

ТЕПЛООБМІН, ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, ГАЗОПОСТАЧАННЯ, ВОДОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.577

А.О. Редько, *д-р техн. наук,*

Д.Х. Харлампіді, *канд. техн. наук,*

В.А. Тарасова, *канд. техн. наук.*

Харківський національний університет будівництва і архітектури
Інститут проблем машинобудування ім. А.І.Подгорного НАН України

ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З ГОРІЗОНТАЛЬНИМ ГРУНТОВИМ ТЕПЛООБМІННИКОМ

З досвіду експлуатації геотермальних ТНУ відомо, що режим постійної витрати холодоносія через ГТ сприяє підвищенню коефіцієнта перетворення ТНУ, однак при цьому температура холодоносія на вході в ГТ t_{c2} буде змінюватися в залежності від зміни теплової потужності ТНУ протягом опалювального періоду. З цього випливає висновок, що при проектуванні геотермальних ТНУ з постійною витратою холодоносія через ГТ не можна довільно задаватися величиною t_{c2} . Вона повинна бути отримана на основі спільного розрахунку ГТ і ТНУ для кожного місяця опалювального періоду. Для цього необхідне рішення двох взаємозалежних завдань. Першим завданням, є розрахунок нестационарного температурного поля ґрунтового масиву. Другим завданням, є визначення раціональних термодинамічних режимів роботи ТНУ з урахуванням теплового стану ґрунту і характеру теплоспоживання об'єкта протягом опалювального періоду.

Формування теплового режиму приповерхневого ґрунту, відбувається під впливом сонячної радіації, температури зовнішнього повітря та атмосферних опадів. Динаміка зміни температури ґрунту на різних глибинах, а відповідно і змінний тепловий режим системи тепловідбору з масиву ґрунту впливає на зміну режимів роботи ТНУ та системи опалення. Крім того, має місце і зворотна ситуація, коли зміна режимів теплоспоживання об'єкта, викликає зміну режимів роботи ТНУ, що в свою чергу впливає на характеристики системи та на температурне поле біля ґрунтового теплообмінника (ГТ). Тому, при проектуванні геотермальних ТНУ необхідний комплексний підхід, з урахуванням взаємовпливу параметрів основних підсистем.

У міжопалювальний період, коли ГТ не експлуатується, ґрунт повинен прогріватися, теоретично, до його початкової температури.

Однак часто цього не відбувається, і до початку наступного опалювального періоду ґрунт має знижний температурний потенціал. Неправильний вибір температурних режимів ТНУ і висока інтенсивність її експлуатації, особливо в початковий період, може призвести до швидкого виснаження енергетичного потенціалу ґрунту. Питання стійкості температурного поля ґрунту до періодичного впливу процесів знімання і підведення теплоти, є одним з важливих при проектуванні об'єктів з ТНУ. Під стійкістю, в даному випадку, слід розуміти здатність ґрунтового масиву відновлювати свою температуру, що відповідає його непомітженому стану. Аналіз цього процесу, дозволить визначити характер і тривалість періоду релаксації ґрунту.

Зміна температурного поля ґрунту знаходиться шляхом розв'язання крайової задачі теплопровідності

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (1)$$

де t – температура ґрунту, $^{\circ}\text{C}$; ∇ – час, с; a – температуропровідність ґрунту, $\text{м}^2/\text{с}$,

Теплоємність сухого ґрунту дорівнює $c_{\text{ср}} = 0,71 \cdot 0,92 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$. При цьому більше значення теплоємності характерно для вологих ґрунтів. Теплоємність вологого ґрунту дорівнює

$$c = (1-P) c_{\text{ср}} + P \cdot s c_{\text{в}} + P \cdot (1-s) c_{\text{пор}}$$

де $c_{\text{в}}$ – теплоємність води; P – пористість ґрунту (0,2...0,5); s – об'ємна частка фази, яка визначається відношенням

$$s = \frac{V_{\text{р}}}{V_{\text{пор}}},$$

де $V_{\text{р}}$ – об'єм рідкої фази, м^3 ; $V_{\text{пор}}$ – об'єм пор, рівний $V_{\text{пор}} = PV$,
 V – об'єм ґрунту, м^3 .

