

УДК 620.97:697.329

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160882

Теоретично-експериментальний аналіз геліозахисту як частини енергоефективного будинку

С. П. Шаповал, В. М. Желих, І. І. Венгрин, Х. Р. Козак, Р. Є. Кригуль

Досліджено використання сонячної енергії як потенційного альтернативного джерела для забезпечення теплопостачанням енергоефективних будинків. Проведено попередній теоретичний аналіз енергетичних показників комбінованої системи теплопостачання за використання геліовікна як частини огороження енергоефективного будинку. З метою підвищення ефективності роботи досліджуваної установки відносно існуючих сонячних колекторів та покращення її в конструктивному аспекті, було розраховано стратифікацію теплоносія в баку-акумуляторі комбінованої системи теплопостачання із геліовікном.

Дослідження ефективності роботи експериментальної установки в системі для використання сонячної енергії проводили в режимі руху циркуляції та гравітації теплоносія за інтенсивності випромінювання імітатора сонячної енергії на систему 600 Вт/м^2 та 900 Вт/м^2 . Як теплоносії використовували воду.

Проаналізовано зміну температури теплоносія в сонячному колекторі та в баку-акумуляторі запропонованої комбінованої системи сонячного теплопостачання із геліовікном як частини зовнішнього захисту енергоефективного будинку.

Встановлено, що температура теплоносія в режимі циркуляції досягала $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Крім цього, наведено порівняльні натурні, лабораторні та теоретичні розрахунки усередненої температури теплоносія в баку-акумуляторі в режимі руху гравітації теплоносія за різних умов.

Було розраховано коефіцієнт корисної дії експериментальної установки. Описано динаміку зміни коефіцієнта корисної дії системи сонячного теплопостачання із геліовікном. У режимі руху циркуляції теплоносія за накопиченням теплової енергії в баку-акумуляторі, залежно від часу нагріву, ККД становив $\approx 55 \%$. В режимі руху гравітації теплоносія було обраховано коефіцієнт корисної дії лише конструкції геліовікна, що становив 53%

Ключові слова: геліовікно, сонячна енергетика, енергетичний баланс, режим гравітації/циркуляції, інтенсивність випромінювання

1. Вступ

В XXI столітті суспільство має можливість встановлювати безліч різноманітних систем теплопостачання та вентиляції, які дають змогу забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов в приміщенні. Однак їхня конструкція і безпека повинна відповідати стандартам, які є гарантом комфортного і екологічно-чистого існування майбутнього.

Катастрофічні зміни клімату вимагають раціональних і виважених рішень людини стосовно навколишнього середовища та побуту. Наприклад, побудовані будинки для тривалого терміну їхньої експлуатації вимагають покращення та модернізації в конструктивному і енергетичному напрямку. Або ж, удосконалення застосування енергоефективних рішень на початкових етапах будівництва чи реконструкції з метою збереження клімату в перспективі та якісного життя майбутніх поколінь.

Для спрощення розрахунку кількості споживання енергії будинку Європи розроблено класифікацію будівель відносно їхньої енергозалежності:

– у спорудах/будівлях, що були збудовані до 1970-х років для опалення від різних видів палива визначено енергозалежність ≈ 300 кВт·год/(m^2 ·рік);

– у спорудах/будівлях, що були збудовані в період 1970–2000-х років для опалення від різних видів палива передбачено енергозалежність до 150 кВт·год/(m^2 ·рік);

– у спорудах/будівлях низької енергетичної залежності – не більше 60 кВт·год/(m^2 ·рік).

В Європі з 2002 року будівництво будинків для перебування людей з більш низьким стандартом не дозволяється.

Визнаним знаком якості для нових і реконструйованих будівель низького споживання енергії є «Minergie» [1]. Ця марка підтримується Швейцарською Конфедерацією, швейцарськими кантонами та Князівством Ліхтенштейн. Марка «Minergie» зареєстрована в Швейцарії та в усьому світі і, таким чином, захищена від неліцензійного використання. Бренд «Minergie» може використовуватися лише для будівель, послуг та компонентів, які фактично відповідають стандарту «Minergie». Запропоновані ними системи якості передбачені для нових і відремонтованих будівель з низьким енергоспоживанням.

Будинки низького енергоспоживання класифікують на 4 типи:

1. Пасивний будинок – споживання енергії такими будинками має бути не більше 15 кВт·год/(m^2 ·рік).

2. Будівля 0 енергії – споживання енергії такими будинками має бути не більше 0 кВт·год/(m^2 ·рік). Варто відзначити те, що архітектурно такі будинки можуть відповідати тому ж стандарту, що і пасивний будинок, однак інженерно вони мають бути обладнані таким чином, щоб споживати виключно тільки ту енергію, яку самі будуть генерувати [2].

3. Будівля низького споживання енергії має на практиці використовувати активні і пасивні сонячні конструкції, будівельні методи і компоненти для зниження енергозатрат [3].

4. Будівля плюс енергії – це будівля такого типу, яка за допомогою енергозберігаючого обладнання (сонячних батарей, колекторів, теплових насосів, рекуператорів, ґрунтових теплообмінників та ін.) виробляла б більше енергії, ніж сама б споживала [2].

Таким чином, будинок плюс енергії є менш енергетично-залежною спорудою, ніж будівля нульової енергії та пасивні будинки [4].

Різні інформаційні джерела виділяють декілька визначень терміну «пасивний будинок». Пасивний або енергоефективний будинок (англ. passive house) –

це споруда, основною особливістю якої є низьке енергоспоживання \approx на 10 % від питомої енергії, що споживає будинок на одиницю об'єму, який споживає більшість сучасних будівель.

Іншим, але не менш важливим визначенням пасивного будинку є те, що це будівельний стандарт. Тобто такий будинок має бути гранично енергоефективним, створювати комфортні умови проживання та мати характеристики економічно-привабливого будівництва [5].

Значають, що пасивний будинок – це будівля, в якій можливо досягти комфортного мікроклімату: взимку – без окремої системи опалення (або використовуючи малопотужну компактну систему опалення), влітку – без системи кондиціонування [6, 7].

Варто звернути увагу, що стримуючим фактором будівництва «енергоефективних будинків» є висока вартість їхнього будівництва в Україні. «Енергоефективні будинки» є приблизно на 8–10 % дорожчі від вартості звичайних будинків. Також, до уваги треба взяти не тільки вартість житла, але й вартість його подальшої експлуатації. Витрати по експлуатації «енергоефективного будинку» в рази менше витрат на звичайне житло, крім цього варто врахувати постійне зростання цін на газ, воду та електроенергію, а як наслідок на житлово-комунальні послуги загалом [8].

Як наслідок, нетрадиційна (відновлювана) енергетика набуває щорік більшої популярності на фоні гострої проблеми зменшення рівня деяких природних ресурсів.

Застосування/наукові основи сонячної енергії в будівництві описано в праці [9]. Крім цього, робота містить практичні поради/рекомендації в застосуванні сонячної енергії в енергоефективних будівлях.

Достатньо дієвим методом обігрівання приміщень пасивної будівлі є застосування повітряних сонячних систем опалення з фазоперехідним акумулятором теплоти на основі глауберової солі [10]. Такі системи можуть бути використані як для додаткового, так і повноцінного обігріву, а тепловий акумулятор дозволяє підтримувати необхідну температуру повітря в приміщенні в період хмарності чи вночі.

