

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.6.151645

УДК 621.577.63, 551.332

І.І. Пуховий<sup>1\*</sup>, А.Є. Денисова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>2</sup>Одеський національний технічний університет, Одеса, Україна

## АНАЛІЗ ПІДГРІВАННЯ ПОВІТРЯ ВЗИМКУ В ҐРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ І У ВОДОЙМАХ ПРИ ЗАМЕРЗАННІ ВОДИ НА ЗАНУРЕНИХ ТРУБАХ

**Проблематика.** Підігрівання повітря взимку в діапазоні температур довкілля нижче  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  можливе як теплою ґрунту, так і теплою фазового переходу води в лід. Підігріте повітря зменшує витрату енергії в системах вентиляції і в теплових насосах типу повітря–вода і повітря–повітря в період пікових навантажень на системи теплопостачання, що дає змогу зменшити установлену потужність теплогенеруючого обладнання.

**Мета дослідження.** Визначення впливу швидкості (витрати) повітря на потрібну довжину труб при сталому значенні діаметра каналу з повітрям. Визначення термічних опорів і лінійної густини теплового потоку з порівнянням процесів охолодження ґрунту і кристалізації води.

**Методика реалізації.** Повітря з температурою нижче  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  пропускають через природні середовища для використання в системах вентиляції, теплових насосах і в буферних зонах будівель у період морозів. Чим нижча температура довкілля, тим більший економічний і енергетичний ефект.

**Результати дослідження.** Виконано розрахунковий аналіз впливу швидкості повітря (витрати) на потрібну довжину труб при сталому діаметрі труб, закладених у ґрунт і занурених у воду, за наявності фазового переходу води в лід. Показано, що на потрібну довжину ґрунтового теплообмінника сильно впливає режим експлуатації (постійна робота без зупинок чи робота з перервою). Для підігрівання повітря з  $-10$  до  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  залежно від швидкості повітря в ґрунтових теплообмінниках потрібна в 1,5–2 рази більша довжина труби через те, що термічний опір ґрунту вищий, ніж у льоду, і товщина льоду менша, ніж товщина охолодженого ґрунту, завдяки високому значенню теплоти кристалізації води. За великих швидкостей лінійна густина теплового потоку доходить до  $40\text{--}60\text{ В/м}^2$ .

**Висновки.** При розміщенні каналу у вигляді труби в ґрунті або у воді можна підігріти морозне повітря в період пікових навантажень на системи теплопостачання, що дає змогу зменшити установлену потужність теплогенеруючого обладнання. У технології замерзання води при підігріванні повітря є значні переваги, особливо при експлуатації в річному режимі.

**Ключові слова:** тепловий потік; теплообмінник; системи вентиляції; системи теплопостачання; термічний опір; лінійна густина; підігрівання повітря; теплота кристалізації; теплогенеруюче обладнання.

### Вступ

Використання відновлюваної енергії є важливим для зменшення викидів вуглекислого газу та економії традиційної енергії. Взимку країни із холодними зимами мають, порівняно з безморозними зонами, додатковий природний ресурс – теплоту кристалізації води [1–5]. Цей ресурс стає доступним якраз у період найбільшої потреби в енергії на опалення і вентиляцію. Оскільки розвинені країни знаходяться переважно в зонах із помірним кліматом, то є досить багато досліджень процесів теплопередачі в ґрунтових колекторах, наприклад [6]. Процеси в каналах, занурених у ґрунт та у воду, дещо схожі, але в останньому випадку вони ускладнюються фазовим переходом води в лід, під час якого виділяється  $334\text{ кДж}$  теплоти на  $1\text{ кг}$  води. Конструктивне оформлення зануреного у воду каналу описано в патенті [5].

Відомі дослідження замерзання води в циліндричних ємностях при їх розміщенні в холодному повітрі та поперечному обтіканні вітром до  $5\text{ м/с}$  [7]. Знайдено, що найбільший термічний опір має тепловіддача в повітря (до  $60\%$  від повного термічного опору). Швидкість замерзання льоду по радіусу  $M$  становить близько  $0,25\text{--}0,33\text{ мм/год}$  на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У середині утворюється льодяна труба з діаметром, що зменшується з часом. У випадку руху повітря в трубі на останній утворюється льодяна труба, зовнішній діаметр якої збільшується, що впливає на показники теплопередачі.

