

характеристики насоса при регулюванні тиску за допомогою дроселюючих елементів на одному з насосів (рис. 3, а) та на двох насосах (рис. 3, б). Аналіз рис. 3 показує, що при регулюванні тиску за допомогою дроселюючих елементів доцільно використовувати насоси з пологими напірними характеристиками.

3. Висновки

Вперше отримані аналітичні вирази для розрахунку характеристики насосної станції з паралельно працюючими насосами при регулюванні тиску на виході з насосної станції за допомогою дроселюючих елементів.

При зміні опору на трубопроводі користувача поза межами насосної станції робоча точка переміщується по напірній характеристиці насоса. При зміні опору на трубопроводі паралельно встановлених насосів в межах насосної станції робоча точка переміщується по характеристиці живильного трубопроводу. Комбінування зміною опорів на живильному трубопроводі та біля насосу дає можливість реалізувати бажаний закон регулювання витрати рідини споживачу.

Встановлено, що ККД насосної станції при регулюванні тиску на виході з насосної станції за допомогою дроселюючих елементів на одному з насосів більше в порівнянні з регулюванням двох насосів.

Визначено залежність ККД насосної станції з двома паралельно працюючими насосами від форми їх напірної характеристики. Встановлено, що при регулюванні зміною гідравлічних опорів доцільно застосовувати насоси з пологою формою характеристики.

Список літератури: 1. Europump/ Variable Speed Pumping. A Guide to Successful Applications // Hydraulic Institute and Europump. Published by Elsevier Ltd. – 2004. – 172 p. 2. *Бойко В.С.* Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження [Текст] / В.С. Бойко, В.Г. Неня, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – № 4/(57). – Частина 1. – С. 168 – 171. 3. *Хованський С.О.* Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.17 “ Гідравлічні машини і гідропневмоагрегати ” [Текст] / С.О. Хованський. – Суми, 2011. – 21с. 4. *Хованський С.О.* Системний аналіз комплексу подачі і розподілу води в житлово-комунальному господарстві [Текст] / С.О. Хованський, В.Г. Неня // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/4(46). – С. 56 – 59.

Поступила в редколлегию 23.11.2011

УДК 621.577

О.І. ТАРАСОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків

В.О. ТАРАСОВА, канд.техн.наук, м.н.с., ИПМаш, Харків

І.В. ДОБРЯНСЬКА, маг, НТУ «ХПІ», Харків

ВПЛИВ КРОКУ МІЖ ТРУБАМИ КОЛЕКТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Представлена двовимірна нестационарна математична модель ґрунтового теплообмінника горизонтального типу. Виконано аналіз впливу кроку розташування труб на величину теплового потоку від ґрунту до розсолу через стінку труби.

Ключові слова: тепловий насос, ґрунтовий теплообмінник, тепловий потік.

Представлена двумерная нестационарная математическая модель грунтового теплообменника горизонтального типа. Выполнен анализ влияния шага расположения труб на величину теплового потока от грунта к рассолу через стенку трубы.

Ключевые слова: Тепловой насос, грунтовый теплообменник, тепловой поток.

Two-dimensional transient mathematical model of ground heat exchanger of horizontal type is presented. The analysis of the influence of pitch tube arrangement on the heat flux from soil to the brine through the pipe wall is developed.

Keywords: heat pump, ground heat exchanger, the heat flux

Раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів являє сьогодні собою одну з глобальних світових проблем, успішне вирішення якої, мабуть, буде мати визначальне значення не тільки для подальшого розвитку світового співтовариства, а й для збереження середовища її проживання. Одним з перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування нових енергозберігаючих технологій, які використовують нетрадиційні відновлювані джерела енергії. Найбільш поширеними з них є теплові насоси (ТН), що використовують у якості зовнішнього джерела теплової енергії тепло ґрунту на невеликих глибинах (цикл «ґрунт-вода»).

Розширення застосування в Україні систем теплопостачання на основі ТН с ґрунтовими теплообмінниками (ГТ) йде, безумовно, недостатньо високими темпами, однак, в умовах дедалі гострішого дефіциту та зростання цін на енергоносії проблема енергозбереження для економіки України в цілому і для її житлово-комунального сектора зокрема стає дуже актуальною.

Ґрунтові теплообмінники являють собою систему труб розміщених в ґрунті вертикальним або горизонтальним способом. У даному дослідженні розглядаються тільки горизонтальне розміщення труб.

