

УДК 697.329:621.577.22

## ЧИСЕЛЬНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРУНТОВОГО КОЛЕКТОРА ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Басок Б. І., член-кореспондент НАН України, Недбайло О.М., канд. тех. наук, Божко І.К.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

В роботі представлено розроблену в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України теплофізичну чисельну модель для дослідження процесів гідродинаміки та теплообміну в горизонтальному ґрунтовому колекторі неглибокого залягання. Наведено результати верифікації даної моделі та розраховані основні енергетичні показники роботи ґрунтового колектора.

В работе представлена разработанная в Институте технической теплофизики Национальной академии наук Украины теплофизическая численная модель для исследования процессов гидродинамики и теплообмена в горизонтальном ґрунтовом коллекторе неглубокого залегания. Приведены результаты верификации данной модели и рассчитаны основные энергетические показатели работы ґрунтового коллектора.

The paper presents a thermophysical numerical model developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine for studying the processes of hydrodynamics and heat transfer in a shallow horizontal collector. The results of verification of this model are given and the main energy indicators of the ground collector operation are calculated.

Бібл. 10, рис. 7.

**Ключові слова:** горизонтальний ґрунтовий колектор; теплонасосна установка; система тепlopостачання.

**Постановка проблеми.** Оскільки акумульована теплота сонячної радіації обмежується шаром ґрунту товщиною не більше 6...10 м, для її вилучення з метою подальшого використання для потреб систем опалення та гарячого водopостачання, найбільш перспективними є системи з використанням горизонтальних ґрунтових колекторів неглибокого залягання. До таких відносяться змієвикові трубні системи, які розміщуються на глибині  $h = 1,2...1,6$  м з кроком між трубами  $L = 0,5...1,5$  м.

**Аналіз основних досліджень та публікацій.** Як показав аналіз літературних джерел, в них недостатньо висвітлено питання теоретичних та експериментальних досліджень горизонтальних ґрунтових теплообмінників неглибокого залягання, які використовуються в якості низькопотенційних джерел теплової енергії для теплових насосів. В основному, наводяться тільки результати математичного моделювання роботи цих колекторів. При цьому, описуються моделі [1 - 5], які орієнтовані на певний тип ґрунту та конструкцію теплообмінника.

**Формулювання мети статті.** Основною метою статті є теоретичні та експериментальні дослідження гідродинаміки та теплообміну в низькотемпературному ґрунтовому контурі теплонасосної системи і, на їх основі, розробка та впровадження теплонасосних систем тепlopостачання для енергоефективних будинків.

**Основна частина.** В даний час широкого поширення набули теплонасосні установки, призначені для вилучення низькопотенційної теплоти з ґрунту з подальшим її використанням для систем автономного опалення, гарячого водopостачання та кондиціонування приміщень будівель різного призначення. Важливим елементом таких установок є горизонтальний ґрунтовий

колектор, ефективність роботи якого значно впливає на теплонасосну установку [6 - 9]. Горизонтальний колектор являє собою плоский змієвик, розташований в траншеях, в якому циркулює теплоносій. Перевагою ґрунтових колекторів неглибокого залягання є природне відновлення в теплий період (за рахунок сонячної інсоляції / або при пасивному кондиціонуванні) температурного стану ґрунтового масиву після експлуатації теплонасосної установки в опалювальний період.

Одним з важливих умов ефективної роботи ґрунтового колектора, як теплообмінного пристрою, є раціональний вибір його конструкційних параметрів, таких як загальна довжина трубопроводу, діаметр труби, відстань між осями сусідніх труб змієвика, глибина залягання і т. п. Оптимальні величини даних параметрів можуть бути отримані на основі варіантних розрахунків теплових режимів колекторів при різних значеннях зазначених величин.