### Постановка задачі

Метою роботи є визначення впливу швидкості (витрати) повітря на потрібну довжину труб при сталому значенні діаметра каналу з повітрям; визначення термічних опорів і лінійної

\* corresponding author: ivan@puh.com.ua

густини теплового потоку з порівнянням процесів охолодження ґрунту і кристалізації води.

### Розрахунки і їх аналіз

Для порівняння ґрунтових (ГТО) і льодяних теплообмінників (ЛТО) як ґрунт було вибрано вологий пісок з такою ж теплопровідністю, як і для льоду (2,2 Вт/(м·К)). Це найвище значення теплопровідності для ґрунту.

Розрахунки проведені для випадку підігрівання повітря з  $-10$  до  $-3$  °С. У розрахунках ГТО при невідомому складі ґрунту використана ідея [6] введення умовного коефіцієнта теплообміну, який залежить від часу безперервної роботи і часу перерв між роботою. При зупинках на день або ніч покладалося значення коефіцієнта тепловіддачі з ґрунтом  $\alpha_{\text{ГР}} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) – добовий режим, а річний режим (опалювальний сезон) –  $\alpha_{\text{ГР}} = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [6].

За таких умов визначалася довжина труби діаметром 140 мм (рекомендується з точки зору гідравлічного опору і теплообміну) [6]. Визначено вплив швидкості повітря з урахуванням факту зростання масової витрати зі збільшенням швидкості.

Процес теплопередачі через циліндричний ґрунтовий охолоджений масив, який назовемо ґрунтовою трубою, збільшує її діаметр при роботі і характеризується такими коефіцієнтами:  $\alpha_{\text{п}}$  – коефіцієнт тепловіддачі від каналу до повітря;  $\alpha_{\text{ГР}}$  – умовний коефіцієнт тепловіддачі від ґрунту до стінки каналу.

Термічним опором стінки закладеного каналу нехтуємо.

Проведемо розрахунки за різних значень швидкості повітря, змінюючи її в межах 2–10 м/с залежно від внутрішнього діаметра труби, та за різних значень умовного коефіцієнта тепловіддачі з ґрунтом.

Теплофізичні параметри теплоносія – повітря – покладались при  $-6,5$  °С. Відзначимо, що за однакових швидкостей число Рейнольдса у холодного повітря є значно вищим через зменшення кінематичної в'язкості.

Режим течії при вимушеній конвекції вже за швидкостей, більших 1,5 м/с, є турбулентним:  $Re > 10000$ .

Коефіцієнт тепловіддачі для повітря залежить лише від числа Рейнольдса.

Для знаходження необхідної довжини труб і лінійної густини теплового потоку без знання

характеристик ґрунту скористаємось спрощеною формулою, нехтуючи термічним опором стінки каналу:

$$K_{\text{ум}} = \frac{\alpha_{\text{п}} \cdot \alpha_{\text{ГР}}}{\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{ГР}}}.$$

Площа поперечного перерізу труби 0,015 м<sup>2</sup>. Знайшовши масову витрату повітря  $m$ , визначимо тепловий потік за рівнянням

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t. \quad (1)$$

З іншого боку, тепловий потік можна визначити за рівнянням теплопередачі:

$$Q = K_{\text{ум}} \cdot F (t_{\text{ГР}} - \bar{t}_{\text{п}}),$$

звідки знайдемо площу теплообміну і довжину закладеної труби (каналу).

Лінійна густина теплового потоку становить

$$q_l = \frac{Q}{l_{\text{тр}}}.$$

Використовуючи наведені залежності, проведемо розрахунок процесу теплопередачі в горизонтальній трубі, розміщеній у ґрунті, при зміні швидкості в діапазоні 2–10 м/с (витрата від 0,02 до 0,1 м<sup>3</sup>/с) та за різних умовних коефіцієнтів тепловіддачі з ґрунтом. Температура ґрунту за межами активного шару ґрунту покладається 5 °С. Також визначимо довжину труби, необхідну для підігріву зовнішнього повітря з  $-10$  до  $-3$  °С. На основі результатів розрахунків, відповідно, побудуємо графіки залежності довжини труби, в якій необхідно нагріти повітря на 7 °С, від швидкості повітря, яке циркулює всередині каналу (рис. 1), та залежності лінійної густини теплового потоку від швидкості при добовому та річному режимах роботи (рис. 2).

