

УДК 662.997+697.7

В.В. Височин, канд. техн. наук, доц.,

Є.І. Кожухар, бакалавр

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, 65044 Одеса, Україна; e-mail: ostapenko.ieksu@mail.ru

УМОВИ ЦІЛОДОВОЇ ЗАРЯДКИ КУЩОВОГО ГРУНТОВОГО АКУМУЛЯТОРА ГЕЛІОСИСТЕМИ

В.В. Височин, Є.І. Кожухар. Умови цілодобової зарядки кущового ґрунтового акумулятора геліосистеми. Проведено чисельні дослідження нестационарного теплообміну в сезонному акумуляторі тепла геліосистеми з 9-ма ґрунтовими теплообмінниками в процесі періодичної, з добовим циклом, зарядки в літній період. Теплообмінник представлено у вигляді вертикального зонда з коаксіальним розташуванням труб. Математична модель сполученої роботи геліосистеми й ґрунтового акумулятора включає диференціальні рівняння, що описують умови приходу й перетворення сонячної енергії в геліоколекторі, а також теплообмін у ґрунтових теплообмінниках і в масиві ґрунту. Показано необхідність урахування взаємного впливу розмірів геліоколекторів і ґрунтового теплообмінника, а також можливість підвищення ефективності акумулятора при роботі із внутрішньою циркуляцією теплоносія в умовах відсутності інсоляції. Запропоновано рекомендації з організації роботи теплообмінників акумулятора.

Ключові слова: ґрунтовий теплообмінник, сезонний кущовий акумулятор, геліосистема.

V.V. Wysochin, Ye.I. Kozhukhar. The conditions of twenty-four-hour charging of the group ground accumulator of solar plant system. The numerical investigations of unsteady heat transfer in the seasonal heat accumulator of a solar plant system with the 9 ground heat exchangers in process of periodic, with day cycle, charging at the summer period are carried out. Heat exchanger is a vertical sonde with the coaxial tubes. The mathematical model of conjugate operation of the solar plant system and the ground heat exchangers encloses differential equations, that of the conditions of incoming and converting the solar energy in the heliocollectors describe, and heat exchange in the ground heat exchangers and in the array of ground too. The necessity to take account of reciprocal effect of dimensions of the heliocollectors and the ground heat exchanger it is shown, and possibility of increase of effectiveness of the accumulator, which have operate with inside circulation heatcarrier by night too. The functioning recommendations of the heat exchangers of accumulator are introduced.

Keywords: ground heat exchanger, seasonal group heat accumulator, solar plant system.

Вступ. Застосування геліосистем для опалення вимагає використання сезонних акумуляторів тепла. Найбільш придатні для цієї мети ґрунтові акумулятори [1, 2]. Серед розмаїття таких акумуляторів найкращими експлуатаційними показниками виділяються вертикальні багатозондні (кущові) конструкції. Зонди являють собою трубчасті теплообмінники, розташовані в свердловинах. Режим роботи теплообмінників — температурний і швидкісний — відрізняються суттєвою нестационарністю, обумовленою впливом сполученої геліосистеми. На сьогодні відсутні надійні рекомендації з вибору раціональних параметрів роботи комплексів «геліосистема — багатозондний сезонний акумулятор», зокрема, швидкостей руху теплоносіїв в ґрунтових теплообмінниках при змінних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з чинників стримування застосування ґрунтових акумуляторів є невисока якість накопиченої теплоти, її низький потенціал. Це пояснюється, зокрема, циклічністю виробництва теплоти в геліосистемі, що призводить до періодичного падіння температурного напору при зарядці акумулятора і розмивання температурного поля в ґрунті [1]. Для розв'язання цієї проблеми застосовують додаткові акумулятори тепла добового циклу [3], що ускладнює систему тепlopостачання і погіршує її показники. Простий, але ефективний спосіб згладжування процесу акумуляування тепла полягає в активізації роботи ґрунтового теплообмінника в нічний час — у так званій пасивній фазі [1]. Аналіз такого методу виконаний стосовно одиночного зонду. Однак для багатозондних акумуляторів подібних досліджень не проведено. Важливо відзначити, що чисельні дослідження роботи ґрунтових акумуля-

DOI 10.15276/opu.2.46.2015.17

© 2015 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

торів проводилися на математичних моделях, в яких використовувалося одновимірне рівняння теплопровідності ґрунту [2, 3]. Така постановка завдання дозволяє проводити лише якісну оцінку процесів, оскільки в реальних умовах має місце суттєва деформація температурного поля в масиві ґрунту [1], обумовлена стіканням тепла в різних напрямках і накладеннями полів від різних джерел. Оскільки для практичних цілей важливо встановлення у належній мірі достовірних режимних параметрів, необхідно розв'язувати такі завдання із застосуванням математичних моделей більш високої точності.

