

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ В РЕМОНТНИХ ПРИМІЩЕННЯХ АВТОМОБІЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА

Вінницький національний технічний університет

У статті розглянуто проблему енергоефективного забезпечення мікроклімату на підприємствах з ремонту автотранспорту, які характеризуються значним цілорічним тепловим навантаженням на системи опалення, вентиляції та гарячого водопостачання внаслідок підвищених норм повітрообміну, необхідних для видалення вихлопних газів автомобілів, зварювальних аерозолів і парів розчинників. Застосування традиційних газових котлів спричиняє високе споживання первинної енергії та значні викиди CO₂, що зумовлює актуальність пошуку альтернативних рішень на основі відновлюваних джерел. Запропоновано комбіновану систему SAHP (Solar-Assisted Heat Pump), яка інтегрує тепловий насос «повітря–вода», масив плоских сонячних колекторів та стратифікований акумулятор теплової енергії.

Розроблено розширену математичну модель, що включає: рівняння Хоттеля–Вільє–Блісса з модифікатором кута падіння IAM, який враховує добові й сезонні варіації прямої сонячної радіації; ексергетичний аналіз циклу теплового насоса з визначенням втрат необоротності $E_{x,loss}$ у компресорі, конденсаторі, дросельному вентилі та випарнику; багатовузлову ($N = 4$) стратифіковану модель акумулятора, що описує вертикальний розподіл температур та конвективно-кондуктивне перенесення теплоти між зонами; модель рекуперативного теплообмінника за методом ϵ -NTU; критерій оптимізації за сезонним коефіцієнтом продуктивності SPF, розрахованим за типовий метеорологічний рік для Вінницького регіону. Задача оптимізації полягає у визначенні оптимальної площі колекторів A_{sol}^* і об'єму акумулятора V_{tank}^* , що максимізують SPF за обмеженнями на капітальні витрати; її сформульовано як задачу нелінійного програмування з обмеженнями та розв'язано гібридним генетичним алгоритмом.

Встановлено, що врахування стратифікації акумулятора підвищує точність прогнозування SPF на 12–18% порівняно з однозонною моделлю повного перемішування, яка систематично переоцінює корисну ємність акумулятора. Інтеграція сонячної теплової енергії підвищує COP системи на 30–77% порівняно з автономним ASHP протягом опалювального сезону, а очікуване значення SPF = 3,8–4,3 відповідає коефіцієнту первинної енергії $E_{PE} = 0,47$ –0,53, що у 1,7–2,1 рази менше, ніж для газового котла. Розглянуто IoT-орієнтоване модельно-предиктивне керування (MPC) з використанням короткострокових прогнозів сонячної радіації й теплового навантаження, що забезпечує додаткове зниження сезонного споживання електроенергії на 6–9%. Отримані результати застосовні для проектування та реконструкції систем теплопостачання промислових автотранспортних підприємств, СТО та подібних об'єктів, що реалізують стратегії декарбонізації та зниження експлуатаційних витрат.

Ключові слова: тепловий насос, сонячні колектори, мікроклімат, автомобільне господарство, COP, SPF, енергоефективність, бак-акумулятор, стратифікація, ексергетичний аналіз, рекуперація тепла, IoT-керування.

Стаття надійшла до редакції / Received 16.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 27.04.2026

Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Гончарук В.О.

Вступ

Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях автомобільного господарства – зонах технічного обслуговування, поточного ремонту та діагностики – є складним інженерним завданням. Специфіка цих приміщень визначається рядом чинників: великі об'єми (висота стелі 5–8 м), часте відчинення воріт для заїзду/виїзду транспортних засобів, значне тепловиділення від двигунів, наявність продуктів згоряння палива (CO, NO_x, вуглеводні), парів розчинників та мастильних матеріалів. Згідно нормативами, температура повітря у робочій зоні при виконанні робіт середньої тяжкості (категорія Пб) має становити 17–20°C у холодний період та не перевищувати 27°C у теплий.