Фундаментальним питанням використання таких систем залишається екологічний та економічний аспекти. Перспективним рішенням є застосування комбінованої системи сонячного теплопостачання із геліовікном як частини огороження енергоефективного будинку. Ця система може бути використана додатковим джерелом тепла для теплогазопостачання та вентиляції в будинку.

Тематика вищенаведених літературних джерел підтверджує актуальність та багатогранність такого напрямку досліджень як «енергоефективне/пасивне будівництво».

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сонячна енергія широко визнана як один з найважливіших відновлюваних джерел енергії завдяки рівномірному розподілу, безпеці та служінню як джерела енергії для інших. За останні десятиліття глобальна сонячна теплова потужність

швидко зростає, і зараз вона широко використовується у всьому світі для забезпечення мікроклімату приміщень та комфортних умов існування людини [11].

В роботі [12] здійснено порівняльний аналіз ефективності роботи сонячної енергетики у провідних країнах світу. Представлено дані, що найвищі показники використання сонячної енергії зафіксовано в Європі, а саме в Іспанії, завдяки теплому клімату і становить 31,4 %, для України це значення дорівнює 12,3 %. Крім того, обґрунтовано доцільність створення великих сонячних електростанцій в регіонах з високою сонячною активністю, а для помірною клімату – невеликих об'єктів.

Одним з найпопулярніших пристроїв для перетворення сонячної енергії в теплову є плоский сонячний колектор, який має ряд таких переваг, як надійність, простота та відносно невисока вартість конструкції, тривалий термін експлуатації. Проте при їх конструюванні виникає складне завдання, а саме підвищення ефективності роботи в періоди з низьким потенціалом сонячного випромінювання і в холодний період року [13, 14].

На думку авторів [15], ефективність запропонованої повітряної системи нагріву, а саме частка сонячним нагрівом, становить 63 %. Для опалення досягається $34 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ з площею сонячних колекторів $1/6$ площі будівлі та прихованої теплоти зберігання теплової енергії зі зміною фази матеріалів масою $25 \text{ кг}/\text{м}^2$ загальної площі будівлі. Однак дані дослідження спрямовані на систему сонячного теплопостачання з повітряним теплоносієм, а не рідинним.

Автори праці [16] навели схему регулювання роботи та стратегію управління сонячною системою опалення з сезонним сховищем тепла для басейну (SHS-SWPHS). Методологія досліджень спрямована на відповідність джерела нагріву до споживчого навантаження. У порівнянні з традиційною системою теплопостачання, температура зберігання тепла постійно зменшується протягом опалювального періоду. Дослідження в першу чергу запропонувало допоміжні режими нагріву теплового насоса непрямого нагрівання, прямого нагрівання та джерела води в залежності від різних температурних рівнів. Крім вище описаного, представлено можливість використання корисної площі басейну для нагріву від сонячної енергії. Тобто, автори пропонують покращену схему регулювання роботи та використання корисної площі, в даному випадку – басейну, однак не корисної площі будівлі.

В роботі [17] розглядається нове рішення пристрою, що використовує сонячну енергію в системах опалення – геліоколектор-енергоактивне огородження. Цей пристрій призначений для збільшення коефіцієнта використання сонячної енергії та збільшення теплового опору базового захисту споруди. Основним завданням такого огородження є зменшення теплових втрат пристроєм при одночасному збільшенні технологічності його виробництва та простоти монтажу.

Кожна запропонована конструкція має свої переваги та недоліки залежно від гідравлічної характеристики системи, однак в дослідженнях не наведені ні теоретичні, ні експериментальні дані щодо стану теплоносія (температури і т.д.) в акумулюючій ємності. В зв'язку із цим для підвищення ефективності існуючих сонячних установок необхідно проаналізувати можливі проблемні зони запропонованої установки. Зокрема, ряд сонячних енергетичних установок має

проблеми в ефективному зберіганні і використанні отриманої теплоти від сонячного колектора.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є обґрунтувати можливості використання сонячної енергії як альтернативного джерела без передачі енергії на значну відстань, тобто в безпосередній близькості до споживача.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні завдання:

- змодельовати стратифікацію теплоносія в баку-акумуляторі запропонованої експериментальної системи сонячного теплопостачання із геліовікном;
- проаналізувати основні параметри роботи експериментальної установки геліозахисту як частини енергоефективного будинку;
- порівняти зміну температури теплоносія за теоретичних розрахунків відносно даних лабораторних та натурних досліджень геліовікна.

4. Матеріали та методи досліджень

4.1. Методи визначення енергетичних показників комбінованої системи теплопостачання із використанням геліозахисту

Методика виявлення проблемних зон і резервів підвищення енергоефективності установки складається з трьох наступних етапів:

- збирання вихідних даних;
- зняття показників приладів обліку енергії;
- опрацювання даних [18].

Згідно стандарту ДСТУ Б EN 15251:2011, існує два основні типи методик розрахунку енергоспоживання на опалення та охолодження [19]:

– квазістаціонарні методи, за якими тепловий баланс розраховують протягом досить тривалого часу (зазвичай один місяць чи цілий сезон), що дозволяє прийняти до уваги динамічні ефекти за емпірично визначеним коефіцієнтом використання надходжень та/або втрат;

– динамічні методи, за якими тепловий баланс розраховують за короткотривалими часовими періодами (як правило одна година). Однак, беруть беручи до уваги обсяг тепла, що акумулюється або вивільняється залежно від масиву будинку.

Автори статті [20] вважають, що найбільш прийнятним для України є рекомендація щодо застосування квазістаціонарного місячного методу за спрощеного підходу розрахунку енергетичної ефективності для всіх типів будинків.

В ДСТУ Б EN ISO 13790 запропоновано три інші типи методу:

- повністю визначений місячний квазістаціонарний розрахунковий метод (де враховано сезонний метод);
- повністю визначений спрощений динамічний погодинний розрахунковий метод;
- методики розрахунку для детальних (часових) динамічних методів моделювання.

В зв'язку із цим впровадження ефективних і конструктивно простих систем сонячного теплопостачання в енергоефективні будинки залишається актуальним і до кінця не вивченим питанням.

Енергетичний баланс системи сонячного теплопостачання можна записати у вигляді формули (1):

$$Q_T - L + E = \Delta U, \quad (1)$$

де Q_T – місячна теплопродуктивність сонячної установки; L – сума місячних навантажень опалення і гарячого водопостачання; E – загальна кількість електроенергії отриманої протягом місяця від дублюючого джерела; ΔU – зміна кількості енергії в акумулюючій установці.

Враховуючи розміри акумуляторів які зазвичай застосовуються в системах сонячного теплопостачання де різниця ΔU мала в порівнянні з Q_T , L і E та може бути прийнятою рівною нулю. Тоді рівняння (1) можна записати в вигляді:

$$f = (L - E) / L = Q_T / L, \quad (2)$$

де f – частина повного місячного теплового навантаження, яке забезпечується за рахунок сонячної енергії.

