УДК 697.921:004.9
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).30

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF A SUPPLY AND EXHAUST VENTILATION SYSTEM WITH HEAT RECOVERY IN AN EDUCATIONAL ROOM

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРИМІЩЕННІ

O. V. Cherednikova
al.chered108@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4684-9870

Dmytro V. Huzyk
guzikd64@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2130-951X

Volodymyr M. Cherednikov
cherednikov@nupp.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1857-3942

D. D. Yermolenko
danylyedd@gmail.com
ORCID: 0009-0005-3341-3463

О. В. Чередніков,
канд. техн. наук, доцент

Д. В. Гузик,
канд. техн. наук, доцент

В. М. Чередніков,
канд. техн. наук, доцент

Д. Д. Єрмоленко,
студент

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава

Abstract. *Purpose*. To evaluate the actual efficiency of a supply and exhaust ventilation unit with heat recovery under real operating conditions of an educational room during the heating period, to obtain the dependencies of its performance indicators on the outdoor air temperature and to quantify the influence of the frost protection algorithm on the achievable level of heat utilization. *Method*. A full-scale experiment was carried out on a Vents VUT 300 PB EC P A21 DTV unit with a counter-flow polymer heat exchanger installed in a computer classroom of the National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". A hardware and software monitoring complex was created, including the built-in temperature sensors of the unit read every 2 minutes by the specially developed ModbusReader application, a Sonoff POWR316D Wi-Fi electricity meter with the eWeLink application, a Sencor SWS12500WIFI weather station and three Xintest HT-501 indoor climate sensors. During the heating period, at outdoor temperatures from minus 9.7 to 12.7 degrees Celsius, an array of 5267 synchronized records was formed; after averaging over 10-minute intervals and sorting by outdoor temperature it contained 1059 points. The recovery effectiveness was determined by the temperature method, and third-degree polynomial regression was applied separately to the two operating modes of the unit. *Results*. It was established that the boundary between the two qualitatively different operating modes is about minus 2.7 degrees Celsius. Below this temperature the frost protection algorithm limited the full operation of the unit to 51.3 percent of the time: the average recovery effectiveness in this mode was about 52 percent, which corresponds to an effective heat utilization of about 27 percent, while in the normal mode the average effectiveness reached 86 percent with peaks up to 97 percent. The average recovered heat capacity was 0.85 kW in the frost protection mode and 1.26 kW in the normal mode, the ratio of the recovered heat capacity to the consumed electric power was on average 7.8 and 2.9 respectively, reaching 18. The recovered heat capacity over the whole period varied within 0.23–1.68 kW, and in the normal mode it naturally decreased with the increase of the outdoor air temperature. *Scientific novelty*. For the first time, on the basis of long-term automated monitoring of a serial small-capacity unit in the climatic conditions of Ukraine, the influence of the frost protection algorithm was quantified and polynomial regression dependencies of the performance indicators on the outdoor air temperature were obtained separately for the two operating modes. *Practical importance*. The obtained dependencies and indicators can be used in technical and economic feasibility calculations of heat recovery ventilation in educational buildings, in the selection of operating modes of such units, and the described monitoring approach can be reproduced for other objects.

Key words: frost protection; automated monitoring; energy consumption; indoor microclimate; polynomial regression; energy performance indicators.

Анотація. *Мета*. Оцінити фактичну ефективність роботи припливно-витяжної вентиляційної установки з рекуперацією теплоти повітря, що видаляється з приміщення в реальних умовах експлуатації навчального аудиторії в опалювальний період. Отримати залежності показників її ефективності від температури зовнішнього повітря та кількісно оцінити вплив алгоритму захисту від обмерзання на досяжний рівень утилізації теплоти. *Методика*. Проведено натурний експеримент на установці Vents ВУТ 300 ПБ ЕС П А21 DTV з протиточним полімерним теплообмінником, змонтованій у комп'ютерному класі (ауд. 107Ц) Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (НУПП). Створено програмно-апаратний комплекс моніторингу, що включає: вбудовані датчики температури установки, покази яких зчитувалися кожні 2 хвилини спеціально розробленим застосунком ModbusReader, лічильник електроенергії, яка споживається установкою ВУТ 300 ПБ ЕС П А21 DTV, Sonoff POWR316D із застосунком eWeLink, метеостанцію Sencor SWS12500WIFI та три датчики мікроклімату Xintest HT-501, що розміщувались у характерних «точках» аудиторії. Протягом опалювального періоду при температурах зовнішнього повітря від мінус 9,7 до плюс 12,7 градусів Цельсія сформовано масив із 5267 синхронізованих записів, який після усереднення за 10-хвилинними інтервалами та сортування за температурою зовнішнього повітря містив 1059 точок. Ефективність рекуперації визначалася температурним методом, а для двох режимів роботи установки окремо застосовано поліноміальну регресію третього степеня. *Результати*. Установлено, що межа між двома якісно різними режимами роботи становить близько мінус 2,7 градуса за шкалою Цельсія. Нижче цієї температури алгоритм захисту від обмерзання обмежував роботу установки в повному режимі до 51,3 відсотка часу: середній коефіцієнт корисної дії рекуперації в цьому режимі становив близько 52 відсотків, що відповідає ефективній утилізації теплоти близько 27 відсотків, тоді як у звичайному режимі середній коефіцієнт корисної дії досягав 86 відсотків з піковими значеннями до 97 відсотків. Середня теплова потужність рекуперації становила 0,85 кВт в режимі захисту та 1,26 кВт у звичайному режимі, відношення відновленої теплової потужності до спожитої електричної в середньому дорівнювало відповідно 7,8 та 2,9. Теплова потужність рекуперації за весь період змінювалася в межах від 0,23 до 1,68 кВт, а у звичайному режимі закономірно знижувалася зі зростанням температури зовнішнього повітря. *Наукова новизна*. Уперше на основі тривалого автоматизованого моніторингу серійної установки малої продуктивності в кліматичних умовах України кількісно визначено вплив алгоритму захисту від обмерзання та отримано поліноміальні регресійні залежності показників ефективності від температури зовнішнього повітря окремо для двох режимів роботи. *Практична значимість*. Отримані залежності та показники можуть використовуватися в техніко-економічних розрахунках доцільності застосування вентиляційних установок з рекуперацією теплоти в навчальних закладах, під час вибору режимів експлуатації таких установок, а описаний підхід до моніторингу може бути відтворений для інших об'єктів.