При $P=0,3$, $s=1$, теплоємність ґрунту дорівнюватиме

$$c = (1-0,30) \cdot 0,92 + 0,30 \cdot 4,19 = 1,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C});$$

За [1] щільність вологого ґрунту визначається як:

$$\rho = (1-P) \rho_{\text{ср}} + P s \rho_{\text{в}} + P(1-s) \rho_{\text{пор}}$$

В нашій роботі прийняті середні значення щільності частинок чорнозему і визначена щільність вологого ґрунту $\rho = 2050 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Теплопровідність вологого ґрунту визначається аналогічно теплоємності. Для більшості мінералів, що становлять тверду фазу ґрунту, $\lambda_{\text{ср}} = 0,84 \pm 2,52 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$, води $\lambda_{\text{в}} = 0,59 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$, повітря $\lambda_{\text{пор}} = 0,021 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Величина λ ґрунту різко зростає із збільшенням його вологості і істотно залежить від щільності і пористості [2].

На рис. 1 наведена залежність коефіцієнта a від пористості ґрунту та його вологості.

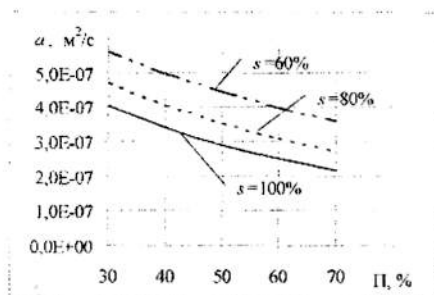


Рис. 1. Вплив вологості і пористості ґрунту на його температуропровідність

На рис. 2 представлена схема експериментальної ділянки масиву ґрунту з поліетиленовим трубопроводом (зовнішній діаметр $d_2=0,040$ м, внутрішній діаметр $d_1=0,035$ м), прокладеним на глибині $h=1,5$ м, в якості ґрунтового теплообмінника. Всередині трубчастого ГТ змієвикового теплообмінника, прокачується холодоносій, (30% розчин етиленгліколю), із швидкістю $W=1$ м/с.

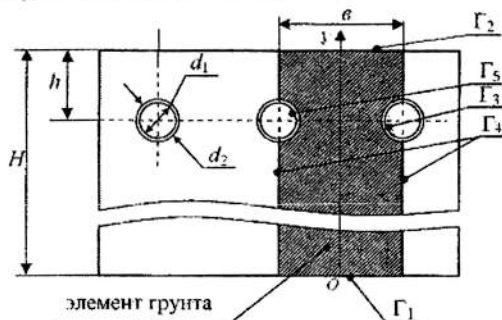


Рис. 2. Схема масиву ґрунту з прокладеним теплообмінником.

При формуванні математичної моделі був обраний елемент ґрунту шириною $e=1$ м і глибиною $H=10$ м.

В експерименті були прийняті наступні граничні умови:

1. На границі Γ_1 задано умову першого роду $t=\text{const}$. Згідноно [1] існує так званий нейтральний шар, для якого температура на глибині від 10 до 20 м залишається незмінною протягом року і дорівнює, як правило, середньорічній температурі зовнішнього повітря;
2. На границі Γ_2 враховані сезонні коливання температури зовнішнього повітря та задана умова третього роду

$$\alpha(t - t_c) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ґрунту до зовнішнього повітря, Вт/(м² °С); t – температура ґрунту, °С; t_c – середньомісячна температура зовнішнього повітря,

3. На границях Γ_3 і Γ_5 задана умова третього роду

$$\alpha_{\text{тр}}(t - t_s) = -\lambda_{\text{тр}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (3)$$

де $\alpha_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки труби до холодоносія (розсолу), Вт/(м² °С); t_s – температура розсолу, °С;

$\lambda_{\text{тр}}$ – коефіцієнт теплопровідності труби, Вт/(м² °С);

4. На границі $\Gamma_4 - \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} = 0$.