Задача про температурний стан ґрунтового масиву при роботі ґрунтового колектору формулюється в такий спосіб. Розглядається теплоперенос в прямокутному паралелепіпеді зі сторонами  $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$ , що охоплює ділянку ґрунтового масиву. На глибині  $h$  розглянутої ділянки розташовується горизонтальний плоский трубчастий змієвиковий теплообмінник (ґрунтовий колектор) з циркулюючим теплоносієм. Значення  $x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$  вибираються так, щоб процеси теплопереносу до ґрунтового колектора в мінімально впливали на температурні умови на межі розрахункової області. Температурне поле ґрунтового масиву описується рівнянням теплопровідності:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_z}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial z} \right). \quad (1)$$

Для його вирішення на поверхні ґрунту ( $z = 0$ )

повинні бути задані граничні умови, що залежать від кліматичних характеристик місцевості і ряду метеорологічних факторів. У загальному випадку це можуть бути умови першого або третього роду:

$$T_z(\tau, 0, y, x) = T_0(\tau, 0),$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_a [T_z(\tau, 0, y, x) - T_a(\tau)]. \quad (2)$$

Представлені умови відображають характер теплового взаємодії ґрунту з повітряним середовищем, температура якого постійно змінюється. У природних умовах коливання температури зовнішнього повітря, а також інтенсивності радіаційного теплообміну призводять до зміни не тільки температури поверхні ґрунту  $T_0(\tau, 0)$ , а й до змін закону розподілу температури по його глибині  $T_0(\tau, z)$ . Але зазначені зміни спостерігаються лише до певної глибини, нижче якої температуру ґрунту можна умовно вважати однаковою і незалежною від клімату довкілля. Якщо межа розрахункової області виявляється нижче вказаного рівня, то умова на нижній межі ( $z = -z_{\max}$ ) можна наближено вважати умовами теплоізоляції:

$$\frac{\partial T_z}{\partial z} \Big|_{z=-z_{\max}} = 0. \quad (3)$$

На інших границях розрахункової області задаються умови, що відповідають температурному режиму ґрунтового масиву при відсутності колектора. Якщо теплоперенос в масиві, що пов'язаний з роботою колектора, відсутній, то розподіли температури в горизонтальних перетинах масиву будуть рівномірними. Це означає, що часткові похідні від температури  $T_z$  по змінним  $x$  або  $y$  будуть дорівнювати нулю. Можна припустити, що зазначені умови приблизно виконуються на бічних границях розрахункової області при роботі колектора, якщо ці границі досить віддалені від його крайніх сегментів. В цьому випадку:

$$\frac{\partial T_z}{\partial x} \Big|_{x=0, x_{\max}} = 0, \quad \frac{\partial T_z}{\partial y} \Big|_{y=0, y_{\max}} = 0. \quad (4)$$

Граничним умовам (3), (4) у рівнянні теплопереносу в ґрунтовому масиві (1) відповідає відсутність надходження теплоти в розрахункову область з боку ділянок ґрунтового масиву, розташованих за її межами. Іншими словами, колектор, розташований в розглянутій розрахунковій області, буде "відбирати" теплоту лише у тій частині ґрунтового масиву, яка обмежена вказаною областю. При цьому рішення задачі теплопереносу відповідатиме умові найбільш інтенсивного охолодження даної обмеженої ділянки ґрунтового масиву. Інший варіант завдання граничних умов для даної задачі ґрунтується на припущенні, що наявність ґрунтового колектора теплоти не впливає на температурні умови на границях розрахункової області. Це означає, що на її бічних границях значення температури залежить від часу так само, як у випадку відсутності ґрунтового колектора. Наприклад, якщо функція  $T_0(\tau, z)$  описує при-

родню сезонну зміна температури ґрунтового масиву в часі при відсутності колектора в ньому, то граничні умови при функціонуєчому колекторі можна сформулювати у вигляді:

$$T_z \Big|_{z=-z_{\max}} = T_0(\tau, -z_{\max}),$$

$$T_z \Big|_{x=0, x_{\max}} = T_z \Big|_{y=0, y_{\max}} = T_0(\tau, z). \quad (5)$$

Така постановка задачі відповідає максимально можливій інтенсивності надходження теплоти в розглянутій обмеженій ділянці з боку зовнішніх шарів ґрунтового масиву. Результати вирішення даної задачі теплопереносу, при двох розглянутих граничних варіантах постановки граничних умов, будуть збігатися, при збільшенні відстаней від крайніх сегментів теплообмінника до кордонів розрахункової області. Ступінь відмінності вказаних результатів можна вважати критерієм при виборі раціональних розмірів розрахункової області.

