УДК 632.4:624.139:621.58:620.92

**І. І. Пуховий,** канд. техн. наук, доц.

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ З ҐРУНТОМ В ҐРУНТОВИХ КОЛЕКТОРАХ

*Розглянуто експериментальні дослідження умовних коефіцієнтів теплообміну труби з ґрунтом при течії повітря і води за короткочасних режимів експлуатації (робота і зупинка в межах годин).*

## Вступ

В останні роки ґрунтові теплообмінники широко використовуються для забезпечення низькопотенційною теплотою теплових насосів, для охолодження повітря в системах кондиціювання та для нагрівання повітря для різних потреб [1, 2]. Процеси, що відбуваються при цьому в ґрунті є нестаціонарними. Аналітичні рішення не дають конкретних, доступних для інженерних розрахунків результатів. Часто у розрахунках теплонасосних систем приймають наближені значення щільності теплового потоку, виражені у Вт/м труби без вказівок на її діаметр, який визначає площу теплообміну.

Автором поставлена задача експериментального дослідження теплообміну з ґрунтом в умовах короткочасних режимів включення теплового обладнання, що є характерним для систем вентиляції та кондиціювання, на режим роботи яких впливає зміна дня та ночі і температура довкілля. Короткочасний режим роботи характерний також для використання теплових насосів в системах опалення та гарячого водопостачання. У цьому випадку теплові насоси споживають електроенергію за нічним тарифом [3].

## Експериментальне дослідження теплообміну в процесі охолодження повітря ґрунтом

### Дослідна ділянка та методика досліджень

Для дослідження теплопередачі від повітря до ґрунту (суглинок з органікою) в процесі охолодження повітря в ґрунт була закладена труба діаметром 140 мм, нижня частина якої була розташована на 300 мм нижче поверхні ґрунту. Неглибока закладка обумовлена короткочасним режимом роботи і достатньо низькою температурою ґрунту в кінці жовтня. В цей час верхні шари ґрунту вже починають бути холоднішими за нижні (температура ґрунту на глибині осі труби склала 11 °С). Рівновага температур в ґрунті по висоті $t$ = 13 °С спостерігається в період з 1 по 10 жовтня. Довжина труби 3,5 м, (тієї частини, що контактує з ґрунтом). Відкриті кінці труби були заглушені до початку досліджень.

Подача повітря проводилась з використанням пилососів (SAMSUNG — 1100 Вт), а їх об'ємна подача бралась з паспортних даних. Досліди виконувались за температури зовнішнього повітря $t_A$ = 18 °С вдень опівдні, коли повітря значно тепліше. Повітря додатково підігрівалось також під час проходження через пилососи.

Крім вимірювання температур повітря на вході $t_{\text{П}}'$, виході $t_{\text{П}}''$ труби, фіксувалась також температура ґрунту $t_{\text{Г}}$ на відстані 50 мм від труби в горизонтальному напрямку навпроти центра труби. Були також проведені вимірювання температури на місці контакту стінки труби з ґрунтом ($t^C_{\text{Г}}$).

### Результати дослідження

Густина повітря за середньої температури в трубі 30 °С склала 1,15 кг/м$^3$. Площа перерізу труби склала 0,0153 м$^2$ . Температура $t_{\text{Г}}$ на відстані 50 мм зростала з приблизним темпом 0,1 °С за 10 хв., а $t^C_{\text{Г}}$ спочатку збільшувалась, а потім стабілізувалась на позначці 12,6 °С.

Тепловий потік, переданий від повітря ґрунту, знаходився з рівняння

© І. І. Пуховий, 2010

$$Q = c_{\Pi} m_B \left( t_{\Pi}' - t_{\Pi}'' \right), \quad (1)$$

З паспортною подачею $V_B$ = 0,030 м$^3$/с швидкість повітря в трубі складає 1,96 м/с. Під час дослідження виявились нещільності, які зменшували подачу повітря в трубу, що визначено аналізом коефіцієнта теплопередачі К (коефіцієнт теплопередачі повинен бути меншим меншого коефіцієнта тепловіддачі), останній при згаданій швидкості склав 7,7 Вт/(м$^2$·К) з розрахованим К = 11,86 Вт/(м$^2$·К).