Безпосередньо рівняння (2) не можна використовувати для розрахунку f , оскільки величина Q_T являє собою важку функцію спадаючого випромінювання, температури навколишнього середовища і теплових навантажень. Проте розгляд параметрів, від яких залежить Q_T , дозволяє припустити, що коефіцієнт заміщення f емпірично можна зв'язати з двома безрозмірними комплексами (3) та (4):

$$X = AF'_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t / L, \quad (3)$$

$$Y = AF'_R (\bar{\tau}\alpha) \bar{H}_T N / L, \quad (4)$$

де A – площа сонячного колектора, m^2 ; F'_R – ефективний коефіцієнт відводу тепла, що враховує теплообмінник; U_L – повний коефіцієнт теплових втрат колектора, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$; Δt – число секунд за місяць; T_{ref} – базова температура, прийнята $100^\circ C$; \bar{T}_a – середня за місяць температура зовнішнього повітря, $^\circ C$; L – повне теплове навантаження за місяць, $Дж$; \bar{H}_T – середній денний прихід сумарної сонячної радіації на похилу поверхню колектора за місяць, $Дж/m^2$; N – число днів на місяць; $\bar{\tau}\alpha$ – середня приведена поглинаюча здатність за місяць.

Безрозмірні комплекси X і Y мають фізичне спрямування:

X – місячні теплові втрати колектора за умов базової температури по відношенню до повного місячного теплового навантаження;

Y – кількість енергії, яка поглинається пластиною колектора протягом місяця відносно повного місячного теплового навантаження.

Для зручності розрахунків вирази X і Y можна переписати в зміненому вигляді (5) та (6).

$$X = F_R U_L (F'_R / F_R) (T_{ref} - \bar{T}_\alpha) \Delta t (A / L), \quad (5)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n (F'_R / F_R) [(\bar{\tau\alpha}) / (\tau\alpha)_n] \bar{H}_T N (A / L). \quad (6)$$

Величини $F_R U_L$ і $F_R (\tau\alpha)_n$ визначаються за результатами випробувань колектора. Значення T_α відомі для різних географічних пунктів. Величина \bar{H}_T визначається по значеннях \bar{H} і \bar{R} за допомогою співвідношень та таблиць. Площа колектора A задається в процесі розрахунків. Таким чином, всі величини в останніх двох формулах можна визначити, якщо відомі вихідні дані.

4. 2. Теоретичний аналіз стратифікації теплоносія в баку-акумуляторі як частини системи сонячного тепlopостачання із геліовікном

Водяні баки-акумулятори можуть працювати при значному степені стратифікації, за умов неоднакової температури теплоносія по висоті баку. При цьому можна описати математичну модель реальної ситуації, яка виникає за умов, що вода, яка надходить в бак, має малу швидкість і займає власний рівень враховуючи її густину.

Для двосекційного баку баланси енергії можна записати наступним чином:

– для верхнього (першого шару) (7):

$$\frac{dt_{\text{БА}_1}}{d\tau} = \frac{1}{M_1 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_K(\tau) - t_{\text{БА}_1}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_1}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_1} \cdot K_{\text{БА}_1} \cdot (t_{\text{БА}_1}(\tau) - t_3) \end{array} \right]; \quad (7)$$

– для нижнього (другого шару) (8):

$$\frac{dt_{\text{БА}_2}}{d\tau} = \frac{1}{M_2 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_1}(\tau) - t_{\text{БА}_2}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_X(\tau) - t_{\text{БА}_2}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_2} \cdot K_{\text{БА}_2} \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_3) \end{array} \right]. \quad (8)$$

В результаті чисельного моделювання отримано розподіл температур, наведений на рис. 1. Зокрема, температура, яка була досягнута в верхньому шарі двосекційного баку акумулятора, становила 45 °С.

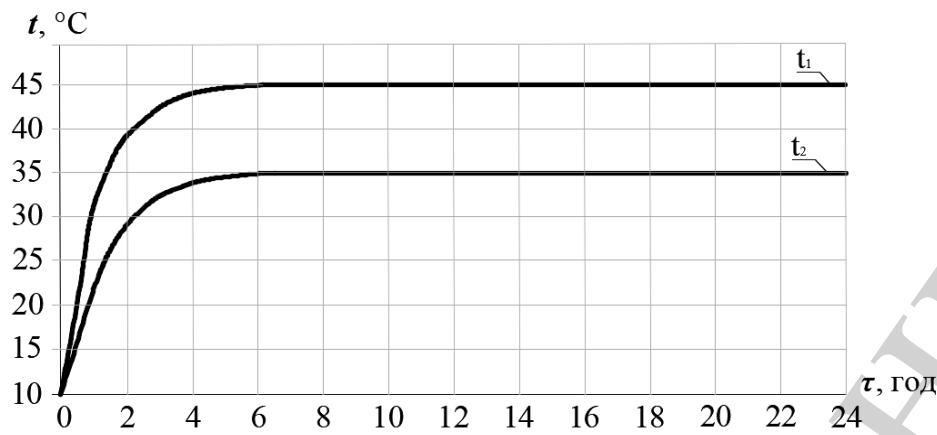


Рис. 1. Розподіл температур в двосекційному баку-акумуляторі протягом доби

Для трисекційного баку баланси енергії можна записати наступним чином:
 – для верхнього (першого шару) (9):

$$\frac{dt_{\text{БА}_1}}{d\tau} = \frac{1}{M_1 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_K(\tau) - t_{\text{БА}_1}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_1}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_1} \cdot K_{\text{БА}_1} \cdot (t_{\text{БА}_1}(\tau) - t_3) \end{array} \right]; \quad (9)$$

– для другого шару (10):

$$\frac{dt_{\text{БА}_2}}{d\tau} = \frac{1}{M_2 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_3}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_3}(\tau) - t_{\text{БА}_2}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_2} \cdot K_{\text{БА}_2} \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_3) \end{array} \right]; \quad (10)$$

– для нижнього (третього шару) (11):

$$\frac{dt_{\text{БА}_3}}{d\tau} = \frac{1}{M_3 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_3}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_X(\tau) - t_{\text{БА}_3}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_3} \cdot K_{\text{БА}_3} \cdot (t_{\text{БА}_3}(\tau) - t_3) \end{array} \right]. \quad (11)$$

В результаті чисельного моделювання отримано розподіл температур, наведений на рис. 2.

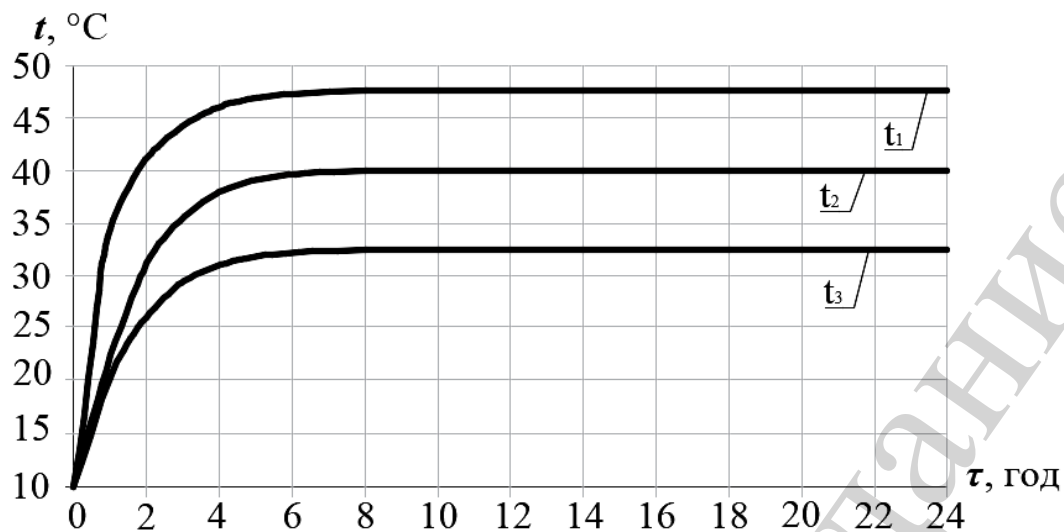


Рис. 2. Розподіл температур в три-секційному баку-акумуляторі протягом доби

Для дев'яти-секційного баку баланси енергії можна записати наступним чином:

– для верхнього (першого шару) (12):

$$\frac{dt_{\text{БА}_1}}{d\tau} = \frac{1}{M_1 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_K(\tau) - t_{\text{БА}_1}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_1}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_1} \cdot K_{\text{БА}_1} \cdot (t_{\text{БА}_1}(\tau) - t_3) \end{array} \right]; \quad (12)$$

– для другого шару (13):

$$\frac{dt_{\text{БА}_2}}{d\tau} = \frac{1}{M_2 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_3}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_3}(\tau) - t_{\text{БА}_2}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_2} \cdot K_{\text{БА}_2} \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_3) \end{array} \right]; \quad (13)$$

– для третього шару (14):

$$\frac{dt_{\text{БА}_3}}{d\tau} = \frac{1}{M_3 \cdot c_B} \cdot \left[\begin{array}{l} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_2}(\tau) - t_{\text{БА}_3}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_4}(\tau) - t_{\text{БА}_3}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_3} \cdot K_{\text{БА}_3} \cdot (t_{\text{БА}_3}(\tau) - t_3) \end{array} \right]; \quad (14)$$

– для четвертого шару (15):

$$\frac{dt_{\text{БА}_4}}{d\tau} = \frac{1}{M_4 \cdot c_B} \cdot \begin{bmatrix} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_3}(\tau) - t_{\text{БА}_4}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_5}(\tau) - t_{\text{БА}_4}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_4} \cdot K_{\text{БА}_4} \cdot (t_{\text{БА}_4}(\tau) - t_3) \end{bmatrix}; \quad (15)$$

– для п'ятого шару (16):

$$\frac{dt_{\text{БА}_5}}{d\tau} = \frac{1}{M_5 \cdot c_B} \cdot \begin{bmatrix} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_4}(\tau) - t_{\text{БА}_5}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_6}(\tau) - t_{\text{БА}_5}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_5} \cdot K_{\text{БА}_5} \cdot (t_{\text{БА}_5}(\tau) - t_3) \end{bmatrix}; \quad (16)$$

– для шостого шару (17):

$$\frac{dt_{\text{БА}_6}}{d\tau} = \frac{1}{M_6 \cdot c_B} \cdot \begin{bmatrix} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_5}(\tau) - t_{\text{БА}_6}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_7}(\tau) - t_{\text{БА}_6}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_6} \cdot K_{\text{БА}_6} \cdot (t_{\text{БА}_6}(\tau) - t_3) \end{bmatrix}; \quad (17)$$

– для сьомого шару (18):

$$\frac{dt_{\text{БА}_7}}{d\tau} = \frac{1}{M_7 \cdot c_B} \cdot \begin{bmatrix} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_6}(\tau) - t_{\text{БА}_7}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_8}(\tau) - t_{\text{БА}_7}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_7} \cdot K_{\text{БА}_7} \cdot (t_{\text{БА}_7}(\tau) - t_3) \end{bmatrix}; \quad (18)$$

– для восьмого шару (19):

$$\frac{dt_{\text{БА}_8}}{d\tau} = \frac{1}{M_8 \cdot c_B} \cdot \begin{bmatrix} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_7}(\tau) - t_{\text{БА}_8}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_9}(\tau) - t_{\text{БА}_8}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_8} \cdot K_{\text{БА}_8} \cdot (t_{\text{БА}_8}(\tau) - t_3) \end{bmatrix}; \quad (19)$$

– для нижнього (дев'ятого шару) (20):

$$\frac{dt_{\text{БА}_9}}{d\tau} = \frac{1}{M_9 \cdot c_B} \cdot \begin{bmatrix} G_K \cdot c_B \cdot (t_{\text{БА}_8}(\tau) - t_{\text{БА}_9}(\tau)) + \\ + G_P \cdot c_B \cdot (t_X(\tau) - t_{\text{БА}_9}(\tau)) - \\ - 3.6 \cdot F_{\text{БА}_9} \cdot K_{\text{БА}_9} \cdot (t_{\text{БА}_9}(\tau) - t_3) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

В результаті чисельного моделювання отримано розподіл температур в баку-акумуляторі (на рис. 3). Температура у верхньому шарі баку-акумуляторі

досягає значення більше $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як в нижньому становить $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це дає можливість обумовлювати важливість врахування стратифікації теплоносія в запропонованій досліджуваній установці для подальших досліджень.

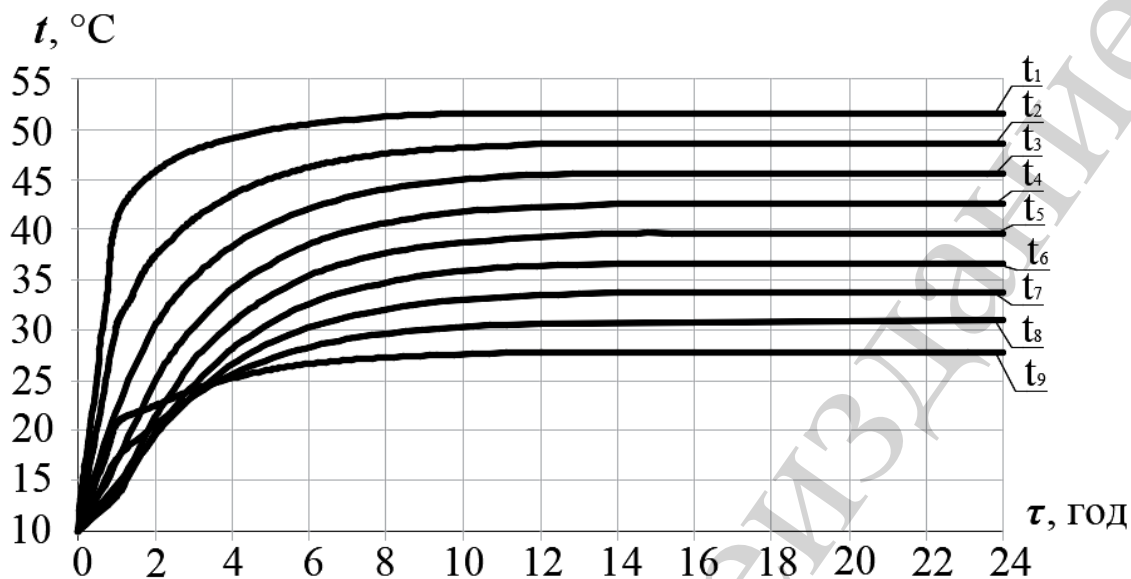


Рис. 3. Розподіл температур в дев'яти-секційному баку-акумуляторі протягом доби

Варто звернути увагу, що аналізуючи результати змодельованих розрахунків температури було встановлено, що в першому шарі бака-акумулятора температура досягає значення більше $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто температури, достатньої для низькопотенційного джерела теплоти. Це дає змогу, також, стверджувати про необхідність кращої ізоляції зберігаючої ємності в шарі, який ближчий до трубопроводу з подаючим (гарячим) теплоносієм. Ці відомості повинні бути враховані в дослідній експериментальній установці, з метою енергоощадливості.