Метою роботи є з'ясування можливостей кушового теплообмінника забезпечувати безперервний цілодобовий режим закачування тепла в ґрунт і визначення умов раціонального проведення цього процесу з використанням математичної моделі підвищеної інформативності на основі тривимірного рівняння теплопровідності в ґрунті.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для дослідження обрано ґрунтовий теплообмінник коаксіального типу (труба в трубі) [1]. Куш акумулятора складається з дев'яти вертикальних паралельно включених теплообмінників висоти h і з поперечним кроком розташування S (рис. 1).

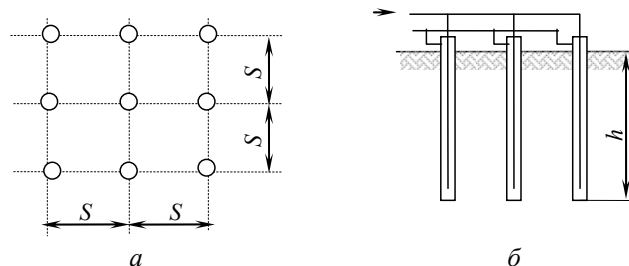


Рис. 1. План (а) і перетин (б) куша з дев'яти теплообмінників

Завдання розв'язується з розглядом процесів поглинання променевої енергії в геліоколекторах (ГК), а також перенесення тепла в теплообміннику і ґрунті. Теплообмін в ґрунтовому теплообміннику описується системою диференціальних рівнянь енергетичного балансу [1] для: теплоносія внутрішньої труби (подавальної); стінки внутрішньої труби; теплоносія зовнішньої труби (зворотної); зовнішньої стінки. Теплообмін в ґрунті описується рівнянням нестационарної теплопровідності в прямокутних координатах у тривимірній постановці

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

де t — температура;

τ — час;

a — коефіцієнт температуропровідності ґрунту;

x, y, z — декартові координати.

Система рівнянь розв'язується кінцево-різницевою методом. Матеріал труб теплообмінника — пластик, теплопровідність стінки $\lambda_c = 0,28$ Вт/(м·К). Діаметр зовнішніх труб теплообмінника за рекомендаціями [1] дорівнює 180 мм. Теплоносій — вода. Сполучення ґрунтового теплообмінника з геліоколекторами здійснюється введенням в розрахункову математичну модель системи рівнянь, що описують умови приходу і перетворення сонячної енергії в ГК [4]. Умови роботи геліосистеми конкретизовані координатами одеського регіону в період, який починався 15 квітня (закінчення опалювального сезону) і закінчувався через 6 місяців. Для дослідження прийняті сучасні плоскі ГК з наведеною характеристикою

$$\frac{U}{(\tau\alpha)} = 4,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}),$$

де U — коефіцієнт втрат теплоти;

$(\tau\alpha)$ — оптична характеристика ГК.

В результаті розв'язання системи рівнянь прийнятої математичної моделі визначаються температурні поля в теплообміннику і ґрунтовому масиві, тепловміст масиву ґрунту, температура і швидкість циркулюючого в геліосистемі теплоносія в розгортці сезонної роботи геліосистеми і доби. Ітераційним розрахунком процесу закачування тепла визначається загальна площа ГК, продуктивність яких відповідає критерію заданої максимальної швидкості теплоносія (2 м/с [1]) в ґрунтових теплообмінниках.

На рисунку 2 наведені дані щодо зміни кількості накопиченої в ґрунті тепла протягом сезонного закачування тривалістю 180 діб. Довжина теплообмінників зондів дорівнює $h_{\text{то}}=10$ м, теплофізичні властивості ґрунту відповідають морфології глини з коефіцієнтом температуропровідності $a=5,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Закачування тепла проводиться у дві фази, одна з яких — денна (активна), коли працюють ГК, а інша — нічна (пасивна), коли залишковий тепловий потенціал теплоносія передається ґрунту в режимі інтенсивного теплообміну при вимушеному русі в рециркуляційному контурі теплообмінників [1]. Активна фаза у всіх розглянутих випадках протікає при безперервній зміні швидкості теплоносія, обумовленій необхідністю підтримки постійної температури теплоносія на вході в теплообмінники зондів при змінній продуктивності ГК. В пасивній фазі швидкість теплоносія залишається незмінною. Отримані дані показують, що вплив на умови проведення пасивної фази шляхом збільшення швидкості теплоносія приводить до зростання кількості накопиченого в ґрунті тепла. Для даного прикладу ця зміна в кінці стадії закачування становить близько 25 %. При цьому помітно, що темп зростання аналізованої функції знижується зі збільшенням швидкості теплоносія.