Відомо, що теплові насоси з ґрунтовими теплообмінниками використовуються в різних районах з м'яким кліматом. Розглянемо можливості такого насоса і зокрема ґрунтового теплообмінника в Україні на прикладі кліматичних умов м. Харкова.

За статистичними метеорологічними даними зміна температури повітря в м. Харкові представлено в табл. 1. Далі ці дані будуть використовуватися в якості граничних умов теплообміну при створенні моделі ГТ.

Таблиця 1. Середньостатистична температура зовнішнього повітря м. Харкова

Середньомісячна температура зовнішнього повітря	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
$t_{з.п.} \text{ } ^\circ\text{C}$	-7	-5	0	8	15	19	21	20	14	7	1	-2

При створенні моделі ГТ враховувалось, що на ефективність роботи теплообмінника впливають атмосферні умови і теплота, що йде від ядра землі. Температури повітря може бути задана достатньо коректно, оскільки є велика

кількість статистичних даних в різних точках планети протягом тривалого періоду вивчення атмосферних умов. Тепловий потік, що йде з ядра землі точно не визначений. Його значення оцінюється як $0,2-0,5 \text{ Вт/м}^2$ [1]. Більш точно відомо, що на глибині близько $10-20 \text{ м}$ температура землі дорівнює середньорічній температурі зовнішнього повітря. Вона становить приблизно $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Тому в якості граничних умов задавалися умови конвекції на поверхні землі (граничні умови третього роду), а також температура на глибині 10 м .

Математична модель являла собою масив ґрунту з розміщеними усередині трубами (рис. 1). Висота масиву H була прийнята 10 м , що дозволило задати температуру землі на нижній межі. На верхній межі були задані зазначені атмосферні умови. Ширина масиву s змінювалася залежно від кроку розміщення труб. Глибина залягання h також була змінним параметром. Внутрішній діаметр труби дорівнював $d_{\text{вн}}=35 \text{ мм}$.

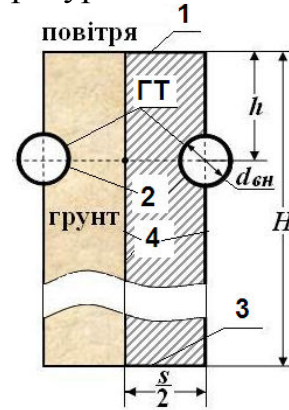


Рис. 1. Схема ґрунтового теплообмінника

Температурне поле ґрунту знаходилось шляхом рішення нестационарної крайової задачі теплопровідності

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

з граничними умовами першого і третього роду.

В якості початкових умов приймалося рівномірний розподіл температури в елементі ґрунту, при цьому початкова температура задавалася рівної середньорічній температурі зовнішнього повітря $t_0 = t_{\text{з.п.}}^{\text{с.р.}}$. Для того, щоб виключити вплив на результати розрахунку невизначеності початкових умов, розрахунок охоплював період у три роки. Причому для аналізу використовувалися данні тільки останнього року розрахунку.

Були прийняті наступні граничні умови:

– на границі 1 задавалася умова III роду

$$\alpha(t_{\text{тр}} - t_{\text{з.п.}}) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right). \quad (2)$$

Індекс «з.п.» вказує на температуру зовнішнього повітря, яка в даних розрахунках змінювалась у часі (табл. 1); індекс «гр» – на температуру ґрунту. Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ґрунту к зовнішньому повітрю α задавалася $23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ згідно [1, 2];

– на границі 2 також задавалася умова III роду

$$\alpha_{\text{гр}}(t_{\text{с}} - t_{\text{р}}) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right), \quad (3)$$

де індекс «с» вказує на температуру стінки труби; індекс «р» – на температуру розсолу (холодоносія) у ГТ.

$\alpha_{\text{гр}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки труби до розсолу, Вт/(м²·К). Для розрахунку $\alpha_{\text{гр}}$ використовували відомі рівняння для вимушеного течії рідини в трубах [3];

– на границі 3 задана умова I роду $t = t_{\text{з.п}}^{\text{с.р.}}$;

– границя 4 в наслідок симетрії вважалась теплоізолюваною.

Для рішення рівняння (1) з крайовими умовами використовувався метод кінцевих елементів.

