRALIZED VENTILATION SYSTEM AND INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY DURING THE NON- HEATING PERIOD

Abstract. *The paper presents the results of a comprehensive experimental and computer-based study of the operation of a decentralized supply and exhaust ventilation unit equipped with a cross-flow plate heat recovery exchanger in an educational classroom during the transitional (non-heating) period in the absence of centralized heating. The objective of the study is a comparative assessment of four operating modes (“Heating”, “Cooling”, “Auto”, and “Ventilation”) in terms of energy performance, indoor air quality, and thermal comfort, with the aim of determining the limits of effective system operation. The experimental investigation was carried out in a computer classroom with a total volume of 90.8 m³ under outdoor air temperatures ranging from +3 to +17 °C. Monitoring of air temperatures at characteristic points of the ventilation system, indoor air temperature and relative humidity, as well as CO₂ concentration, was performed at 2–5 minute intervals, followed by aggregation to 10-minute time steps for statistical data processing and further analytical evaluation. The study determined the heat recovery efficiency coefficient (η_{rec}), the amount of recovered heat (Q_{rec}), and the integral energy efficiency indicator (E_{eff}), together with thermal comfort parameters PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) calculated in accordance with Fanger’s model. A correlation analysis was conducted to identify relationships between energy and comfort parameters and outdoor air temperature. It was established that with increasing outdoor temperature (t_m), the indicators η_{rec} , Q_{rec} , and E_{eff} decrease ($r = -0.593$ to -0.947), which is associated with a reduction in the temperature difference across the heat exchanger. The highest share of comfortable conditions was achieved in the “Auto” mode (approximately 44.7%), whereas*

operating modes without electric reheating do not ensure acceptable thermal comfort when t_m is below +12 °C. Based on the findings, temperature thresholds for the justified use of the electric heater were defined, and practical recommendations for optimizing the control algorithm of ventilation systems in educational buildings during the transitional season were developed.

Keywords: *energy efficiency, heat recovery, ventilation, thermal comfort, indoor air quality, computer-based data analysis, statistical processing, correlation analysis.*

Received/Надійшла до редакції 03.12.2025

Reviewed/Рецензована 25.12.2025

Accepted/Прийнята 26.12.2025