

1. Такаев Б. В. Разработка воздушного солнечного коллектора с прозрачной тепловой изоляцией и оптимизация систем солнечного теплоснабжения. – М., 2003. – 155 с. 2. Михеев М.А., Михеев И.М. Основы теплопередачи. – изд. 2-е – М.: Энергия, 1977 – 344 с. 3. Возняк О.Т., Желих В.М. Основы научных исследований у будівництва. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2003. – 173 с. 5. http://www.mensh.ru/konstrukcii_vozdushnyh_kollektorov. 6. Лесик Х.Р., Желих В.М. Визначення теплових характеристик термосифонного сонячного колектора / Науковий вісник НЛТУ України : Збірн. наук.-техн. пр. – Львів: РВВ НЛТУ України . 2012. Вип.22.4.

УДК 620.97:697.329

С.П. Шаповал

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теплогазопостачання і вентиляції

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОАКУМУЛЯЦІЇ КОМБІНОВАНИМ ГЕЛІОНАГРІВНИКОМ

© Шаповал С.П., 2013

Розглянуто спосіб підвищення ефективності використання сонячної енергії комбінованим геліонагрівником. Виконання комбінованого геліонагрівника із орієнтацією теплопоглинача на південний схід, південь і південний захід дає можливість ефективніше використовувати сонячну енергію в ранішні та вечірні години. Описано результати досліджень надходження сонячної радіації на комбінований геліонагрівник. Встановлено залежності між різними орієнтаціями комбінованого геліонагрівника і ефективністю роботи геліосистеми. Показано, що із комбінованого геліонагрівника можна отримати більше енергії ніж із традиційно плоских.

Ключові слова: комбінований геліонагрівник, сонячна енергетика.

This article studies the method of efficiency increase of solar energy using by combined solar collector. The making of combined solar collector with orientation on southeast, south and southwest gives a chance to use solar energy in morning and evening hours more efficiently. The results of investigation of solar radiation incoming on the combined solar collectors are described. The dependence between different orientations of the absorber and different constructional overall dimensions are determined. It is shown that we can receive more energy from combined solar collectors with triple orientation of absorber than from traditionally flat.

Key words: cmbined solar collector, solar energetic.

Вступ

У середині ХХ ст. використання відновних джерел енергії було незначним, проте енергетична криза 70-х років минулого століття, Чорнобильська катастрофа 1986 р. та катастрофа на АЕС “Фукусіма-1” в Японії 2011 р. докорінно змінили погляди людства на відновлювальні джерела енергії. Європейська спільнота вимагає від країн, які прагнуть до неї вступити, збільшення частки відновлювальних джерел енергії в національному виробництві енергії до 6%, а до 2030 р. – до 20%. В Україні показник використання альтернативних видів енергії знаходиться на рівні 0,7%. Все це спонукає до інтенсифікації використання сонячної енергії, оскільки вона може ефективно трансформуватись в теплову та електричну і використовуватись для потреб опалення та гарячого водопостачання. Одним із способів вирішення цього питання є застосування систем сонячного теплопостачання із потрійно-орієнтованими сонячними колекторами, а також комбінованих геліонагрівників із потрійно-орієнтованим теплопоглиначем.

Постановка проблеми

Для оцінювання ефективності потрійно-орієнтованого комбінованого геліонагрівника необхідно провести аналітичні розрахунки. Метою аналітичного розрахунку є визначення термоакумуляційних властивостей комбінованих геліонагрівників та пошук оптимальних їх параметрів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Ефективним методом підвищення ефективності плоских сонячних колекторів у ранішні та вечірні години є встановлення їх “дельта-системою”, тобто з орієнтацією одночасно на південний схід, південь і південний захід. Дослідження такої системи показало можливість підвищення ефективності геліосистеми з плоскими сонячними колекторами в вечірні і ранішні години роботи [1]. Але ці дослідження проведені для протічної схеми, в якій кожен сонячний колектор діє індивідуально, що не є характерним для систем сонячного теплопостачання із використанням термоакумуляції в геліонагрівнику.

Дослідження оптимальних кутів нахилу плоского сонячного колектора до горизонту і азимута його повороту встановили, що кут нахилу сонячного колектора до горизонту залежить від широти місцевості та часу дії геліоустановки [2]. Проте потрійно-орієнтовані системи є недостатньо вивченими, а саме, не відомо як змінюється ефективність такої установки залежно від різних кутів встановлення сонячних колекторів при їх сумісній дії з баком-акумулятором впродовж дня.