Закладка горизонтального теплообмінника в ґрунт є достатньо трудомісткою і дорогою операцією, і тому, зазвичай обмежуються максимальною глибиною закладання труб рівною 2 м. У даній роботі розглянуто модель ґрунтового масиву з закладкою труб на глибину $h=1,2$ м (див. рис. 1).

Встановлено в результаті розрахунків, що відведення теплоти в ГТ призводить до зниження температури ґрунту, прилеглого до труби. Причому вплив відведення теплоти відчувається навіть на поверхні ґрунту під час закладання труб на глибину 1,2 м с кроком між трубами $s=0,5$ м.

Змінення температури поверхні ґрунту відбувається з деякою затримкою. Так зниження температури на поверхні спостерігається після 15 діб з початку роботи ТН. Реакція ґрунту в точці А (рис. 1) на початку роботи теплового насосу проявляється вже через одну добу (рис. 2). Температура в цій самій точці менше

температури в цій же точці при непрацюючому тепловому насосі на 6–10 °С.

У місці закладення труб на відстані по горизонталі 0,25 (точка А) температура ґрунту різко знижується після включення теплового насоса.

В опалювальний період із збільшенням кроку s зменшується взаємовплив між колекторами і збільшується температура ґрунту в площині симетрії між трубами. Тому можна вважати, що збільшується акумульована теплота ґрунтом.

Розрахунки показали, що при зміні кроку між трубами від 0,5 м до 2 м температура в точці А збільшується на 1,5 °С в найбільш холодний час року (січень) (рис. 3). На початку січня температура в точці А при кроці 2 м позитивна.

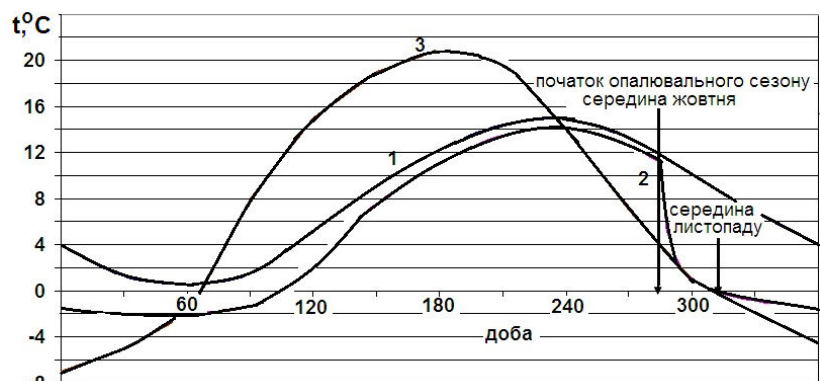


Рис. 2. Зміна температури ґрунтового масиву на глибині 1,2 м: 1 – температура безпосередньо ґрунтового масиву, тобто без закладання колектора; 2 – температура ґрунту у місці закладення ґрунтового; 3 – зміна температури повітря на протязі року

Проте ефективність експлуатації теплового насоса в грудні – березні зменшується. Час, коли найбільш ефективно використовувати тепловий насос обмежено жовтнем і листопадом.

У літературі вказується на те, що лінійна щільність теплового потоку до труб

у ґрунтовому теплообміннику становить 10-25 Вт/м. [1]. Ця оцінка була опорною для проектування теплообмінників такого типу. Слід зазначити, що обчислення теплового потоку в трубу виявляється досить проблематичним по результатам розрахунку теплового стану, в силу малої різниці температур розсолу і поверхні труби. Тому розрахунок теплового потоку проводився з аналізу градієнта температури в прилеглих до кордону елементах розрахункової сітки.

На рис. 4 ілюструється зміна теплового потоку в залежності від кроку розташування труб при температурі розсолу – 2 °С протягом всього опалювального періоду. Протягом перших 30 днів після початку опалення приміщень лінійна щільність теплового потоку до труб розташованих з

кроком 1 м знаходиться в межах 12–40 В/м, тобто середня величина складає приблизно 20 Вт/м. Це знаходиться у відповідності з даними [1].

Важливо зазначити, що експериментальні дані [1] відносяться до періоду часу роботи теплового насоса наближено рівному 30 днів. Отримані нами дані показують ще раз, що час роботи насоса не охоплює весь опалювальний період. Згідно розрахункам, найбільш доцільно його використовувати в наших кліматичних умовах у період перших 60 днів опалювального сезону. Це пояснюється тим, що акумульована ґрунтом теплота в теплий період року відбирається тепловим насосом і одночасно відбирається атмосферним повітрям.