Як видно з графіка на рис. 1, для того, щоб підігріти зовнішнє повітря у зимовий період часу від  $-10$  до  $-3$  °С у каналі, розміщеному в ґрунті, за більших швидкостей подачі повітря, необхідно мати канал значно більшої довжини. При річному режимі (швидкість повітря 10 м/с) необхідна довжина труби майже в 3 рази більша, ніж при швидкості 2 м/с. Відзначимо, що в добовому режимі з зупинками вплив швидкості (витрати) повітря на потрібну довжину каналу значно менший через кращий теплообмін із ґрунтом. Якщо при 2 м/с на 1 градус підігріву потрібно 1,5–3 м труби, то

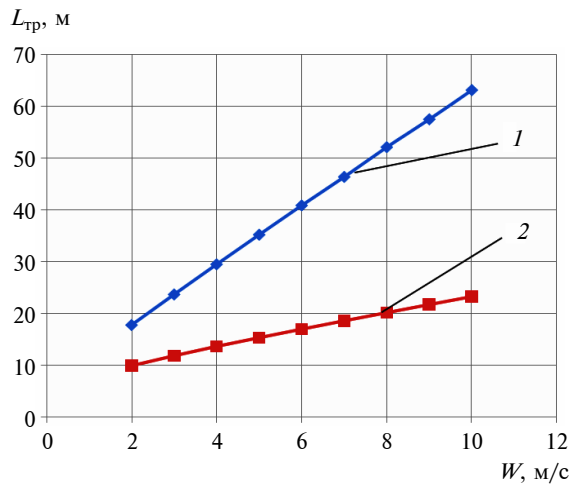


Рис. 1. Залежність довжини труби, яка потрібна, від швидкості повітря в каналі: 1 – річний режим; 2 – добовий режим

при 6 м/с – 3–7 м залежно від способу використання каналу. Використання річного режиму нагрівання повітря в трубі є більш капіталоемним.

На рис. 2 наведено залежність лінійної густини теплового потоку від швидкості повітря в каналі при різних режимах.

Аналізуючи наведену графічну залежність, бачимо, що при добовому режимі нагрівання повітря в каналі в міру збільшення швидкості інтенсивніше зростає густина теплового потоку через більше значення  $\alpha_{\Gamma P} = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

Значення умовного коефіцієнта тепловіддачі з ґрунтом залежно від складу конкретного ґрунту, його теплопровідності з урахуванням вологості та, задавшись радіусом активного шару, можна розрахувати за такою формулою:

$$\alpha_{\Gamma P} = \frac{\lambda_{\Gamma}}{R_{\Gamma P} \cdot \ln \frac{R_{\Gamma P}}{R_{\Gamma P}}}, \quad (2)$$

де  $\lambda_{\Gamma}$  – теплопровідність ґрунту (для піщаного ґрунту при вологості  $0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$   $\lambda_{\Gamma} = 2,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ );  $R_{\Gamma P}$  – внутрішній радіус труби;  $R_{\Gamma P}$  – радіус активного шару ґрунту (труби)

Використовуючи наведені вище залежності (1) і (2), проведемо розрахунок процесу теплопередачі в трубі при зміні зовнішнього діаметра умовного циліндра активного шару ґрунту, який збільшується з часом. При визначенні лінійного коефіцієнта теплопередачі для трубчатих теплообмінників скористаємось такою формулою:

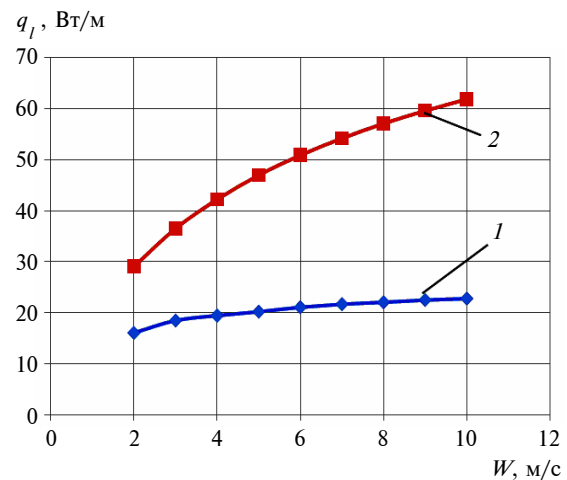


Рис. 2. Залежність лінійної густини теплового потоку від швидкості повітря в каналі: 1 – річний режим; 2 – добовий режим

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_p \pi d_{вн}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{ст}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_{вн}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{\Gamma}} \cdot \ln \frac{d'}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{\Gamma P} \pi d_3}}, \quad (3)$$

де індекси: п – повітря, вн – внутрішній, ст – стінка труби, з – зовнішній,  $\Gamma$  – ґрунт;  $d'$  – зростаючий протягом часу зовнішній діаметр охолодженої “труби” ґрунту.