Чисельне рішення нестационарної задачі теплопереносу в ґрунтовому масиві при працюючому ґрунтовому колекторі виявляється достатньо проблематичним внаслідок необхідності використання великої сітки для задачі теплопереносу в ґрунтовому масиві і дрібної сітки для завдання течії та теплопереносу в каналі колектора. У зв'язку з цим для складання спрощеної розрахункової схеми застосовується ряд припущень. Реальна конфігурація горизонтального ґрунтового теплообмінника замінюється системою окремих трубчастих сегментів, розташованих один до іншого під прямим кутом (рис. 1). Осі зазначених сегментів вважаються паралельними горизонтальним осям координат. Вхід теплоносія в колектор і вихід з нього визначаються координатами точок перетину осей першого і останнього сегментів ґрунтового колектора з граничною площиною ( $y = 0$ ), які мають значення  $x = x_{\text{вх}}$ ,  $z = -h$  (вхід) і  $x = x_{\text{вих}}$ ,  $z = -h$  (вихід).

Вважається, що течія теплоносія в каналі – ламінарна, а профіль її швидкості – параболічний у всіх його перетинах. Деформацією профілю швидкості на ділянках поворотів каналу нехтуємо. Передбачається також, що температура на зовнішній поверхні стінки циліндричного каналу ( $R = R_1$ ) рівномірно розподілена по периметрах кіл його нормальних перетинів і змінюється лише по довжині каналу, а профілі температури в каналі – симетричні щодо його осі.

Теплофізичні властивості теплоносія і ґрунту вважаються постійними. З урахуванням зазначених припущень, рівняння теплопереносу в циліндричному каналі колектора набуває вигляду:

$$c_{жс} \rho_{жс} \left( \frac{\partial T_{жс}}{\partial \tau} + u_l(r) \frac{\partial T_{жс}}{\partial l} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{жс} r \frac{\partial T_{жс}}{\partial r} \right), \quad (6)$$

де

$$u_l(r) = \frac{2G}{\pi R_0^2} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

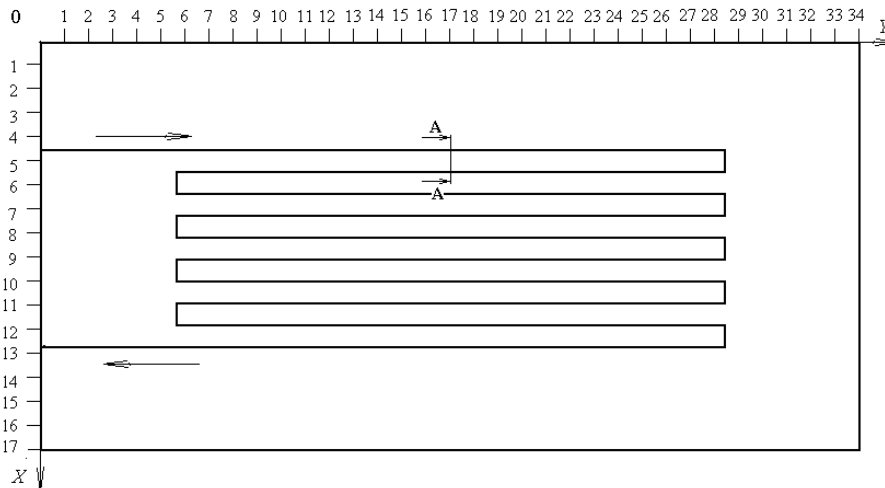


Рис. 1. Горизонтальний переріз розрахункової області на глибині залягання ґрунтового колектора ( $z = 1,65$  м).