Ключові слова: захист від обмерзання; автоматизований моніторинг; енергоспоживання; мікроклімат приміщення; поліноміальна регресія; коефіцієнт корисної дії.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Підвищення енергоефективності систем теплопостачання та вентиляції будівель залишається одним із ключових напрямів розвитку сучасної інженерії в Україні. Актуальність цього питання зумовлена постійним зростанням вартості енергоресурсів, а також посиленням нормативних вимог щодо енергетичної ефективності будівель [1]. Одним із дієвих способів скорочення теплових втрат є застосування механічних систем вентиляції з рекуперацією теплоти, які, залежно від типу теплообмінника, забезпечують повернення від 50 до 90 % теплової енергії витяжного повітря до припливного потоку [2]. Проблема недостатньої вентиляції навчальних приміщень є поширеною у світовій практиці та безпосередньо впливає на здоров'я і працездатність присутніх [3]. Для громадських і навчальних будівель системи з рекуперацією дозволяють одночасно підтримувати нормативні параметри мікроклімату [4; 5; 6] та зменшувати витрати теплової енергії на опалення.

Поштовхом до проведення даного дослідження стала необхідність покращення параметрів мікроклімату в аудиторії № 107 центрального корпусу НУПП. Досліджуване приміщення використовується як комп'ютерний клас і не має безпосереднього контакту із зовнішнім повітрям, що призводило до підвищення вологості та накопичення двоокису вуглецю під час проведення занять.

Для вирішення цієї проблеми було реалізовано комплексний підхід, який охоплював усі етапи створення системи – від комп'ютерного проєктування, надання обладнання на спонсорських засадах ПрАТ «ВЕНТИЛЯЦІЙНІ СИСТЕМИ» (м. Боярка, Україна), його монтаж за участі студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» під час проходження практики та виконання необхідних інженерних розрахунків до проведення натурного експерименту з автоматизованим збиранням і аналізом експлуатаційних даних.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Ефективність систем вентиляції з рекуперацією теплоти та їхній вплив на якість внутрішнього повітря активно досліджуються у світовій практиці.

Огляди технологій утилізації теплоти вентиляційного повітря [2; 11] систематизують конструкції теплообмінників та досяжні рівні ефективності рекуперації. У роботі [8] показано суттєвий вплив рекуперації на якість повітря та енергоспоживання малих житлових будівель, огляд [9] узагальнює взаємозв'язок теплового комфорту, якості повітря та енергоспоживання вентиляції навчальних будівель, а в [10] доведено безпосередній вплив параметрів мікроклімату на працездатність та результати навчальної діяльності. Особливості застосування рекуператорів у холодному кліматі детально розглянуто в огляді [12], присвяченому теплообмінникам для енергоефективних будівель північних країн. Окремим напрямом є проблема обмерзання теплообмінників: у [13] запропоновано динамічну модель протиточного рекуператора з урахуванням конденсації та утворення інею, огляд [14] систематизує технології захисту від обмерзання для житлової вентиляції в холодних кліматичних регіонах, а в [15] експериментально досліджено роботу однокімнатного рекуператора в умовах обмерзання та оцінено стратегії керування. Саме періодичне вимкнення або обмеження припливного потоку алгоритмами захисту, як показано в [14; 15], може суттєво знижувати фактичну сезонну ефективність утилізації теплоти. У попередніх працях авторів [16; 17] розглянуто експериментально-комп'ютерний аналіз енергетичної ефективності децентралізованої вентиляційної системи в неопалювальний період та комп'ютеризовану систему моніторингу параметрів вентиляційної установки в навчальному середовищі.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість публікацій, більшість оцінок ефективності систем із рекуперацією ґрунтується або на паспортних характеристиках виробників, отриманих у стандартизованих лабораторних умовах, або на короткочасних вимірюваннях. Бракує результатів тривалого автоматизованого моніторингу серійних установок малої продуктивності в реальних умовах експлуатації навчальних приміщень, зокрема для кліматичних умов України. Кількісний вплив алгоритмів захисту від обмерзання на фактичну ефективність конкретних серійних установок здебільшого залишається поза увагою, а регресійні залежності показників ефективності від температури зовнішнього повітря, придатні для техніко-економічних розрахунків, для установок цього класу в літературі відсутні.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є оцінка фактичної ефективності роботи припливно-витяжної вентиляційної установки з рекуперацією теплоти повітря, що видаляється з приміщення шляхом аналізу експлуатаційних даних, визначення залежностей теплової потужності та ефективності рекуперації від температури зовнішнього повітря з побудовою поліноміальних ліній тренду, а також дослідження впливу алгоритму захисту від обмерзання на енергетичні характеристики системи.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процес рекуперації теплоти в припливно-витяжній вентиляційній установці Vents ВУТ 300 ПБ ЕС П А21 DTV ПрАТ "ВЕНТИЛЯЦІЙНІ СИСТЕМИ" з протиточним полімерним теплообмінником (паспортні дані: максимальна витрата повітря 340 м^3/год, максимальна ефективність рекуперації до 90 %, підключення повітропроводів ∅160 мм), змонтованій у навчальній аудиторії № 107 центрального корпусу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Предметом дослідження стали енергетичні характеристики та показники ефективності рекуперації теплоти в реальних умовах експлуатації в опалювальний період.

