

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПРИВАРЮВАННЯ ПАТРУБКА ДО ДІЮЧОГО ТРУБОПРОВОДУ

В.Б. Запхляк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422),
e-mail: public@nung.edu.ua

Безвогневе врізання в трубопровід є одним із видів робіт під час ремонту діючих трубопроводів. Даний метод врізання супроводжується приварюванням патрубків-відводів до діючого трубопроводу. Виведено рівняння теплопроводності безмежної тонкої пластини з рухомим джерелом тепла, що рухається по колу.

Ключові слова: труба, безвогневе врізання, температурне поле

Врезка в трубопровод является одним из видов работ при ремонте действующих трубопроводов. Данный метод врезки сопровождается привариванием патрубка-отвода к действующему трубопроводу. Выведено уравнение теплопроводности безграничной тонкой пластины с подвижным источником тепла, движущимся по кругу.

Ключевые слова: труба, горячая врезка, температурное поле

Cutting in a pipeline is one types of works at repair of operating pipelines. This method of cutting in is accompanied by welding on of the union coupling-taking to the operating pipeline. Equalization of heat conductivity of boundless lamina is shown out with the mobile source of heat, which moves on a circle.

Keywords: pipe, hot tapping, temperature field

Завдяки своєму географічному положенню Україна є основним транзитером нафти та газу до країн Європи. Трубопровідний транспорт України на сьогоднішній день є одним з найрозвинутіших в світі і забезпечує постачання енергоресурсів як споживачам України, так і виконання контрактних зобов'язань з їх транзиту до країн Європи. Водночас технічний стан та ефективність функціонування трубопровідної системи, основні потужності якої було створено у 70–80-х роках минулого століття, не відповідають сучасним вимогам, тому для забезпечення надійного її функціонування необхідно на відповідному рівні проводити обслуговування лінійної частини магістральних трубопроводів та своєчасно виконувати її ремонт.

На певних етапах проведення обслуговування і ремонту трубопровідних систем виникає необхідність у застосуванні безвогневого врізання в діючі трубопроводи, зокрема: для під'єднання камер прийому та пуску очисних поршнів та під час ремонту трубопроводу із повною заміною тіла труби без зупинки транспортування продукту. Також безвогневе врізання ефективно застосовується з метою під'єднання трубопроводів-відводів у процесі розвитку трубопровідних систем.

Безвогневе врізання в діючий трубопровід, як правило, супроводжується приварюванням патрубка до стінки діючого трубопроводу. Даний процес є надзвичайно небезпечним, оскільки відбувається нагрівання стінки трубопроводу, що перебуває під тиском, до високих температур, що може призвести до його руйнування. Тому виникає необхідність дослідити формування температурного поля в стінці трубопроводу під дією рухомої зварювальної дуги як джерела тепла.

В роботі [1] виведено диференціальне рівняння (1), розв'язавши яке, можна встановити формування нестационарного температурного поля в стінці трубопроводу, обумовленого коловим рухом зварювальної дуги, як джерела тепла.

$$\Delta T - \chi^2(T - t_c) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda r} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \omega \tau). \quad (1)$$

В поставленій задачі розглядається тонка безмежна ізотропна пластинка, в якій по колу рухається лінійне джерело тепла. Для такої пластинки, як це було вказано раніше, маємо таке диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} - \chi^2 T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda r} \delta(r - r_0) \delta(\varphi - \omega \tau). \quad (2)$$

Додаємо до рівняння (1) початкову і граничну умови:

$$T|_{\tau=0} = 0, T|_{r=\infty} = 0, \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=\infty} = 0. \quad (3)$$

Задачу (2), (3) розв'язуємо, користуючись інтегральними перетвореннями. По змінній φ застосовуємо інтегральне перетворення Фур'є [2]:

$$\bar{T} = \int_c^{2\pi} T K_\gamma(\varphi) d\varphi, \quad \gamma = \begin{cases} 2n \\ 2n - 1 \end{cases} \quad (4)$$

де $K_{2n}(\varphi) = \frac{1}{\pi} \cos n\varphi$, $K_{2n-1}(\varphi) = \frac{1}{\pi} \sin n\varphi$.

