

## Приборы и оборудование

УДК 620.92:662.997:536.24

**Клименко В.В.**, докт. техн. наук, проф., **Кравченко В.І.**, канд. техн. наук, **Личук М.В.**, канд. фіз.-мат. наук, **Солдатенко В.П.**

**Кіровоградський національний технічний університет**

пр. Університетський, 8, 25003 Кіровоград, Україна, e-mail: klymvas@ukr.net

### Грунтовий теплоаккумулятор з покращеними теплотехнічними характеристиками

Проаналізовано результати досліджень щодо впливу на ефективність ґрунтових теплоаккумуляторів теплофізичних характеристик осередку ґрунтового масиву. Визначено, що для різних типів ґрунтів існують максимальні значення вологості, при яких їх теплофізичні властивості оптимальні. Запропоновано конструкцію ґрунтового теплоаккумулятора, в якому забезпечується підтримка оптимальної вологості ґрунтового осередку, відокремленого від природного маловологовмісного ґрунтового масиву водонепроникним екраном з ґрунтоцементних паль. Такий акумулятор дозволить підвищити теплотехнічну ефективність використання добової термічної нерівноваги атмосферного повітря в системах тепло-холодопостачання, при цьому поверхня його теплообмінних елементів буде у 2,5 рази менша у порівнянні з поверхнею, потрібною при їх розміщенні безпосередньо у «сухому» (маловологовмісному) ґрунті. *Бібл. 11, рис. 5.*

**Ключові слова:** теплоаккумулятор, осередок ґрунту, теплообмінні елементи, теплофізичні характеристики, температурне поле, ґрунтоцемент.

Обмеженість запасів природних енергоресурсів в Україні призводить до необхідності пошуку нетрадиційних способів виробництва та збереження теплової енергії. Одним із таких способів є використання систем підземної акумуляції теплоти.

Такі системи переважно застосовують як сезонні для підвищення ефективності систем тепло- та холодопостачання інженерних споруд шляхом накопичення-використання літнього «тепла» та зимового «холоду» [1, 2]. Однак підвищувати ефективність систем тепло- та холодопостачання, що використовують теплові насоси, можливо і шляхом застосування теплоаккумуляторів (ТА), в яких використовується добовий перепад температур [3]. У таких випадках також можливо застосовувати ґрунтові

теплоаккумулятори, але для підвищення їх конкурентоздатності з традиційними ТА вони повинні мати кращі теплотехнічні характеристики, ніж сезонні акумулятори. Це стосується, насамперед, швидкості переносу енергії від чи до споживача та теплозасвоєння ґрунтового масиву, які в свою чергу залежать від його теплофізичних властивостей.

Прийнято вважати, в деякій мірі умовно, що ґрунтовий масив складається з неглибокого верхнього ґрунтового шару (ґрунту) та нижнього — підґрунтя [4]. Значення теплофізичних характеристик ґрунту, які досить добре вивчені [4, 5], є переважно невисокими, що обумовлює низьку конкурентність ТА, теплообмінні елементи (ТЕ) яких розташовані в ґрунтах горизонтально. Крім того, на ефективність роботи

таких акумулюючих систем не прогнозовано впливають зовнішні чинники: зміна стану атмосфери, опади тощо.

Враховуючи це, а також часто високу вартість досить великих площ земельних ділянок, необхідних для розміщення ґрунтових ТА з горизонтальними ТЕ, доцільно використовувати ТА з вертикальним розташуванням ТЕ в ґрунтовому масиві [6]. Довжина ТЕ значно перевищує їх діаметр, тому їх теплообмінна поверхня знаходиться переважно у підґрунті.

На сьогодні значення теплофізичних характеристик підґрунтя через труднощі визначення їх у відносно глибоких шарах вивчені недосконало та в літературі майже відсутні. Основні типи підґрунтя, за класифікацією В.В.Охотіна згідно гранулометричного складу, такі: глина, суглинок, супісок та пісок [4]. При цьому автор за розмірами частинок класифікує підґрунтя так: < 0,005 мм – глина; 0,005–0,25 мм – пил; 0,25–2,0 мм – пісок.

Відомо, що характеристики ґрунтів залежать від їх структурних особливостей, мінерального складу, а також температури, пористості та вологості, які в різних ґрунто-кліматичних зонах відмінні та змінюються на протязі року [2, 5].

Осередок ґрунту, який накопичує теплоту, являє собою складну полідисперсну гетерогенну структуру з густиною  $\rho$ , що складається з трьох фаз (твердої, рідкої та газоподібної), скелет якої утворено великою кількістю твердих частинок різної форми та розмірів. Проміжки між твердими частинками скелету можуть бути заповнені мінералізованою вологою, газом та паром або тим та іншим одночасно. Тобто середовище, яке заповнює порожнини твердого скелету, може знаходитися у різних агрегатних станах, що впливає на теплофізичні характеристики ґрунтового масиву.