У роботі було застосовано методи натурного експерименту з автоматизованим збиранням даних, температурний метод визначення ефективності рекуперації, статистичне оброблення часових рядів з усередненням та поліноміальний регресійний аналіз.

Для проведення експериментальних досліджень був створений програмно-апаратний комплекс автоматизованого збирання та оброблення даних, до складу якого входили вбудовані датчики температури вентиляційної установки, Wi-Fi лічильник електроенергії, метеостанція та датчики мікроклімату приміщення.

Контроль температурних параметрів здійснювався за допомогою вбудованих датчиків установки, покази яких відображаються пультом керування А21 та застосунком Vents Home у 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. Зчитування показників виконувалося кожні 2 хвилини за допомогою спеціально розробленого застосунку ModbusReader з автоматичним збереженням результатів разом із часовими мітками у файл OutputData.csv для подальшого оброблення та аналізу в середовищі Microsoft Excel.

Визначення фактичного енергоспоживання вентиляційної установки здійснювалося за допомогою Wi-Fi лічильника електроенергії Sonoff POWR316D із передаванням даних через мобільний застосунок eWeLink (добові, погодинні значення фіксувались з кроком 2 хвилини). Прилад був підключений таким

чином, щоб реєструвати виключно споживання електроенергії вентиляційною системою без урахування інших електричних навантажень аудиторії.

Параметри зовнішнього середовища контролювалися за допомогою метеостанції Sencor SWS12500WIFI, встановленої на даху корпусу, з якої для експерименту використовувалася температура зовнішнього повітря $t_м$, що дозволило враховувати вплив кліматичних умов [7] на роботу системи рекуперації. Додатково для оцінювання параметрів мікроклімату в приміщенні було встановлено три датчики Xintest HT-501, які вимірювали концентрацію двоокису вуглецю (CO_2), температуру та відносну вологість повітря кожні 2 хвилини. Датчики розміщувалися в характерних точках аудиторії: у центральній частині приміщення на висоті дихальної зони користувачів, поблизу припливного повітророзподільника та в найбільш віддаленій від анемостатів зоні.

Установка працювала в режимі «Авто» на другій швидкості вентиляторів, що відповідало витраті повітря 206 м^3/год та сумарній потужності двох вентиляторів 64 Вт. Вимірювання виконувалися протягом опалювального періоду 2025–2026 навчального року при температурах зовнішнього повітря $t_м$ від –9,7 до 12,7 °С. Сформований масив даних містив 5267 рядків із кроком 2 хвилини ($t_1 = t_3$, t_2, t_4, t_5, $t_м$, спожита електроенергія $E_{спож}$) з датами та часом вимірювань; пропущені значення були видалені, а ряди – синхронізовані за часом. Миттєвий ККД рекуперації визначався за температурним методом:

$$\eta = (t_4 - t_5)/(t_4 - t_м) \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

де t_4 – температура витяжного повітря на вході рекуператора (з приміщення);

t_5 – температура витяжного повітря на виході рекуператора;

$t_м$ – температура зовнішнього повітря за даними метеостанції.

Теплова потужність рекуперації визначалася за формулою:

$$Q_{рек} = \rho \cdot c \cdot L \cdot (t_1 - t_2) =$$
$$= 1{,}2 \cdot 1{,}005 \cdot 0{,}057 \cdot (t_1 - t_2),\ кВт, \qquad (2)$$

де $\rho = 1{,}2$ кг/м^3 – густина повітря;

$c = 1{,}005$ кДж/(кг · °С) – питома теплоємність повітря;

$L = 0{,}057$ м^3/с – витрата повітря на другій швидкості вентилятора.

Теплова потужність, необхідна для підігрівання припливного повітря без рекуперації:

$$Q_{без} = \rho \cdot c \cdot L \cdot (t_4 - t_м),\ кВт. \qquad (3)$$

Частка теплової потреби, яка не покривається рекуперацією та має компенсуватися системою опалення (з урахуванням роботи захисту від обмерзання $Q_{рек.зах}$):

$$\delta = (Q_{без} - Q_{рек.зах})/Q_{без} \cdot 100\ \%. \qquad (4)$$

Оскільки при температурах зовнішнього повітря нижче –2,7 °С алгоритм захисту від обмерзання періодично вимикав припливний вентилятор (приблизно 3 хвилини роботи та 2,7 хвилини паузи), рекуператор функціонував у повному режимі лише 51,3 % часу. Для об'єктивного оцінювання застосовувався коефіцієнт ефективності системи $k_{еф} = \eta \cdot 0{,}513$ (при $t_м \le -2{,}7$ °С; при вищих температурах $k_{еф} = \eta$). Коефіцієнт енергетичної ефективності процесу рекуперації визначався як відношення відновленої теплової потужності до спожитої електричної:

$$K = Q_{рек}/E_{спож}. \qquad (5)$$

На основі первинного масиву були обчислені середньоарифметичні значення η, $k_{еф}$, $Q_{рек}$, $Q_{без}$, δ та K за кожні 10 хвилин. Після усереднення в таблиці було залишено лише 10-хвилинні значення (1059 точок), які були відсортовані за температурою зовнішнього повітря $t_м$. Оскільки установка має два якісно різні режими роботи, поліноміальні лінії тренду третього степеня будувалися окремо для діапазону від –9,7 до –2,7 °С (режим захисту від обмерзання) та для діапазону від –2,7 до 12,7 °С (звичайний режим роботи рекуператора). Такий обсяг вибірки та автоматизований характер вимірювань забезпечують статистичну обґрунтованість отриманих залежностей і можливість повного відтворення описаного дослідження.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Аудиторія № 107 центрального корпусу Полтавської політехніки, яка використовується як комп'ютерний клас, не має безпосереднього контакту із зовнішнім середовищем, що унеможливлює організацію природного повітрообміну. Для забезпечення нормативних параметрів вентиляції, зокрема подачі свіжого повітря в обсязі не менше 20 м^3/год на одну особу відповідно до вимог [4], було обрано механічну припливно-витяжну вентиляційну установку з рекуперацією теплоти, характеристики якої наведено в розділі «Методи, об'єкт та предмет дослідження».

Аеродинамічне проєктування вентиляційної системи здійснювалося з використанням сучасних комп'ютерних засобів розрахунку. У процесі розрахунків були визначені витрати повітря для окремих ділянок мережі, швидкості руху повітряних потоків у повітропроводах, а також сумарні втрати тиску з урахуванням аеродинамічного опору повітропроводів, фасонних елементів та повітророзподільчих пристроїв. На підставі отриманих результатів для вентиляційної мережі були обрані круглі повітропроводи діаметром 160 мм, які забезпечують необхідні параметри повітрообміну при допустимих швидкостях руху повітря та низькому рівні шуму. Засоби комп'ютерної графіки (CAD) застосовувалися для побудови схеми вентиляційної системи з рекуперацією теплоти

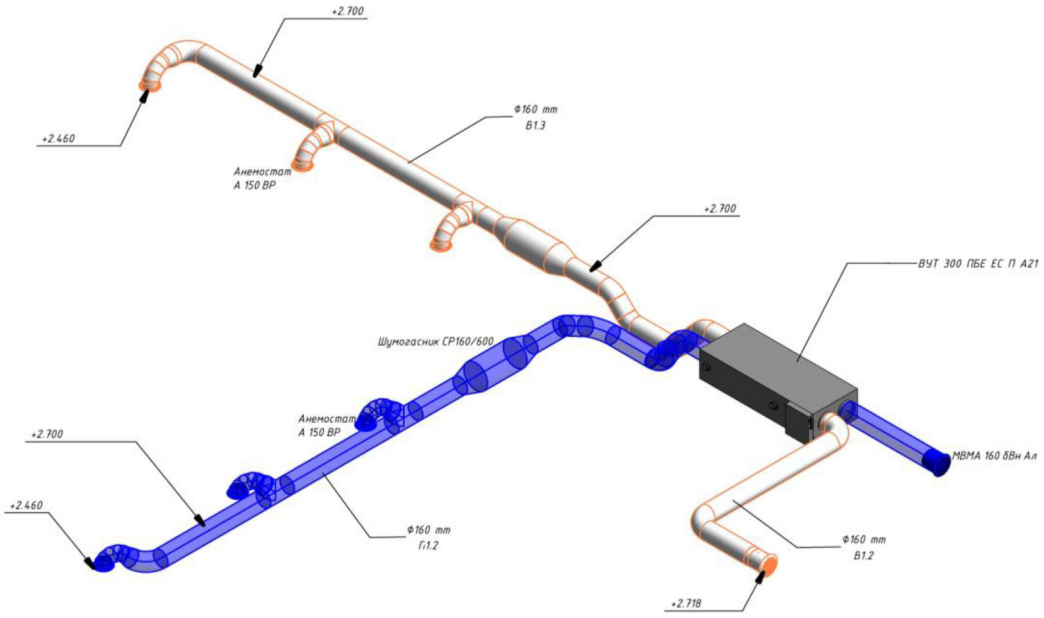


Рис. 1. Схема припливно-витяжної вентиляційної системи

(рис. 1), що відображає тривимірну конфігурацію повітропроводів та місця підключення повітророзподільчих пристроїв.

Відповідно до розробленої системи вентиляції, у приміщенні встановлено три припливні та три витяжні анемостати А150ВР виробництва VENTS, які забезпечують рівномірний розподіл повітряних потоків по всьому об'єму аудиторії. Для зменшення шумового навантаження на припливній та витяжній гілках мережі передбачено шумоглушники СР 160/600, а для запобігання неконтрольованому перетіканню повітря при зупинці установки – зворотні клапани (рис. 2). Припливно-витяжна установка розміщена під стелею коридору між аудиторією та зовнішньою стіною будівлі (рис. 2), що забезпечує зручність монтажу та обслуговування обладнання.