Перший член знаменника характеризує опір “стінка труби–повітря”, другий – опір стінки труби, третій – опір льодяної труби (при розміщенні труби в ґрунті його значення дорівнює нулю) і четвертий – опір охолодженої “труби” ґрунту з умовним коефіцієнтом тепловіддачі або опір тепловіддачі від води до льодяної труби.

Розрахунки проводимо за зовнішніх діаметрів ґрунту 250, 500, 750 і 1250 мм, причому  $\alpha_{\Gamma P}$  є змінними і зростаючими при зменшенні діаметра активного шару ґрунту, який охолоджується, а також при його теплопровідності. Відповідно, покладемо  $\alpha_{\Gamma P} = 54,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ,  $\alpha_{\Gamma P} = 24,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ,  $\alpha_{\Gamma P} = 18,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ ,  $\alpha_{\Gamma P} = 14,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

Ці розрахунки показують, що за діаметрів до 500 мм ми знаходимося у режимах погодинної та добової роботи, а при річному режимі діаметр активного шару ґрунту буде більшим, досягаючи 2,5–3 м. На рис. 3 і 4 наведені залежності термічного опору від швидкості повітря в трубі, розміщеній у ґрунті, та лінійної гус-

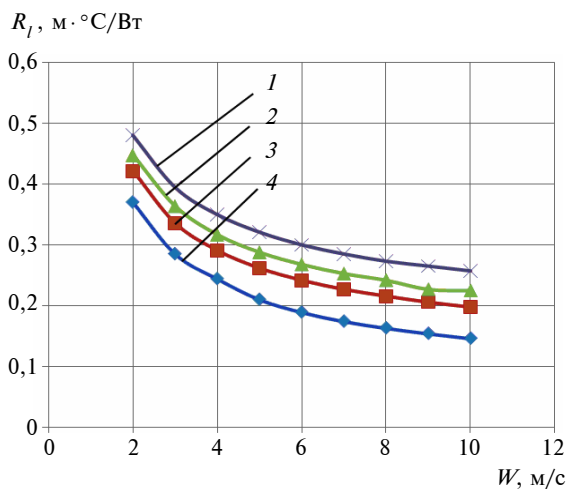


Рис. 3. Повний термічний опорний опір залежно від швидкості повітря за різних зовнішніх діаметрів активного шару ґрунту: 1 – 250 мм; 2 – 750 мм; 3 – 750 мм; 4 – 250 мм

тини теплового потоку від швидкості за різних значень зовнішнього діаметра активного шару ґрунту  $d'$ .

Видно (рис. 3), що за більших значень  $d'$ , тобто зі збільшенням активного шару ґрунту, повний термічний опір знижується зі зростанням  $W$  менш інтенсивно через зростання опору ґрунту. Аналізуючи графік на рис. 4, бачимо, що лінійна густина теплового потоку  $q_l$  з підвищенням швидкості в каналі за менших зовнішніх діаметрів (почасовий і добовий режими) зростає інтенсивніше і досягає 50 Вт/м, як і при русі рідин у ГТО теплових насосів діаметром близько 40 мм.

#### Підігрівання повітря при замерзанні води на трубі у водоймі

Вихідними даними для розрахунку теплообміну є горизонтальна труба, яка розміщена у водоймі нижче шару криги з внутрішнім діаметром 140 мм і товщиною 5 мм. Температура води 0,1 °С. Проведемо розрахунок на основі експериментальних даних по товщині замерзлого льоду за годину за середньої різниці температур 6,5 °С з метою визначити, на скільки градусів можна підігріти холодне повітря, яке подають у трубу довжиною 1 м з різною швидкістю. Повітря підігрівається в трубі від –10 до –3 °С.

Позначимо:  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до повітря;  $\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від води до льоду;  $\delta_l$  – товщина намерзлого шару льоду.