Виклад основного матеріалу

Під час аналітичного описування термоакумуляції комбінованим геліонагрівником були прийняті такі допущення і спрощення: температура кожного елемента системи вважалась постійною в досліджуваному проміжку часу; потік сонячної енергії розподілений рівномірно по поверхні теплопоглинача; прийнято, що випромінювальні властивості поверхонь не залежать від довжини хвилі; вважається, що тепловипромінюванням і конвекцією з теплопоглинача передається прозорому покриттю і тоді віддається в навколишнє середовище; у комбінованому геліонагрівнику теплоносії розглядався як статична маса.

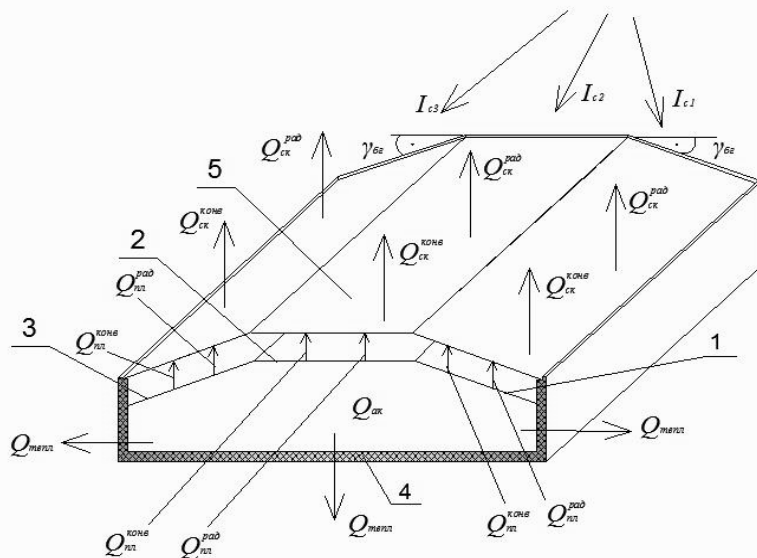


Рис. 1. Теплонадходження та тепловтрати комбінованого геліонагрівника за орієнтації теплопоглинача на: 1 – південний схід; 2 – південь; 3 – південний захід; (4 – теплоізоляція; 5 – прозоре покриття; $\gamma_{бс}$ – азимутальне відхилення бічних граней, град.)

Тепловий баланс для цього комбінованого геліонагрівника за певний проміжок часу:

$$Q_c \Delta T = Q_{ак} + Q_{ск}^{контр} \Delta T + Q_{тепл} \Delta T + Q_{ск}^{рад} \Delta T, \quad (1)$$

де Q_c – кількість сонячної енергії, що надходить на комбінований геліонагрівник, Вт; $Q_{ак}$ – кількість тепла закумуляованого впродовж періоду часу ΔT , Дж; $Q_{ск}^{конв}$ – конвективні втрати із поверхні прозорого покриття, Вт; $Q_{менл}$ – втрати теплопровідністю, Вт; $Q_{ск}^{рад}$ – втрати із поверхні прозорого покриття випромінюванням, Вт.

Кількість тепла, закумуляованого в комбінованому геліонагрівнику, визначається за формулою

$$Q_{ак} = c m (t_1 - t_m), \quad (2)$$

де c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К); m – маса теплоносія, кг; t_1, t_m – температури теплоносія на початку і наприкінці термоакумуляції, К.

Кількість енергії, що надходить від Сонця, визначається як сума надходжень на кожну із поверхонь комбінованого геліонагрівника:

$$Q_c = DA(F_{нл1}I_{c1} + F_{нл2}I_{c2} + F_{нл3}I_{c3}), \quad (3)$$

де D – коефіцієнт пропускання сонячної енергії прозорим покриттям; A – коефіцієнт поглинання сонячної енергії теплопоглиначем; $F_{нл i}$ – площа відповідної частини теплопоглинача (див. рис. 1), м²; I_{ci} – інтенсивність сонячної енергії, що надходить на відповідну частину теплопоглинача (див. рис. 1), Вт/м².

Втрати конвекцією від прозорого покриття в навколишнє середовище

$$Q_{ск}^{конв} = \alpha_{ск} F_{ск} (t_{ск} - t_{о.с.}), \quad (4)$$

де $\alpha_{ск}$ – коефіцієнт тепловіддачі від скляного покриття до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); $F_{ск}$ – площа прозорого покриття, м²; $t_{ск}$ – температура скляного покриття, К; $t_{о.с.}$ – температура навколишнього середовища, К.

Тепловтрати через теплоізоляцію із тильного боку та бокових стінок:

$$Q_{менл} = \kappa_{із} F_{із} (t_m - t_{о.с.}), \quad (5)$$

$\kappa_{із}$ – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції, Вт/(м²·К); $\kappa_{із} = 1/R_{із}$, де $R_{із}$ – термічний опір теплопровідності теплоізоляції, (м²·К)/Вт; $F_{із}$ – площа теплоізоляції, м²; t_m – температура теплоносія, К.