4. 3. Принципова схема експериментальної установки геліозахисту

Принципова схема системи сонячного теплопостачання із геліовікном в якості геліозахисту як частини енергоефективного будинку зображена на рис. 4. В експериментальній установці системи сонячного теплопостачання із геліовікном для зменшення тепловтрат було утеплено всі трубопроводи та бак-акумулятор.

Відповідно до методики і плану досліджень перед початком дослідів склали робочий журнал, в якому реєстрували отримані показники. Витрату теплоносія вимірювали витратомірами та ротаметром типу РМ-0,016Ж, які були встановлені на зворотній лінії руху охолодженого теплоносія перед входом в сонячний колектор. Перед проведенням експериментів ротаметр попередньо тарували об'ємним методом. Експериментальні дослідження проводили застосовуючи гіпотетичні припущення та спрощення.

Було обрано наступні умови: густина теплового потоку прийнята однаковою по всій площині геліовікна; конструкцію геліовікна не затінювали; вплив

відбитої сонячної енергії від навколишніх предметів не враховувався; прийнято довірчу ймовірність результатів експерименту $\alpha=0,95$.

Додатковим робочим моментом був контроль за тим, щоб на проведення експерименту не впливали інші фактори (сонячна енергія через вікно, гладкі поверхні, затінення сонячного колектора, тощо).

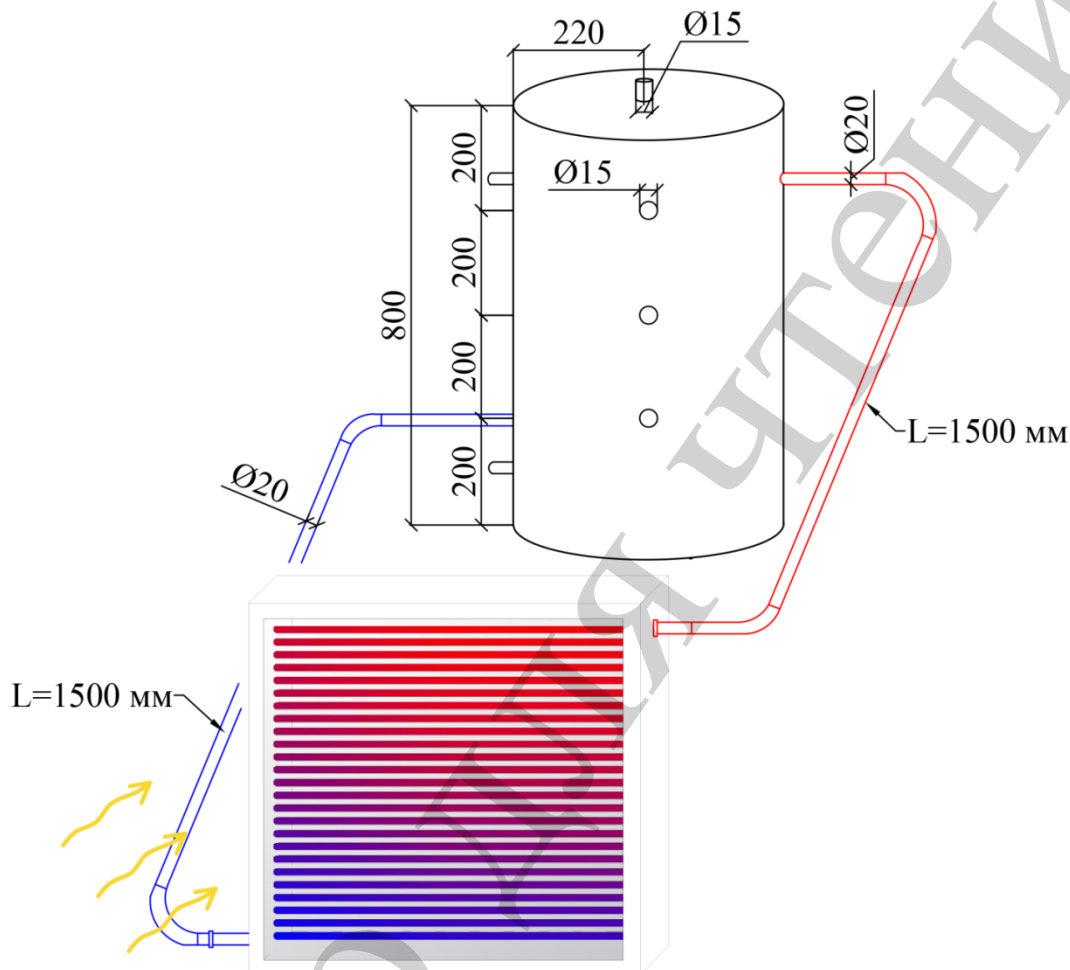


Рис. 4. Схема експериментальної установки системи сонячного теплопостачання із геліовікном

Система сонячного теплопостачання із геліовікном може працювати в режимі руху гравітації чи циркуляції теплоносія.

Принцип роботи полягає у наступному. Вода з баку-акумулятора поступає в трубки контуру циркуляції, де нагрівається. За принципом природної конвекції, в режимі руху гравітації теплоносія, та внаслідок нагрівання від імітатора сонячної енергії, вода повертається в бак-акумулятор. Тоді теплоносієм стає можливим для його відбору через патрубок до споживача.

Інтенсивність потоку енергії, що випромінює імітатор сонячної енергії, заміряли актинометром АТ-50 (Росія).

Температура теплоносія на вході й виході у геліовікно та в баку-акумуляторі було виміряно термоперетворювачами опору 50М (Україна), що працюють з регулятором-вимірювачем типу РТ-0102 (Україна). Температуру

навколишнього повітря та його швидкість вимірювали термоелектроанемометром TESTO 405 – V1 (Німеччина).

5. Результати експериментальних досліджень системи сонячного теплопостачання із геліовікном як частини геліозахисту енергоефективного будинку

Результати досліджень ґрунтувались на експериментальних даних дослідження теплоносія в запропонованій системі сонячного теплопостачання із геліовікном.

Температура теплоносія в запропонованій системі сонячного теплопостачання із геліовікном за інтенсивності сонячної енергії 600 Вт/м^2 на виході геліовікна досягала $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5).