В такому складному матеріалі теплопередача може здійснюватися з одночасною дією чотирьох процесів: теплопровідності, конвекції газу або рідини, випромінювання газу та переносу вологи. Однак, вимушена конвекція в ґрунті відсутня, а експериментальні дослідження свідчать, що для виникнення вільної конвекції необхідна наявність в його структурі великих пор та дії значних, неприйнятних для природного стану ґрунту температурних перепадів [5].

Також з'ясовано і незначний вплив випромінювання в ґрунті, оскільки навіть при температурі 50 °С для частинок діаметром 0,1–1 мм приведений коефіцієнт радіаційної теплопровідності у тисячу разів менше загального

коефіцієнта теплопровідності у гранульованих матеріалах [5]. В загальному процесі теплообміну в таких системах можна нехтувати і переносом речовини, оскільки тільки у значно нагрітих або з надлишком зволжених ґрунтах помітний вплив масопереносу. Тому у природних ґрунтах, в яких відсутні високі температури, а вологість помірна, домінуючим способом переносу теплоти є процес теплопровідності. Решта теплових процесів майже не впливають на загальний механізм теплопередачі і ними можна нехтувати.

Це дає змогу стверджувати, що ефективність накопичення енергії в ґрунтових теплоакумуляторах переважно залежить від теплофізичних властивостей ґрунтового масиву: теплоємності  $c$ , теплопровідності  $\lambda$ , теплопровідності  $a$  та коефіцієнта теплозасвоєння  $b = (\lambda c)^{1/2}$ .

Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  осередку ґрунту визначається трьома чинниками: пористістю  $n$ , температурою  $t$  і вологістю  $w$  [2, 5]:

$$\lambda = \varphi(n, w, t).$$

Залежність теплопровідності ґрунту від його пористості суттєва, оскільки теплопровідність твердого скелета ґрунту в сотні разів перевищує теплопровідність повітря, а вплив ґрунту при переході від одного типу до іншого в інтервалі температур 0–50 °С незначно змінює нахил прямої  $\lambda = \varphi(t)$  [2]. Для врахування залежності  $\lambda$  від температури при наближених теплотехнічних розрахунках запропоновано загальну формулу, придатну для багатьох типів ґрунтів [2]:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t),$$

де  $\lambda_0$ ,  $\lambda$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалу при 0 °С та при  $t$  °С;  $\beta$  – коефіцієнт майже однаковий для всіх ґрунтів (на підставі експериментальних даних  $\beta = 0,0025$ ).

На практиці досить ефективно впливати на теплофізичні характеристики ґрунту з наявною структурою можна переважно зволоженням. Залежність відношення коефіцієнта теплопровідності вологого ґрунту до сухого  $\lambda_w/\lambda_c$  та питомої теплоємності ( $c_w/c_c$ ) від вологості при сталій пористості для більшості ґрунтів має зростаючий характер (рис.1) [5]. Наприклад, зміна вологості від 2 до 20 % для супіску збільшує теплопровідність у 5 разів та теплоємність у 1,3 рази, що можна пояснити збільшенням у порах ґрунту вмісту води, яка має високу теплопровідність та теплоємність.

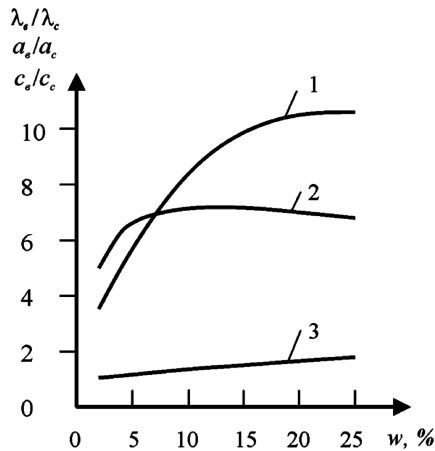


Рис.1. Залежність відношень коефіцієнтів теплопровідності, температуропровідності та теплоємності від вологості для супіску: 1 –  $\lambda_w/\lambda_c$ ; 2 –  $a_w/a_c$ ; 3 –  $c_w/c_c$ .

Наприклад, теплоємність води, яка становить 4,2 кДж/(м<sup>3</sup>·К), у 2,1 рази вище за теплоємність твердої фази ґрунту, теплопровідність води у 25 разів вища, ніж повітря: 0,6 проти 0,024 Вт/(м·К) [4].