Проведені розрахунки показали, що вплив кроку розташування труб на відбір від ґрунту теплового потоку спостерігається у весь опалювальний період (рис. 4). Наприклад, на п'ятнадцятий день роботи теплового насоса тепловий потік при кроці 0,5 м становить 10 Вт/м, а при кроці 2 м – 20 Вт/м. Таким чином, вони відрізняються в два рази. Через 105 діб тепловий потік різко знижується і

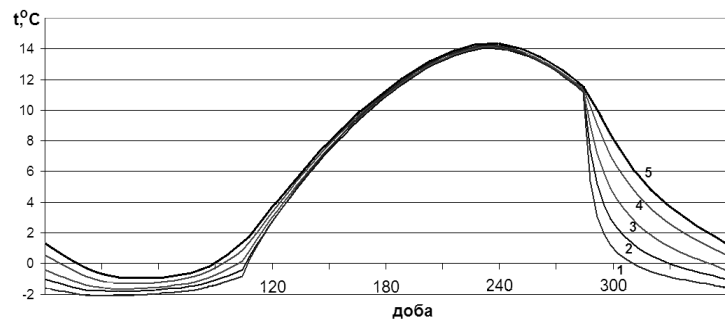


Рис. 3. Зміна температури ґрунту в точці А в залежності від кроку між трубами: 1 – 0,5 м; 2 – 0,7 м; 3 – 1 м; 4 – 1,5 м; 5 – 2 м

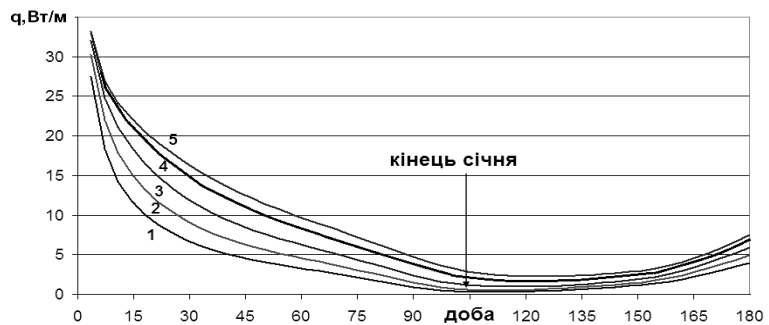


Рис. 4. Зміна теплового потоку в опалювальний період в залежності від кроку розташування труб на глибині залягання ґрунтового колектора 1,2 м: 1– 0,5 м; 2 – 0,7 м; 3 – 1 м; 4 – 1,5 м; 5 – 2 м при температурі розсолу -2 °С

відміна стає ще більшою. Однак величина теплового потоку настільки мала, що робить неефективним роботу теплового насоса при будь-якому з розглянутих кроків розташування труб. Якщо вважати, що тепловий насос використовується у перші 60 діб, то крок труб в 1 м виявляється кращим з точки зору економії площі під теплообмінник і прийнятного теплового потоку.

Слід відмітити, що метою даного дослідження була оцінка впливу розташування ГТ на величину теплосбіра з ґрунту. Тому для простоти задавалася постійна температура розсолу протягом всього опалювального періоду, що в результаті дало різке зниження величини теплового потоку з січня по березень. При роботі ТН температура розсолу не постійна, вона залежить від багатьох факторів [4]. Отже, змінюючи температуру розсолу, вдається збільшити щільність теплового потоку. Слід мати на увазі, що нижня межа температури розсолу обмежена тільки технічними можливостями теплового насоса. Навпаки верхня межа визначається головним чином тепловим станом ґрунту. Відомі марки теплових насосів володіють найбільшою ефективністю при низьких

температурах розсолу на виході випарника. Ця температура звичайно змінюється в діапазоні від 0 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 5 наведено результати розрахунків теплового потоку в залежності від температури розсолу в трубах, розташованих на відстані 0,5 м одна від одної. Видно, що чим нижче температура розсолу, тим більше тепло збір с ґрунту ГТ.