У першому наближенні значення α приймалося рівним 5 Вт/(м² °С). Далі, в результаті розв'язання нестационарної задачі теплопровідності отримано розподіл температури на поверхні ґрунту протягом року. Після цього, виконано уточнений розрахунок коефіцієнта тепловіддачі з урахуванням отриманих різниць між температурами навколишнього середовища і поверхнею ґрунту для кожного місяця (рис. 3).

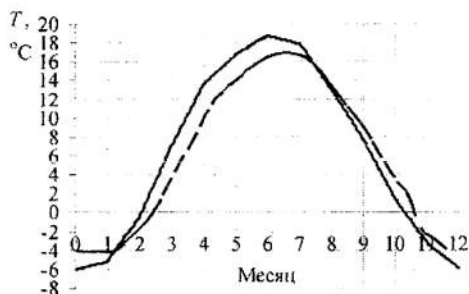


Рис. 3. Розподіл температури зовнішнього повітря (лінія 1) і температури на поверхні ґрунту (лінія 2)

Середньомісячні коефіцієнти тепловіддачі від ґрунту до зовнішнього повітря $\alpha=f(t)$ визначались з використанням відомих критеріальних співвідношень для вільної конвекції [3].

На рис. 4 представлені залежності розподілу температури ґрунту протягом року по глибині, отримані чисельним методом (суцільна лінія) і з використанням емпіричної формули (пунктирна лінія), наведеної у роботі [2]. Як видно, має місце достатньо точний збіг результатів, не зважаючи на те, що при заданні граничних умов на Γ_2 не враховувався вплив покриву ґрунту (сніг, рослинність і т.д.) і ряду інших чинників.

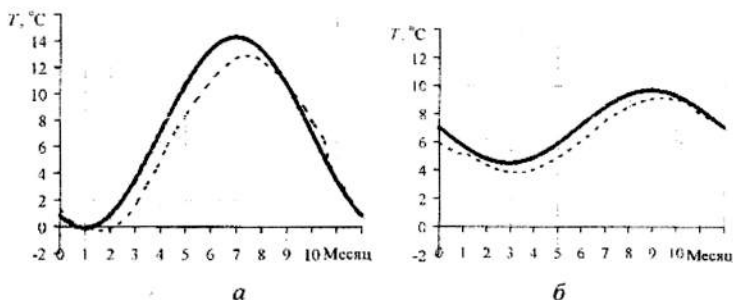


Рис. 4. І графіки коливань температури ґрунту протягом року, отримані чисельним і середньостатистичним методами:
а - на глибині 1 м; б - на глибині 3 м

Необхідна довжина трубопроводу ГТ розраховується за такою методикою:

1. Для завдання граничних умов III роду на внутрішній поверхні труби (границя Г₃, рис.2), визначається коефіцієнт тепловіддачі від холодоносія на ділянці ΔL_n . Теплофізичні властивості холодоносія відповідають середній температурі t_s^{cp}

У першому наближенні можна вважати, що температура на вході в ГТ t_{s2} рівна температурі t_{s1} , таким чином $t_s^{cp} = t_{s2}$.

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від внутрішньої поверхні ГТ до розсолу використовують відомі критеріальні рівняння для вимушеної течії рідини в трубах. Якщо температури холодоносія на вході в ГТ протягом року змінюються, то для кожного місяця будуть різні значення коефіцієнта тепловіддачі на ділянці ΔL_n .

Для знаходження теплового потоку з ґрунту визначається осереднение значення температур стінки t_{cm}^{cp} внутрішньої поверхні труби. Значення t_s^{cp} також усереднюється по кожному місяцю опалювального періоду.

Тепловий потік, що відводиться холодоносієм, визначався за формулою

$$Q_{\Delta L} = \alpha_{cm} (t_{cm}^{cp} - t_s^{cp}) \pi d_1 \Delta L, \text{ Вт}$$

де d_1 – внутрішній діаметр труби.