Вираз, що відтворює залежність зростання Оскільки

$$\lambda = \lambda_c (d\lambda/dw)w,$$

де  $\lambda$ ,  $\lambda_c$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності ґрунту у вологому та сухому стані;  $d\lambda/dw$  – приріст  $\lambda$  на 1 % вологості.

Для умов реальних ґрунтів спостерігається відхилення від прямолінійності у функції  $\lambda = \varphi(w)$ , тому останній вираз є наближенням, оскільки отриманий на підставі розгляду теплопередачі в ідеалізованій структурі ґрунту. Здійснивши апроксимацію  $\lambda$  для ґрунтів лінійною функцією вологості, отримали вираз у вигляді [2]:

$$\lambda = \lambda_c (1 + w \delta_w/100),$$

де  $\delta_w$  – приріст (у відсотках)  $\lambda$  сухого ґрунту на кожен відсоток об'ємної вологи матеріалу, значення яких різні для окремих класів ґрунтів у залежності від їх структури та властивостей.

Зміна співвідношення коефіцієнтів температуропровідності ( $a_w/a_c$ ) у залежності від вологості має складний характер (рис.2) [5]. Спочатку зі збільшенням вологості показник  $a$  для всіх досліджених ґрунтів зростає лінійно та досягає максимальних значень, які відповідають певному типу ґрунту, та з подальшим зростанням вологості у кожному типі ґрунту відбувається нелінійне зменшення  $a$ , причому момент початку такого зменшення є також

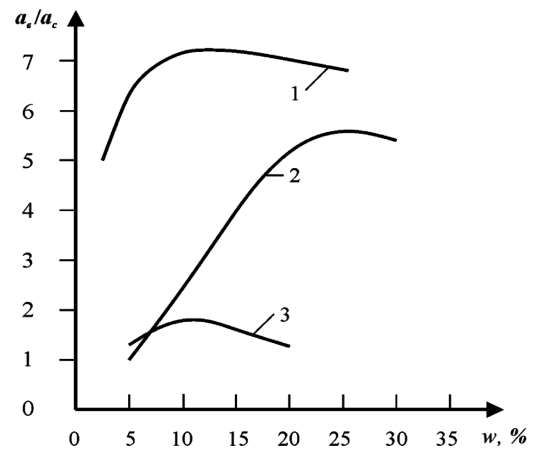


Рис.2. Залежність відношення коефіцієнтів температуропровідності зволоженого та сухого ґрунту від вологості для різних типів ґрунтів: 1 – супісок; 2 – підзолистий ґрунт; 3 – глинистий ґрунт.

різним та характерним для кожного окремого ґрунту. Така тенденція обумовлена тим, що в інтервалі невисокої вологості згідно виразу для коефіцієнта температуропровідності  $a = \lambda/(\rho c)$  домінує зростання теплопровідності над теплоємністю (див. рис.1). Починаючи з деякого значення  $w$ , відбувається спадання цієї переваги та в подальшому спостерігається перевага впливу теплоємності над повільно зростаючою теплопровідністю.

Проведений нами короткий аналіз таких ґрунтів, які можуть використовуватися при експлуатації ґрунтових акумуляторів, показує, що на теплопровідність, температуропровідність та теплоємність ґрунту суттєво впливає зміна вологості, максимумами  $a$  розглянутих ґрунтів знаходяться в достатньо широкому інтервалі вологості (від 10 до 25 %).

Для подальшого аналізу розглянемо нестационарний процес нагрівання осередку ґрунтового масиву гарячим теплоносієм, що рухається у вертикальному циліндричному ТЕ акумулятора (схема процесу зображена на рис.3).

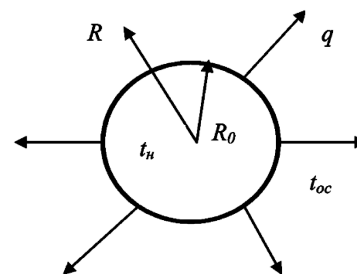


Рис.3. Схема нагрівання осередку ґрунтового масиву теплоносієм.

При математичному описі процесу приймаємо таке:

– у межах розрахункового об'єму неоднорідність та анізотропність осередку ґрунтового масиву незначні та можуть враховуватися відповідним усередненням їх теплофізичних констант, тому масив будемо вважати однорідним та ізотропним;

– початкова температура осередку масиву  $t_{oc}$  постійна, дорівнює температурі ґрунтового масиву поза межами ґрунтового акумулятора  $t_r$  та для будь-якого робочого горизонту в межах об'єму масиву, що підлягає нагріванню, однакова;

– обмежувальною частиною масиву є колова циліндрична зовнішня поверхня резервуару нескінченної довжини;

– коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  від гарячого теплоносія, температура якого  $t_n$ , до внутрішньої стінки циліндричного резервуару приймаємо незмінним у часі, товщину стінки резервуару незначною з високим коефіцієнтом теплопровідності, термічний опір масиву від зовнішньої поверхні стінки – сталою величиною.