В результаті застосування даного перетворення Фур'є отримуємо:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} \bar{T} - \kappa^2 \bar{T} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda r} \delta(r - r_0) \bar{f}_Y(n, \tau), \quad (5)$$

$$\bar{T}|_{r=0} = 0, \bar{T}|_{r=\infty} = 0, \frac{\partial \bar{T}}{\partial r}|_{r=\infty} = 0. \quad (6)$$

Тут:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{2n}(n, \tau) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \cos n\varphi \times \\ &\times \delta(\varphi - \omega\tau) d\varphi = \frac{1}{\pi} \cos n\omega\tau, \\ \bar{f}_{2n-1}(n, \tau) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin n\varphi \times \\ &\times \delta(\varphi - \omega\tau) d\varphi = \frac{1}{\pi} \sin n\omega\tau. \end{aligned}$$

Далі знаходимо інтегральне перетворення Хенкеля [2] за змінною r до задачі (5), (6):

$$\bar{T}(p, n, \tau) = \int_0^\infty r J_n(pr) \bar{T}(r, n, \tau) dr,$$

де $J_n(pr)$ – функція Бесселя першого роду n -ного порядку.

При цьому будемо мати:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \tau} + \alpha(p^2 + \kappa^2) \bar{T} = \frac{qa}{\lambda} \bar{f}_Y(n, \tau) J_n(pr), \quad (7)$$

$$\bar{T}|_{\tau=0} = 0. \quad (8)$$

Розв'язок звичайного диференціального рівняння (7) за умови (8) має такий вигляд (в даному випадку одержуємо два розв'язки, оскільки функція \bar{f}_Y має два різних вигляди при $\underline{\gamma} = 2\underline{n}$ і $\underline{\gamma} = 2\underline{n} - 1$. Позначимо ці розв'язки \bar{T}_{2n} і \bar{T}_{2n-1}):

$$\begin{aligned} \bar{T}_{2n} &= \frac{qa J_n(pr_0)}{\pi\lambda [a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2]} \times \\ &\times \{ [a(p^2 + \kappa^2) \cos n\omega\tau + \\ &+ n\omega \sin n\omega\tau] - a(p^2 + \kappa^2) e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau} \}, \\ \bar{T}_{2n-1} &= \frac{qa J_n(pr_0)}{\pi\lambda [a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2]} \times \\ &\times \{ [a(p^2 + \kappa^2) \sin n\omega\tau - \\ &- n\omega \cos n\omega\tau] + n\omega e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau} \}. \end{aligned} \quad (9)$$

Знаходимо обернені перетворення Хенкеля:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{2n} &= \int_0^\infty p J_n(pr) \bar{T}_{2n} dp = \\ &= \frac{qa^2}{\pi\lambda} \cos n\omega\tau \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} (p^2 + \kappa^2) dp + \\ &+ \frac{qa}{\pi\lambda} n\omega \sin n\omega\tau \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \\ &- \frac{qa^2}{\pi\lambda} \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} \times \\ &\times (p^2 + \kappa^2) e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau} dp, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_{2n-1} &= \int_0^\infty p J_n(pr) \bar{T}_{2n-1} dp = \\ &= \frac{qa^2}{\pi\lambda} \sin n\omega\tau \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} (p^2 + \kappa^2) dp - \\ &- \frac{qa}{\pi\lambda} n\omega \cos n\omega\tau \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp + \\ &+ \frac{qa}{\pi\lambda} n\omega \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} \times \\ &\times e^{-a(p^2 + \kappa^2)\tau} dp. \end{aligned}$$

Обернене перетворення Фур'є функцій (10) визначається за формулою:

$$T = \sum_{n=0}^{\infty} (\bar{T}_{2n} \cos n\varphi + \bar{T}_{2n-1} \sin n\varphi) \quad (11)$$

де (') після знака суми означає, що доданок при $n=0$ містить множник 1/2.