Традиційні системи опалення ремонтних зон – газові інфрачервоні випромінювачі, повітряно-опалювальні агрегати – характеризуються значним споживанням первинної енергії. В умовах енергетичної кризи та зростання вартості природного газу актуальним стає застосування SAHP-систем (Solar-Assisted Heat Pump), що поєднують тепловий насос із сонячними тепловими колекторами.

Метою статті є розробка та обґрунтування комбінованої енергоефективної системи мікроклімату ремонтних приміщень автомобільного господарства з розширеною математичною моделлю, яка

враховує стратифікацію теплоаккумулятора та ексергетичний аналіз циклу. Завдання: аналіз публікацій із SAHP-тематики; розробка принципової схеми; побудова математичної моделі з урахуванням термодинамічної незворотності; оцінка режимів роботи та критеріїв оптимальності.

Основний розділ

Системи SAHP класифікують за типом сонячного джерела: теплові (ST-ASHP), фотоелектричні (PV-ASHP) та гібридні (PV/T-ASHP). За результатами систематичного огляду [1–9], PV-ASHP демонструє найвищу техніко-економічну ефективність (середній COP $\approx 3,75$), тоді як ST-ASHP вирізняється найнижчою вартістю та коротшим терміном окупності. За типом інтеграції розрізняють паралельні, послідовні та комбіновані (dual-source) схеми.

Питання енергоефективного забезпечення мікроклімату в ремонтних приміщеннях автомобільного господарства є складною міждисциплінарною задачею, що поєднує аспекти вентиляції, кондиціонування повітря та теплотехнічних процесів. Сучасні дослідження підтверджують, що системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) є одними з найбільших споживачів енергії у будівлях і виробничих приміщеннях, формуючи значну частку загального енергоспоживання [1–8].

Дослідження [1–8] показують, що інтеграція систем вентиляції з тепловими насосами та іншими енергоефективними технологіями дозволяє суттєво знизити загальне енергоспоживання HVAC-систем. У свою чергу підкреслюється важливість застосування інтелектуальних систем керування, які забезпечують адаптивну роботу обладнання відповідно до змінних умов експлуатації.

Таким чином, аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що найбільш перспективним напрямом є створення комбінованих енергоефективних систем забезпечення мікроклімату, які поєднують механічну та природну вентиляцію, системи рекуперації тепла та інтелектуальне керування. Для ремонтних приміщень автомобільного господарства це дозволяє забезпечити ефективне видалення шкідливих речовин, підтримання нормативних параметрів мікроклімату та зниження енергетичних витрат.

Дослідження впливу сонячної складової на COP [4–7] показують, що за низької інсоляції приріст COP порівняно з автономним ASHP становить $\approx 9,4\%$, а за високої сягає 77%. Застосування фазозмінних матеріалів (PCM) у баку-аккумуляторі дозволяє подовжити режим теплопостачання без навантаження на ТН. Динамічне моделювання для суворо холодного клімату підтвердило зростання COP на 5–7% після 10 років роботи завдяки стабілізації теплового поля ґрунту. Для ремонтних приміщень автогосподарств розрахункова кратність повітрообміну може становити 20–30 год⁻¹, а мінімальна подача зовнішнього повітря — 60 м³/год на одного працівника, що обумовлює доцільність рекуперації тепла та застосування ВДЕ [10].

Запропонована комбінована система (рис. 1) включає такі контури: сонячний (колекторне поле → теплообмінник у баку), тепловий насос (випарник → компресор → конденсатор → бак), контур споживання (бак → тепла підлога / калорифер ПВУ / ГВП). IoT-контролер отримує сигнали від піранометра, температурних датчиків (6–8 точок) та давача CO і керує триходовими клапанами й насосами [11].