Коефіцієнт теплопередачі є умовним, враховуючи, що ґрунт є твердим тілом. Коефіцієнт тепловіддачі від повітря розраховувався за лінійно апроксимованою формулою [2] для діаметра 0,14 м

$$\alpha_{\Pi} = 2{,}75\ w_{\Pi} + 2{,}2, \quad \text{Вт} \Big/ \left( \text{м}^2 \cdot \text{К} \right). \quad (2)$$

При $w_{\Pi}$ = 1 м/с

$$\alpha_{\Pi} = 2{,}75 \cdot 1 + 2{,}2 = 4{,}95\ \text{Вт} \Big/ \left( \text{м}^2 \cdot \text{К} \right).$$

Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі від повітря міг лежати в межах 5…7 Вт/(м$^2$·К). Для розрахунку умовного коефіцієнта тепловіддачі від стінки труби до ґрунту було використане рівняння

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{q}{t_{\text{C}} - t_{\Gamma}},$$

в якому $q$ = 87 Вт/м$^2$ знаходилось через коефіцієнт тепловіддачі від повітря (5 Вт/(м$^2$·К) та різницю температур між повітрям та стінкою труби, що вимірювались.

Якщо вважати $\alpha_{\Pi}$ = 5 Вт/(м$^2$·К), тоді з похибкою до 15…20 % (враховуючи неточність вимірювання швидкості) $\alpha_{\Gamma}$ = 54,4 Вт/(м$^2$·К).

Тепловий потік $Q = q \cdot F$ ($q$ = 87 Вт/м$^2$) має значення 133 Вт. Тоді на 1 метр труби лінійна мінімальна густина теплового потоку

$$q_{\text{l}} = 133/3{,}5 = 38\ \text{Вт/м}.$$

Для передачі теплоти від повітря в ґрунт з тепловою потужністю 1 кВт, для згаданих умов, потрібно 26 м труби діаметром 0,14 м.

Враховуючи, що відношення діаметрів активної частини ґрунту $d^{\text{A}}_{\Gamma}$ і труби менше величини 2, знайдемо товщину активного шару ґрунту, що має температуру більшу, ніж ґрунт вдалині за формулою для плоскої стінки

$$\delta = \frac{\lambda}{q} \left( t_{C1} - t_{C2} \right),$$

де $t_{C2}$ — температура ґрунту.

Розрахуємо δ для різних значень λ. Для експерименту (ґрунт вологий суглинковий з органікою) припустимо λ = 1. Максимально можливе значення $\lambda_{\text{ГР}}$ = 3 (вологий дрібний пісок). Мінімальне значення λ = 0,6 для вологої глини та 0,3 — для глини середньої вологості. Найімовірнішими товщинами активного шару ґрунту, де температура значно відрізнялася від загального масиву ґрунту, могли бути від 11 до 50 мм за час експерименту 45 хвилин (на відстані 50 мм відчувалась дуже незначна зміна температури).

**Залежність розрахованої товщини активного шару ґрунту від коефіцієнта теплопровідності ґрунту в процесі охолодження ґрунту протягом 45 хвилин**

| λ, Вт/м· К | 0,3 | 0,6 | 1 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| Товщина, мм | 5 | 11 | 18 | 54 |

## Експериментальне дослідження теплообміну між ґрунтом і одиночною трубою з вимушеною течією води в ній

### Дослідна ділянка та методика проведення експерименту

Для проведення досліду в ґрунті була розташована труба з полівінілхлориду діаметром $d_{ЗОВ}/d_{ВН}$ = 31/28 мм. Глибина закладки 1 м, а довжина труби, що контактує з ґрунтом, була 70 м. Ґрунт на глибині закладки труби — суглинок з значним вмістом глини. Для такого ґрунту теплопровідність (0,3) для середньої вологості майже не залежить від вологості. Вимірювання температур проводилися термометром з поділками 0,1 °С. Температура ґрунту на глибині закладки труби визначили вимірюванням температури тієї маси води, що була в рівновазі з температурою ґрунту протягом тижня. Вона складала 13 °С. Замірялись також температури води на вході і виході ґрунтового колектора.

### Результати досліджень

Витрати води через трубу склали 0,139 кг/с. Для густини води ρ = 1000 кг/м$^3$ швидкість води в трубі за рівнянням неподільності є 0,22 м/с. Критерій Рейнольда для води 4176 відповідає перехідному режиму, тоді

$$Nu = 0{,}12\left(\mathrm{Re}^{0{,}67} - 125\right)\mathrm{Pr}^{0{,}33}\left(\frac{\mu}{\mu_C}\right)^{0{,}14}. \qquad (3)$$

В формулі (3) число Прандтля та в'язкість знаходились за середньою температурою. Розрахунок показав, що число $Nu$ = 41,88; а значення коефіцієнта тепловіддачі від стінки труби до води, що по ній рухається, α = 859 Вт/(м$^2$·К). Вважаючи, що середній діаметр труби 0,03 м, знайдемо площу теплообміну за формулою для циліндричної поверхні. Вона буде $F$ = 7 м$^2$.

