

УДК 620.9; 666.9-13

д.т.н., проф. Андрій Редько,  
[andrey.ua-mail@ukr.net](mailto:andrey.ua-mail@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2331-7273,

д.т.н., проф. Ігор Редько,  
[igor.redko1972@gmail.com](mailto:igor.redko1972@gmail.com), ORCID: 0009-0005-1556-0830,

к.арх. доц. Дмитро Бородай,  
[dimaboroday@gmail.com](mailto:dimaboroday@gmail.com), ORCID: 0000-0002-0771-9769,

к.т.н., ст.викл. Сергій Андрух,  
[sl\\_a@ukr.net](mailto:sl_a@ukr.net), ORCID: 0000-0001-5041-885X,

ст.викл. Геннадій Циганенко,  
[tsyganenkogm@gmail.com](mailto:tsyganenkogm@gmail.com), ORCID: 0000-0002-3335-4804,

Сумський національний аграрний університет  
Український державний університет залізничного транспорту

## ЗАСТОСУВАННЯ СКЛОПЛАСТИКОВИХ ТРУБ У ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

***Анотація.** Розроблено метод теоретичного визначення коефіцієнта теплопровідності стінки труби зі складною структурою армування. Наведено результати розрахунку коефіцієнта теплопровідності розробленої конструкції трубопроводу з багатошарового композиційного просторово-орієнтованого склопластику. Склопластикова труба виготовлена безперервним способом косошарового поздовжньо-поперечного намотування на самоподавальну оправу змоченої зв'язувальною речовиною армувальної псевдострічки у формі розрідженої сітки. При кожному оберті оправки вона зміщується на величину затвердіння отриманого двокомпонентного матеріалу під впливом температури. При порівнянні різних відомих розрахункових залежностей та експериментальних значень обумовлюється прийнята фізична модель та реальна структура матеріалу. Відомі залежності отримано лише для середовища з нескінченними довгими паралельними між собою циліндричними включеннями для односпрямованих та ортогонально армованих матеріалів. Тому для матеріалів зі складною структурою та схемою армування ці залежності дають відхилення. У роботі прийнято припущення, що склопластик складається з двох компонентів – армувального наповнювача та зв'язувальної речовини з порами, армувальні волокна нескінченні, та мають круглий поперечний переріз, вони рівномірно розподілені у матриці зв'язувальної речовини, на межах розподілу між арматурою та цією речовиною існує ідеальний тепловий контакт. Експериментальні дані щодо визначення поперечної теплопровідності односпрямованих склопластикових стержнів з арматурою на основі алюмоборсилікатного або магнезійно-алюмосилікатного*

скла та епоксидних зв'язувальних речовин показали найменшу похибку порівняно з розрахунковими (8...10 %). Отримано, що коефіцієнт теплопровідності склопластикової труби в 100 разів менший ніж у сталевій труби. Визначено, що можлива заміна сталевій труби діаметром 219 мм на склопластикову трубу діаметром 146 мм.

**Ключові слова:** коефіцієнт теплопровідності, конструкція трубопроводу, склопластик, армування.

**Вступ.** Зниження температури геотермальної рідини при русі в експлуатаційній свердловині призводить до зменшення кількості теплоти, що видобувається. Пропонуються рішення щодо теплоізоляції стволів свердловин [1]. Однак це дорогий і трудомісткий проект. Більш ефективним є застосування неметалічних труб, що характеризуються низьким значенням коефіцієнта теплопровідності. Одним із таких рішень є застосування склопластикових труб.

На кафедрі теплогазопостачання, вентиляції та використання ТВЕР Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури розроблено конструкції [2] та виконуються дослідження виробництва та застосування склопластикових труб у системах водо- та теплогазопостачання.

Одним із теплотехнічних параметрів, що характеризують теплові втрати у свердловині, є коефіцієнт теплопровідності труби.

Розрахунок коефіцієнта теплопровідності дисперсного матеріалу складної структури викликає певні труднощі.