Припускаючи також, що нагрівання осередка масиву відбувається при незмінній у часі температурі теплоносія циліндричного ТЕ, математичну модель згаданого вище процесу можна записати у такому вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial t}{\partial R} \right); \quad (1.1)$$

$$t_{oc} = t_r \text{ при } \tau = 0; \quad (1.2)$$

$$t_{oc} \rightarrow t_r \text{ при } R \rightarrow \infty, \tau > 0; \quad (1.3)$$

$$-\lambda(\partial t / \partial R) - \alpha [t_n - t_r] = 0 \text{ при } R = R_0, \quad (1.4)$$

де (1.1) – диференціальне рівняння теплопровідності у циліндричних координатах при  $\partial^2 t / \partial z^2 = 0$ ; (1.2) – закон початкового розподілу температур; (1.3) – умова необмеженості масиву в радіальному напрямку; (1.4) – закон теплообміну поверхні стінки масиву з теплоносієм ТЕ при  $t_n = \text{const}$  з урахуванням незначної товщини стінки та високим коефіцієнтом її теплопровідності.

Якщо температурне поле в масиві вважати одномірним, то рівняння теплопровідності спроститься до виду:

$$\partial \vartheta / \partial \tau = a (\partial^2 \vartheta / \partial x^2), \quad (1.5)$$

де  $\vartheta$  – різниця температур, °С;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $x$  – координата, м;  $\tau$  – час, с.

Розглядаючи осередок ґрунту як напівнескінченне тіло при інтегруванні рівняння тепло-

провідності (1.5), одержимо для розподілу температури вираз [7]:

$$\vartheta / \vartheta_0 = \text{erfz},$$

де  $\text{erfz}$  – інтеграл похибок Гауса [2, 7],  $\text{erfz} = 2 \pi^{-1/2} \int_0^z \exp(-\beta^2) d\beta$ ;  $z$  – відносна координата.

Оскільки

$$z = x / [2(a \tau)^{1/2}],$$

то з останнього виразу можна знайти час, за який на певній відстані від резервуару шар ґрунту прогріється до певної температури.

Як приклад розглянемо прогрівання підзолістого ґрунтового осередку при різних значеннях його вологості, а отже й при різних його теплофізичних характеристиках. Прийнемо, що в початковий момент часу температура ґрунту стала та дорівнює  $t_r = 8$  °С, температура стінки ТЕ, починаючи з моменту часу  $\tau = 0$  та під час усього процесу, дорівнює  $t_c = 30$  °С.

Залежність зміни температури підзолістого ґрунту від часу при різних відстанях від зовнішньої стінки ТЕ акумулятора приведено на рис.4. Характер цих кривих показує, що у ґрунті з невисокою вологістю 10–15 %, отже й з низькими значеннями  $a$ , для досягнення заданих значень температур необхідно значно більше часу, ніж для ґрунту з вологістю 25 %, при якій  $a$  має максимальне значення (див. рис.2).

Густина теплового потоку з поверхні ТЕ для даних умов можна визначити за виразом [7]:

$$q = -(\lambda c)^{1/2} (t_c \pm t_r) (\pi \tau)^{-1/2}.$$

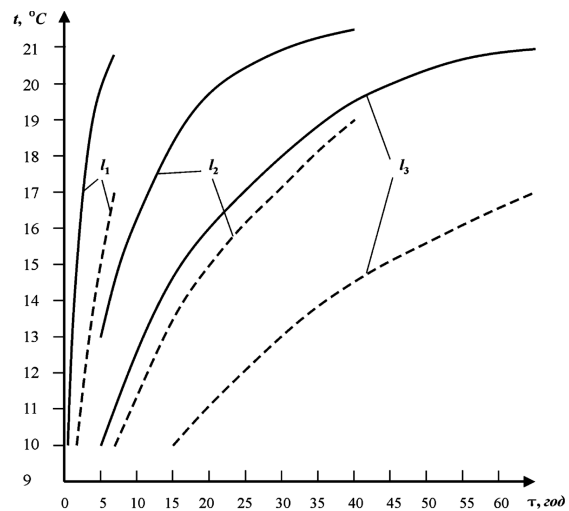


Рис.4. Залежність зміни температури підзолістого ґрунту від часу при різних відстанях від зовнішньої стінки ТЕ акумулятора  $l$  ( $l_1 = 0,1$  м;  $l_2 = 0,2$  м;  $l_3 = 0,3$  м) та різних  $w, \%$ : штрихова – 10; суцільна – 25.