За впорядкованими експериментальними даними побудовано графіки залежності середнього ККД рекуперації (рис. 3), теплової потужності рекуперації (рис. 4) та коефіцієнта енергоефективності (рис. 5) від температури зовнішнього повітря з поліноміальними лініями тренду третього степеня для кожного з двох режимів роботи. Для аналізу використовувалися усереднені за 10-хвилинними інтервалами значення показників, що дозволило позбутися впливу миттєвих випадкових коливань, особливо помітних у режимі захисту від обмерзання.



Рис. 2. Припливно-витяжна вентиляційна система аудиторії 107Ц

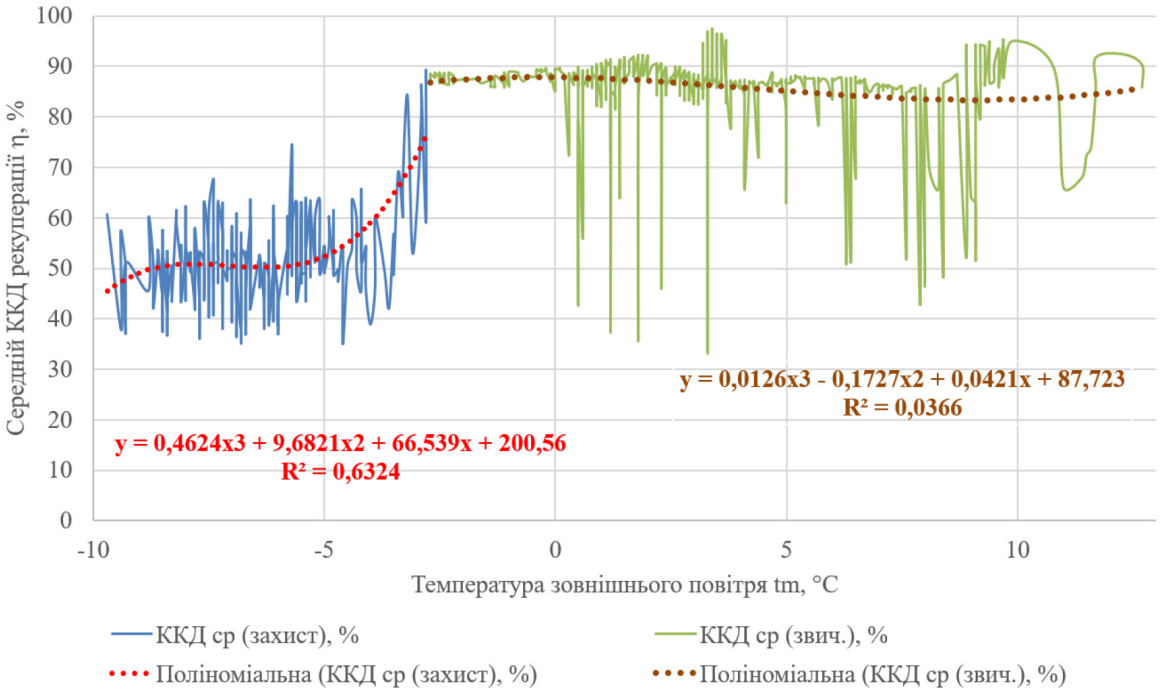


Рис. 3. Залежність середнього ККД рекуперації від температури зовнішнього повітря за режимами роботи

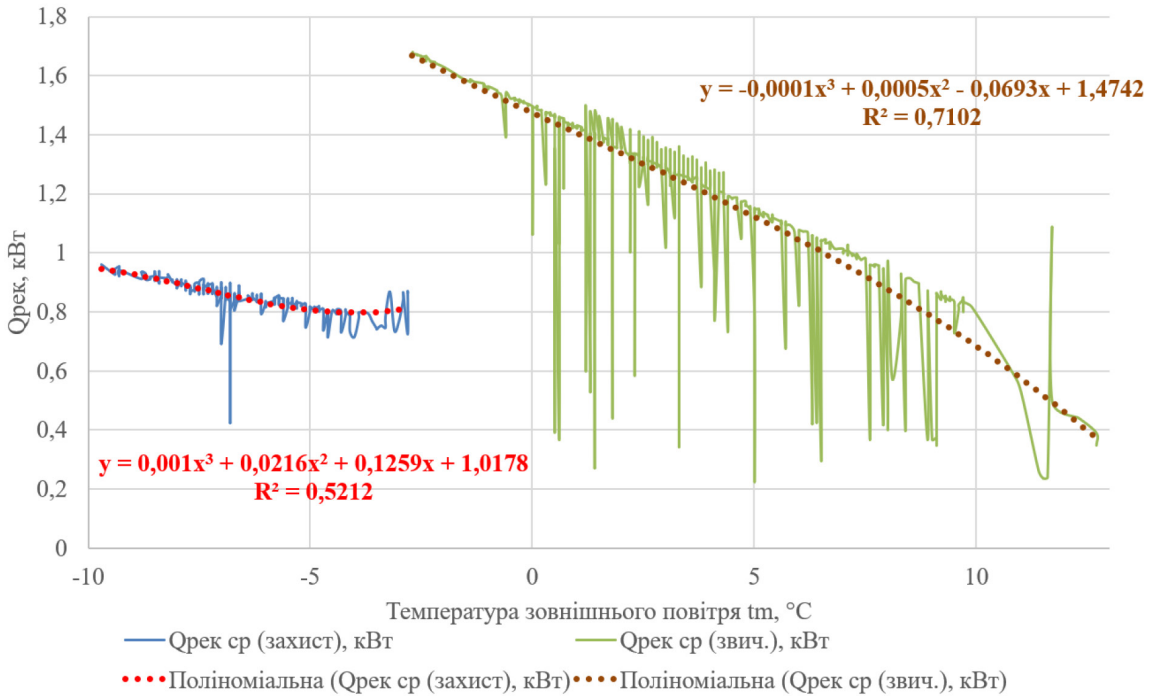


Рис. 4. Залежність теплової потужності рекуперації від температури зовнішнього повітря за режимами роботи