**Стан проблеми.** Застосування геотермальних систем теплопостачання вимагає зниження їхньої металомісткості, зниження тепловтрат при русі геотермальної рідини в експлуатаційних свердловинах і захисту від корозії [3,4]. Досліджується можливість застосування неметалічних труб. Знаходять застосування труби із композитних матеріалів. Однак відомі методики розрахунку коефіцієнта теплопровідності композитних труб вимагають уточнення та доопрацювання.

Відомі рішення для розрахунку коефіцієнта теплопровідності засновані на припущенні про адитивність багатокомпонентної односпрямованої структури в різних напрямках [5, 6, 7] і не можуть використовуватися при розрахунку коефіцієнта теплопровідності склопластику з більш складною схемою армування. Результати розрахунку за різними залежностями (рис. 1) дають розбіжність до 25...30 %. Розглянуті формули дають для ідентичних матеріалів значення, розбіжність між якими збільшується зі зростанням об'ємної частки заповнювачів  $V_H$ . Уже за  $V_H = 0,5$  досягає 23,6 %. Це, очевидно, є результатом відмінностей фізичних моделей, прийнятих авторами зазначених залежностей.

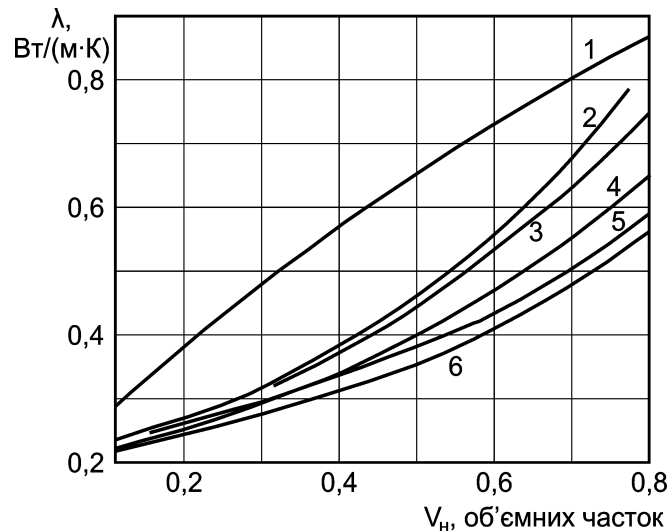


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопровідності композитного матеріалу від об'ємного вмісту наповнювача – розрахункові залежності: 1-[5], 2-[8], 3-[9], 4-[6, 13], 5-[13], 6-[7]

При порівнянні отриманих аналітично та експериментально значень відхилення обумовлюватиметься ступенем адекватності прийнятої фізичної моделі до реальної структури матеріалу. Однак загальним недоліком наведених формул слід вважати, що всі вони отримані для середовищ з нескінченно довгими паралельними між собою циліндричними включеннями і не можуть бути застосовані до матеріалів більш складних структур.

Наявні в літературі результати аналітичних досліджень теплопровідності матеріалів складнішої структури обмежені лише визначенням коефіцієнта теплопровідності склотекстоліту. Це – склопластик, шаруватий композиційний матеріал на основі тканини зі скловолокна, заповненого полімерною зв'язувальною речовиною. Так, наприклад, для теплопровідності в площині армування склотекстоліту в напрямку осі  $x$  отримано вираз [8]:

$$\lambda_x = \lambda_{\parallel} \cdot \frac{K}{K+1} + \lambda_{\perp} \cdot \frac{1}{K+1}, \text{ Вт/(м·К)}, \quad (1)$$

де  $K$  – кількість волокон, розташованих уздовж осі  $x$ , що припадає на одне волокно, розташоване вздовж осі  $y$ , а  $\lambda_{\parallel}$  та  $\lambda_{\perp}$  – коефіцієнт теплоповідності волокон, паралельних і перпендикулярних осі  $x$  (при визначенні  $\lambda_y$  коефіцієнти переставляються місцями):

$$\lambda_{\parallel} = \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot V_k + \lambda_{3B} \cdot V_{3B}, \text{ Вт/(м·К)}, \quad (2)$$

$$\lambda_{\perp} = \lambda_{3B} \cdot \left( 1 + \frac{2,54 \cdot V_H}{1 - 1,27 \cdot V_H + \frac{2,5}{\frac{\lambda_H}{\lambda_{3B}} - 1}} \right), \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad (3)$$

де  $\lambda_{CB}$  та  $V_{CB}$  – відповідно, коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), та об'ємна частка зв'язувальної речовини.