2. З рівняння теплового балансу визначається температура t_{s1}^A на виході з ділянки ΔL для кожного місяця

$$Q_{\Delta L_n} = \alpha_{cm} (t_{cm}^{cp} - t_s^{cp}) \pi d_1 \Delta L_n = \frac{\rho W \pi d_1^2}{4} c_p (t_{s1}^A - t_{s2}^A).$$

$$t_{s1}^A = t_{s2}^A + \frac{4Q_{\Delta L_n}}{\rho W \pi d_1^2 c_p} \quad (4)$$

3. Розрахунок повторюється з п. 1. і визначається уточнене значення $\alpha_{\text{гт}}$.
4. Далі розрахунок повторюється для наступної ділянки труби Δl_n . Повна довжина трубопроводу ГТ дорівнює сумі ділянок

$$l = \sum_{n=1}^i \Delta l_n.$$

Подача холодоносія в ГТ від ТНУ можлива за наступними режимами.

Перший режим. ТНУ працює тільки в зимовий період. Протягом усього опалювального періоду температура холодоносія на вході в ГТ приймається постійною, рівною, наприклад, $t_{\text{с2}} = -3^\circ\text{C}$. Слід зазначити, що даний режим недоцільний з точки зору забезпечення ефективної експлуатації ТНУ. Оскільки підтримання постійної $t_{\text{с2}}$ при зниженні теплопродуктивності ТНУ в холодні місяці опалювального періоду пов'язане з пониженням температури випаровування, а відповідно і зменшенням μ . Однак такий прийом дозволяє провести якісний аналіз теплового стану ґрунту для кожного місяця опалювального періоду;

Другий режим. ТНУ експлуатується в опалювальний період, забезпечуючи постійну температуру холодоносія на вході в ГТ ($t_{\text{с2}} = -3^\circ\text{C}$), а також у міжопалювальний період, покриваючи навантаження з кондиціонування об'єкта ($t_{\text{с2}} = 21^\circ\text{C}$);

Третій режим. ТНУ працює в період з жовтня по березень температура холодоносія змінюється відповідно $t_{\text{с2}} = -1, -2, -3, -4, -5^\circ\text{C}$, а в літній - з постійною температурою подачі розсолу в ГТ $t_{\text{с2}} = 21^\circ\text{C}$. На рис. 5. для трьох режимів наведено питому кількість тепла одержаного з ґрунту по місяцях. У даному випадку не розглядається процес інтерференції, вважається, що в ґрунті закладена одна пряма труба і на границі $l'_{\text{с}}$

задається умова $\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_{n=0} = 0$.

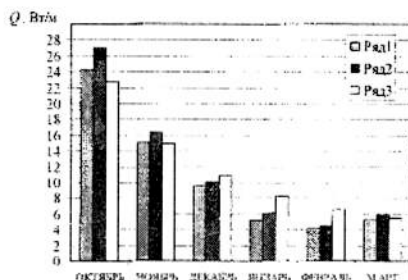


Рис. 5. Тепловий потік (Вт/м) при роботі ТНУ.

Як видно з рис. 5, найбільша кількість тепла з ґрунту одержується в режимі 2. Подача холодоносія в ГТ з температурою $t_{\text{с2}} = -3^\circ\text{C}$ в жовтні не раціональна за умовами експлуатації ТНУ. Кращим представляється

режим 3, при якому знімання тепла протягом опалювального сезону вище, ніж в інших режимах. Тому в першому наближенні він і може бути обраний як розрахунковий.

Розроблена модель дозволяє вирішувати одне з важливих питань при проектуванні ГТ - вибір найбільш раціональної глибини його закладання.

На рис. 6 наведено результати розрахунку питомого тепловідбору по довжині ГТ, розміщеного на глибині 1,5 м і 1 м. Режим роботи ТНУ встановлений при постійній температурі на вході в ГТ $t_{s2} = -3^{\circ}\text{C}$.