У звичайному режимі роботи (від –2,7 до 12,7 °С) середній ККД рекуперації становив близько 86 % з піковими значеннями до 97 %. У режимі захисту від обмерзання (від –9,7 до –2,7 °С) середній ККД рекуперації за температурним методом знижувався приблизно до 52 %, а з урахуванням того, що установка працювала в повному режимі лише 51,3 % часу ($k_{еф}$ = η · 0,513), ефективна утилізація теплоти становила близько 27 % (рис. 3). Теплова потужність рекуперації (з урахуванням роботи системи захисту) змінювалася в межах 0,23–1,68 кВт: у режимі захисту від обмерзання її середнє значення становило 0,85 кВт, у звичайному режимі – 1,26 кВт (рис. 4). Коефіцієнт енергетичної ефективності $K = Q_{рек}/E_{спож}$ був найвищим при низьких зовнішніх температурах: середнє значення близько 7,8 у режимі захисту від

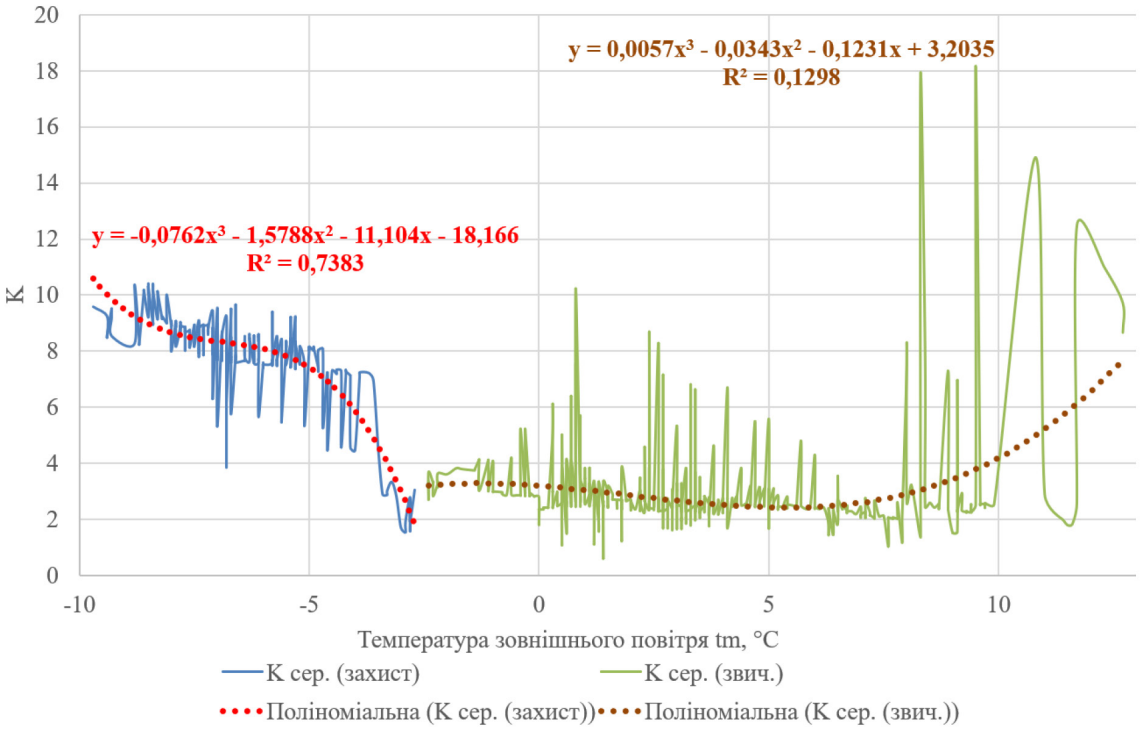


Рис. 5. Залежність коефіцієнта енергоефективності від температури зовнішнього повітря за режимами роботи

обмерзання проти 2,9 у звичайному режимі, з піковими значеннями до 18 (рис. 5). Коефіцієнти детермінації поліноміальних трендів у режимі захисту від обмерзання становлять $R^2 = 0{,}37$ для $\eta(t_м)$, $R^2 = 0{,}28$ для $Q_{рек}(t_м)$ та $R^2 = 0{,}74$ для $K(t_м)$; у звичайному режимі – відповідно 0,04; 0,71 та 0,13.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати кількісно підтверджують висновки оглядових і модельних досліджень [13; 14; 15] про те, що робота систем захисту від обмерзання є визначальним чинником зниження фактичної сезонної ефективності рекуперації в холодний період: циклічне вимкнення припливного вентилятора зменшувало ефективну утилізацію теплоти з паспортних 90 % до приблизно 27 % при температурах нижче –2,7 °C. Водночас у звичайному режимі виміряний середній ККД (близько 86 %) наближається до паспортного значення, а практично горизонтальний тренд ККД (коефіцієнт детермінації 0,04) свідчить про стабільність характеристик теплообмінника в усьому діапазоні додатних температур, що узгоджується з даними виробників та результатами лабораторних випробувань, узагальненими в [2; 11]. Виражена спадна залежність теплової потужності рекуперації від температури зовнішнього повітря у звичайному режимі (коефіцієнт детермінації 0,71) також відповідає фізичній картині процесу: зі зменшенням різниці температур знижується теплообмін.