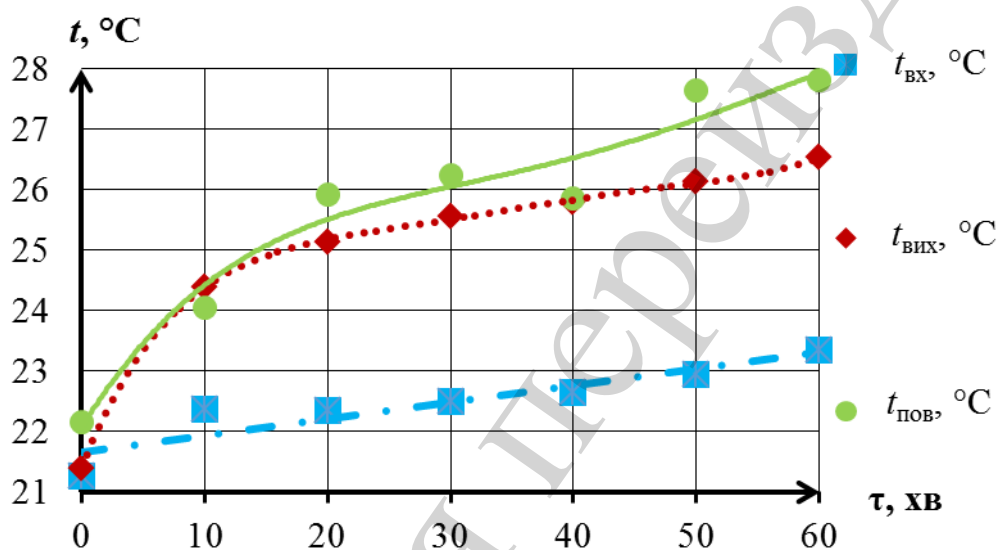


Рис. 5. Температура теплоносія на вході $t_{\text{вх}}$, $^\circ\text{C}$ і виході $t_{\text{вих}}$, $^\circ\text{C}$ геліовікна та температура навколишнього середовища $t_{\text{пов}}$, $^\circ\text{C}$ впродовж експерименту в режимі руху циркуляції теплоносія за умов випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 600 Вт/м^2

Температура в баку-акумуляторі за інтенсивності випромінювання імітатора сонячної енергії 600 Вт/м^2 досягала $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 6).

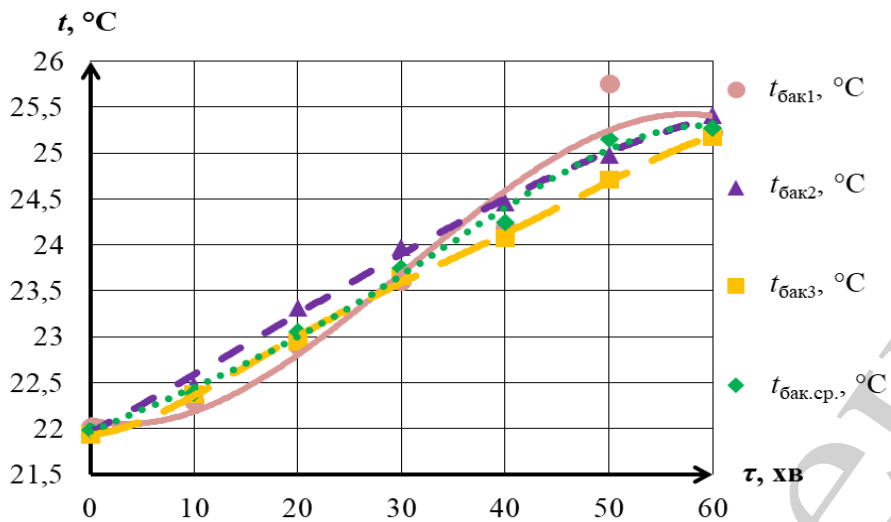


Рис. 6. Зміна температури теплоносія в трьох шарах бака-акумулятора $t_{\text{бак1...3}}$, °C та усереднена температура бака-акумулятора $t_{\text{бак.ср.}}$, °C залежно від часу нагріву в режимі руху циркуляції теплоносія за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 600 Вт/м^2

Слід звернути увагу, що для визначення коефіцієнта корисної дії системи сонячного теплопостачання із геліовікном в цілому (рис. 7) спочатку необхідно було визначити теплову енергію, що акумулювалась в баку-акумуляторі за формулою (21)

$$Q_{\text{бак}} = m \cdot c \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}), \quad (21)$$

де m – маса теплоносія в баку-акумуляторі, кг; c – середня питома теплоємність теплоносія (за сталого тиску) при середньоарифметичній температурі теплоносіїв, Дж/(кг·К); $t_{\text{п}}$, $t_{\text{к}}$ – температура теплоносія в баку-акумуляторі на початку та в кінці експерименту відповідно, К.

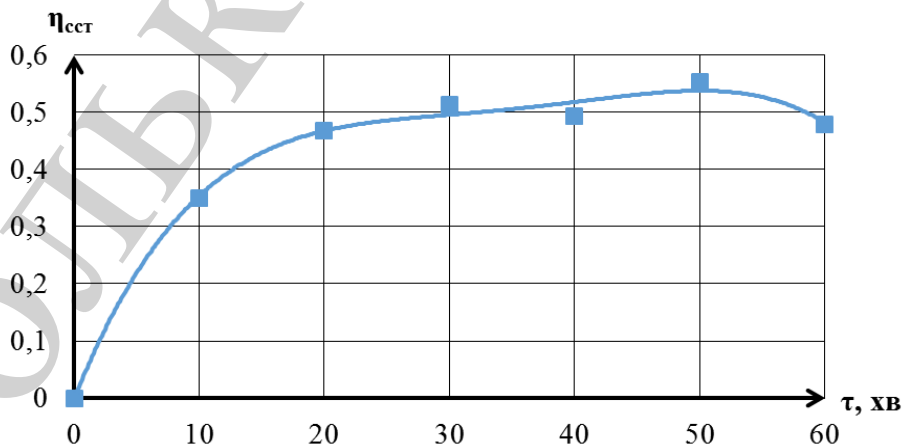


Рис. 7. Динаміка зміни коефіцієнта корисної дії системи сонячного теплопостачання із геліовікном $\eta_{\text{сст}}$ в цілому (за накопиченням теплової енергії в баку-

аккумуляторі) залежно від часу нагріву в режимі руху циркуляції теплоносія за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 600 Вт/м^2

Зміна температури теплоносія в баку-аккумуляторі в режимі руху гравітації теплоносія наведена на рис. 8.

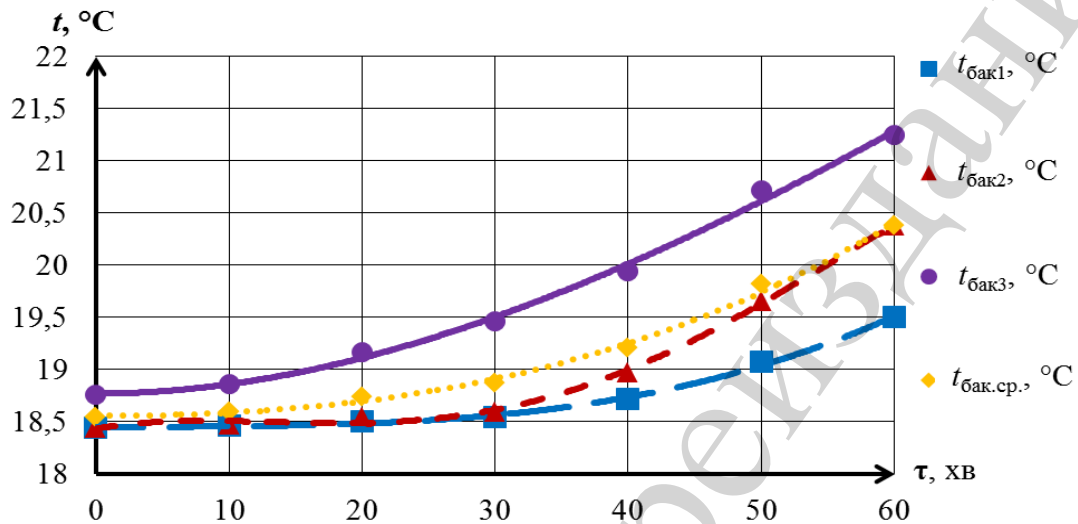


Рис. 8. Зміна температури теплоносія в трьох шарах баку-аккумулятора $t_{\text{бак1...3}}$, °C та усереднена температура баку-аккумулятора $t_{\text{бак.ср.}}$, °C залежно від часу нагріву в режимі руху гравітації теплоносія за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 600 Вт/м^2