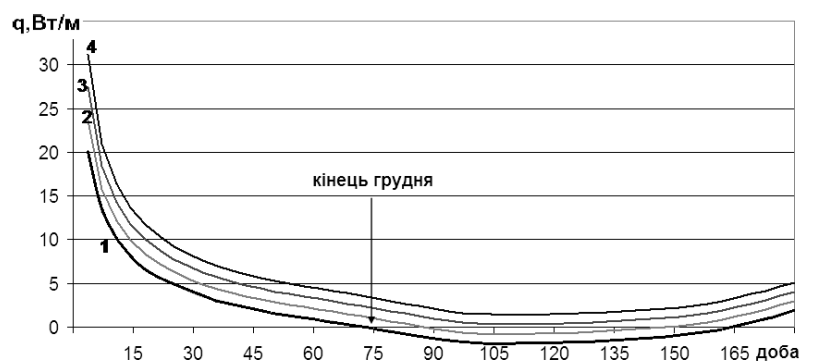


Рис. 5. Зміна теплового потоку в опалювальний період під впливом температури розсолу в трубі, розташованій на глибині 1,2 м:
1 – $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Висновки

При зміні кроку між колекторами від 0,5 м до 2 м зменшується взаємовплив між ними і збільшується температура ґрунту в площині симетрії між трубами. Але це збільшення в найбільш холодний час року (січні) становить лише $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що призводить до зниження ефективності теплового насоса.

Ефективність теплового насоса може бути збільшена у разі завдання оптимального графіка теплового навантаження ТН впродовж опалювального сезону. Крім того можна очікувати більшої теплової міцності у разі циклічного включення та відключення секцій ґрунтового теплообмінника, що може дати змогу прогріти ґрунт біля труб колектора.

Список літератури: 1. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергией поверхностных слоёв земли / Г.П. Васильев. – М.: Издательский дом «Граница», 2006.– 176 с. 2. ДБН В.2.6-31:2006 Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель/ Мінбуд України, Київ, 2006. 3. Исаченко В.П. Теплопередача/ В.П. Исаченко В.А. Осипова, А.С. Сукомел. –М.: Энергия, 1975.– 488 с. 4. Тарасова В. А., Харлампиди Д.Х., Шерстюк А. В. Моделирование тепловых режимов совместной работы

УДК 004.942:621.382

Д.В. ФЕДАСЮК, докт. техн. наук, проф., проректор, НУ«Львівська політехніка», Львів

Т.О. МУХА, асис., НУ«Львівська політехніка», Львів

ПОРІВНЯННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ТА ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПАРОВУВАННЯ

У статті проведено порівняльний аналіз нелінійної та лінійної математичних моделей процесу теплообміну з використанням випаровування рідини для інтенсифікації тепловідведення за критичних умов в електронних пристроях. Проведено порівняння результатів моделювання з використанням цих моделей при різних значеннях вхідних параметрів. Показано залежність точності розв'язку лінійної моделі порівняно із розв'язком нелінійної від вхідних параметрів, сформовано рекомендації щодо використання моделей.

Ключові слова: теплообмін, випаровування, нелінійна модель, лінійна модель, моделювання.

В статье проведен сравнительный анализ нелинейной и линейной математических моделей процесса теплообмена с использованием испарения жидкости для интенсификации теплоотвода за критических условий в электронных устройствах. Проведено сравнение результатов моделирования с использованием этих моделей при различных значениях входных параметров. Показана зависимость точности решения линейной модели по сравнению с решением нелинейной от входных параметров, сформированы рекомендации по применению моделей.

Ключевые слова: теплообмен, испарение, нелинейная модель, линейная модель, моделирование.

In this article comparative analysis of the non-linear and linear mathematical models of heat transfer with using of liquid evaporation for heat dissipation intensification under critical conditions in microelectronic devices has been made. The modeling results comparison obtained for these models with different values of input parameters have been made. Precision dependence of the linear model solution comparative to the non-linear model solution on input parameters has been shown. Recommendations to model using have been given.

Key words: heat transfer, evaporation, non-linear model, linear model, simulation.

1. Постановка проблеми

Температурний режим мікроелектронних пристроїв є одним із найважливіших факторів, від яких залежить надійність пристрою [1]. Зростання тепловиділення накладає обмеження на потужність та швидкодію електронних пристроїв, тому важливою задачею є відведення тепла для забезпечення відповідного температурного режиму. Постійне збільшення тепловиділення в наслідок мікромініатюризації зумовлює постійну розробку нових та вдосконалення вже існуючих підходів до відведення тепла.

Швидке охолодження забезпечує один із сучасних підходів тепловідведення, при якому використовується зміна стану речовини з рідкого на газоподібний. При зміні агрегатного стану речовини відбувається відведення тепла у вигляді