Найвищі значення коефіцієнта енергоефективності K спостерігалися саме при низьких зовнішніх температурах: кожна кіловат-година спожитої електроенергії забезпечувала повернення в приміщення в середньому в 7,8 рази більшої кількості теплової енергії, що підтверджує енергетичну доцільність застосування рекуперації навіть з урахуванням простоїв у режимі захисту. Різкі стрибки значень K при $t_м$ понад 8 °C пояснюються малою різницею температур і впливом внутрішніх тепловиділень, що знижує статистичну якість тренду в цій зоні (коефіцієнт детермінації 0,13). Частка теплової потреби δ, яка не покривається рекуперацією, у дні з максимально низькою температурою зовнішнього повітря суттєво зростає, і саме вона визначає додаткове навантаження на систему опалення будівлі.

Отримані поліноміальні регресійні залежності показників ефективності від температури зовнішнього повітря можуть безпосередньо застосовуватися в техніко-економічних розрахунках доцільності використання вентиляційних установок з рекуперацією теплоти цього класу в кліматичних умовах регіону. Слід зазначити обмеження дослідження: результати отримано для однієї серійної установки протягом одного опалювального періоду, тому для узагальнення висновків доцільне продовження моніторингу та порівняння з установками інших типорозмірів.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження підтверджують ефективність комплексного підходу

до проєктування та впровадження систем вентиляції навчальних приміщень, який поєднує сучасні комп'ютерні технології, інженерно-графічні методи та засоби автоматизованого моніторингу. Використання CAD-систем дає змогу виконати аеродинамічний розрахунок вентиляційної мережі, обґрунтувати вибір її елементів та розробити схему системи, яка стала основним інженерним документом під час виконання монтажних робіт.

Створений програмно-апаратний комплекс автоматизованого збирання даних (вбудовані датчики температури установки із застосунком ModbusReader, Wi-Fi лічильник електроенергії, метеостанція та датчики мікроклімату) забезпечив безперервний моніторинг параметрів повітряного середовища та енергоспоживання і дозволив сформувати репрезентативний масив із 5267 експериментальних записів для оцінювання ефективності системи в реальних умовах експлуатації.

Експеримент показав, що установка Vents ВУТ 300 ПБ ЕС П А21 DTV має два якісно різні режими роботи з межею близько –2,7 °С. У звичайному режимі середній ККД рекуперації становить близько 86 % з піками до 97 % і практично не залежить від температури зовнішнього повітря, тоді як у режимі захисту від обмерзання середній ККД знижується приблизно до 52 %, а ефективна утилізація теплоти з урахуванням циклічного вимкнення припливного вентилятора – до близько 27 %. Середня теплова потужність рекуперації становила 0,85 кВт у режимі захисту та 1,26 кВт у звичайному режимі, коефіцієнт енергетичної ефективності був найвищим узимку (у середньому 7,8, з піками до 18). Отримані для кожного режиму поліноміальні залежності придатні для використання в економічних обґрунтуваннях застосування систем із рекуперацією в навчальних будівлях.

Перспективними напрямами подальших досліджень є вдосконалення алгоритмів керування вентиляційною установкою з метою скорочення тривалості роботи в режимі захисту від обмерзання, продовження моніторингу в теплий період року для формування повної річної характеристики енергетичної ефективності, а також інтеграція результатів автоматизованого моніторингу з BIM-моделлю будівлі для комплексного аналізу теплового балансу приміщень.

REFERENCES

[1] Zakon Ukrainy "Pro enerhetychnu efektyvnist budivel" vid 22.06.2017 no. 2118-VIII [Law of Ukraine "On energy efficiency of buildings" of 22.06.2017 no. 2118-VIII]. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19 [in Ukrainian].

[2] Mardiana-Idayu, A., & Riffat, S. B. (2012). Review on heat recovery technologies for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1241–1255. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026

[3] Fisk, W. J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. Indoor Air, 27(6), 1039–1051. https://doi.org/10.1111/ina.12403

[4] DBN V.2.2-3:2018 (2018). Budynky i sporudy. Zaklady osvity [Buildings and structures. Educational institutions]. Kyiv : Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].

[5] DBN V.2.5-67:2013 (2013). Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia [Heating, ventilation and air conditioning]. Kyiv : Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].

[6] DSTU B EN 15251:2011 (2012). Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel [Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings]. Kyiv: Minrehion Ukrainy. [in Ukrainian].

[7] DSTU-N B V.1.1-27:2010 (2010). Budivelna klimatolohiia [Building climatology]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy. [in Ukrainian].