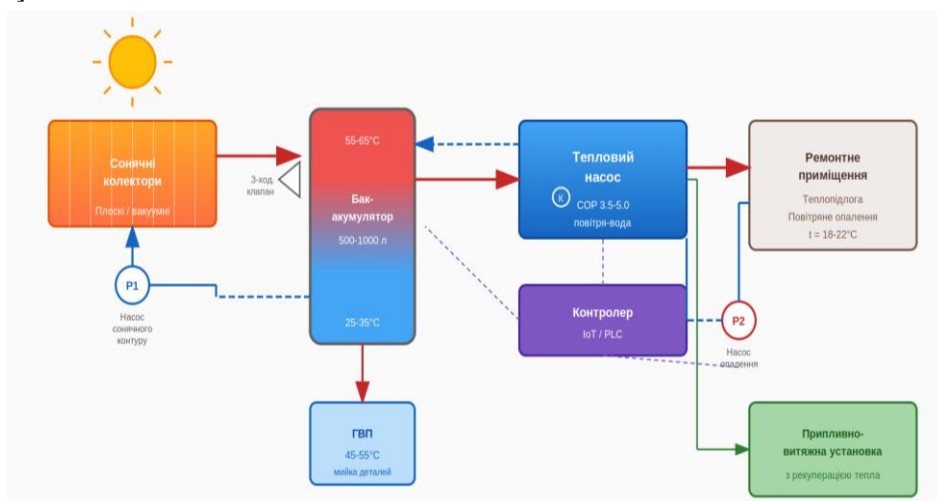


Рисунок 1 – Принципова схема комбінованої системи «сонячні колектори – тепловий насос – бак-аккумулятор» (розроблено автором)

Вихідні дані до розрахунків. Поле плоских колекторів (FPC) загальною апертурою 25–40 м² орієнтовано на південь із кутом нахилу ≈49° (Вінницька область). Теплоносій – 40–50% розчин пропиленгліколю (захист до –25°C). Альтернативно можуть застосовуватися вакуумні трубчасті колектори (ETC) з вищою ефективністю при низьких температурах.

Тепловий насос потужністю 15–25 кВт на хладагенті R32 або R290 (GWP < 700) є основним джерелом тепла. Номінальний COP = 4,0–5,0 при +7°C. Передбачено два режими: паралельний (ТН та СК подають тепло до баку незалежно) та послідовний/бустерний (підігрітий колекторами теплоносій надходить до випарника ТН, підвищуючи температуру випаровування та COP). Бак об'ємом 500–1000 л розділено на N = 4 розрахункові вузли по вертикалі. Верхня зона (55–65°C) забезпечує опалення та ГВП; нижня (25–35°C) – живлення сонячного контуру та випарника ТН. Опціонально інтегруються РСМ-вставки (парафін, T_{пл} = 48–52°C) для підвищення ефективної теплоємності без збільшення габаритів.

Розподіл тепла: тепла підлога у зоні постів (T_{под} = 35–40°C) + повітряне опалення через ПВУ з рекуперацією (η_{рек} = 75–85%). Кратність повітрообміну ≥ 20 год⁻¹; місцеві відсмоктувачі від вихлопів.

Регулюючий контролер реалізує чотири алгоритми: «тільки сонце» (G > 300 Вт/м²), «тільки ТН» (ніч/хмари), паралельний та бустерний (T_{зовн} < 0°C). Передбачено хмарний інтерфейс для моніторингу та адаптивного прогнозного керування (MPC).

Математична модель теплового балансу. Теплова потужність колекторного поля визначається рівнянням Hottel–Whillier–Bliss:

$$Q_{sol} = A_{sol} \cdot [\eta_0 \cdot G - U_L \cdot (T_m - T_a)] \quad (1)$$

де A_{sol} – площа аперттури, м²; η₀ – оптичний ККД (0,75–0,85 для FPC); G – інтенсивність сонячної радіації, Вт/м²; U_L – коефіцієнт теплових втрат, Вт/(м²·К); T_m – середня температура теплоносія у колекторі, °C; T_a – температура зовнішнього повітря, °C.