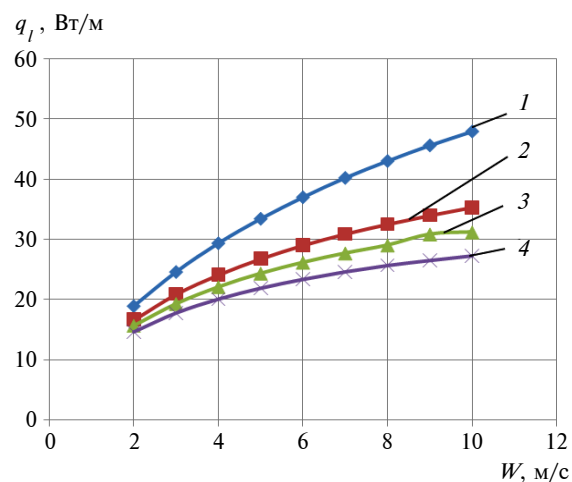


Рис. 4. Графік залежності лінійної густини теплового потоку в ґрунтовому теплообміннику від швидкості повітря за різних зовнішніх діаметрів ґрунту: 1 – 250 мм; 2 – 500 мм; 3 – 750 мм; 4 – 1250 мм

Швидкість замерзання води залежить від температури повітря та інших факторів. Проведені нами дослідження показали, що при вільній конвекції повітря горизонтальна поверхня води замерзає зі швидкістю 1 мм/год за товщини льоду до 50 мм і температури –6 °С. Це становить  $M = 0,17$  мм/(°С·год), що нижче, ніж при поперечному обтіканні вітром циліндричних ємностей з водою, де  $M = 0,25$ – $0,33$  мм/(°С·год). Розглядаємо випадок, коли швидкість замерзання становить 1 мм/год при 6,5 °С (гірший варіант). Тепловий потік становить

$$Q = m_l \cdot \lambda, \quad (4)$$

де  $\lambda = 334$  кДж/кг – теплота кристалізації води.

Зростання маси льоду на 1 м труби становить 0,012 кг/с. Тепловий потік на 1 м труби за формулою (4) становить 40 Вт. З іншого боку, тепловий потік можна визначити за рівнянням (1). Визначимо, на скільки градусів максимум можна підігріти повітря в каналі довжиною 1 м, розміщеному у водоймі. З рівняння теплового балансу (1) маємо

$$\Delta t_{\text{пов}} = \frac{Q}{c_{\text{пов}} \cdot m_{\text{пов}}}.$$

Підігріти холодне повітря, яке циркулює в трубі довжиною 1 м, можливо лише на частки градуса (рис. 5). Швидкість, що залежить від витрати, значно впливає на довжину труби до 5 м/с. Користуючись графіком, що показує різницю температур, можливо розрахувати мінімальну довжину каналу, яка потрібна, щоб підігріти повітря на 7 °С – від 7 до 35 м.

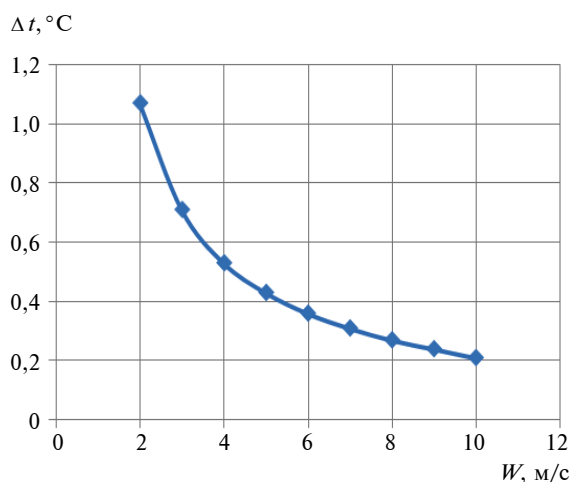


Рис. 5. Різниці температур, на які можна підігріти холодне повітря в каналі льодяного теплообмінника довжиною 1 м, зануреному у воду, від швидкості повітря за його середньої температури  $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Щоб порівняти процеси теплопередачі в трубі, розміщеній у водоймі, з процесом теплопередачі в трубі, розміщеній у ґрунті, необхідно виконати розрахунок залежно від зміни товщини льоду, тобто від збільшення зовнішнього діаметра льодяної труби  $d'$ . Діаметри покладемо такі ж самі, як і для труби, розміщеної в ґрунті, але спочатку з'ясуємо кліматичні умови, що можуть привести до таких товщин льоду (50, 175, 300 і 550 мм).

Як відомо, північніше лінії Кишинів–Грозний можлива заготівля льоду з зими на літо. У Північній і Східній Україні нині є близько 60–80 днів з низькою температурою повітря, з

них близько 15–20 з температурою вночі менше  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що при тривалості ночі 15 год максимально становить 300 год, тому за холодні зими на трубі може намерзати до 250–300 мм льоду (зовнішній діаметр льодяної труби буде близько 700 мм). Більші діаметри можуть бути у північних країнах і в Антарктиді. При зупинках у подачі повітря під час відлиг лід практично не розтає в холодній воді, що виключає розгляд добового і річного режимів.