З цього виразу випливає, що в перші моменти часу швидкість теплообміну найвища та потім поступово зменшується. Причому ця швидкість також зростає з підвищенням теплофізичних характеристик ґрунту, які об'єднані в коефіцієнт акумуляції теплоти, що визначається як  $\varepsilon = (\lambda c \rho)^{1/2}$ .

Забезпечення підвищеного теплосасвоєння осередком ґрунтового масиву та збільшення швидкості передачі теплоти до чи від споживача може бути здійснено в запропонованій конструкції ґрунтового теплоакумулятора, схема якого наведена на рис.5 [8].

Теплоакумулятор складається з циліндричних герметичних резервуарів (теплообмінних елементів) 1 з рідким теплоносієм 2, розподільними камерами 3, 4 та перегородками 5, розміщеними у свердловинах 6, що виконані в осередку ґрунтового масиву 7, гідроізолюваного по периметру від навколишнього природного ґрунту 8 вертикальними ґрунтоцементними палями 9 до рівня водонепроникного шару, вкритого зверху гідроізолюваним матеріалом 10, наприклад, горизонтальним шаром ґрунтоцементу, а також циркуляційного насоса 11.

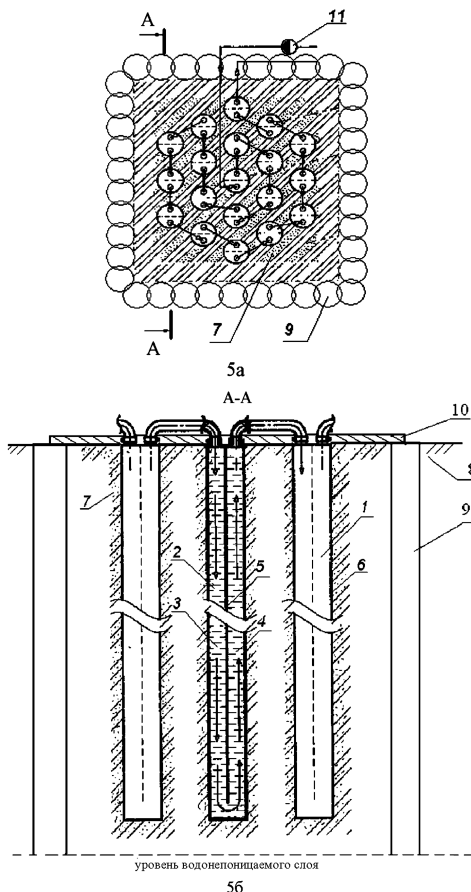


Рис.5. Схема ґрунтового теплоакумулятора.

Накопичення теплової енергії в такому акумуляторі здійснюється таким чином. За допомогою циркуляційного насоса 11 рідкий теплоносієм 2 рухається по замкнутому контуру акумулятора, послідовно проходячи через циліндричні герметичні резервуари 1 (рух рідкого теплоносія показано на рис.5,а стрілками). У середині герметичного резервуара 1 рідкий теплоносієм 2 рухається вниз по камері 3, обгинає поздовжньо-поперечну перегородку 5 та піднімається нагору по камері 4 до наступного резервуара (рух рідкого теплоносія 2 всередині резервуара 1 показаний стрілками на рис.5,б). Завдяки покращеним теплофізичним характеристикам зволоженого осередку масиву 7 акумулятора відбувається більш інтенсивна передача теплоти від рідкого теплоносія 2 через зовнішні поверхні резервуарів 1 до осередку ґрунту 7 навколо свердловин 6 з накопиченням теплової енергії переважно центральною частиною осередку ґрунту.

Гідроізоляція осередку ґрунту 7 від природного 8 здійснюється із ґрунтоцементних елементів 9, виготовлених за бурозмішувальною технологією без виймання ґрунту [9]. Ґрунтоцемент — це суміш ґрунту, цементу та води, яка з часом тужавіє та утворює водонепроникне кам'яновидне тіло — палю.

Бурозмішувальний метод виготовлення ґрунтоцементу полягає у тому, що за допомогою спеціального обладнання виконують розпушування ґрунту безпосередньо у масиві без його виймання. Одночасно у розпушений ґрунт нагнітається цементна суспензія, виконується перемішування й ущільнення ґрунтоцементної суміші. Внаслідок цього у ґрунті утворюється циліндричний ґрунтоцементний елемент (палю) діаметром 0,3–0,8 м та довжиною до 30 м.