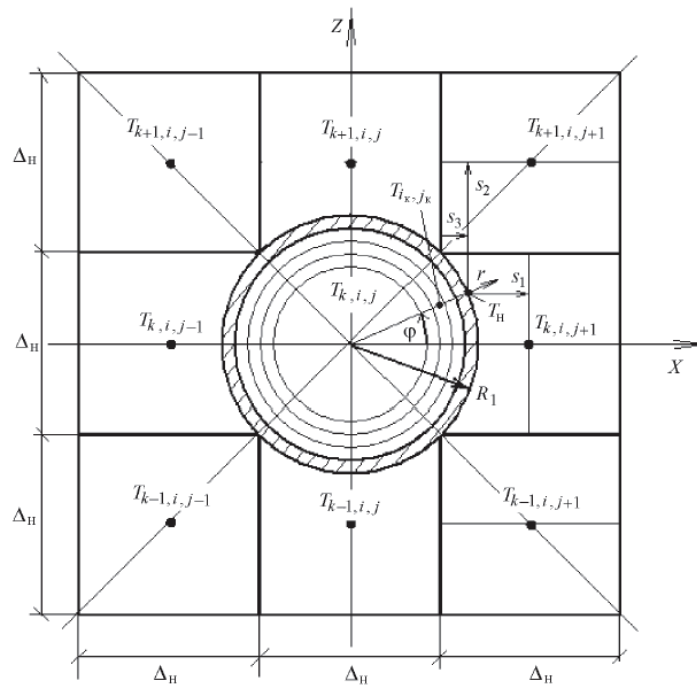


Рис. 2. Фрагмент розрахункової сітки поблизу поверхні каналу.

Якщо вісь каналу паралельна осі  $OX$ , то

$$\frac{\partial T_{жс}}{\partial l} = \frac{\partial T_{жс}}{\partial x} \quad (8)$$

Якщо ж вісь каналу паралельна осі  $OY$ ,

$$\frac{\partial T_{жс}}{\partial l} = \frac{\partial T_{жс}}{\partial y} \quad (9)$$

то якщо напрямок течії теплоносія збігається з напрямком осі, і:

$$\frac{\partial T_{жс}}{\partial l} = -\frac{\partial T_{жс}}{\partial y} \quad (10)$$

якщо напрямок течії теплоносія не збігається з напрямком осі  $OY$ .

Температура теплоносія на вході в ґрунтовий колектор задається відповідно до періодичного режиму роботи теплового насоса. Приймається, що при  $l = 0$   $T_{жс}(\tau, 0, R) = T_{вх}(\tau)$ , де  $T_{вх}(\tau)$  – задана функція. На осі каналу ( $R = 0$ ) приймається умова:

$$\left. \frac{\partial T_{жс}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (11)$$

Ця умова відповідає осьовій симетрії профілю температури. На внутрішній і зовнішній поверхнях стінки каналу задаються умови четвертого роду:

$$-\lambda_{жс} \left. \frac{\partial T_{жс}}{\partial r} \right|_{r=R_0} = -\lambda_c \left. \frac{\partial T_c}{\partial r} \right|_{r=R_0}, \quad (12)$$

$$T_{жс}|_{r=R_0} = T_c|_{r=R_0};$$

$$-\lambda_c \left. \frac{\partial T_c}{\partial r} \right|_{r=R_1} = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R_1}, \quad T_c|_{r=R_1} = T_2|_{r=R_1}. \quad (13)$$

Припускаючи, що в стінці каналу ( $R_0 < r < R_1$ ) перенесення теплоти відбувається лише в радіальному напрямку, то рівняння теплопровідності для цієї стінки можна представити у вигляді:

$$c_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_c r \frac{\partial T_c}{\partial r} \right). \quad (14)$$

Початкові умови для поставленої задачі задаються у вигляді  $T_2(0, z, y, x) = T_0(0, z)$ . Функція  $T_0(0, z)$  характеризує розподіл температури по глибині ґрунтового масиву в момент початку експлуатації колектора ( $T=0$ ). Температура теплоносія в каналі колектора, а також температура його стінок вважаються при  $\tau = 0$  рівними температурі ґрунту на глибині  $z = -h$ .

Рівняння теплопровідності для ґрунтового масиву (зовнішня задача) і рівняння теплопереносу в каналі (внутрішня задача) вирішуються окремо. Узгодження одержуваних рішень здійснюється шляхом задоволення умовами співставлення (12) і (13), заданих на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки каналу. Для чисельного рішення рівняння теплопереносу в ґрунто-вому масиві (1) використовується різницєва сітка, що складається з осередків у формі прямокутних паралелепіпедів зі змінними довжинами сторін. Вузли сітки розташовуються в центрах комірок. Форму, відмінну від зазначеної, мають комірки, що безпосередньо примикають до зовнішньої поверхні стінки каналу. Лінійні розміри таких комірок в поперечних перетинах мінімальні і дорівнюють:

$$\Delta_H = R_1 \sqrt{2}. \quad (15)$$

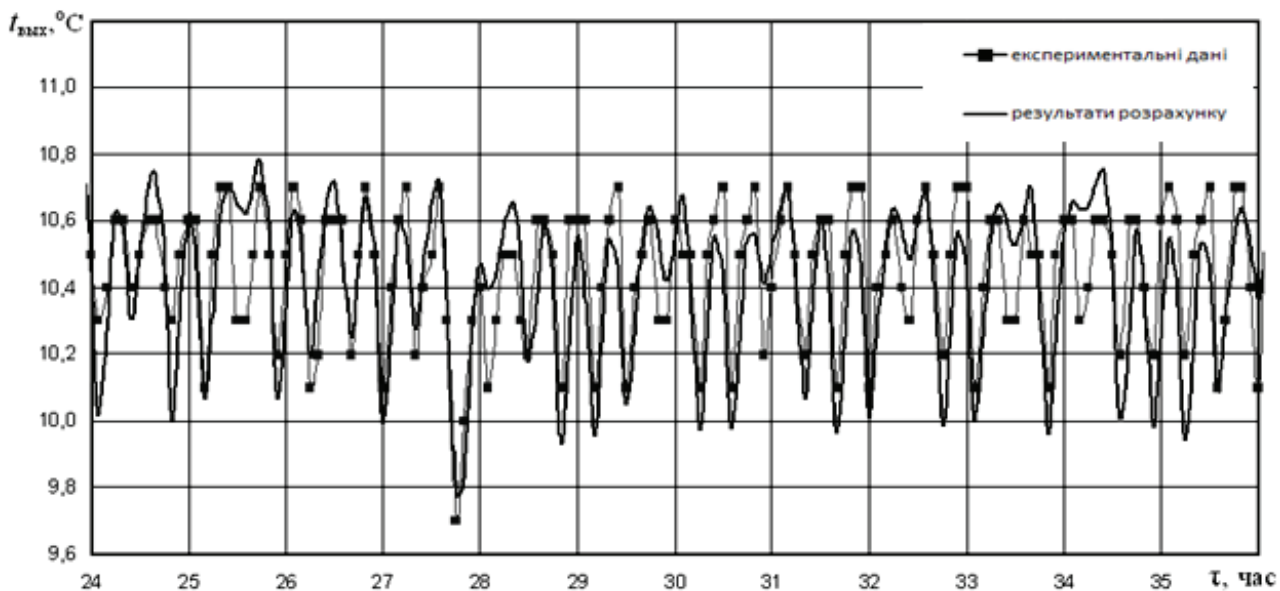


Рис. 3. Зміна температури теплоносія на виході з колектора за період  $\tau = 24 \dots 36$  годин.

Нижче, приводяться результати розрахунків температурного стану горизонтального ґрунтового колектора. Горизонтальний ґрунтовий колектор розташований на глибині 1,65 м на території ІТТФ НАН України. Також, приводиться порівняння результатів, отриманих при розрахунках та експериментальних досліджень за допомогою вимірювального комплексу.

З графіків (рис. 3, 4) видно, що при роботі теплового насоса у поєднанні з горизонтальним ґрунтовим колектором, температура теплоносія на вході та виході з колектора постійно змінюється. Однак, результати розрахунків відповідають експериментальним да-

ним. Таким чином, робимо висновок, що дана модель працює адекватно і її можливо використовувати для розрахунків горизонтальних ґрунтових колекторів неглибокого закладення.

На графіках (рис. 5-6) показано розподіл температури в ґрунтовому масиві. Як видно, при обраному кроці між осями сусідніх труб колектора в 1 м, не відбувається взаємовплив між сусідніми трубами колектора.

Також, був розрахований тепловий потік, що надійшов до теплоносія через горизонтальний ґрунтовий колектор (рис. 7). Як видно, середнє значення переданого теплового потоку, при роботі колектора складає 3,5 кВт.