З використанням наведених вище залежностей (1) і (3) було виконано розрахунки процесу теплопередачі в трубі залежно від заданого діаметра намерзлого льоду і швидкості повітря в каналі при зміні коефіцієнтів тепловіддачі від повітря до каналу від 7 до  $26\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . У формулі (3) замість умовного коефіцієнта тепловіддачі (останній член знаменника) покладалося значення  $\alpha = 100\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  при кристалізації води, що впливає з експериментальних досліджень.

Залежність термічного опору від швидкості повітря в трубі, розміщеній у воді, та залежність лінійної густини теплового потоку від швидкості за різних значень зовнішнього діаметра труби показані відповідно на рис. 6 і 7.

На рис. 6 зображений графік залежності термічного опору циліндричної стінки від швидкості повітря в каналі за різних діаметрів льодяної оболонки на трубі.

Із графіка видно, що за більших значень зовнішнього діаметра термічний опір з ростом швидкості повітря в каналі зменшується інтен-

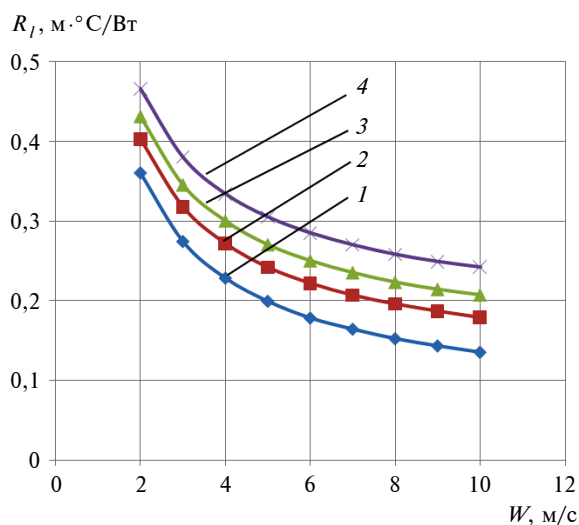


Рис. 6. Графік залежності термічного опору ґрунтового теплообмінника від швидкості повітря в каналі за різних зовнішніх діаметрів льодяної труби: 1 – 250 мм; 2 – 500 мм; 3 – 750 мм; 4 – 1250 мм

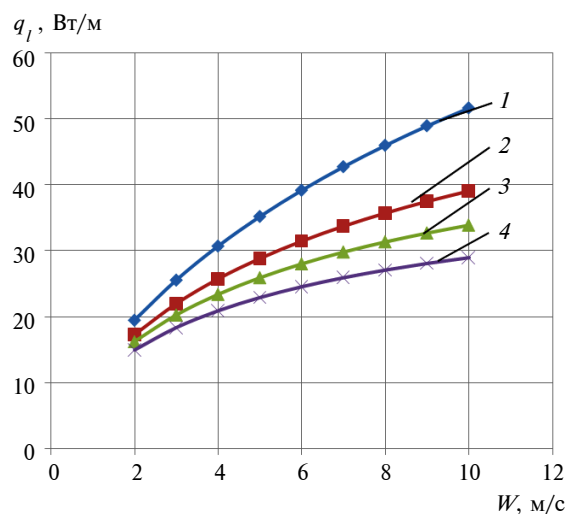


Рис. 7. Залежність лінійної густини теплового потоку від швидкості повітря за різних зовнішніх діаметрів льодяної труби: 1 – 250 мм; 2 – 500 мм; 3 – 750 мм; 4 – 1250 мм

сивніше. Це своєю чергою призводить до погіршення процесу теплопередачі. З розрахунків видно (рис. 7), що лінійна густина теплового потоку за діаметра льоду до 500 мм є більшою 50 Вт/м, що перевищує отримане вище значення 40 Вт/м за відомою швидкістю намерзання льоду  $M = 0,17$  кг/(К·год). За великих швидкостей повітря значення  $M$  слід оцінювати близько 0,2–0,25 мм/(°С·год), як у [7], де  $M$  знайдені за вимушеної конвекції (вітер).