У припущенні, що шари матеріалу, які мають різну теплопровідність, досить тонкі, а ізотермічні поверхні паралельні між собою, для розрахунку коефіцієнта теплопровідності такої моделі в довільному напрямку отримано формулу:

$$\lambda = \lambda_x \cdot i^2 + \lambda_y \cdot j^2 + \lambda_z \cdot \gamma^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad (4)$$

де  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  і  $\lambda_z$  – основні коефіцієнти теплопровідності, Вт/(м·К);  $i$ ,  $j$ ,  $\gamma$  – напрямні косинуси заданої осі.

У наведеному виразі для розрахунку коефіцієнта теплопровідності склопластику в перпендикулярній площині армування напрямку для елемента компонента, що складається з паралельно покладених шарів матриці та армувального наповнювача, маємо

$$\lambda = \left[ \frac{V_H}{\lambda_H} + \frac{1 - V_H}{\lambda_{3B}} \right], \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \quad (5)$$

Авторами роботи [9] для зазначеної мети запропоновано залежність:

$$\lambda = \lambda_{3B} \cdot \left[ \left( 1 - \sqrt{V_H} \right) + \frac{4 \sqrt{V_H} \cdot (1 - \sqrt{V_H})}{2 - \sqrt{V_H} \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_{3B}}{\lambda_H} \right)} + \frac{V_H}{1 - \sqrt{V_H} \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_{3B}}{\lambda_H} \right)} \right], \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \quad (6)$$

Проведений аналіз стану питання аналітичного визначення теплопровідності склопластиків показує, що наявні в літературі аналітичні залежності описують тільки теплопровідність односпрямовано або ортогонально армованих матеріалів і таким чином, не можуть бути застосовані до розрахунку коефіцієнта теплопровідності склопластиків з складнішими схемами армування.

**Мета дослідження:** визначення коефіцієнта теплопровідності та можливості використання в системах геотермального теплопостачання односпрямованих труб, виготовлених безперервним способом косошарого поздовжньо-поперечного намотування (КППН) зі склопластику.

**Особливості склопластикових труб.** У реальному склопластиковому виробі є різні дефекти (перегини, скручування та обриви армувальних ниток, скупчення пор, місцеві відмінності ступеня затвердіння зв'язувальної речовини тощо), обумовлені випадковими технологічними факторами.

Як відомо, пори в склопластиках розташовуються в основному у зв'язувальній речовині, а також на межі розділу армувальний наповнювач – зв'язувальна речовина. Пори знижують теплопровідність зв'язувальної речовини та склопластикового виробу загалом. Пористість у склопластиках є небажаним фактором, і при виготовленні виробів її рівень прагнуть знижувати. Однак повністю позбутися пор у реальних склопластикових виробках практично неможливо. Тому рівень пористості необхідно враховувати для дослідження теплопровідності виробів зі склопластиків. Надалі при виведенні розрахункових формул вважатимемо, що склопластик складається з двох компонентів – армувального наповнювача та зв'язувальної речовини з порами. При цьому покладемо:

- армувальні волокна нескінченні та мають круглий поперечний переріз;
- армувальні волокна рівномірно розподілені в матриці зв'язувальної речовини;
- на межах розділу між арматурою та зв'язувальною речовиною існує ідеальний тепловий контакт.

Розглядатимемо структуру односпрямованих склопластикових стрижнів, отриманих методом протяжки (пултрузії). Вважатимемо, що армувальні волокна прямолінійні та паралельні між собою.