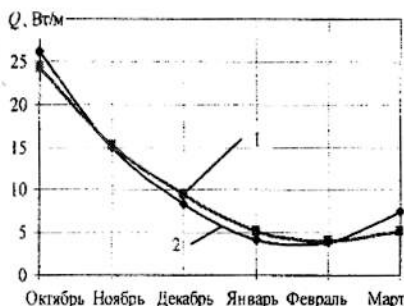


Рис. 6. Тепловідбір Q з одного метра трубопроводу ГТ при режимі роботи ТНУ ($T = -3^{\circ}\text{C}$)

1 - ГТ на глибині 1,5 м, 2 - ГТ на глибині 1 м

Як видно з рис. 6 питома кількість тепла, відібраного з одиниці довжини, при закладенні ГТ на 1,0 м більша на початку і в кінці опалювального періоду, оскільки в даному випадку ступінь впливу граничних умов на поверхні ґрунту більш істотна. Однак, в період максимального теплоспоживання об'єкта (з листопада по лютий) питомий тепловідбір вищий на глибині 1,5. При виборі глибини закладання ГТ цей фактор є визначальним. В залежності від того, в якій системі опалення експлуатується ТНУ, вибирається режим роботи ГТ, адже теплова потужність випаровувача змінюється із зміною навантаження конденсатора.

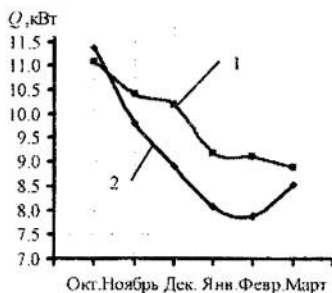
Найбільш характерними для роботи ТНУ в системі опалення, є два режими. Перший режим роботи - моновалентний, коли ТНУ покриває все навантаження системи опалення. При цьому система опалення є низькотемпературною з параметрами теплоносія в розрахунковому режимі $55/45^{\circ}\text{C}$. Другий режим роботи ТНУ - бівалентно-альтернативний, згідно з яким ТНУ покриває опалювальне навантаження і забезпечує необхідні температури теплоносія в магістралях тільки до певної температури зовнішнього повітря (точка бівалентності), далі навантаження покриває котел-доводчик. У цьому випадку система водяного опалення є високотемпературною з розрахунковими параметрами теплоносія $95/70^{\circ}\text{C}$.

В бівалентному режимі роботи ТНУ теплоспоживання об'єкта при розрахунковій температурі зовнішнього повітря становить 35 кВт. В моновалентному режимі ТНУ теплоспоживання об'єкта дорівнює 15 кВт. Основні характеристики ТНУ: масова витрата холодоносія в ГТ 1,01 кг/с; масова витрата теплоносія 0,33 кг/с; об'ємна подача компресора 29 м³/ч; поверхня випарника 6,7 м²; поверхня конденсатора 6,8 м²; довжина ГТ 1600 м; глибина залягання 1,5 м. Холодоагент ТНУ - R134a.

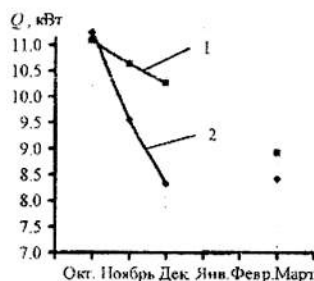
Температура теплоносія на вході в конденсатор ТНУ приймається рівною температурі у зворотній магістралі системи опалення. При цьому з врахуванням рекомендацій [4,5] для розглянутих систем опалення попередньо побудовані графіки якісного регулювання. Статичні характеристики ТНУ визначені за методикою [6,7]. Витрата теплоносія в системі опалення в обох режимах, прийнята постійною.

Співставлення режимів роботи ГТ довжиною $L=1600$ м і ТНУ в кожному місяці опалювального періоду наведено на рис. 7. Довжина ґрунтового теплообмінника L визначена за умови забезпечення необхідної холодопродуктивності ТНУ.