### Порівняння результатів для ґрунту і льоду

Бачимо, що лінійна густина теплового потоку залежить від швидкості подібним чином для розглянутих діаметрів охолодженого ґрунту чи утвореного льоду, адже збільшується коефіцієнт теплопередачі за рахунок зменшення термічного опору від повітря. Але при річному режимі експлуатації в ґрунті збільшення швидкості практично не впливає на загальний термічний опір через те, що термічний опір ґрунту стає більшим, ніж для повітря (див. рис. 1). Діаметр намороженого за рік льоду завжди в 3–4 рази є меншим діаметра охолодженого масиву ґрунту через велику теплоту кристалізації води порівняно з теплоємністю ґрунту. Зауважимо, що для розрахунків з ґрунтом поклалися найкращі показники теплопровідності 2,2 Вт/(м·К), такі як у льоду при вологості піску близько 0,15 м<sup>3</sup> води на 1 м<sup>3</sup> піску. У лесу, глини і торфу теплопровідність становить відповідно близько 1; 0,2, та 0,1 Вт/(м·К), тобто у 2–10 разів менша. Тому для таких ґрунтів лінійна густина теплового потоку буде в 1,5–2 рази меншою порівняно із замерзанням води

на стінках каналу. У формулі (3) останній член у знаменнику зменшується як зі зростанням  $d$ , так і зі збільшенням  $\alpha$ . Також відзначимо, що ґрунт поступово охолоджується зовнішнім повітрям з атмосфери, що зменшує тепловий потік, а температура води є незмінною (близько 0,1–1 °С). Труби ЛТО можна виготовити з льоду і зробити їх оребреними з внутрішньої сторони [8], що знижує їх необхідну довжину на 20–30 %.

### Висновки

При розміщенні каналу у вигляді труби в ґрунті або у воді можна підігріти морозне повітря в період пікових навантажень на системи теплостачання, що дає змогу зменшити установлену потужність теплогенеруючого обладнання.

Збільшення швидкості викликає одночасно зростання витрати повітря, і при цьому лінійна густина теплового потоку зростає як для ґрунту, так і для льоду.

При добовому використанні ГТО збільшення витрати компенсується зростанням інтенсивності теплообміну з повітрям, і необхідна довжина каналу збільшується слабо.

У технології замерзання води при підігріванні повітря є значні переваги, особливо при експлуатації в річному режимі.

Рух повітря з від'ємними температурами в більшості випадків є турбулентним через зменшення його в'язкості у цих умовах.

Використання труб діаметром від 0,1 до 0,14–0,15 м незначно змінить отримані результати, крім необхідних довжин труб.

### References

- [1] I.I. Pukhovoy, "Pukhovoy's building heating system", RU Patent 1388665, June 21, 1993.
- [2] I.I. Pukhovoy, "Building heating system without heat pump using natural cold water", *Promyshlennaya Teplotekhnika*, no. 1-3, pp. 57–61, 1992.
- [3] I.I. Pukhovoy, "Space heating without a heat pump and utilizing naturally-cold water", *Heat Transfer Res.*, vol. 26, no. 4, pp. 572–575, 1993.
- [4] I.I. Pukhovoy *et al.*, "Analysis of heat supply schemes with two heat pumps and the use of ventilation emissions and air heated by the heat of water crystallization", *Vidnovliuvana Energetyka*, no. 4, pp. 28–35, 2014.
- [5] P. Hollmuller. *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et rafraichissement des bâtiments* [Online]. Available: <http://www.unige.ch/cyberdocuments/theses2002/HollmullerP/these.html>. DOI: 10.13097/archive-ouverte/unige:147
- [6] I.I. Pukhovoy, "Freezing of water in cylindrical plastic containers and heat flows obtained for heating the air with the heat of crystallization", *Vidnovliuvana Energetyka*, no. 4, pp. 43–46, 2007.
- [7] I.I. Pukhovoy *et al.*, "Heat of crystallization of water for heating of air in channels with ice edges", in *Proc. X Int. Conf. Modern Problems of Scientific Support of Power Engineering*, Kyiv, Ukraine, April 17–20, 2012, p. 186.
- [8] I.I. Pukhovoy *et al.*, "Method of heating and cooling the air by natural environment", UA Patent 103185, Dec. 10, 2015.

И.И. Пуховой, А.Е. Денисова

#### АНАЛИЗ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА ЗИМОЙ В ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ И В ВОДОЕМАХ ПРИ ЗАМЕРЗАНИИ ВОДЫ НА ПОГРУЖЕННЫХ ТРУБАХ

**Проблематика.** Подогрев воздуха зимой в диапазоне температур окружающей среды ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  возможен как теплотой грунта, так и теплотой фазового перехода воды в лед. Подогретый воздух уменьшает расход энергии в системах вентиляции и в тепловых насосах типа воздух–вода и воздух–воздух в период пиковых нагрузок на систему отопления, что позволяет снизить установленную мощность теплогенерирующего оборудования.