Склопластикова труба, виготовлена безперервним способом косошарового поздовжньо-поперечного намотування (КППН) (рис. 2) – це виріб, отриманий намотуванням на самоподавальну оправку змоченої зв'язувальною речовиною армувальної псевдострічки у формі розрідженої сітки. При кожному оберті оправки вона зміщується на величину затвердіння отриманого двокомпонентного матеріалу під впливом температури 120 – 180 °С.

У результаті зазначеного процесу труба утворюється безперервною стрічкою, сусідні витки якої – елементарні порожнисті конуси – вкладені один в оден пошарово вздовж спіралі і склеєні бічними поверхнями полімерною матрицею. При цьому стінка труби виявляється армованою в поздовжньому і поперечному напрямках, причому елементарні шари, що її складають, орієнтовані під деяким кутом до напрямку поздовжньої осі труби (рис. 2).

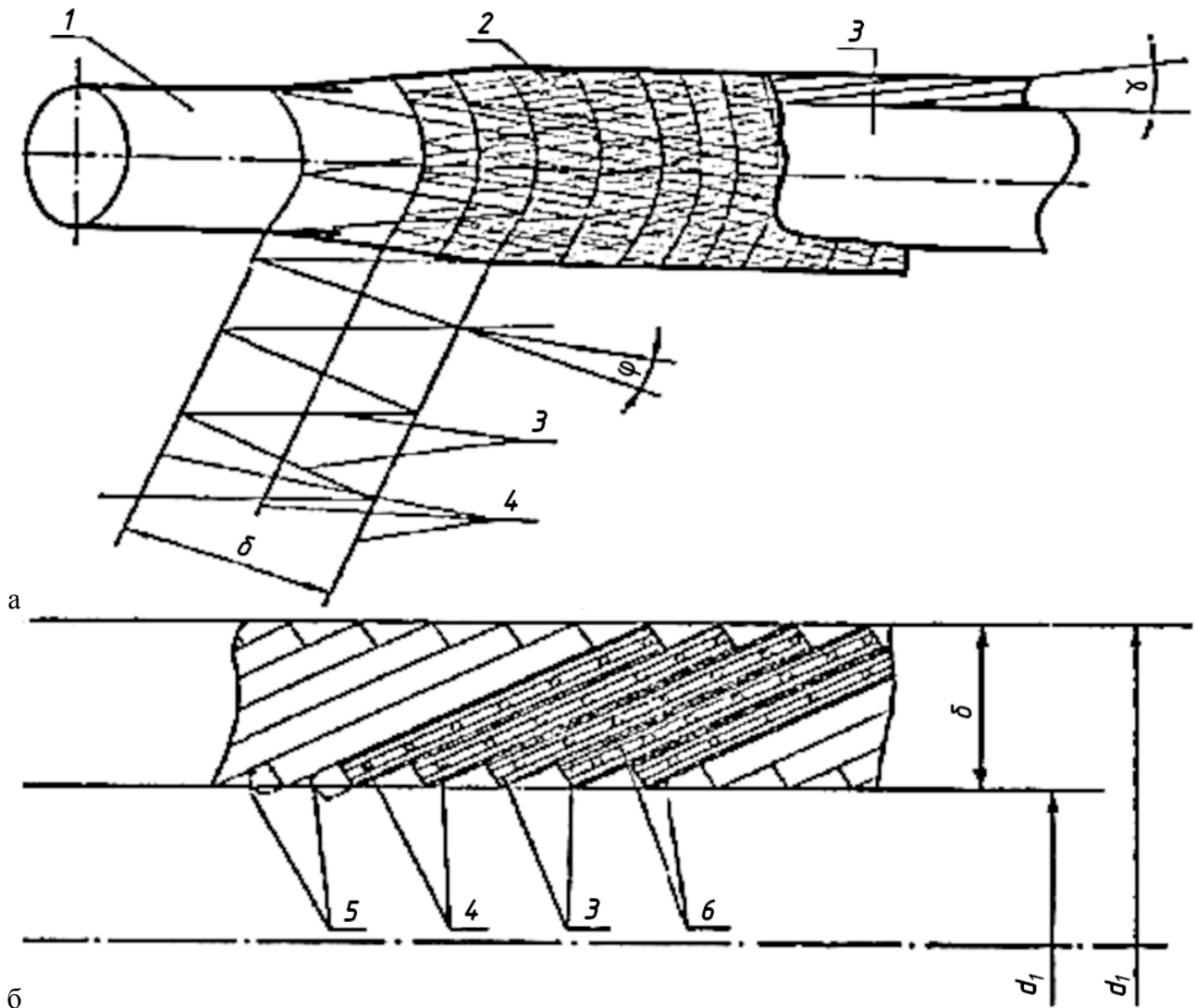


Рис. 2. Схема намотування та структури труби з косошарою поздовньо-поперечною намоткою:

а – схема процесу; б – отримана структура:

1 – самоподавальна оправка; 2 – арматура стінки труби; 3 – поздовжня нитка; 4 – поперечна нитка; 5 – елементарний шар труби; 6 – зв'язувальна речовина

Армувальна псевдострічка утворюється намотуванням на базові (дві крайні поперечні відносно осі труби) нитки поздовжніх ниток таким чином, що половина кута між ними становить  $(\pi/2) \pm \varphi$ . Фактично кут  $\pm \pi$  є кутом армування і може відраховуватись як кут між поздовжньою ниткою та твірною елементарного конуса. Кут нахилу твірної елементарного конуса до осі труби буде називатись кутом нахилу (конусністю) шару.

Крім базових проводиться намотування деякої кількості поперечних ниток, які збільшують до заданої величини кількість армувальної стрічки з притисканням поздовжньої нитки в проміжку між базовими.

Розглянемо конструктивні параметри труб, виготовлених косошаровим