При вибраних параметрах ГТ його теплова потужність (крива 1 на рис.7) покриває необхідну холодопродуктивність ТНУ (крива 2). Зменшення холодопродуктивності ТНУ з грудня по березень пов'язане із збільшенням температурних меж циклу, обумовлених зростанням теплоспоживання об'єкта в цей період.



а



б

Рис. 7. Співставлення теплової потужності ГТ і холодопродуктивності ТНУ

а - в моновалентному режимі; б - в бівалентному режимі

На рис. 8 представлені залежності зміни температури ґрунту на глибині 3 м, отримані для непотривоженого стану ґрунту і при закладанні ГТ на глибині 1,5 м для режимів роботи ТНУ з температурами t_{s2} характерними для моновалентного режиму. У розрахунках враховувався режим кондиціонування в літній період при температурі $t_{s2} = 21$ °С.

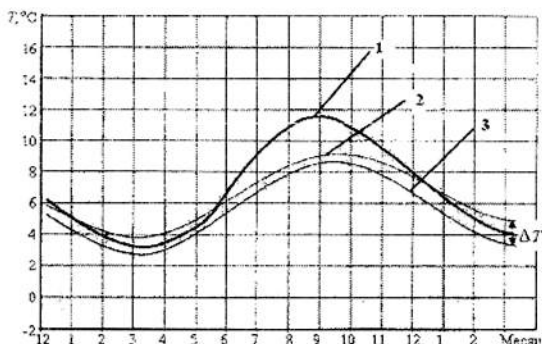


Рис. 8. Зміна температури ґрунту на глибині 3 м в різні пори року:
 1 - при роботі ТНУ в моновалентному режимі в опалювальний період і в режимі кондиціонування в літній період; 2 - непоміжаний стан ґрунту;
 3 - при роботі ТНУ тільки в режимі нагріву в опалювальний період

В березні при відсутності режиму кондиціонування температура ґрунту в порівнянні з непоміжаним його станом знижується на $\Delta t=2^{\circ}\text{C}$. Акумуляція тепла ґрунтом в літній період (режим кондиціонування) збільшує теплову стійкість ґрунту, тому в опалювальний період (з жовтня по січень) температура ґрунту збільшується. Таким чином, експлуатація ТНУ в режимі кондиціонування (рис. 8, лінія 1) сприяє відновленню температури ґрунту.

Існує кілька схем прокладання ГТ горизонтального типу [2] (змієвикове, колекторне, змішане). У кожному з цих випадків трубопроводи ГТ прокладаються паралельно один одному з певним кроком. Тому, при проектуванні ГТ слід враховувати вплив теплової інтерференції між ділянками трубопроводу [8]. Для цього на границі Г5, на Г3, задається умова III роду (рис. 2) з врахуванням збільшення температури по довжині ГТ. Розподіл температури в розглянутому елементі ґрунту в кінці березня при закладанні ГТ змійовикового типу на глибину 1,5 м з кроком в 1 м показано на рис. 9.

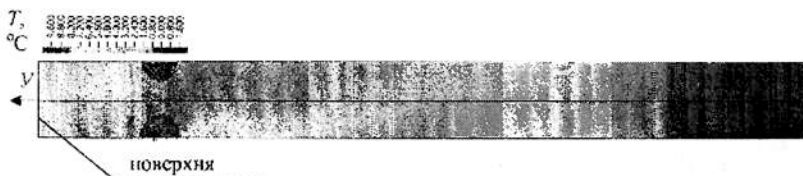


Рис. 9. Розподіл температури в ґрунті при роботі ТНУ в моновалентному режимі наприкінці березня