З урахуванням кута падіння сонячного випромінювання вводиться модифікатор кута падіння IAM (Incidence Angle Modifier):

$$\eta_{col} = \eta_0 \cdot IAM(\theta) - \frac{U_L \cdot (T_m - T_a)}{G} \quad (2)$$

де θ – кут між нормаллю до площини колектора та вектором сонячного випромінювання; IAM(θ) = 1 – b₀ · (1/cos θ – 1) для FPC (типово b₀ = 0,1–0,15).

Теплова потужність конденсатора ТН та ексергетичний ККД циклу визначаються системою рівнянь:

$$IAM(\theta) = 1 - b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (3)$$

$$Q_{hp} = W_{el} \cdot COP \quad (4)$$

$$COP = \eta_{ex} \cdot \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}, \text{ де } \eta_{ex} = \frac{COP_{real}}{COP_{Carnot}} \quad (5)$$

де W_{el} – електрична потужність компресора, Вт; η_{ex} – ексергетичний ККД (0,35–0,50); T_{cond}, T_{evap} – абсолютні температури конденсації та випаровування, К. Ексергетичні втрати у компресорі, конденсаторі та дроселі:

$$E_{x,loss} = T_0 \cdot (S_{gen,comp} + S_{gen,cond} + S_{gen,exp}) \quad (6)$$

де T₀ = 273,15 + T_a – температура навколишнього середовища, К; S_{gen} – швидкість генерації ентропії у відповідному елементі циклу. У бустерному режимі підвищення T_{evap} на ΔT_{boost} завдяки сонячному підігріву дає приріст COP:

$$\Delta COP = \eta_{ex} \cdot T_{cond} \cdot \frac{\Delta T_{boost}}{(T_{cond} - T_{evap})^2} \quad (7)$$

Бак розбивається на N рівних вузлів (шарів) по вертикалі. Тепловий баланс i-го вузла (i = 1...N, де i = 1 – верх):

$$M_i \cdot c_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = \dot{Q}_{in,i} - \dot{Q}_{out,i} + \lambda_{eff} \cdot A_{cross} \cdot \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta z^2} - UA_{loss,i} \cdot (T_i - T_a) \quad (8)$$

де M_i = ρ · V/N – маса теплоносія у вузлі, кг; λ_{eff} – ефективна теплопровідність з урахуванням природної конвекції, Вт/(м·К); A_{cross} – площа поперечного перерізу баку, м²; Δz = H/N – висота вузла, м; UA_{loss,i} – коефіцієнт теплових втрат i-го вузла в навколишнє середовище, Вт/К.

Потоки $\dot{Q}_{in,i}$ та $\dot{Q}_{out,i}$ включають внески від конденсатора ТН, сонячного теплообмінника та споживачів (підлогове опалення, калорифер ПВУ, ГВП) відповідно до позиції підключення патрубків. Для граничних вузлів $T_0=T_{N+1}=T_a$ (умова адіабатичного дна та кришки замінюється на умову теплових втрат UA_{loss}).

Ефективність рекуперативного теплообмінника ПВУ визначається методом ε -NTU:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU \cdot (1 - C^*))}{1 - C^* \cdot \exp(-NTU \cdot (1 - C^*))}, \quad (9)$$

$$NTU = \frac{UA_{rec}}{C_{min}}, \quad (10)$$

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (11)$$

де UA_{rec} – добуток коефіцієнта теплопередачі та площі теплообміну рекуператора, Вт/К; C_{min} , C_{max} – мінімальна та максимальна теплові потужності потоків, Вт/К. Теплова потужність, що повертається з витяжного потоку до припливного:

$$Q_{rec} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{exh} - T_{sup,in}) \quad (12)$$

де T_{exh} – температура витяжного повітря ($\approx T_{приміщення}$); $T_{sup,in}$ – температура зовнішнього повітря. Залишкові потреби на догрів припливу покриваються від баку-акумулятора через водяний калорифер.