Облаштування ґрунтового теплоакумулятора з покращеними теплофізичними властивостями здійснюється таким чином. По периметру запланованої площі ґрунтового теплоакумулятора в природному ґрунті 8 пробурюються свердловини заданої глибини до рівня водонепроникного ґрунту та наповнюються ґрунтоцементом. Після його тужавіння утворюються ґрунтоцементні палі 9, які являють собою захисний водонепроникний екран від природного малозволоженого ґрунту 8. Свердловини пробурюються, налягаючи одна на одну, за бурозмішувальною технологією без виймання ґрунту. Потім у створеному осередку ґрунту 7, обмеженому ґрунтоцементними палями 9 виконуються свердловини 6, в які встановлюють циліндричні резервуари (теплообмінні елементи) 1. Шляхом насичення осередку ґрунту 7 водою досягається стан його оптимальної консистенції з покраще-



ними теплофізичними властивостями. Для запобігання зміни теплофізичних властивостей зволоженого ґрунту 7 через відкриту верхню поверхню його вкривають шаром з ґрунтоцементу 10. Розміри ґрунтового теплоакумулятора теплоти, його об'єм, профіль та глибина визначаються на стадії робочого проектування стосовно конкретної кількості теплової енергії, яку необхідно акумулювати з урахуванням забезпечення необхідної динаміки режимів зарядки-розрядки.

Розрахувати тепловий потік від чи до такого типу ТЕ ґрунтового акумулятора можна за формулою [10, 11]:

$$Q = U_a (t_n - t_r),$$

де  $U_a$  — здатність до акумулювання теплоакумулятора, що залежить від сумарної довжини ТЕ та теплового опору ґрунтового масиву;  $t_n$  — середня температура теплоносія у теплообміннику;  $t_r$  — середня температура масиву.

Величина  $U_a$  визначається за виразом

$$U_a = (n H) / R_r,$$

де  $n$  — кількість циліндричних резервуарів (ТЕ) ґрунтового теплообмінника;  $H$  — глибина занурення ТЕ;  $R_r$  — тепловий опір ґрунтового масиву, що розраховується для кола навколо кожного ТЕ.

Для квадратичного або гексагонального їх розташування він описується виразом [11]:

$$R_r = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{A_p}}{r\sqrt{\pi}} \right) - 0,75 \right] + R_c, \text{ при } \frac{\sqrt{A_p}}{r\sqrt{\pi}} \geq 15,$$

де  $A_p$  — площа перерізу осередку ґрунту навколо кожного теплообмінного елемента кожної свердловини;  $r$  — радіус буріння свердловини під циліндричний ТЕ;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності ґрунтового масиву;  $R_c$  — ефективний тепловий опір самої свердловини.

Розрахунки, виконані згідно робіт [2–5, 7, 10, 11], показали, що в порівняних умовах поверхня теплообмінних елементів ґрунтового акумулятора з осередком ґрунту оптимальної вологості буде приблизно у 2,5 рази менше поверхні, потрібної при їх розміщенні безпосередньо у «сухому» (маловологовмістному) ґрунті.

### Висновки

Обґрунтовано застосування ґрунтового теплоакумулятора в добовому циклі зарядки-розрядки з використанням термічної нерівноваги атмосферного повітря. Енергоефективність таких теплоакумуляторів може бути забезпечена

на при покращених теплофізичних властивостях осередку ґрунтового масиву, які для різних типів ґрунтів залежать в основному від ступеню вологості.

Встановлено, що залежність коефіцієнта температуропровідності від вологості для різних типів ґрунтів має параболічний характер з максимумом при вологості 10–12 % для глинистих ґрунтів та сушіску та при близько 25 % для підзолистого ґрунту. Для визначення впливу вологості на теплофізичні властивості різних типів підґрунтя осередку ґрунтового масиву необхідні додаткові дослідження, зокрема, експериментальні.

Запропоновано конструкцію ґрунтового теплоакумулятора, яка дозволяє підтримувати оптимальну вологість ґрунтового осередку, відокремленого від природного маловологовмісного ґрунтового масиву водонепроникним екраном з ґрунтоцементних паль. Такий акумулятор дозволить підвищити теплотехнічну ефективність використання добової термічної нерівноваги атмосферного повітря в системах теплохолодопостачання, при цьому поверхня його теплообмінних елементів буде приблизно у 2,5 рази менше у порівнянні з поверхнею, потрібною при їх розміщенні безпосередньо у «сухому» (маловологовмістному) природному ґрунті.

