

## АНАЛІТИЧНЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ПОШКОДЖЕНОЇ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТРУБОПРОВОДІВ

**Вступ.** Однією з характерних проблем у системах теплопостачання України є визначення та прогнозування втрат теплової енергії при транспортуванні теплоносія. Більшість трубопроводів теплових мереж та їх ізоляція у багатьох населених пунктах України пошкоджена (див. рис.1). Довжина ділянок теплотрас і магістралей великого діаметра є значною і може досягати 10 км і більше. Без встановлення приладів обліку теплової енергії на всіх джерелах та у всіх споживачів (тобто будівель) без винятку визначити та прогнозувати реальні теплові втрати у тепловій мережі є складною задачею. Ця задача є також актуальною для систем енергоменеджменту систем теплопостачання, підприємств енергетики та промисловості.

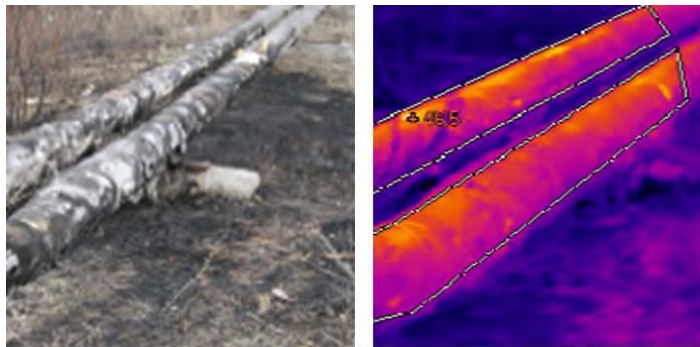


Рисунок 1 - Фактичний стан ізоляції трубопроводів теплотраси та термограма

**Метою даної роботи** є розробка методики визначення теплових втрат трубопроводами з урахуванням пошкодження їх ізоляції та розподілу характерних пошкоджень за довжиною. Характер пошкодження теплової ізоляції можна визначити під час проведення натурних обстежень трубопроводів (особливо теплотрас, прокладених на свіжому повітрі). Отже можна побудувати геометричну модель ділянки з характерним для цієї мережі ізоляції. Для розв'язання задачі проводиться окреме математичне моделювання температурного стану ділянки пошкодженого ізоляційного шару з визначенням теплового потоку через нього. Вирішення задачі запропоновано зробити методом аналітичного розв'язання диференціального рівняння теплопровідності з граничними умовами третього роду. Далі знаходяться коефіцієнти збільшення теплового потоку по відношенню до вихідної непошкодженої ділянки. При рівномірному розподілі характерних пошкоджень за загальною довжиною трубопроводу знаючи межі впливу пошкодження, частку пошкодження ізоляції та кількість пошкоджень на трубопроводі можна визначити реальний тепловий потік із зовнішньої поверхні трубопроводів у т.ч. та коефіцієнт збільшення теплових втрат на ділянці теплотраси по відношенню до тих, що визначені нормативними документами в залежності від року побудови.

Виходячи з вищевикладеного, основні завдання цієї роботи: аналітичне розв'язання математичної моделі з метою визначення фактичних теплових втрат характерних пошкоджених ділянок. Далі математичне моделювання теплового стану для виявлення характеристик списку характерних ушкоджень ізоляції (теплові потоки та коефіцієнти їх збільшення, зони впливу ушкодження) для різних типорозмірів труб. Ці дані будуть використовуватися для визначення, прогнозування та експертної оцінки теплових втрат ділянок теплотрас, що зазнали натурального обстеження та огляду.