Радіаційні тепловтрати із поверхні прозорого покриття в навколишнє середовище:

$$Q_{ск}^{рад} = \varepsilon_{пр}^{ск} c_0 F_{нл} \left[\left(\frac{t_{ск}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_n}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

де $\varepsilon_{пр}^{ск}$ – приведений відносний коефіцієнт теплового випромінювання прозорого покриття; c_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴); t_n – температура небосхилу, К; $F_{нл}$ – площа теплопоглинача (теплопоглинаючої пластини), $F_{нл} = F_{нл1} + F_{нл2} + F_{нл3}$, м².

Якщо прийняти, що тепловтрати конвекцією і випромінюванням із теплопоглинача витрачаються на тепловтрати конвекцією і випромінюванням прозорого покриття, то можна записати таке рівняння:

$$Q_{нл}^{конв} + Q_{нл}^{рад} = Q_{ск}^{конв} + Q_{ск}^{рад}. \quad (7)$$

Тепловтрати конвекцією і випромінюванням прозорого покриття можна визначити за такими залежностями:

$$Q_{нл}^{конв} = \alpha_{нл} F_{нл} (t_{нл} - t_{ск}), \quad (8)$$

де $\alpha_{нл}$ – коефіцієнт тепловіддачі від теплопоглинача до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); $F_{нл}$ – площа теплопоглинача, м²; $t_{нл}$ – температура теплопоглинача, К.

$$Q_{nl}^{rad} = \varepsilon_{np}^{nl} c_0 F_{nl} \left[\left(\frac{t_{nl}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{ск}}{100} \right)^4 \right], \quad (9)$$

де $\varepsilon_{np}^{ск}$ – приведений відносний коефіцієнт теплового випромінювання теплопоглинача.

Ефективна температура небосхилу, яка враховує неоднорідність температури атмосфери, може бути визначена за такою формулою [3]:

$$t_n = 0,0552 t_{o.c.}^{1,5}. \quad (10)$$

Температура теплоносія за певний проміжок часу може бути визначена за такою формулою:

$$t_m = t_1 + \frac{Q_c \Delta \tau + Q_{ск}^{конв} \Delta \tau + Q_{менл} \Delta \tau + Q_{ск}^{rad} \Delta \tau}{cm}. \quad (11)$$

Оскільки з теплопоглинача до прозорого покриття, а з нього до навколишнього середовища тепловтрати здійснюватимуться конвекцією, теплопровідністю та випромінюванням, то в розглянутому випадку буде складний теплообмін. Якщо теплопровідністю скла і панелі знехтувати, то в даному випадку буде радіаційно-конвективний теплообмін. Втрати тепла із теплосприймаючої частини комбінованого геліонагрівника будуть визначатись:

$$Q_{p-к} = \kappa_{p-к} (t_m - t_{o.c.}) F_{nl}, \quad (12)$$

де $\kappa_{p-к}$ – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К).

$$\kappa_{p-к} = \frac{1}{R_{p-к}}, \quad (13)$$

де $R_{p-к}$ – термічний опір теплопередачі від теплопоглинача до навколишнього середовища, (м²·К)/Вт.

Термічний опір теплопередачі від теплопоглинача до навколишнього середовища можна знайти за такою залежністю [4]

$$R_{p-к} = \left(\frac{1}{R_{nl}^{конв}} + \frac{1}{R_{nl}^{rad}} \right)^{-1} + R_{ск} + \left(\frac{1}{R_{ск}^{конв}} + \frac{1}{R_{ск}^{rad}} \right)^{-1}, \quad (14)$$

де $R_{nl}^{конв}$, R_{nl}^{rad} – відповідно термічний опір тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від теплопоглинача до повітряного прошарку, (м²·К)/Вт; $R_{ск}$ – термічний опір теплопровідності прозорого покриття, (м²·К)/Вт; $R_{ск}^{конв}$, $R_{ск}^{rad}$ – відповідно термічний опір тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від прозорого покриття до навколишнього середовища, (м²·К)/Вт.