поздовжно-поперечним намотуванням, їхній взаємозв'язок та технологічні обмеження. До цих параметрів крім зазначених кутів  $\varphi$  і  $\alpha$  належать товщина стінки труби  $\delta$ , м, кількість поперечних армувальних волокон на довжині бази укладача, відносний об'ємний вміст арматури (об'ємна частка арматури в об'ємі труби), коефіцієнт анізотропії.

Позначимо  $b$  – відстань між базовими нитками (базу укладання), м. Тоді:

$$\cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{\delta^2 + b^2}}; \quad \sin \varphi = \frac{K}{\sqrt{n_2^2 + K^2}}. \quad (7)$$

Вираз для коефіцієнта анізотропії  $K$  при однаково лінійній щільності поздовжніх і поперечних ниток має вигляд

$$K = n_2/n_1 = V_2/V_1, \quad (8)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – кількість поздовжніх та поперечних ниток у квадраті зі стороною, що дорівнює базі укладання;  $V_1$ ,  $V_2$  – об'ємний вміст поздовжніх та поперечних ниток ( $V_1 + V_2 = V_H$ ).

Параметр  $V_H$  обмежується величиною  $V_H^{max}$ . При  $V_H > V_H^{max}$  унаслідок порушення монолітності виробу через брак зв'язувальної речовини для утворення суцільної клейової плівки між армувальними волокнами, механічні характеристики та переносні властивості виробу погіршуються. Величина  $V_H^{max}$  визначається призначенням виробу та умовами промислового виробництва. Зазвичай,  $0,1 \leq V_H \leq 0,8$ .

Безперервний спосіб косошарової поздовжньо-поперечного намотування дозволяє варіювати коефіцієнт анізотропії в межах  $0,15 \leq K \leq \infty$ . При зменшенні  $K$  нижче граничного значення  $K_{min}$  через малу кількість поперечних ниток і розуцільнення намотування істотно зростає вміст зв'язувальної речовини, що призводить до зниження герметичності труби, погіршення її механічних і переносних властивостей.

Товщина стінки труби  $\delta$  визначається багатьма факторами: можливостями технологічної установки, заданим коефіцієнтом  $K$ , довжиною самоподавальної оправки, часом твердіння зв'язувальної речовини тощо. При цьому  $\delta > 13...15$  мм для труб на основі поліефірного сполучного.