В результаті застосування оберненого перетворення (11) отримуємо:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{n=0}^{\infty} \{ a \cos n(\varphi - \omega\tau) \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{p(p^2 + \kappa^2) J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \\ &- n\omega \sin n(\varphi - \omega\tau) \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} dp - \\ &- e^{-a\kappa^2\tau} [a \cos n\varphi \times \\ &\times \frac{p(p^2 + \kappa^2) J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} e^{-ap^2\tau} dp - \\ &- n\omega \sin n\varphi \int_0^\infty \frac{p J_n(pr_0) J_n(pr)}{a^2(p^2 + \kappa^2)^2 + n^2\omega^2} e^{-ap^2\tau} dp \}]. \end{aligned} \quad (12)$$

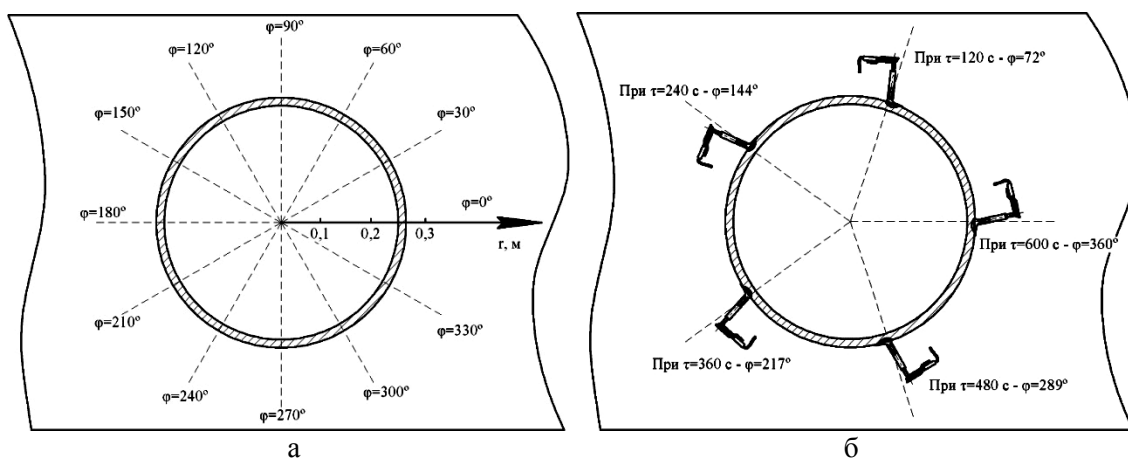
Безпосередньою підстановкою (12) в (2) і (3) переконуємося, що функція (12) є розв'язком поставленої задачі.

В монографії [3] розглядається аналогічна задача для анізотропної пластинки за нульової температури навколишнього середовища і початкової температури пластинки $f(r, \varphi)$.

В даній задачі початкова температура пластинки та навколишнього середовища прийнята рівною нулю. Якщо ж ця температура відмінна від нуля, наприклад рівна t_c , то до розв'язку (12) необхідно додати t_c .