[8] Ahmed, K., Kurnitski, J., & Olesen, B. W. (2024). Examining heat recovery ventilation impact on indoor air quality in small residential buildings. Buildings, 14(6), 1802. https://doi.org/10.3390/buildings14061802

[9] Jia, L.-R., Han, J., Chen, X., Li, Q.-Y., Lee, C.-C., & Fung, Y.-H. (2021). Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: a comprehensive review. Buildings, 11(12), 591. https://doi.org/10.3390/buildings11120591

[10] Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2017). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. Building and Environment, 112, 359–366. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.020

[11] O'Connor, D., Calautit, J. K. S., & Hughes, B. R. (2016). A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1481–1493. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039

[12] Justo Alonso, M., Liu, P., Mathisen, H. M., Ge, G., & Simonson, C. (2015). Review of heat/energy recovery exchangers for use in ZEBs in cold climate countries. Building and Environment, 84, 228–237. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.014

[13] Nielsen, T. R., Rose, J., & Kragh, J. (2009). Dynamic model of counter flow air to air heat exchanger for comfort ventilation with condensation and frost formation. Applied Thermal Engineering, 29(2–3), 462–468. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.006

[14] Bai, H. Y., Liu, P., Justo Alonso, M., & Mathisen, H. M. (2022). A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 162, 112417. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112417

[15] Gendebien, S., Parthoens, A., & Lemort, V. (2019). Investigation of a single room ventilation heat recovery exchanger under frosting conditions: modeling, experimental validation and operating strategies evaluation. Energy and Buildings, 186, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.039

[16] Cherednikova, O., Huzyk, D., Cherednikov, V., & Cherednikov, M. (2026). Eksperymentalno-kompiuternyi analiz enerhetychnoi efektyvnosti detsentralizovanoi ventyliatsiinoi systemy ta yakosti vnutrishnoho seredovyshcha v neopaliuvalnyi period [Experimental and computer analysis of the energy efficiency of a decentralized ventilation system and indoor environment quality in the non-heating period]. Ventyliatsiia, osvitlennia ta teplohazopostachannia – Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply, 56, 55–82. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.55-82 [in Ukrainian].

[17] Cherednikov, V. M., Cherednikova, O. V., & Yermolenko, D. D. (2026). Kompiuteryzovana systema monitorynhu parametriv ventyliatsiinoi ustanovky v navchalnomu seredovyshchi [Computerized monitoring system of ventilation unit parameters in an educational environment]. Tezy 78-yi naukovoi konferentsii profesoriv, vykladachiv, naukovykh pratsivnykiv, aspirantiv ta studentiv Natsionalnoho universytetu «Poltavska politekhnika imeni Yuriia Kondratiuka», Vol. 2, 71–72. Poltava : NUPP. Retrieved from: https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2026/78-conf/tom-2-2026.pdf [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII (зі змінами). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19

[2] Mardiana-Idayu, A., & Riffat, S. B. (2012). Review on heat recovery technologies for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1241–1255. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026

[3] Fisk, W. J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. Indoor Air, 27(6), 1039–1051. https://doi.org/10.1111/ina.12403

[4] ДБН В.2.2-3:2018 (2018). Будинки і споруди. Заклади освіти. Київ : Мінрегіон України.

[5] ДБН В.2.5-67:2013 (2013). Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України.

[6] ДСТУ Б EN 15251:2011 (2012). Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Київ : Мінрегіон України.

[7] ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 (2010). Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіонбуд України.

[8] Ahmed, K., Kurnitski, J., & Olesen, B. W. (2024). Examining heat recovery ventilation impact on indoor air quality in small residential buildings. Buildings, 14(6), 1802. https://doi.org/10.3390/buildings14061802

[9] Jia, L.-R., Han, J., Chen, X., Li, Q.-Y., Lee, C.-C., & Fung, Y.-H. (2021). Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: a comprehensive review. Buildings, 11(12), 591. https://doi.org/10.3390/buildings11120591

[10] Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2017). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. Building and Environment, 112, 359–366. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.020

[11] O'Connor, D., Calautit, J. K. S., & Hughes, B. R. (2016). A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1481–1493. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039

[12] Justo Alonso, M., Liu, P., Mathisen, H. M., Ge, G., & Simonson, C. (2015). Review of heat/energy recovery exchangers for use in ZEBs in cold climate countries. Building and Environment, 84, 228–237. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.014

[13] Nielsen, T. R., Rose, J., & Kragh, J. (2009). Dynamic model of counter flow air to air heat exchanger for comfort ventilation with condensation and frost formation. Applied Thermal Engineering, 29(2–3), 462–468. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.006

[14] Bai, H. Y., Liu, P., Justo Alonso, M., & Mathisen, H. M. (2022). A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 162, 112417. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112417

[15] Gendebien, S., Parthoens, A., & Lemort, V. (2019). Investigation of a single room ventilation heat recovery exchanger under frosting conditions: modeling, experimental validation and operating strategies evaluation. Energy and Buildings, 186, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.039

[16] Чередніков, О., Гузик, Д., Чередніков, В., & Чередніков, М. (2026). Експериментально-комп'ютерний аналіз енергетичної ефективності децентралізованої вентиляційної системи та якості внутрішнього середовища в неопалювальний період. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 56, 55–82. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.55-82

[17] Чередніков, В. М., Чередніков, О. В., & Єрмоленко, Д. Д. (2026). Комп'ютеризована система моніторингу параметрів вентиляційної установки в навчальному середовищі. Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Т. 2. Полтава: НУПП. С. 71–72. URL: https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2026/78-conf/tom-2-2026.pdf

© Чередніков О. В., Гузик Д. В., Чередніков В. М., Єрмоленко Д. Д.
Дата першого надходження статті до видання: 08.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)