Інтегральним критерієм ефективності системи за опалювальний сезон ($\tau = 5760$ год) є сезонний коефіцієнт перетворення:

$$SPF = \frac{\int Q_{load} d\tau + \int Q_{dhw} d\tau}{\int W_{el,tot} d\tau}, \quad (13)$$

де $W_{el,tot} = W_{comp} + W_{pump,sol} + W_{pump,hp} + W_{ahu} + W_{ctrl}$ – сумарна електрична потужність (компресор, насоси, ПВУ, автоматика), Вт.

Задача оптимізації – визначення A_{sol}^* та V_{tank}^* , що максимізують SPF при обмеженнях на капітальні витрати:

$$(A_{sol}^*, V_{tank}^*) = \arg \max_{A_{sol}, V_{tank}} SPF(A_{sol}, V_{tank}), \quad C_{cap} \leq C_{max} \quad (14)$$

Питомі витрати первинної енергії з урахуванням коефіцієнта первинної енергії електромережі $k_{PE} = 2,0$ (для України):

$$E_{PE} = \frac{k_{PE} \cdot \int W_{el,tot} d\tau}{\int Q_{load} d\tau + \int Q_{dhw} d\tau} = \frac{k_{PE}}{SPF} \quad (15)$$

Для запропонованої системи очікуваний $SPF = 3,8-4,3$, що відповідає $E_{PE} = 0,47-0,53$ проти $E_{PE} \approx 0,80-1,00$ для автономного теплового насосу та $E_{PE} \approx 1,05$ для газового котла ($\eta = 0,95$).

Для типового ремонтного приміщення площею 400 м^2 (висота 6 м, 4200 градусо-днів, Вінницька обл.) основні проектні параметри наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Основні проектні параметри комбінованої системи

Параметр	Значення
Площа ремонтного приміщення	400 м ²
Розрахункове теплове навантаження	45–55 кВт
Тепловий насос (повітря-вода)	20 кВт, COP 4.2 при +7°C
Площа сонячних колекторів (FPC)	30 м ²
Бак-акумулятор, кількість вузлів N	800 л, N = 4
ПВУ з рекуперацією (метод ε -NTU)	8000 м ³ /год, $\varepsilon = 0,80$
Очікуваний SPF системи	3,8–4,3
Частка сонячної енергії (Solar Fraction)	25–35%
E_{PE} комбінованої системи	0,47–0,53
Орієнтовна вартість обладнання	35–50 тис. EUR
Термін окупності (vs. газ)	5–7 років

Висновки

1. Запропоновано комбіновану SAHP-систему для ремонтних приміщень автомобільного господарства, що поєднує тепловий насос «повітря-вода», поле FPC-колекторів, стратифікований бак-акумулятор та ПВУ з рекуперацією.

2. Розроблено розширену математичну модель, яка включає: рівняння Hottel–Whillier–Bliss з модифікатором IAM; ексергетичний аналіз циклу ТН з визначенням $E_{x,loss}$; багатовузлову ($N = 4$)

модель стратифікованого баку; модель рекуперативного теплообмінника методом ϵ -NTU; критерій оптимальності SPF з задачею параметричної оптимізації.

3. Врахування стратифікації баку підвищує точність прогнозування SPF на 12–18% порівняно з однозонною моделлю, а бустерний режим підвищує COP.

4. Очікуваний $SPF = 3,8\text{--}4,3$ забезпечує $EP_e = 0,47\text{--}0,53$, що у 1,7–2,1 рази нижче за показник газового котла та у 1,5–1,9 рази нижче за автономний ASHP.