Значення кутів  $\alpha$  і  $\varphi$  вибираються в діапазонах  $0 < \alpha < 10^\circ$ ;  $0 < \varphi < 45^\circ$  залежно від характеру навантаження та значень  $\delta$ ,  $b$  й  $K$ . Для матеріалів склопластиків характерне співвідношення між коефіцієнтами теплопровідності наповнювача та зв'язувальної речовини  $\lambda_{||}/\lambda_{\perp} = 4 \dots 7$ . Припущення про плоскопаралельність ізотермічних поверхонь у матеріалі було підтверджено

результатами електричного моделювання процесу теплопровідності.

**Метод розрахунку теплопровідності склопластикової труби.** Коефіцієнт теплопровідності армованого суцільними безперервними волокнами односпрямованого композиту у напрямку армування за припущенням про плоскопаралельність

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_H \cdot V_H + \lambda_{3B} \cdot (1 - V_H). \quad (9)$$

Як було показано раніше, стінка труби, виготовленої КППН, є системою склеєних сполучних шарів поздовжніх і поперечних армувальних волокон. При цьому поздовжні волокна орієнтовані під кутом  $\varphi$ , а елементарні шари труби - під кутом  $\alpha$  до поздовжньої осі труби. Вираз коефіцієнта осьової теплопровідності у разі, за аналогією з (9) має вигляд:

$$\lambda_T = \frac{[\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3B} \cdot (1 - V_H)]}{3} + \Delta\lambda_{нед}, \quad (10)$$

де  $\lambda_T$  – коефіцієнт теплопровідності труби;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності шару поздовжніх та поперечних армувальних волокон (з урахуванням кута армування та конусності),  $\Delta\lambda_{нед}$  – вплив неадитивної складової.

Як було показано вище, значення коефіцієнтів теплопровідності односпрямованих склопластиків у поперечному напрямку, розраховані за формулами (9, 10), можуть мати розбіжності близько 30 % і вище.

Проведені авторські численні експерименти щодо визначення поперечної теплопровідності односпрямованих склопластикових стрижнів з арматурою на основі алюмоборсилікатного або магнезійно-алюмосилікатного скла та епоксидною зв'язувальною речовиною показали, що для  $0,40 \leq V_H \leq 0,75$  найменшу похибку між розрахунковими та експериментальними значеннями забезпечує визначення  $\lambda_1$  саме за формулою (3).

Теплопровідність шару, орієнтованого під кутом  $\gamma$  до напрямку вимірювання теплопровідності, визначається за виразами виду:

$$\lambda_y = \lambda_x \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma, \quad (11)$$

де  $\lambda_x, \lambda_y$  – коефіцієнти теплопровідності шару в напрямку основних осей симетрії, Вт/(м·К).

Для елемента композиту, що складається з паралельно покладених шарів матриці та зв'язувального наповнювача, теплопровідність у напрямку,



перпендикулярному площині армування:

$$\lambda = \frac{1}{\frac{V_H}{\lambda_H} + \frac{(1-V_H)}{\lambda_{3B}}}, \quad (12)$$

З використанням формули (10) запишемо об'ємну частку поздовжніх та поперечних армувальних волокон, відповідно,

$$V_1 = V_H \cdot \frac{1}{1+K}; \quad V_2 = \frac{K}{1+K}. \quad (13)$$

З урахуванням залежностей (3), (9), (11), (12) і (13), вираз (10) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \lambda_T = & \cos^2 \alpha \cdot \left\{ \frac{\lambda_H \cdot V_H + \lambda_{3B} \cdot (1 - V_H)}{1 + K} \cdot \cos^2 \varphi \right\} + \\ & + \left[ \lambda_{3B} \cdot \left( 1 + \frac{2,54 \cdot V_H}{1 - 1,27 \cdot V_H + \frac{2,5}{\frac{\lambda_H}{\lambda_{CB}} - 1}} \right) \cdot \frac{1}{1 + K} \right] \cdot \sin^2 \varphi + \\ & + \lambda_{3B} \cdot \left( 1 + \frac{2,54 \cdot V_H}{1 - 1,27 \cdot V_H + \frac{2,5}{\frac{\lambda_H}{\lambda_{CB}} - 1}} \right) \cdot \frac{K}{1 + K} + \\ & + \sin^2 \alpha \cdot \left\{ \frac{1}{\frac{V_H}{\lambda_H} + \frac{(1 - V_H)}{\lambda_{3B}}} \right\} + \Delta \lambda_{неод}. \end{aligned} \quad (14)$$

