

*The Fluid Mechanics of The Freeman Scholar Lecture / Journal of Fluids Engineering.* – March 1999. – Vl. 121. – P. 5–33. 47. Седов Л. И. Снижение турбулентного сопротивления при течении суспензий и эмульсий / Л. И. Седов, В. Н. Пулипенко // *Мех. неоднород. и турбулентн. потоков.* – М., 1989. – С. 5–15. 48. Malhotra J. P. Shear stability studies on polymer-polymer and polymer-libre mixtures / Malhotra J. P., Chaturvedi P. N., Singh R. P. // *Rheol. Acta.* – 1987. – V. 26. – № 1. – P. 31–39. 49. Singh R. P. Characteristics of some polymer-polymer, polymer-fibre combinations and grafted polymers as drag reducing agents and their industrial applications / [Singh R. P., Chang P., Reddy G.V., etc.] // *Drag Reduct. 3rd Int. Conf., Bristol.* – Bristol. – 1984. – P. D4/1-D4/5. 50. А. с. 654828 СССР, МКИ F 17D 1/20. Способ уменьшения гидродинамического сопротивления при внутренней и внешней задаче течения / И. Т. Эльперин (СССР). – № 2506886/25-08; Заявлено 05.07.77; Опубл. 30.03.79, Бюл. № 12. 51. Чернюк В. В. Влияние добавок полиакриламида на потери напора во внезапных сужениях и расширениях труб / В. В. Чернюк, Б. С. Піцишин, В. И. Орел, В. М. Жук // *Инж.-физ. журн.* – 2002. – Т. 75, № 4. – С. 115–122. 52. Чернюк В. В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків рідин гідродинамічно активними додатками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.23.16 “Гідравліка і інженерна гідрологія” / В. В. Чернюк. – К. 2010. – 36 с.

УДК 620.97: 697.329

С.П. Шаповал

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра теплогазопостачання і вентиляції

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКУМУЛЯЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КОМБІНОВАНИМ ГЕЛІОНАГРІВНИКОМ

© Шаповал С.П., 2012

**Розглянено 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.**

**Ключові слова:** сонячний колектор, сонячна енергія, 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.**

**Key words:** solar collector, solar energy, solar energetics.

**Вступ.** У середині ХХ ст. використання відновних джерел енергії було незначним, проте енергетична криза 70-х років минулого століття, Чорнобильська катастрофа 1986 року та катастрофа на АЕС “Фукусіма-1” в Японії 2011 року 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 року – 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 у 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.** Плоскі геліонагрівники погано вловлюють ранішню і вечірню сонячну енергію, що знижує денну ефективність системи сонячного теплопостачання. Тому необхідно дослідити різні кути встановлення системи із потрійно-орієнтованим теплопоглиначем для визначення найефективніших її конструктивних вирішень. Для оцінки ефективності потрійно-орієнтованого комбінованого геліонагрівника необхідно провести аналітичні розрахунки. Метою математичного моделювання є визначення термоаккумуляційних властивостей комбінованих геліонагрівників та пошук їхніх оптимальних параметрів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження потрійно-орієнтованої системи сонячних колекторів показало можливість підвищення її ефективності 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 термоаккумуляції 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 не достатньо вивченими, а саме, не відомо як змінюється ефективність такої установки залежно від різних кутів встановлення сонячних колекторів при їх сумісній дії з баком-аккумулятором упродовж дня.

**Виклад основного матеріалу.** За аналітичного опису термоаккумуляції 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 тепло випромінюванням і конвекцією з теплопоглинача передається прозорому покриттю і тоді віддається в навколишнє середовище; у комбінованому геліонагрівнику теплоносії розглядався як статична маса.

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

$$Q_c = DA(F_{nl1}I_{c1} + F_{nl2}I_{c2} + F_{nl3}I_{c3}), \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт пропускання сонячної енергії прозорим покриттям;  $A$  – коефіцієнт поглинання сонячної енергії теплопоглиначем;  $F_{nli}$  – площа відповідної частини теплопоглинача (див. рис. 1), м<sup>2</sup>;  $I_{ci}$  – інтенсивність сонячної енергії, що надходить на відповідну частину теплопоглинача (див. рис. 1), Вт/м<sup>2</sup>.

Тепловтрати через теплоізоляцію із тильної сторони та бокових стінок:

$$Q_{менл} = \kappa_{i3}F_{i3}(t_m - t_{o.c.}), \quad (2)$$

де  $\kappa_{i3}$  – коефіцієнт теплопередачі теплоізоляції, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\kappa_{i3} = 1/R_{i3}$ , де  $R_{i3}$  – термічний опір теплопровідності теплоізоляції, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $F_{i3}$  – площа теплоізоляції, м<sup>2</sup>;  $t_m$  – температура теплоносія, К.