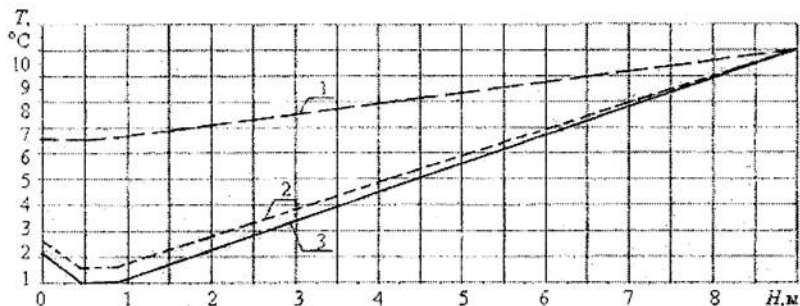


Рис. 10. Залежність температури ґрунту від глибини (кінць березня):

- 1 - непомітний стан ґрунту; 2 - бівалентний режим роботи ТНУ;
3 - моновалентний режим роботи ТНУ

З рис. 10 видно, що в моновалентному режимі роботи ТНУ ґрунт охолоджується на $0,7\text{ }^\circ\text{C}$ більше, ніж в бівалентному режимі. Це пояснюється тим, що температура розсолу на вході в ГТ для двох режимів у березні відрізняється на $0,83\text{ }^\circ\text{C}$. Тому, перерва в роботі ТНУ в бівалентному режимі практично не впливає на відновлення теплового потенціалу ґрунту. На відновлення теплового потенціалу ґрунту істотно впливає підвищення температури зовнішнього повітря в кінці опаловального періоду. Цей ефект виявляється при закладанні ГТ до 2 м. Аналіз рис.10 також показав, що температура поверхні ґрунту є результатом взаємного впливу зовнішнього повітря та режиму роботи ТНУ.

Висновки

1. Запропонована методика розрахунку ґрунтового теплообмінника горизонтального типу, дозволяє зробити довгостроковий прогноз відновлення теплового стану ґрунту. Методика враховує вплив теплової інтерференції між ділянками ґрунтового теплообмінника, а також зміну температури холодоносія.

2. При проектуванні ґрунтових теплообмінників горизонтального типу доцільно ставити граничні умови на поверхні ґрунту третього роду, а на глибині нейтрального шару – першого роду.

3. Експлуатація ГТ в бівалентному режимі роботи ТНУ для опалення в зимовий період та для кондиціонування в літній період призводить до зниження теплового впливу на ґрунт, але при цьому зменшується і енергетична ефективність ТНУ віднесена до числа годин використання її встановленої потужності.

4. Відновлення температурного поля ґрунту навколо теплообмінника після закінчення експлуатації ТНУ залежить як від теплофізичних властивостей ґрунту, так і від інтенсивності використання встановленої потужності ТНУ.

Список літератури

1. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной энергии поверхностных слоев Земли. – М.: Издательский дом «Граница», 2003. – 176 с.
2. Денисова А. Е. Использование энергии грунта в теплонасосных геосистемах энергоснабжения //А. Е. Денисова, А. С. Мазуренко, Ю. К. Тодорцев, В. А. Дубковский //Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 1. – С. 27 – 30.
3. Исаченко В.П. Теплопередача /В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. –М.: Энергия, 1975.- 488 с.
4. Шиманські В. Пристосування системи центрального опалення до реального споживача тепла //Ринок інсталяційний, –2000. –№4. – С.9 – 12.
5. Сакуи И. А. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин. – Л.: Машиностроение. – 1987. – 190 с.
6. Костиков А. О. Харлампиди Д. Х. Влияние теплового состояния грунта на эффективность работы теплонасосной установки с грунтовым теплообменником //Энергетика: економіка, технології, екологія. -№1.- 2009. –С. 32 - 40.
7. Редько А. А., Харлампиди Д. Х. Исследование термодинамических режимов геотермальных теплонасосных установок //Вісник донбаської національної академії будівництва та архітектури. – Вип. 2 (76). – 2009. – С. 86 – 98.
8. Mei V. C. Heat Pump Ground Coil Analysis With Thermal Interference //Journal of Solar Energy Engineering. - 1988. – Vol. 110. –P. 67 – 73.

Надійшла до редакції

21.09.11 р.