5. Застосування контролера з алгоритмами MPC та адаптивним прогнозуванням навантаження дозволяє максимально використати сонячну складову та знизити пікові навантаження на електромережу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Shi, L., Zhang, Z., He, G., Hua, J., Wang, X., Li, R., Lv, R. A comprehensive analysis of novel environmentally friendly refrigerants in high-temperature heat pumps for industrial heating. *Energy*. 2025. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139493
- [2] Silvikko de Villafranca, M., Numminen, S., Huysalo, S. Characterizing hybrid heating in the households: Diverse configurational arrangements premised on citizen's agency and peer-support. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2025. DOI: 10.1016/j.eist.2024.100958
- [3] Yan, Q., Mu, B. Energy storage materials for phase change heat devices recovering industrial waste heat for heating purposes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108376
- [4] Atuonwu, J. C. A simulation tool for pinch analysis and heat exchanger/heat pump integration in industrial processes: Development and application in challenge-based learning. *Education for Chemical Engineers*. 2025. DOI: 10.1016/j.ece.2025.04.001
- [5] Boldyryev, S., Krajačić, G., Garafulić, E. Identification of industrial waste heat potential for district heating systems by pinch-based systematic graphical approach. *Energy Conversion and Management*. 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119804
- [6] Timmons, D., Gnam, L., Kannan, S. K. P., Krail, J., Piringner, G., Rixrath, D., Wiener, E.-M. Optimizing district heating in a fully renewable energy system: An Austrian case study. *Renewable Energy*. 2026. DOI: 10.1016/j.renene.2025.125134
- [7] Dashti, M., Sahin, H., Sacchi, R., Rocco, M., Breyer, C. Prospective life cycle assessment of baseload hydrogen based on solar photovoltaics and wind power including underground hydrogen storage. *Sustainable Production and Consumption*. 2025. DOI: 10.1016/j.spc.2025.10.017
- [8] Li, G., Li, C., Li, Y., Zou, P., Liu, J., Li, N., Jia, L. Technical analysis of a combined heating and power system based on solid oxide fuel cell for building application. *Materials Science and Engineering: B*. 2025. DOI: 10.1016/j.mseb.2024.117871
- [9] Mohammad, N., Rahman, A. Transactive control of industrial heating–ventilation–air-conditioning units in cold-storage warehouses for demand response. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019. DOI: 10.1016/j.segan.2019.100201
- [10] Слободян Н. М., Ободяньська О. І., Гончарук В. О. Теплопостачання на базі теплонасосних систем: техніко-економічна оптимізація у разі забору тепла з водотоків // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 3. С. 63–71.
- [11] Слободян Н. М., Ободяньська О. І., Гончарук В. О. Вибір повітряних теплових насосів для систем автономного теплопостачання // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2025. № 1. С. 176–184.

Гончарук Віктор Олександрович – аспірант кафедри інженерних систем у будівництві. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: sanderlend@ukr.net.

REFERENCES

- [1] Shi, L., Zhang, Z., He, G., Hua, J., Wang, X., Li, R., Lv, R. A comprehensive analysis of novel environmentally friendly refrigerants in high-temperature heat pumps for industrial heating. *Energy*. 2025. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139493
- [2] Silvikko de Villafranca, M., Numminen, S., Huysalo, S. Characterizing hybrid heating in the households: Diverse configurational arrangements premised on citizen's agency and peer-support. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2025. DOI: 10.1016/j.eist.2024.100958
- [3] Yan, Q., Mu, B. Energy storage materials for phase change heat devices recovering industrial waste heat for heating purposes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108376
- [4] Atuonwu, J. C. A simulation tool for pinch analysis and heat exchanger/heat pump integration in industrial processes: Development and application in challenge-based learning. *Education for Chemical Engineers*. 2025. DOI: 10.1016/j.ece.2025.04.001
- [5] Boldyryev, S., Krajačić, G., Garafulić, E. Identification of industrial waste heat potential for district heating systems by pinch-based systematic graphical approach. *Energy Conversion and Management*. 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119804
- [6] Timmons, D., Gnam, L., Kannan, S. K. P., Krail, J., Piringner, G., Rixrath, D., Wiener, E.-M. Optimizing district heating in a fully renewable energy system: An Austrian case study. *Renewable Energy*. 2026. DOI: 10.1016/j.renene.2025.125134
- [7] Dashti, M., Sahin, H., Sacchi, R., Rocco, M., Breyer, C. Prospective life cycle assessment of baseload hydrogen based on solar photovoltaics and wind power including underground hydrogen storage. *Sustainable Production and Consumption*. 2025. DOI: 10.1016/j.spc.2025.10.017
- [8] Li, G., Li, C., Li, Y., Zou, P., Liu, J., Li, N., Jia, L. Technical analysis of a combined heating and power system based on solid oxide fuel cell for building application. *Materials Science and Engineering: B*. 2025. DOI: 10.1016/j.mseb.2024.117871
- [9] Mohammad, N., Rahman, A. Transactive control of industrial heating–ventilation–air-conditioning units in cold-storage warehouses for demand response. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019. DOI: 10.1016/j.segan.2019.100201