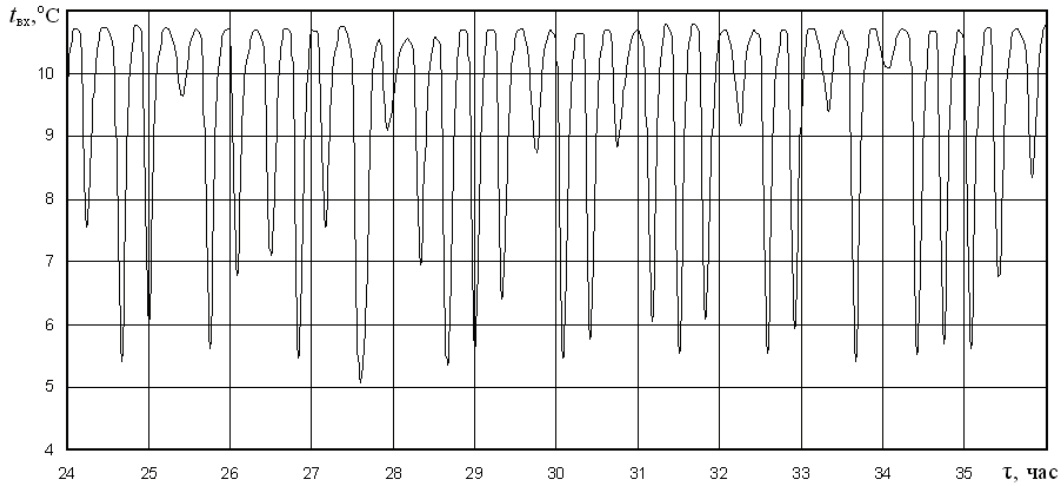


Рис. 4. Розрахована зміна температури теплоносія на вході в колектор за період  $\tau = 24 \dots 36$  годин.

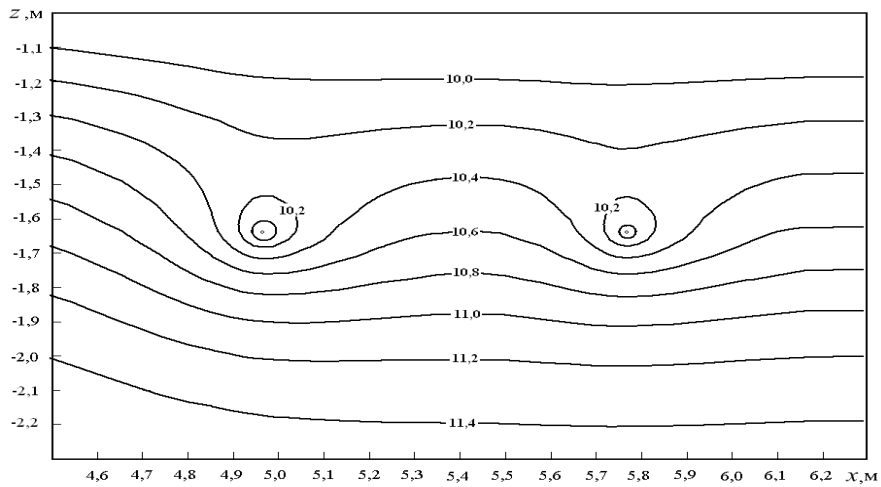


Рис. 5. Розподіл температури у вертикальному перерізі ґрунтового масиву (розріз А-А (див. рис. 1);  $y = 17$  м) в момент часу  $\tau = 54$  годин.