Тепловий баланс термоаккумуляції даним комбінованим геліонагрівником можна здійснити за такою залежністю:

$$mc \frac{dt_m}{d\tau} = Q_c - Q_{p-к} - Q_{менл}. \quad (15)$$

При підстановці у рівняння (15) вирази (3, 5, 12) отримують таке рівняння теплового балансу комбінованого геліонагрівника в диференційній формі:

$$mc \frac{dt_m}{dT} = DA(F_{nl1} I_{c1} + F_{nl2} I_{c2} + F_{nl3} I_{c3}) - \frac{(t_m - t_{o.c.}) F_{nl}}{R_{p-к}} - \frac{(t_m - t_{o.c.}) F_{i3}}{R_{i3}}. \quad (16)$$

Оскільки надходження сонячної енергії впродовж дня є нестационарним процесом, як і нагрівання теплоносія в комбінованому геліонагрівнику, тому доцільно проаналізувати термоаккумуляцію сонячної енергії за допомогою диференційного рівняння (16). Застосувавши комп'ютерне моделювання та метод чисельного розв'язку Рунге-Кутта, можна проаналізувати термоаккумуляційні властивості комбінованого геліонагрівника залежно від площі теплопоглинаючих поверхонь, коефіцієнтів тепловтрат та маси теплоносія.

При математичному моделюванні задавались час максимальної та мінімальної температури навколишнього середовища впродовж доби, а також самі температури. Прийнято синусоїдальну

залежність зміни температури навколишнього середовища впродовж доби. Результат моделювання для комбінованого геліонагрівника, виконаного із металевого листа (товщиною 1 мм) покритого чорною матовою фарбою в області теплопоглинання, в якому використано віконне скло для прозорі ізоляції і утеплення пінопластом (товщиною 0,05 м) із $F_{nл1} = F_{nл2} = F_{nл3} = 0,135 \text{ м}^2$, $F_{із} = 0,324 \text{ м}^2$, $m = 40,5 \text{ кг}$, $\gamma_{\text{бс}} = 15^\circ$, $\beta = \varphi \square 15$ зображено на рис. 2.12 (конструкція використана для експериментальних досліджень).

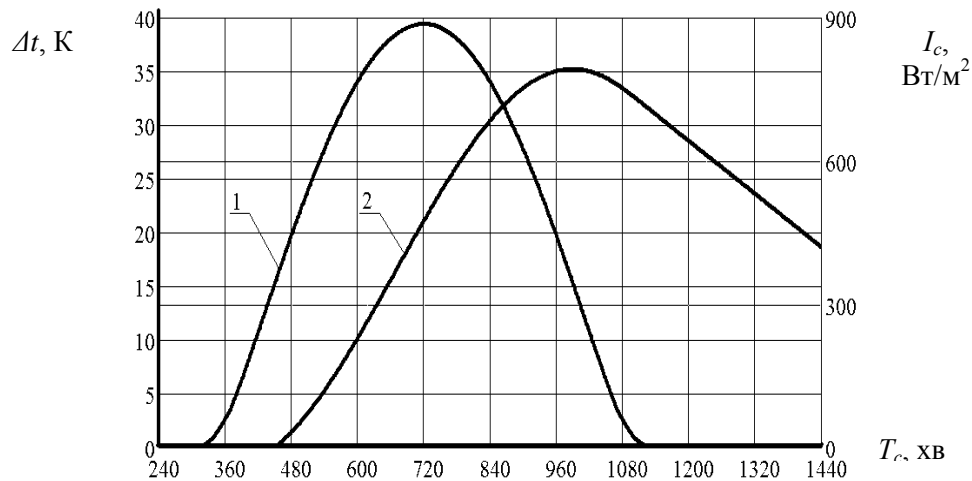


Рис. 2. Моделювання термоаккумуляції комбінованим геліонагрівником впродовж дня $N = 140$ ($N = 0$ відповідає 20 березня): 1 – інтенсивність потоку сонячної енергії I_{cs} , Вт/м^2 ; 2 – нагрівання теплоносія у комбінованому геліонагрівнику Δt , К

Висновки

Побудована в роботі математична модель термоаккумуляції комбінованим геліонагрівником сонячної енергії дозволяє здійснювати розрахунки для довільного часового інтервалу і довільного дня року. Модель дає змогу врахувати залежність інтенсивності потоку сонячної енергії від географічної широти, кількості робочих поверхонь та їх орієнтації, а також величину тепловтрат залежно від температури теплоносія, навколишнього середовища та конструктивних характеристик геліонагрівника.

1. Новаківський Є. В. Підвищення ефективності використання сонячної енергії в комбінованих системах промислового теплопостачання / Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Одеський національний політехнічний університет. – Одеса, 2004. – 22 с. 2. Wiśniewski G., Gołębowski S., Grycik M. i in. Kolektory słoneczne: energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle. – Warszawa : Medium, 2008. – 201 s. 3. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман ; пер. с англ. под. ред. Ю. Н. Малевского. – М. : Мир, 1977. – 420 с. 4. Твайделл Д. Возобновляемые источники энергии / Д. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В. А. Коробкова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 391 с.