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

$$Q_{nl}^{конв} + Q_{nl}^{рад} = Q_{ск}^{конв} + Q_{ск}^{рад} . \quad (3)$$

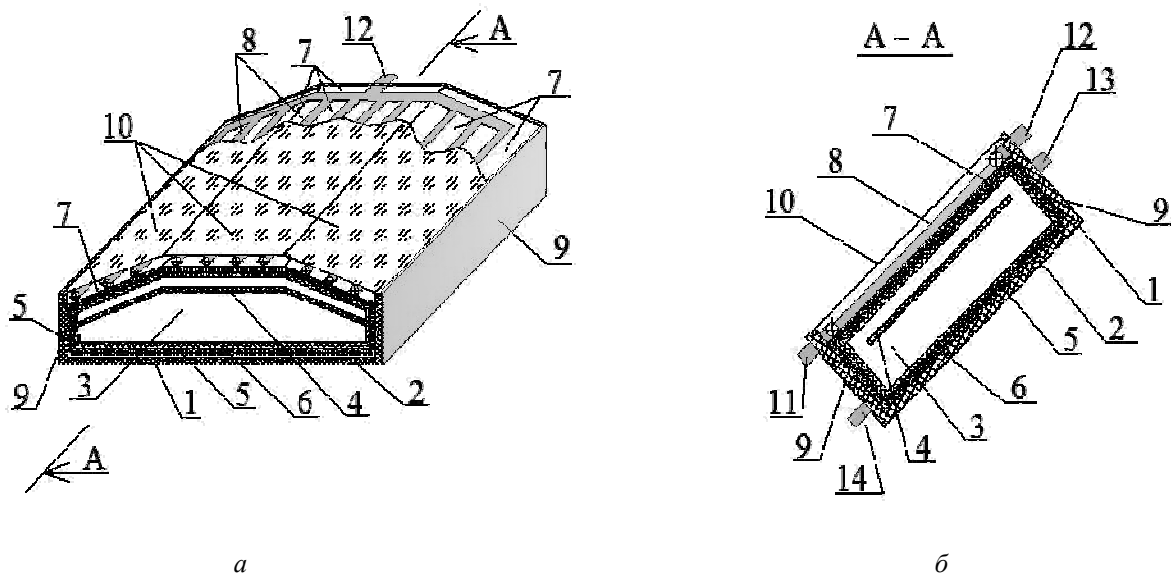


Рис. 1. Схема комбінованого геліонагрівника: 1 – корпус; 2 – теплоізоляція корпусу; 3 – бак-акумулятор; 4 – теплоізолювальна перегородка; 5 – тепловідбиваюче покриття; 6 – абсорбер; 7 – теплопоглинаюча панель (теплопоглинач); 8 – канали циркуляції теплоносія; 9 – бічні стінки корпусу; 10 – прозоре покриття; 11 – патрубок подачі теплоносія в циркуляційні канали; 12 – патрубок виходу теплоносія з циркуляційних каналів; 13 – патрубок заливу теплоносія в бак-акумулятор; 14 – патрубок зливу теплоносія з бака-акумулятора

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

$$Q_{nl}^{конв} = a_{nl} F_{nl} (t_{nl} - t_{ск}) , \quad (4)$$

де  $a_{nl}$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплопоглинача до навколишнього середовища, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{nl}$  – площа теплопоглинача, м<sup>2</sup>;  $t_{nl}$  – температура теплопоглинача, К.

$$Q_{nl}^{рад} = e_{np}^{ск} c_0 F_{nl} \left[ \left( \frac{t_{nl}}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{ск}}{100} \right)^4 \right] , \quad (5)$$

де  $e_{np}^{ск}$  – наведений відносний коефіцієнт теплового випромінювання теплопоглинача.

Ефективну температуру небозводу, яка враховує неоднорідність температури атмосфери, можна визначити за такою формулою [3]:

$$t_n = 0,0552 t_{o.c.}^{1,5} . \quad (6)$$

Температуру теплоносія за певний проміжок часу можна обчислити так:

$$t_m = t_1 + \frac{Q_c Dt + Q_{ск}^{конв} Dt + Q_{менл} Dt + Q_{ск}^{рад} Dt}{cm} . \quad (7)$$

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 цьому разі буде радіаційно-конвективний теплообмін. Втрати тепла із теплосприймаючої частини комбінованого геліонагрівника будуть визначатись:

$$Q_{p-k} = \kappa_{p-k} (t_m - t_{o.c.}) F_{nl}, \quad (8)$$

де  $\kappa_{p-k}$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$\kappa_{p-k} = \frac{1}{R_{p-k}}, \quad (9)$$

де  $R_{p-k}$  – термічний опір теплопередачі від теплопоглинача до навколишнього середовища, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