Важливим моментом дослідження системи сонячного теплопостачання є аналіз зміни коефіцієнта корисної дії установки геліовікна як сонячного колектора в режимі руху гравітації теплоносія (рис. 9).

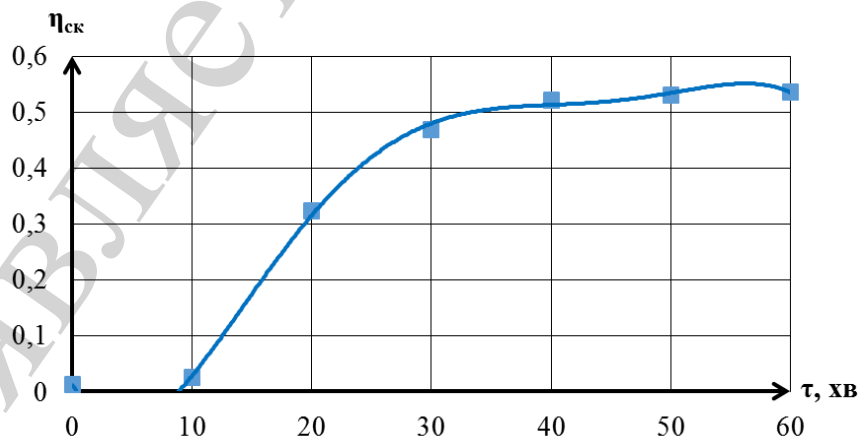


Рис. 9. Зміна коефіцієнта корисної дії $\eta_{\text{ск}}$ геліовікна впродовж експерименту в режимі руху гравітації теплоносія за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 600 Вт/м^2

На рис. 10 наведено дані натурних, лабораторних та теоретичних розрахунків зміни усередненої температури теплоносія в баку-акумуляторі за різних експериментальних умов в режимі руху гравітації теплоносія.

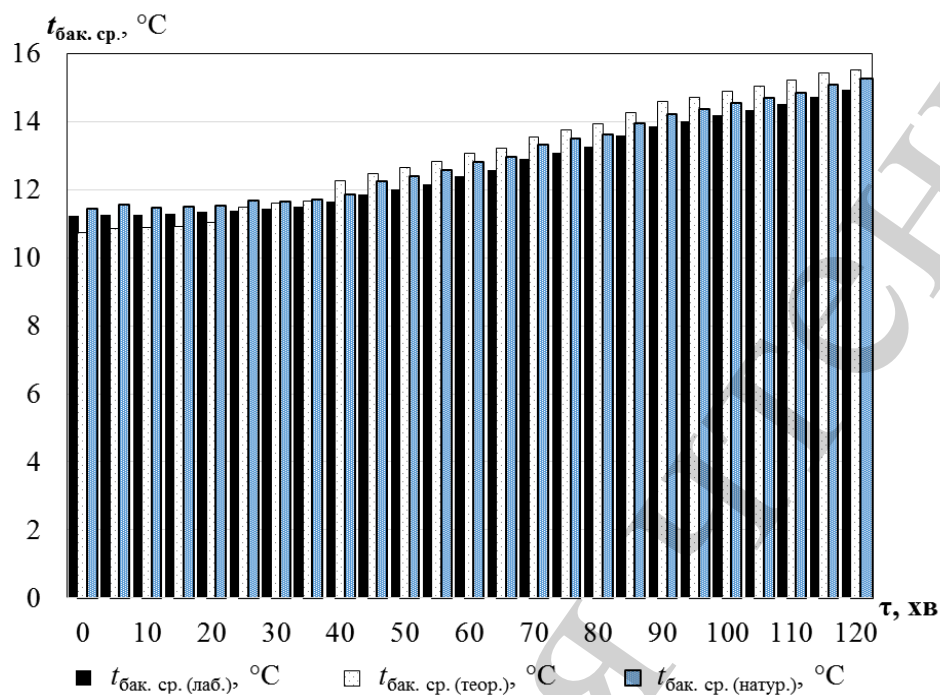


Рис. 10. Порівняння теоретичних, експериментальних та натурних даних температури в баку-акумуляторі гелювікна в режимі руху гравітації теплоносія при інтенсивності випромінювання 900 Вт/м^2

Доцільним питанням в режимі руху гравітації теплоносія було дослідження миттєвих значень питомої теплової енергії для системи сонячного теплопостачання, які наведені на рис. 11.

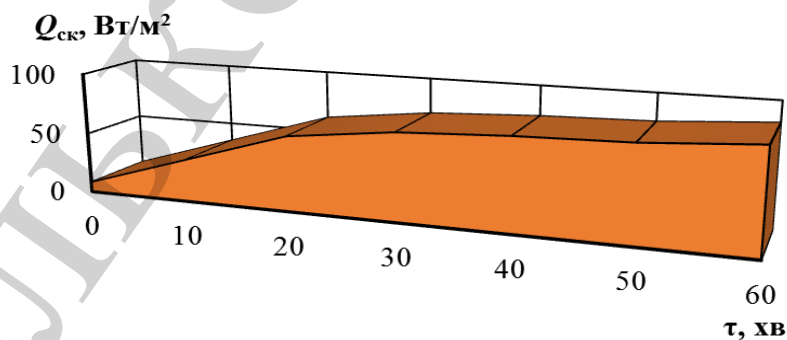


Рис. 11. Миттєва потужність гелювікна як сонячного колектора $Q_{\text{ск}}$, Вт/м² в режимі руху гравітації теплоносія за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 900 Вт/м^2

Аналіз результатів свідчить про те, що миттєва потужність геліовікна за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 900 Вт/м^2 досягає значень 96 Вт/м^2 (рис. 11).

6. Обговорення експериментальних та теоретичних досліджень системи сонячного теплопостачання із геліовікном

Отримані результати проведених теоретичних, натурних та експериментальних досліджень системи сонячного теплопостачання із геліовікном підтверджують можливість впровадження запропонованого схемного рішення для будинків на стадії проектування та реконструкції.