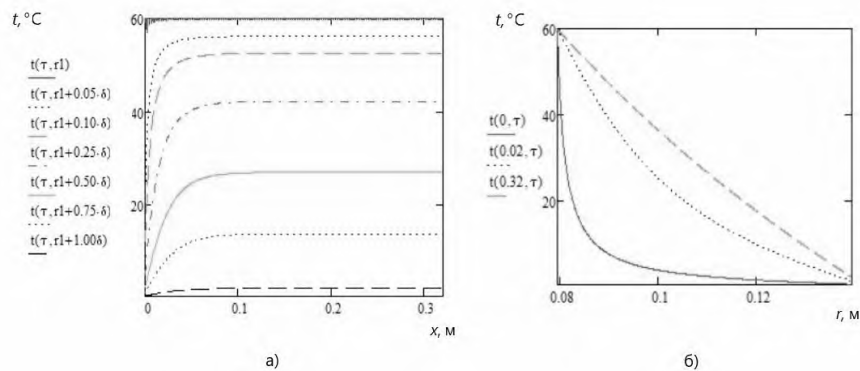
Запропоновано рішення шукати аналітичним шляхом у вигляді суми частинних аналітичних рішень [1] із урахуванням граничних умов 3 роду:

$$v = \sum_{k=1}^n a_k \cdot v_k, \quad v_k = \left( c_k \cdot I_0\left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot r\right) + K_0\left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot r\right) \right) \cdot \left( \sin\left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot x\right) + b_k \cdot \cos\left(\frac{k \cdot \pi}{l} \cdot x\right) \right), \quad (1)$$

де  $k$  – поточний індекс (ціле позитивне число);  $n$  – кількість частинних рішень (тобто членів нескінченного ряду, що визначається збіжністю);  $a_k$  – ваговий коефіцієнт рішення;  $b_k$  та  $c_k$  – коефіцієнти, що виходять з граничних умов (4) та (2);  $I_0$  та  $K_0$  – модифіковані функції Бесселя (першого роду) та Неймана (другого роду, або Макдональда), тобто від уявного аргументу та нульового порядку [2, 3];  $l$  – довжина ділянки розкладання рішення.

Щоб отримати вагові коефіцієнти  $a_k$  використовується неоднорідна гранична умова теплообміну усередині труби та запропоновано розкладання її правої частини до ряду Фур'є.

На рис. 2 наведено приклад розв'язання задачі знаходження поля температур для ділянки трубопроводу  $\varnothing 159$  мм та товщиною шару ізоляції  $\delta=60$  мм. (на довжині від вільної ділянки). Температура оточуючого повітря  $0,2^\circ\text{C}$ , теплоносія –  $60^\circ\text{C}$ . Як видно із рис. 2 поле температур у зоні ушкодження неоднорідне. Вплив пошкодження поширюється на довжину  $\approx 0,32$  м від ушкодження. Поза цією довжиною поле температур є одномірним і можна вважати теплопередачу як для неушкодженої ізоляції. Подібні дослідження були проведені за різних граничних умов та інших діаметрів трубопроводу.



а) - по довжині труби на різних радіусах; б) – за радіусом на різній довжині  
Рисунок 2 - Приклад поля температур шару ізоляції у розрізі пошкодженої ділянки

Проведені експериментальні та чисельні дослідження методом кінцевих різниць в комбінації з методом прогонки змінних напрямлень [4] для аналогічних моделей підтвердили збіг аналітичного рішення запропонованої моделі та кінцеворізницевої моделі [5] у межах допустимої погрішності.

Розроблені математичні моделі та методи дозволяють оцінити та прогнозувати реальні теплові втрати через ізоляцію трубопроводів при передачі теплоносія з урахуванням фактичного стану ізоляції під час експлуатації трубопроводів теплових мереж. Їх досить легко використовувати для інших умов роботи мережі, дослідити вплив найвагоміших факторів на теплові втрати, а також для вибору раціональних параметрів роботи теплової мережі та нормування теплових втрат.

#### Список використаних джерел:

1. Корн Г. Справочник по математике/Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И. Г. Арамановича. – М.: Наука, 1978.–832 с.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - изд.13-е.-М. : Наука, 1986. - 544 с.
3. И.С. Градштейн, И.М.Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. - изд. 4-е перераб. - М. : Физматгиз, 1963. - 1100 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем / Самарский А. А. – М.: Наука, 1989. – 616 с.
5. Підкопай В. М. Математичне моделювання та ідентифікація фактичних теплових втрат через пошкоджену ізоляцію трубопроводів теплотрас / В. М. Підкопай, А. М. Ганжа, Н. А. Марченко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип. : Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2014.–№ 12 (1055).–С. 83-89.