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

$$R_{p-k} = \left( \frac{1}{R_{nl}^{конв}} + \frac{1}{R_{nl}^{рад}} \right)^{-1} + R_{ск} + \left( \frac{1}{R_{ск}^{конв}} + \frac{1}{R_{ск}^{рад}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

де  $R_{nl}^{конв}$ ,  $R_{nl}^{рад}$  – відповідно термічний опір тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від теплопоглинача до повітряного прошарку, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $R_{ск}$  – термічний опір теплопровідності прозорого покриття, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $R_{ск}^{конв}$ ,  $R_{ск}^{рад}$  – відповідно термічний опір тепловіддачі конвекцією та випромінюванням від прозорого покриття до навколишнього середовища, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

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

$$mc \frac{dt_m}{dt} = Q_c - Q_{p-k} - Q_{менл}. \quad (11)$$

Підставляючи у рівняння (11) вирази (1, 2, 8), отримуємо таке рівняння теплового балансу комбінованого геліонагрівника в диференційній формі:

$$mc \frac{dt_m}{dT} = DA(F_{nl1}I_{c1} + F_{nl2}I_{c2} + F_{nl3}I_{c3}) - \frac{(t_m - t_{o.c.})F_{nl}}{R_{p-k}} - \frac{(t_m - t_{o.c.})F_{із}}{R_{із}}. \quad (12)$$

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 (12). Застосувавши комп'ютерне моделювання та метод чисельного рішення Рунге-Кутта можна проаналізувати термоаккумуляційні властивості комбінованого геліонагрівника залежно від площі теплопоглинальних поверхонь, коефіцієнтів тепловтрат та маси теплоносія.

За математичного моделювання задавали 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 прозорої ізоляції і утеплення пінопластом (товщиною 0,05 м) із  $F_{nl1} = F_{nl2} = F_{nl3} = 0,135$  м<sup>2</sup>,  $F_{із} = 0,324$  м<sup>2</sup>,  $m = 40,5$  кг,  $\gamma_{бг} = 150$ ,  $\beta = \varphi - 15$  зображено на рис. 2 (конструкція використана для експериментальних досліджень).

**Висновки.** Побудована в роботі математична модель термоаккумуляції комбінованим геліонагрівником сонячної енергії дає можливість 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.

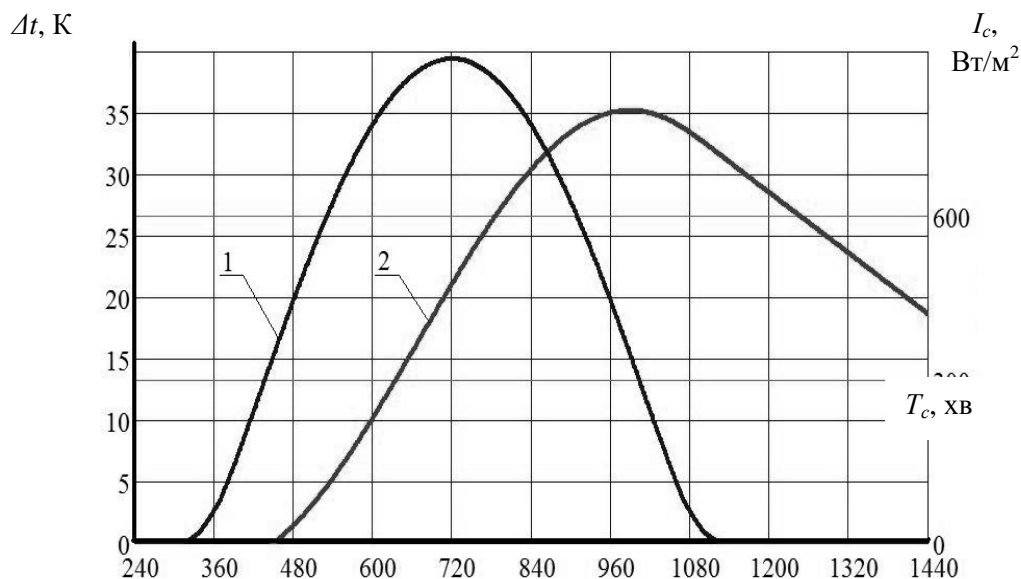


Рис. 2. Моделювання термоаккумуляції комбінованим геліонагрівником впродовж дня  $N = 140$  ( $N = 0$  відповідає 20 березня): 1 – інтенсивність потоку сонячної енергії  $I_c, \text{Вт/м}^2$ ; 2 – нагрівання теплоносія у комбінованому геліонагрівнику  $\Delta t, \text{K}$

1. Новаківський Є. В. Підвищення ефективності використання сонячної енергії в комбінованих системах промислового тепlopостачання / Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Одеський національний політехнічний університет. – О., 2004. – 22 с. 2. Wiśniewski G., Gołębiowski 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.