Проведені дослідження – це продовження попередніх теоретично-експериментальних досліджень геліозахистів, досліджень теплотехнічних характеристик сонячних колекторів, панелей та дослідження сонячної радіації [10, 13, 14]. В порівнянні з попередніми дослідженнями, в даній роботі, конструкція геліозахисту в системі сонячного теплопостачання була досліджена за випромінювання імітатора сонячної енергії на установку при інтенсивності 600 та 900 Вт/м^2 та режиму руху гравітації або циркуляції теплоносія. За змодельованими результатами стратифікації теплоносія встановлено що температура, яку зможе досягнути бак-акумулятор в верхньому шарі становить 50°C (рис. 3). Усереднена температура теплоносія в бак-акумуляторі за режиму руху гравітації теплоносія досягала на 20% меншого значення ніж за режиму руху циркуляції теплоносія (рис. 6, 8). Максимально досягнута ефективність геліовікна в режимі руху гравітації теплоносія в якості сонячного колектора становила $\approx 53\%$ (рис. 9).

Виходячи з цих результатів, можна констатувати, що теоретичні дослідження температури теплоносія в бак-акумуляторі були більші відносно натурних, тоді як лабораторні дослідження навпаки (рис. 10).

Миттєва питома теплова потужність за сталої об'ємної витрати $0,25 \text{ л/хв}$ набуває зростаючого значення, що може бути пов'язано з розігрівом системи, зміна миттєвої питомої теплової потужності за таких параметрів відбувалась від 61 – 96 Вт/м^2 за постійного сонячного випромінювання 900 Вт/м^2 .

Схемні рішення із геліовікнами є простими та дешевими в реалізації, що є передумовою їх широкого застосування. Оскільки такі конструктивні рішення із геліовікнами дозволяють отримувати сонячну енергію протягом цілого дня та більше її з акумулювати після обіду, то їх можна вважати інерційними. З іншої сторони, бак-акумулятор дає змогу догрівати теплоносій без значного виносу з акумульованого тепла назад у геліовікно. Нічна термоакумуляція за пільговим тарифом дозволить підвищити ефективність системи в цілому, оскільки в бак-акумуляторі може залишатись не використана теплова енергія.

Такі принципіві схеми геліозахистів ще на стадії проектування будівель/споруд можуть вирішити проблемні питання в частині ефективного використання корисної площі будівлі та сонячної енергії.

Подальшими дослідженнями планується порівняти фактори, що впливали на установку за натурних досліджень, таких як швидкість та напрямок вітру, і т. д.

7. Висновки

1. На основі теоретичного моделювання розшаровування теплоносія в дво-, три- та дев'яти-секційному баку-акумуляторі проблемною зоною був перший шар та останній в усіх випадках. Тому для підвищення резерву енергоефективності установки запропоновано в таких конструкціях покращувати ізоляцію зберігаючої ємності в шарі, ближчому до трубопроводу з подаючим (гарячим) теплоносієм.

2. За проведеним комплексом досліджень системи сонячного теплопостачання із геліовікном, в якості геліозахисту як частини енергоефективного будинку, встановлено, що у системі сонячного теплопостачання із геліовікном:

– усереднена температура в баку-акумуляторі в режимі руху циркуляції теплоносія досягає 25,5 °С;

– усереднена температура в баку-акумуляторі в режимі руху гравітації теплоносія досягає 20,4 °С;

– миттєва питома теплова потужність теплоносія в режимі руху гравітації становить 96 Вт/м²;

– ефективність (коефіцієнт корисної дії) становить 53 % та 55 % в режимі руху гравітації та циркуляції теплоносія відповідно.

Позитивними сторонами установки є спрощення запропонованої конструкції для монтажу та розрахунків. Використання корисної площі захищення за умов застосування не дорогих будівельних матеріалів в схемному рішенні підтверджує можливість його широкого застосування у системі сонячного теплопостачання із геліовікном.

3. Виявлено, що теоретичні розрахунки усередненої температури теплоносія в баку-акумуляторі за режиму руху гравітації теплоносія є більшими на 9,5 % ніж отримані результати в реальних умовах.

Література

1. Hall M. One Year Minergie-A–Switzerland's Big Step towards Net ZEB // *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 7, Issue 1. P. 11–19. doi: <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2013.01.002>

2. Даниленко О. Технології енергозберігаючого будівництва // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій*. Тернопіль, 2012. С. 73–74.

3. Sartori I., Hestnes A. G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article // *Energy and Buildings*. 2007. Vol. 39, Issue 3. P. 249–257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>

4. Voss K., Sartori I., Lollini R. Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings – How definitions & regulations affect the solutions // *Rehva Journ*. 2012. P. 23–27.

5. Lorenz P., Pinner D., Seitz T. The economics of solar power // *The McKinsey Quarterly*. 2008.

6. Кравчук В., Каплун В. До питання створення комбінованої системи енергозабезпечення енергоефективних (пасивних) будинків // *Техніка і технології АПК*. 2012. № 3. С. 9–14.

7. Specificity of temperature mode formation in production premises with infrared heating system / Zhelykh V., Spodyniuk N., Dzeryn O., Shepichak V. // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. 2015. Vol. 4, Issue 9. P. 8–16.

8. Грачев А. Пассивный дом. 7 Главных правил по немецкой технологии // *Стройка*. 2010. С. 50–53.

9. Chwieduk D. *Solar Energy in Buildings. Optimizing Thermal Balance for Efficient Heating and Cooling*. Elsevier, 2014. 382 p. doi: <https://doi.org/10.1016/c2012-0-07007-x>

10. Physical Modeling of Thermal Processes of the Air Solar Collector with Flow Turbulators / Zhelykh V., Kozak K., Dzeryn O., Pashkevych V. // *Energy Engineering and Control Systems*. 2018. Vol. 4, Issue 1. P. 9–16. doi: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2018.01.009>

11. Solar heating and cooling: Present and future development / Ge T. S., Wang R. Z., Xu Z. Y., Pan Q. W., Du S., Chen X. M. et. al. // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 126. P. 1126–1140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.081>

12. Нараєвський С. В. Порівняльний аналіз ефективності роботи сонячної енергетики у провідних країнах світу // *Економічний вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2015. № 12. С. 145–150.

13. Voznyak O., Shapoval S., Kasynets M. Rise of effective use of solar energy in combined solar heaters // XIII International scientific conference “Current issues of civil and environmental engineering in Kosice, Lviv and Rzeszow”. Kosice, 2011.

14. Zvýšenie efektivity systémov zásobovania teplotou s využitím slnečnej energie s slnečnými kolektormi a solárnymi panelmi / Voznyak O., Shapoval S., Kasynets M., Kapalo P. // *Plynár-vodár-kúrenár*. 2012. Issue 3. P. 32–34.

15. Performance analysis of a solar air heating system with latent heat storage in a lightweight building / Arkar C., Šuklje T., Vidrih B., Medved S. // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 95. P. 281–287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.031>

16. Zhao J., Lyu L., Han X. Operation regulation analysis of solar heating system with seasonal water pool heat storage // *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 47. P. 101455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101455>

17. Накашидзе Л. В., Шевченко М. В. Геліфоколектор-енергоактивне огороження як елемент системи кліматизації споруд // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. № 99. С. 127–135.

18. Яцишин М. Модернізація житла під енергопасивний будинок // *Технічні вісті*. 2006. С. 79–81.

19. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, IDT). Київ, 2011. 71 с.

20. Колесник Є. С., Белоус А. Н. Методи розрахунку енергоефективності будівель згідно з ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 «Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні» // *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. 2012. Т. 8, № 4. С. 197–204.