**Цель исследования.** Определение влияния скорости (расхода) воздуха на нужную длину труб при постоянном значении диаметра канала с воздухом. Определение термических сопротивлений и линейной плотности теплового потока с сравнением процессов охлаждения грунта и кристаллизации воды.

**Методика реализации.** Воздух с температурой ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  пропускают через элементы природной среды для использования в системах вентиляции, тепловых насосах и в буферных зонах зданий в период морозов. Чем ниже температура атмосферного воздуха, тем больший экономический и энергетический эффект.

**Результаты исследования.** Выполнен расчетный анализ влияния скорости воздуха (расхода) на необходимую длину труб, заложенных в грунт и погруженных в воду при наличии фазового перехода воды в лед. Показано, что на необходимую длину грунтового теплообменника сильно влияет режим эксплуатации (постоянная работа без остановок или работа с перерывами). Для нагревания воздуха от  $-10$  до  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от скорости воздуха в грунтовых теплообменниках необходима в 1,5–2 раза большая длина труб из-за того, что термическое сопротивление грунта больше, чем у льда, и толщина льда ниже, чем толщина охлажденного грунта, в силу высокого значения теплоты кристаллизации воды. При больших скоростях линейная плотность теплового потока доходит до  $40\text{--}60\text{ В/м}^2$ .

**Выводы.** При размещении канала в виде трубы в грунте или в воде можно подогреть морозный воздух в период пиковых нагрузок на системы теплоснабжения, что позволяет уменьшить установленную мощность теплогенерирующего оборудования. В технологии замерзания воды при подогреве воздуха имеются значительные преимущества, особенно при эксплуатации в годовом режиме.

**Ключевые слова:** тепловой поток; теплообменник; системы вентиляции; системы теплоснабжения; термическое сопротивление; линейная плотность; подогрев воздуха; теплота кристаллизации; теплогенерирующее оборудование.

I.I. Pukhovoy, A.Ie. Denisova

#### ANALYSIS OF AIR HEATING IN WINTER IN UNDERGROUND HEAT EXCHANGERS AND IN WATER BODIES DURING WATER FREEZING ON SUBMERGED PIPES

**Background.** Air heating in winter in the ambient temperatures range below  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  is possible both by the heat of the soil and by the heat of the phase transition of water to ice. Heated air reduces energy consumption in ventilation systems and heat pumps such as air–water and air–air during peak loads on the heating system, which reduces the installed capacity of the heat-generating equipment.

**Objective.** The aim of the paper is determination of the influence of air velocity (flow rate) on the desired length of pipes at a constant value of the diameter of the channel with air, as well as determination of thermal resistances and linear heat flux density with a comparison of the processes of soil cooling and water crystallization.

**Methods.** Air with a temperature below  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  is passed through elements of the natural environment for use in ventilation systems, heat pumps, and in the buffer zones of buildings during the frost period. The lower the air temperature, the greater the economic and energy efficiency.

**Results.** The calculated analysis of the effect of air velocity (flow rate) on the required length of pipes embedded in the ground and submerged in water subject to a phase transition of water to ice was carried out. It is shown that the required length of the ground heat exchanger is strongly influenced by the mode of operation (continuous operation without interruptions or operation with interruptions). To heat the air from  $-10$  to  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , depending on the air speed in the ground heat exchangers, the needed length of the pipes should be 1.5–2 times longer because the thermal resistance of the soil is greater than that of ice and the ice thickness is lower than that of the cooled soil, due to the high heat value of water crystallization. At high speeds, the linear density of the heat flux reaches  $40\text{--}60\text{ W/m}^2$ .

**Conclusions.** When placing a channel in the form of a pipe in the ground or in water, it is possible to pre-heat the frosty air during peak loads on heating systems, which makes it possible to reduce the installed power of the heat-generating equipment. The technology of water freezing during air heating has significant advantages, especially when operating in annual mode.

**Keywords:** heat flow; heat exchanger; ventilation systems; heat supply systems; thermal resistance; linear density; air heating; heat of crystallization; heat generating equipment.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
26 грудня 2017 року

Прийнята до публікації  
6 грудня 2018 року