або з урахуванням формул (7) для труби, виготовленої КППН, матимемо

$$\lambda_T = \frac{b^2}{\delta^2 + b^2} \times$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left\{ \frac{\lambda_H \cdot V_H + \lambda_H \cdot (1 - V_H)}{1 + K} \cdot \frac{n_2^2}{n_2^2 + K^2} \right\} \times \\
 & \times \left[ \lambda_{3B} \cdot \left( 1 + \frac{2,54 \cdot V_H}{1 - 1,27 \cdot V_H + \frac{2,5}{\frac{\lambda_H}{\lambda_{3B}} - 1}} \right) \cdot \frac{1}{1 + K} \cdot \frac{K^2}{n_2^2 + K^2} + \right. \\
 & \left. + \lambda_{CB} \cdot \left( 1 + \frac{2,54 \cdot V_H}{1 - 1,27 \cdot V_H + \frac{2,5}{\frac{\lambda_H}{\lambda_{3B}} - 1}} \right) \cdot \frac{K}{1 + K} \right] + \\
 & + \frac{\delta^2}{\delta^2 + b^2} \cdot \left\{ \frac{1}{\frac{V_H}{\lambda_H} + \frac{(1 - V_H)}{\lambda_{3B}}} \right\} + \Delta\lambda_{нед}. \tag{15}
 \end{aligned}$$

Оскільки значення коефіцієнтів теплопровідності склоарматури та сполучних, що використовуються у виробництві склопластиків, лежать у межах  $\lambda_n = 0,9 \dots 1,1$  Вт/(м·К), рівняння (15) для середнього значення  $\lambda_n = 1,0$  Вт/(м·К) набуде вигляду

$$\begin{aligned}
 \lambda_T &= \frac{b^2}{\delta^2 + b^2} \times \\
 & \left\{ \frac{0,2 + 0,8 V_H}{1 + K} \cdot \frac{n_2^2}{n_2^2 + K^2} + \right. \\
 & \left. + \left[ 0,2 + \frac{0,508 \cdot V_H}{1,625 - 1,27 \cdot V_H} \right] \cdot \frac{1}{1 + K} \cdot \frac{K^2}{n_2^2 + K^2} \times \right. \\
 & \left. \times \left[ 0,2 + \frac{0,508 \cdot V_H}{1,625 - 1,27 V_H} \right] \cdot \frac{K}{1 + K} \right\} +
 \end{aligned}$$

$$+\frac{\delta^2}{\delta^2+b^2}\cdot\left\{\frac{1}{5-4V_H}\right\}. \quad (16)$$

Отримана залежність (15) або (16) дозволяє розрахувати осьову теплопровідність склопластикових труб у випадку армування стінки труби в поздовжньому і поперечному напрямках з нахилом шарів щодо осі труби.

Справді, при  $n_2 = 0$ ,  $\alpha = \varphi = 0$  формула (15) перетворюється на вираз (9). За умови  $\varphi = 0$  з залежності (15) отримаємо формулу для визначення теплопровідності ортогонально армованих матеріалів під кутом до площини армування в напрямку поздовжніх волокон

$$\lambda = \cos^2 \alpha \left\{ \frac{\lambda_H V_H + \lambda_{CB}}{1+K} + \lambda_{CB} \left( 1 + \frac{2,54 V_H}{1 - 1,27 V_H + \frac{2,5}{\frac{\lambda_H}{\lambda_{3B}} - 1}} \right) \frac{K}{1+K} \right\} + \sin^2 \alpha \left\{ \frac{1}{\frac{V_H}{V_H} - \frac{(1-V_H)}{\lambda_{3B}}} \right\} + \beta (\lambda_H v_H + \lambda_{CB}), \quad (17)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт, що визначається експериментально.