### Список літератури

1. Sanner В. Oberflaechennahe Geothermie-Waerme- und Kaelteversorgung aus dem Untergrund // BBR : Brunnenbau, Bau Wasserwerk, Rohrleitungsbau. — 1998. — № 10. — Р. 34–40.
2. Забарний Г.М., Кудря С.О., Маслокова З.В., Примак А.І. Сезонне акумулювання теплоти в підземних акумуляторах. — Київ : ВІОЛ-ПРИНТ, 2009. — 278 с.
3. Клименко В.В., Корниенко В.Н. Рациональное использование термической неравновесности наружного воздуха // Холодильная техника. — 1989. — № 6. — С. 25–30.
4. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. — М. : Агропромиздат, 1986. — 416 с.
5. Чудновский А.Ф. Теплообмен в дисперсных средах. — М. : Недра, 1976. — 349 с.
6. Пат. 33302 Укр., МПК F 24 J 3/08. Геотермальный акумулятор теплоти / Ю.П.Морозов, В.Г.Олійніченко, А.О.Александров, В.В.Величко. — Оубл. 10.06.08, Бюл. № 11.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М. : Высш. шк., 1967. — 599 с.
8. Пат. 97104 Укр., МПК F 24 J 3/08. Ґрунтовий теплоакумулятор / В.В.Клименко, В.І.Кравченко, М.Л.Зоценко, В.П.Солдатенко, М.В.Кубкін. — Оубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

9. Зоценко М.Л., Великодний Ю.Й., Клименко В.В. Грунтоцементні протифільтраційні завіси для гідротехнічних споруд // Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф. «Проблеми розвитку дорожньо-транспортного і будівельного комплексів» (Кіровоград, 3–5 жовт. 2013 р.). — Кіровоград : Кіровоград. нац. техн. ун-т, 2013. — С. 305–308.
10. Федоров П.О., Федорова А.П. Технико-экономические характеристики системы теплоснабжения на базе возобновляемых источников энергии в реалиях приднепровского региона // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2013. — № 7. — С. 29–36.
11. Daniel Pahud. The design of a borehole thermal energy storage requires dynamic system simulation, especially for a system without heat pump // SUPSI-DCT-LEE Laboratoria di Energia, Ecologia ed Economia, 12/05/2002. — P. 66–81.

Надійшла до редакції 12.01.15

**Клименко В.В.,** докт. техн. наук, проф., **Кравченко В.И.,** канд. техн. наук, **Личук М.В.,** канд. физ.-мат. наук, **Солдатенко В.П.**  
**Кировоградский национальный технический университет**  
 пр. Университетский, 8, 25003 Кировоград, Украина, e-mail: klymvas@ukr.net

## Грунтовой теплоаккумулятор с улучшенными теплотехническими характеристиками

Проанализированы результаты исследований относительно влияния на эффективность грунтовых теплоаккумуляторов теплофизических характеристик грунтового массива. Определено, что для разных типов грунтов существуют максимальные значения влажности, при которых их теплофизические свойства оптимальны. Предложена конструкция грунтового теплоаккумулятора, в котором обеспечивается поддержка оптимальной влажности части грунта, отделенного от естественного грунтового массива с малым влагосодержанием водонепроницаемым экраном из грунтоцементных свай. Такой аккумулятор позволит повысить теплотехническую эффективность использования суточной термической неравновесности атмосферного воздуха в системах тепло- и хладоснабжения, и при этом поверхность его теплообменных элементов будет (в 2,5 раза меньше в сравнении с поверхностью, необходимой при их размещении непосредственно в «сухом» (с малым влагосодержанием) грунте. *Библ. 11, рис. 5.*

**Ключові слова:** теплоаккумулятор, массив грунта, теплообменные элементы, теплофизические характеристики, температурное поле, грунтоцемент.

**Klymenko V.V.,** Doctor of Technical Sciences, Professor,  
**Kravchenko V.I.,** Candidate of Technical Sciences, **Lychuk M.V.,**  
 Candidate of Physical and Mathematical Sciences, **Soldatenko V.P.**  
**Kirovograd National Technical University**  
 8, University ave., 25003 Kirovograd, Ukraine, e-mail: klymvas@ukr.net

## Ground Heat Accumulator with Improved Thermal Characteristics

The research results regarding to the influence on the efficiency of ground heat accumulators of thermophysical characteristics of the soil mass center are analyzed. It is determined that for the different types of soils there are existed maximum values of humidity at which their thermophysical properties are the optimal. The construction of ground heat accumulator, which provides support of optimal humidity of soil parts, separated from natural soil mass center with small moisture content by waterproof screen from ground-cement piles is proposed. The accumulator will increase the use of thermal efficiency of daily atmospheric air thermal disequilibrium in the systems of heat and cold supply, at the same time the surface of the heat exchange elements will be 2,5 times smaller in comparison with the required surface when the elements are placed directly in «dry» (low water content) soil. *Bibl.11, Fig. 5.*

**Key words:** heat accumulator, soil mass center, heat exchange elements, thermal characteristics, temperature field, ground cement.