На рисунку 3 представлені дані щодо впливу швидкості теплоносія в пасивній стадії на максимальну кількість тепла (пікова — $Q_{\text{пик}}$), накопиченої в ґрунті за сезон закачування. Для зондів невеликих розмірів ($h_{\text{то}}=10$ м) вплив швидкості на $Q_{\text{пик}}$ невеликий. Ця обставина має місце для різних ґрунтів. Зі збільшенням довжини зонда вплив швидкості теплоносія зростає (крива 3), і для зонду з $h_{\text{то}}=49$ м, наприклад, в розглянутих межах зміни швидкості досягає 10 %. Темп зміни даної цільової функції для різних швидкостей $w_{\text{пас}}$ відрізняється. З ростом $w_{\text{пас}}$ зміна $Q_{\text{пик}}$ зменшується, асимптотично наближаючись до граничного значення. Можна виділити рубіжні значення швидкості $w_{\text{пас}}=(0,7 \dots 1,0)$ м/с, коли зміна $Q_{\text{пик}}$ стає несуттєвою.

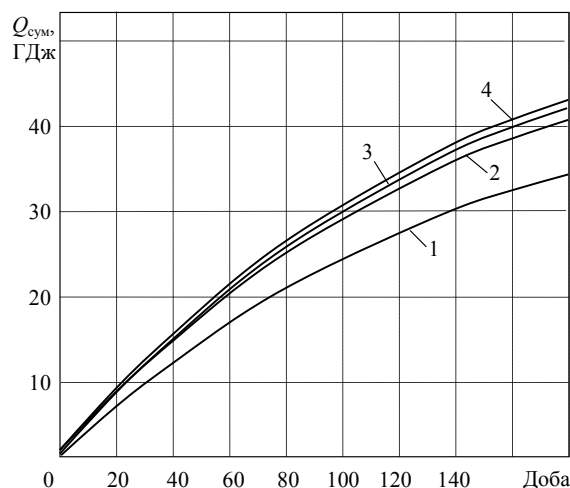


Рис. 2. Залежність кількості накопиченої в ґрунті тепла від режиму роботи теплообмінників в пасивній фазі. Крок розміщення зондів 4 м. Швидкості: змінна в активній фазі, в пасивній: 0,0 м/с (1); 0,2 м/с (2); 0,5 м/с (3); 0,7 м/с (4)

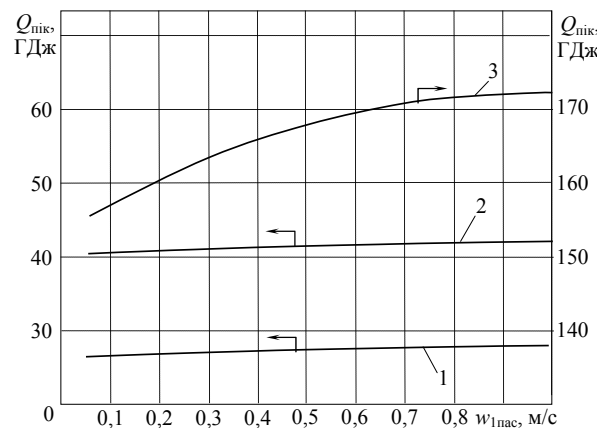


Рис. 3. Залежність максимальної кількості накопиченого в ґрунті тепла за сезон закачування від швидкості теплоносія на вході в теплообмінник в пасивній стадії, довжини зонда і теплофізичних властивостей ґрунту: $h_{\text{то}}=10$ м, $a=2,78 \cdot 10^{-7}$ м²/с (1); $h_{\text{то}}=10$ м, $a=5,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с (2); $h_{\text{то}}=50$ м, $a=5,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с (3)

Для техніко-економічного обґрунтування важливими показниками є розміри активної площі ГК, необхідні для здійснення раціональної роботи системи «приймач сонячної енергії — теплообмінник ґрунтового акумулятора». Показовим для оцінки вибору площі ГК є відношення сумарної площі геліоколекторів до максимального (пікового) значення кількості тепла, накопиченої в ґрунті — $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пik}}$. Назвемо цей показник питомою площею ГК, необхідною для зарядки ґрунтового акумулятора. На рисунку 4 наведені дані щодо впливу швидкості теплоносія в пасивній стадії на показник $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пik}}$. Зі збільшенням швидкості питома площа $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пik}}$ зменшується. При цьому можна виділити ділянку швидкостей, де їх вплив невеликий — вона відповідає величинам $w_{\text{пас}} > (0,7 \dots 0,8)$ м/с, що узгоджується з результатами аналізу, проведеного вище. Така залежність характерна для зондів різної довжини, при різному кроці зондів в кушці і при різній температурі теплоносія на вході в теплообмінники в активній фазі.

Аналіз рисунка 4 показує, що показник $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пik}}$ залежить від кроку розташування зондів у кушці. Найменша питома площа у геліоакуючій системі при великому кроці ($S=6$ м), зі зменшенням кроку $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пik}}$ зростає. Зростає також залежність цього показника від швидкості $w_{\text{пас}}$.