Через 40 хв. з початку досліду температура води на виході була біля 10 °С (з постійною температурою на вході 8,3 °С). Через 140 хвилин від початку дослідження (приблизно 80 хвилин подачі води) температура води на виході складала 9,7 °С. Далі, через годину, була практично та сама температура. Знайдемо кількість теплоти, що отримала вода, припускаючи $t_{ВИХ}$ = 9,5 °С,

$$Q = cm_{В}\left(t_{ВИХ} - t_{ВХ}\right); \quad Q = 4{,}187 \cdot 0{,}139\left(9{,}5 - 8{,}3\right) = 700 \text{ Вт}.$$

Отримаємо на 1 м труби $q_l$ = 700/70 = 10 Вт/м, а на 1 м$^2$ $q$ = 700/7 = 100 Вт/м$^2$.

Знайдемо умовний коефіцієнт теплопередачі в ґрунтовому теплообміннику для температур на вході і виході 8,3 та 9,5 °С, і середній температурі 8,9 °С:

$$K_{УМ} = \frac{q}{\Delta t}; \qquad K_{УМ} = 100/(13\text{-}8{,}9) = 24,4 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Якщо нехтувати термічним опором від води до стінки і термічним опором стінки, то можна оцінювати $\alpha_{ГР}$ близько до 25 Вт/(м$^2$·К). Ці дослідження є точнішими, ніж дослідження з повітрям, завдяки тому, що точно вимірювалась витрата води. Загальний термічний опір

$$R_{УМ} = 1/K_{УМ}; \quad R_{УМ} = 1/24{,}4 = 0{,}041(\text{м}^2\,\text{К})/\text{Вт}.$$

Розглядаючи результати досліджень умовних $\alpha_Г$ (для ґрунту) з течією повітря і води, бачимо, що з часом $\alpha_Г$ буде зменшуватись. Для короткого терміну охолодження повітря знайдено, що $\alpha_Г$ = 54,4 Вт/(м$^2$·К), для двогодинної роботи ґрунтового теплообмінника типу ґрунт—вода $\alpha_Г$ = 20 Вт/м$^2$ К. Для годинної роботи теплообмінника $\alpha_Г$ = 25 Вт/(м$^2$·К).

Зазначимо, що на глибині 1 м ґрунт був з більшою домішкою глини і тому λ ґрунту могло бути трохи іншим, ніж для закладки ґрунтового теплообмінника типу повітря—ґрунт у верхній частині ґрунту з більшим вмістом органіки.

Короткочасна зупинка експерименту на 66 хвилин привела до швидкого відновлення температури ґрунту біля труби і збільшення температури води. Збільшення температури води зі зупинкою її течії проходить повільніше, ніж з відновленням циркуляції, через різні значення коефіцієнтів тепловіддачі від стінки труби до води у цих випадках. Порівнюючи результати отриманих умовних коефіцієнтів теплообміну між ґрунтом і теплообмінником з розрахунками за формулами, запропонованими в [2],

бачимо, що у [2] з добовим періодом роботи (12 годин робота + 12 годин зупинки) $\alpha_{ГР}$ лежить в межах 17,6…31,9 Вт/(м$^2$·К). Зазначимо, що з формули для циліндричної стінки випливає, що чим більший діаметр теплообмінника, тим більший термічний опір ґрунту.

## Висновки

Для кількагодинного (авторські дослідження) та добового циклу роботи ґрунтового теплообмінника [2] коефіцієнти тепловіддачі $\alpha_{ГР}$ змінюються від 14 до 55 Вт/(м$^2$ К) і зростають зі зменшенням часу з товщиною активного шару ґрунту до від 0,015 м (авторські дослідження) до 0,15 м. Для річного циклу [2] з товщиною активного шару ґрунту 3 м значення $\alpha_{ГР}$ лежать в межах 5…14 Вт/(м$^2$·К). Час повернення системи в початковий стан у разі кількагодинного та добового режимів експлуатації ґрунтового колектора складає 1…2 години і для річного циклу [2] складає 18…28 діб.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щербина О. М. Геотермальна енергія та її використання / О. М. Щербина // Зелена енергетика, 2001. — № 4. — С. 14—16.

2. Hollmuller P. Utilisation des echangeurs air/sol pour le chauffage et rafraichissement des batiments/ www.Unique. Ch /cyberdocument/theses 2002 Hollmuller. Meta. Html.

3. Никифорович Є. Я. Підвищення ефективності використання грунтових теплообмінників при роботі теплових насосів за нічним тарифом на електроенергію / [Є. Я. Никифорович, І. І. Пуховий, М. К. Безродний, та ін.] // Відновлювана енергетика XXI століття : матер. IX міжн. наук. конференції, Крим, Миколаївка, (15—18 вересня 2008 р.). — Київ : ПП «Viva–принт», 2008. — 33 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Надійшла до редакції10.02.10
Рекомендована до друку 22.12.09

***Пуховий Іван Іванович*** — доцент кафедри теоретичної та промислової теплотехніки.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»