## References

1. Sanner B. Oberflaechennahe Geothermie – Waerme- und Kaelteversorgung aus dem Untergrund, *BBR : Brunnenbau, Bau Wasserwerk, Rohrleitugsbau*, 1998 (10), pp. 34–40. (De)
2. Zabarnij G.M., Kudrja S.O., Masljukova Z.V., Primak A.I. Sezone akumuljuvannja teploti v pidzemnih akumuljatorah. Kiev : VIOL-PRINT, 2009, 278 p. (Ukr.)
3. Klymenko V.V., Kornienko V.N. Racional'noe ispol'zovanie termicheskoj neravnovesnosti naruzhnogo vozduha, *Holodil'naja tehnika*, 1989 (6), pp. 25–30. (Rus.)
4. Vadjunina A.F., Korchagina Z.A. Metody issledovanija fizicheskikh svojstv pochv, Moscow : Agropromizdat, 1986, 416 p. (Rus.)
5. Chudnovskij A.F. Teploobmen v dispersnyh sredah, Moscow : Nedra, 1976, 349 p. (Rus.)
6. Pat. 33302 Ukraini., IPC F 24 J 3/08. Geothermal'nij akumuljator teploti / Yu.P.Morozov, V.G.Olijnichenko, A.O.Aleksandrov, V.V. Velichko. — Publ. 10.06.2008, Bul. № 11. (Ukr.)
7. Lykov A.V. Teorija teploprovodnosti, Moscow : Vyshaja hkola, 1967, 599 p. (Rus.)
8. Pat. UA 97104 U, IPC F 24 J 3/08. Gruntovij teploakumuljator / V.V. Klymenko, V.I.Kravchenko, M.L.Zocenko, V.P.Soldatenko, M.V.Kubkin. — Publ. 25.02.2015, Bul. № 4. (Ukr.)
9. Zocenko M.L., Velikodnij Yu.J., Klymenko V.V. Gruntocementni protyfil'tracijni zavisj dlja gidrotehnicnih sporud, *Materiali Mizhnarodnoj naukovopraktichnoj konferencij «Problemi rozvitku dorozhn'o-transportnogo budivel'nogo kompleksiv»* (Kirovograd, 3–5 zhovtnja 2013). Kirovograd : Kirovograd National Technical University, 2013, pp. 305–308. (Ukr.)
10. Fedorov P.O., Fedorova A.P. Tehniko-ekonomicheskie charakteristiki sistemy teplosnabzhenija na baze vozobnovljaemyh istochnikov jenergii v realijah pridneprovskogo regiona, *Jenergosberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit*, 2013 (7), pp. 29–36.
11. Daniel Pahud. The design of a borehole thermal energy storage requires dynamic system simulation, especially for a system without heat pump, *SUPSI-DCT-LEE Laboratoria di Energia, Ecologia ed Economia*, 12/05/2002, pp. 66–81.

Received January 12, 2015

УДК 66.096.5

**Семейко К.В.**, канд. техн. наук**Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: k\_simeyko@ukr.net

## Использование электротермического псевдоожигенного слоя в качестве внешнего нагревательного элемента реактора

Перспективными устройствами для проведения высокотемпературных процессов являются реакторы с электротермическим псевдоожигенным слоем. Одним из таких реакторов является разработанный в Институте газа НАН Украины лабораторный реактор, где в качестве внешнего нагревательного элемента используется кольцевой электротермический псевдоожигенный слой. В данном реакторе проводился пиролиз смеси углеводородных газов на основе пропана с целью получения капсулированного пироуглеродом кварцевого песка, который используется как модель микросферического ядерного топлива (микротвэла). Также полученный материал планируется использовать для дальнейшего карботермического восстановления кремния. Приведены схема реактора и принцип работы, принципиальная технологическая схема, результаты проведенных опытов, расчеты тепловых характеристик, основные расходные показатели реактора. Дана оценка эффективности реактора при осуществлении пиролиза смеси углеводородных газов на основе пропана. Разработанный реактор возможно использовать для термической обработки материалов, которые не проводят электрический ток (диэлектриков). *Библ. 10, рис. 5, табл. 1.*

**Ключевые слова:** электротермический псевдоожигенный слой, высокотемпературная обработка, пиролиз, пироуглерод, пропан.