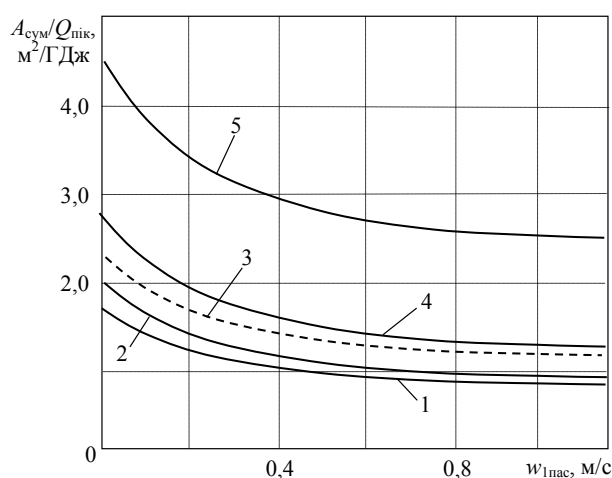


Рис. 4. Залежність відносної (питомої) площі сонячних колекторів від швидкості теплоносія на вході в теплообмінник в пасивній стадії і кроку між зондами: 6 м (1); 4 м (2); 4 м (3); 3 м (4); 2 м (5). Для кривої 3 довжина зонда становить 49 м, для інших — 10 м

Результати. Узагальнення отриманих даних дозволяє виробити рекомендації щодо ведення режиму роботи геліоакуючій системи теплопостачання. Раціональні умови роботи системи включають: у денний час — мінливий закон зміни швидкості теплоносія в ґрунтових теплообмінниках відповідно до теплової продуктивності ГК при обмеженні за максимальним значенням (2 м/с); у нічний час — рециркуляція теплоносія в контурі теплообмінника з подавальної і зворотної труб з постійною швидкістю на вході $w_{\text{пас}}=(0,7 \dots 0,8)$ м/с. Отримані дані відрізняються від рекомендацій для одиночного зонда [1], згідно з якими швидкість в пасивній фазі повинна становити $w_{\text{пас}}=(0,1 \dots 0,2)$ м/с, що вказує на відмінність умов формування температурного градієнта в системі «теплообмінник — ґрунтовий масив».

З отриманих даних випливає, що крок між зондами робить істотний вплив на питомі показники геліосистеми. З ростом кроку показник $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пik}}$ зменшується, однак при цьому знижується температурний потенціал ґрунтового масиву. З урахуванням цих обставин можливий раціональний вибір кроку кушового акумулятора, що потребує подальших досліджень.

Висновки. При кушовому способі організації сезонного акумулятора рециркуляція теплоносія в теплообмінниках в період відсутності сонячної радіації (у пасивній фазі) сприяє підвищенню ефективності закачування тепла в ґрунт. Гранична швидкість теплоносія на вході в теп-

лообмінник в пасивній фазі становить $w_{\text{пас}}=(0,7\dots0,8)$ м/с. Ці умови дозволяють досягти підвищення тепловмісту ґрунту і зменшити відносну площу сонячних колекторів $A_{\text{сум}}/Q_{\text{пик}}$.

Література

1. Высочин, В.В. Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы гелиосистемы / В.В. Высочин, А.Ю. Громовой // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2013. — Вип. 2(41). — С. 148 — 152.
2. Накорчевский, А.И. Оптимальная конструкция грунтовых теплообменников / А.И. Накорчевский, Б.И. Басок // Пром. теплотехника. — 2005. — Т. 27, № 6. — С. 27 — 31.
3. Накорчевский, А.И. Проблемы грунтового аккумулирования теплоты и методы их решения / А.И. Накорчевский, Б.И. Басок, Т.Г. Беляева // Пром. теплотехника. — 2003. — Т. 25, № 3. — С. 42 — 50.
4. Высочин, В.В. Математическая модель гелиосистемы с сезонным аккумулятором тепла / В.В. Высочин // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2011. — Вип. 2(36). — С. 125 — 129.

References

1. Wysochin, V.V. and Gromovoy, A.J. (2013). The role of the ground heat exchanger to leveling irregularity of solar plant system operation. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2, 148-152.
2. Nakorchevsky, A.I. and Basok, B.I. (2005). Optimal design of ground heat exchangers. *Industrial Heat Engineering*, 27(6), 27-31.
3. Nakorchevsky, A.I., Basok, A.I. and Belyaeva, T.G. (2003). Problems of soil heat accumulation and methods of their solution. *Industrial Heat Engineering*, 25(3), 42-50.
4. Wysochin, V.V. (2011). Mathematical model of a solar-plant system with the seasonal heat accumulator. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2, 125-129.

Надійшла до редакції 12 травня 2015 р.