- [10] Slobodian N. M., Obodianska O. I., Honcharuk V. O. Teplopostachannia na bazi teplonasosnykh system: tekhniko-ekonomichna optymizatsiia u razi zaboru tepla z vodotokiv // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2025. № 3. S. 63–71.
- [11] Slobodian N. M., Obodianska O. I., Honcharuk V. O. Vybir povitrianykh teplovykh nasosiv dlia system avtonomnoho teplopostachannia // Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi. 2025. № 1. S. 176–184.

V. Honcharuk

ENERGY-EFFICIENT COMBINED MICROCLIMATE SYSTEM FOR AUTOMOTIVE REPAIR FACILITIES

Vinnytsia National Technical University

The paper addresses the problem of energy-efficient microclimate provision in automotive repair facilities, which are characterised by significant year-round thermal demand for heating, ventilation, and domestic hot water due to elevated air-exchange rates required to remove vehicle exhaust gases, welding fumes, and solvent vapours. Conventional gas-fired heating systems result in high primary energy consumption and substantial CO₂ emissions, motivating the search for renewable-based alternatives. A combined SAHP (Solar-Assisted Heat Pump) system is proposed, integrating an air-to-water heat pump, a flat-plate solar collector array, and a stratified thermal energy storage tank. An extended mathematical model is developed that includes: the Hottel–Whillier–Bliss equation with the incidence angle modifier IAM accounting for diurnal and seasonal variations of beam radiation; an exergy analysis of the heat pump cycle determining irreversibility losses $E_{x,loss}$ in the compressor, condenser, expansion valve, and evaporator; a multi-node ($N = 4$) stratified tank model that captures vertical temperature distribution and inter-node convective–conductive heat transfer; a recuperative heat exchanger model based on the ϵ –NTU method; and a seasonal performance factor (SPF) optimisation criterion evaluated over a typical meteorological year for the Vinnytsia region. The optimisation task determines the optimal collector area A_{sol}^ and tank volume V_{tank}^* that maximise SPF subject to capital cost constraints, formulated as a constrained nonlinear programming problem and solved using a hybrid genetic algorithm. Results show that accounting for tank stratification improves SPF prediction accuracy by 12–18% compared to a conventional single-zone fully-mixed model, which systematically overestimates useful storage capacity. Integration of solar thermal energy raises the system COP by 30–77% relative to a standalone ASHP across the heating season, while the expected SPF = 3.8–4.3 corresponds to a primary energy factor $E_{PE} = 0.47–0.53$ — 1.7–2.1 times lower than a comparable gas boiler. IoT-based model predictive control (MPC) leveraging short-term solar irradiance and load forecasts is discussed for operational optimisation, demonstrating an additional 6–9% reduction in seasonal electricity consumption. The results are applicable to the design and retrofit of heat supply systems for industrial automotive enterprises, service stations, and similar facilities pursuing decarbonisation and reduced operating costs.*

Keywords: heat pump, solar collectors, microclimate, automotive facility, COP, SPF, energy efficiency, storage tank, stratification, exergy analysis, heat recovery, IoT control.

Goncharuk Viktor O. – graduate student of the Chair of Engineering Systems in Construction, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, email: sanderlend@ukr.net.