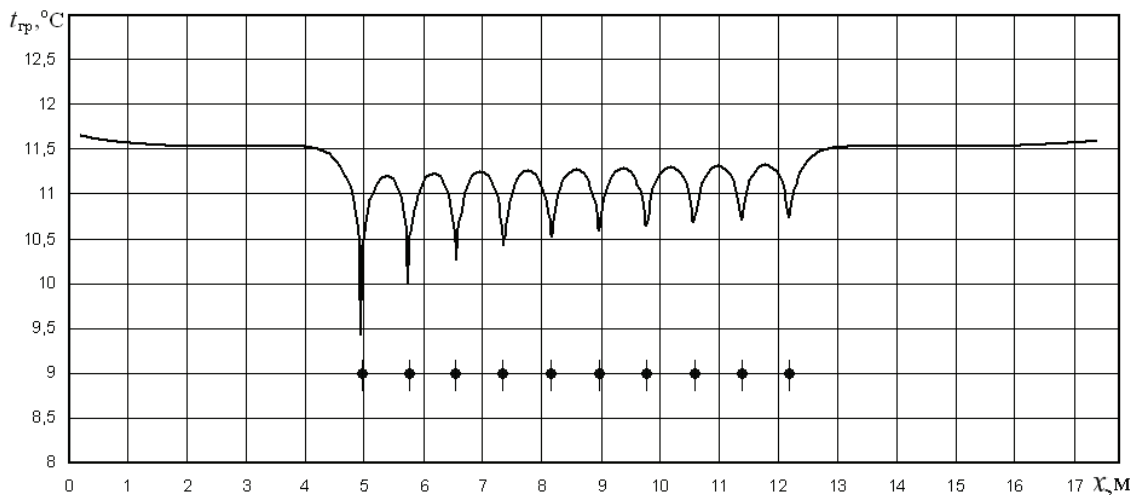


Рис. 6. Зміна температури по ширині ґрунтового масиву ( $z = 1,65$  м;  $y = 17$  м) в момент часу  $\tau = 54$  годин.



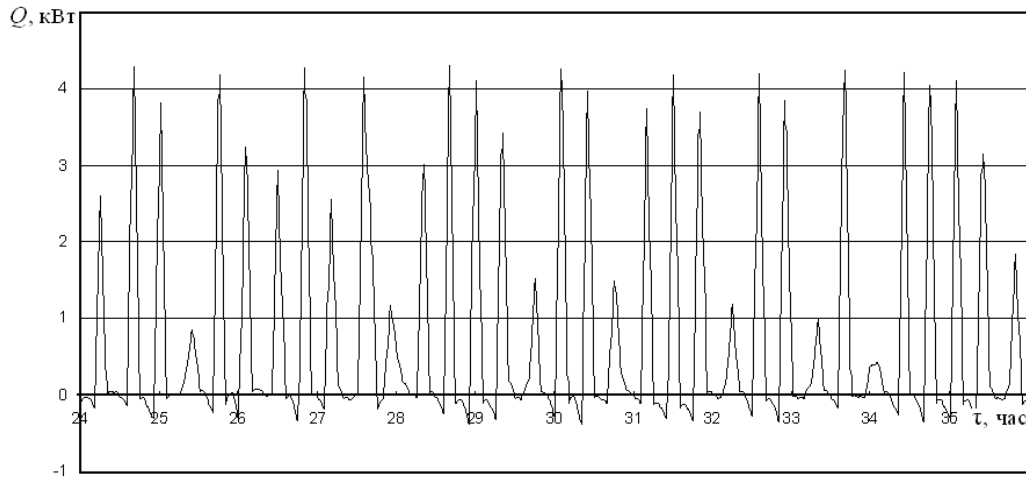


Рис. 7. Зміна теплового потоку, який надійшов до теплоносія за період  $\tau = 24 \dots 36$  годин.

### Висновки

Чисельна модель роботи ґрунтового горизонтального колектора показала результати, які добре корелюють з експериментальними даними [10]. Це свідчить про її працездатність.

Встановлено, що крок між осями сусідніх труб  $\approx 1$  м, є оптимальним для вибору їх діаметру та товщини стінки при створенні ґрунтового колектора в умовах ґрунту м. Києва (підзолистий ґрунт). Оскільки при такому кроці мінімізується взаємовплив сусідніх петель ґрунтового колектора.

Середня розрахункова потужність зняття теплової енергії ґрунту з 1 погонного метра трубопроводу експериментального ГТО склала 28 Вт.

### ЛІТЕРАТУРА

1. G. Florides. *Ground heat exchangers – A review of systems, models and applications* / G. Florides, S. Kalogirou. // *Renewable Energy*. – №32 (2007). – 2007. – P. 2461–2478.
2. Безродний М.К. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем тепlopостачання: монографія / Безродний М.К., Притула Н.А. // – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016.
3. Мазуренко А.С. Разработка схемы комбинированной системы теплоснабжения с использованием сезонного аккумулирования тепла от гелиосистем / Мазуренко А.С., Климчук А.А., Юрковский С.Ю., Омеко Р.В. // *Восточно-Европейский журнал передовых техноло-*

гий. – №8 (73). – 2015. С. 17-20.

4. Oussama Ibrahim. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects / Oussama Ibrahim, Farouk Fardoun, Rafic Younes, Hasna Louahlia-Gualous // *Building and Environment*. – Vol. 72. – 2014. – P. 259–286.

5. H. Esen. Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system / H. Esen M., Inallib, M. Esen // *Building and Environment*. – №42 (2007). – 2007. – P. 1126–1134.

6. Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах / Васильев Г. П., Шилкин Н. В. // *АВОК*. – № 2. – 2003. С. 52–60.

7. Накорчевский А.И. Оптимальная конструкция ґрунтовых теплообменников / Накорчевский А. И., Басок Б. И. // *Промышл. теплотехника*. – Т. 27, № 6. – 2005. – С. 27–31.

8. Накорчевский А.И. Технологические показатели различных схем ґрунтового аккумулирования теплоты / Накорчевский А. И., Басок Б. И., Беляева Т. Г. // *Теплоэнергетика*. – № 3. – 2006. – С. 29–35.

9. Долинский А.А. Научно-технический центр теплонасосных технологий ИТТФ НАН Украины / Долинский А. А., Басок Б. И., Накорчевский А. И., и др. // *Промышл. теплотехника*. – Т. 33, № 7. – 2011. – С. 89–91.

10. Басок Б.И. Теплофизика влияния солнечного излучения на здания / Басок Б.И., Накорчевский А.И. // *Київ: Наукова думка*. – 2016. – 224 с.

**NUMERICAL MODEL OF WORK OF THE  
HORIZONTAL GROUND COLLECTOR OF  
HEAT PUMP SYSTEM**

**Basok B.I., Nedbaylo A.M., Bozhko I.K.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

The paper presents a thermophysical numerical model developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine for studying the processes of hydro-dynamics and heat transfer in a shallow horizontal horizontal collector. The results of verification of this model are given and the main energy indicators of the ground collector operation are calculated.

References 10, figures 7.

**Key words:** horizontal ground collector; heat pump installation; heat supply system.

1. *G. Florides*. Ground heat exchangers – A review of systems, models and applications. *G. Florides, S. Kalogirou. Renewable Energy*. №32 (2007). 2007. P.2461–2478.

2. *Bezrodnyiy M.K.* Termodinamichna ta energetichna efektyvnist teplonasosnih shem teplopostachannya: monografiya. *Bezrodnyiy M.K., Pritula N.A.* Kyiv: NTUU «KPI». 2016. (Ukr.)

3. *Mazurenko A.S.* Razrabotka shemy kombinirovannoy sistemyi teplosnabzheniya s ispolzovaniem

sezonnogo akkumulirovaniya tepla ot geliosistem. *Mazurenko A.S., Klimchuk A.A., Yurkovskiy S.Yu., Omeko R.V.* *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy*. №8 (73). 2015. P. 17–20. (Rus.)

4. *Oussama Ibrahim*. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. *Oussama Ibrahim, Farouk Fardoun, Rafic Younes, Hasna Louahlia-Gualous.* *Building and Environment*. Vol. 72. 2014. P.259–286.

5. *H. Esen*. Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system. *H. Esen M., Inallib, M. Esen.* *Building and Environment*. №42 (2007). 2007. P.1126–1134.

6. *Vasilev G.P.* Ispolzovanie nizkopotentsialnoy teplovoy energii zemli v teplonasosnyih sistemah. *Vasilev G. P., Shilkin N.V.* *AVOK*. № 2. 2003. P. 52–60. (Rus.)

7. *Nakorchevskiy A.I.* Optimalnaya konstruktsiya gruntovyih teploobmennikov. *Nakorchevskiy A.I., Basok B.I.* *Promyishl. teplotehnika*. T. 27, № 6. 2005. P. 27–31. (Rus.)

8. *Nakorchevskiy A.I.* Tehnologicheskie pokazateli razlichnyih shem gruntovogo akkumulirovaniya teploty. *Nakorchevskiy A.I., Basok B.I., Belyaeva T.G.* *Teploenergetika*. № 3. 2006. P. 29–35. (Rus.)

9. *Dolinskiy A.A.* Nauchno-tehnicheskyy tsentr teplonasosnyih tehnologiy ITTF NAN Ukrainyi. *Dolinskiy A.A., Basok B.I., Nakorchevskiy A.I., i dr.* *Promyishl. teplotehnika*. T. 33, № 7. 2011. P. 89–91. (Rus.)

10. *Basok B.I.* Teplofizika vliyaniya solnechnogo izlucheniya na zdaniya. *Basok B.I., Nakorchevskiy A.I.* Kyiv: Naukova dumka. 2016. 224 p. (Rus.)

*Получено 10.05.2017  
Received 10.05.2017*