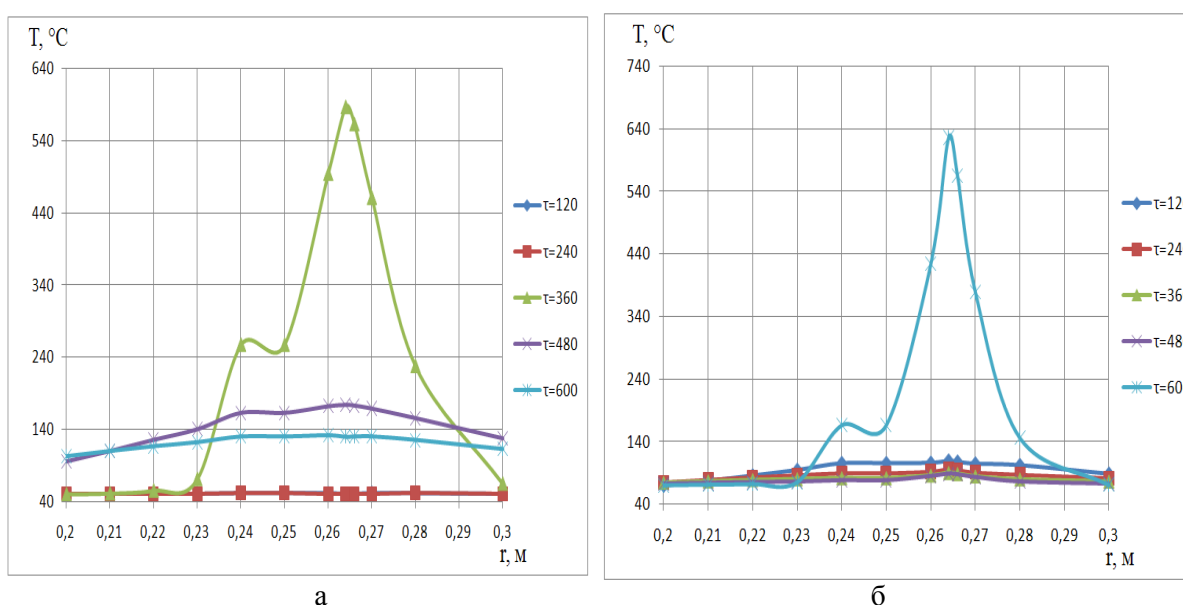
В результаті реалізації математичної моделі, приведеної до вигляду (12), отримано масиви значень температур стінки труби для різних положень зварювальної дуги відносно полярних координат (радіуса та кута повороту з кроком 30° (рис. 1, а)) та часу (з кроком 120 с (рис. 1, б)). Розрахункові схеми зображені на рисунку 1.

Результати розрахунків наведемо у вигляді залежності температури стінки труби, до якої



а – схема розрахунку температурних полів; б – положення дуги в різні моменти часу

Рисунок 1 – Розрахункові схеми приварювання патрубків-відводу



а – кут повороту $\varphi=210^\circ$; б – кут повороту $\varphi=360^\circ$

Рисунок 2 – Залежність температури стінки труби до якої приварюється патрубків від радіусу r для різних значень часу τ

приварюється патрубків від радіусу r для різних значень часу τ за кутів повороту $\varphi=210^\circ$ та $\varphi=360^\circ$, оскільки їм відповідає положення зварювальної дуги відповідно при $\tau=360$ с та $\tau=600$ с (рис. 2, а і б).

Таким чином, на основі аналітичних досліджень на створеній математичній моделі формування нестационарного температурного поля в стінці трубопроводу, зумовленого коловим рухом зварювальної дуги як джерела тепла, встановлено, що миттєві значення температур трубної сталі можуть перевищувати 600°C . Тривалість нагрівання з наступним охолодженням і стабілізацією температури залежить від характеристик руху продукту в трубопроводі і коливається в межах (650–340) с.

Література

- 1 Спосіб безвогневої врізки в діючі газопроводи [Текст] : матеріали Всеукр. наук. – практ. конф. (Миколаїв, 2 квіт. 2009 р.). – Миколаїв : НУК ім. адмірала Макарова, 2009. – 288 с. – ISBN 978-966-321-099-5.
- 2 Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики [Текст] / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.
- 3 Галицин А.С. Интегральные преобразования и специальные функции в задачах теплопроводности [Текст] / А.С. Галицин, А.Н. Жуковский. – К.: Наукова думка, 1976. – 282 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
27.07.10
Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.