З метою перевірки застосування формули (17) виконано порівняння з відомими літературними даними [8, 9, 13]. Порівняння показує, що розрахункові дані із задовільною точністю  $\pm 8...10\%$  збігаються з експериментальними даними.

**Результати розрахунку теплотехнічної ефективності склопластикового трубопроводу в геотермальній системі.** Як критерії використання геотермальної енергії застосовують такі параметри: витрата води, що видобувається, і температура води на гирлі свердловини. Однією із специфічних особливостей геотермальної свердловини, що відрізняє її від свердловини, яка видобуває холодну воду, є суттєва залежність температури води на гирлі свердловини від режиму її експлуатації.

Для оцінювання ефективності відбирання теплоти пропонується додатковий показник – коефіцієнт відбирання теплоти  $K_T$  – відношення різниці температури води пластової  $T_{пл}$ ,  $K$ , і води на гирлі свердловини  $T_y$ ,  $K$ , до першої, а саме

$$K_T = \frac{T_{пл} - T_y}{T_{пл}}, \quad (17)$$

Коефіцієнт характеризує ступінь досконалості процесу отримання геотермальної енергії і залежить від багатьох факторів за такою формулою:

$$K_T = \frac{1}{T_0 + \Gamma \cdot h} \left[ T_0 + \frac{\Gamma}{B} \cdot (1 - e^{-B \cdot h}) \right], \quad (18)$$

де  $B$  – параметр:

$$B = \frac{\pi}{M_1 C_{p_1} (R_1 + R_2)}; \quad (19)$$

$T_0$  – температура води, К;  $\Gamma$  – геотермічний градієнт, К/м;  $h$  – глибина закладення пласта, м;  $R_1$  та  $R_2$  – відповідно, термічний опір конструктивних елементів свердловини та гірських порід, м·К/Вт;  $M_1$  і  $C_{p_1}$  – відповідно, дебіт свердловини, кг/с, та питома теплоємність води, кДж/(кг·К).

Значення термічних опорів конструктивних елементів свердловини та гірських порід визначаються за формулами:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha \cdot d} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}; \quad (20)$$

та

$$R_2 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{4 \sqrt{a \cdot \tau}}{d_c}, \quad (21)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки труби, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $d_1$  – діаметр труби, м;  $\lambda_i$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності кільцевого шару (метал, вода, метал, цемент), укладеного між елементами з  $d_{i+1}$  та  $d_i$  гірських порід, Вт/м·град;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності гірських порід, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – час експлуатації свердловини год;  $d_c$  – діаметр свердловини за долотом, м.

Аналіз залежності показує, що значення  $K_m$  може прямувати до нуля (тобто втрати теплоти мінімальні) при високих дебітах свердловини або до одиниці при малих дебітах. Ефективність відбирання теплоти зростає при експлуатації свердловин на високодебітних режимах. При цьому кількість теплоти збільшується не лише за рахунок збільшення дебіту свердловини, а й за рахунок

підвищення гирлової температури. Для інтенсифікації зростання дебіту свердловин можливе застосування ефективних методів підвищення проникності та фільтраційних характеристик привибійної зони свердловин (гідророзрив пластів, кислотне оброблення, гідропіскоструминне перфорування, створення стресових депресій тощо).

Іншим методом підвищення ефективності відбирання теплоти є збільшення коефіцієнта термічного опору конструктивних елементів свердловини. Для збільшення  $R_1$  можуть застосовуватися матеріали з низьким коефіцієнтом теплопровідності.

На даний час освоюється виробництво склопластикових труб для умов експлуатації у нафтовій та газовій промисловості. Склопластикові труби не схильні до корозії, мають меншу густину, ніж сталеві, а коефіцієнт теплопровідності в 100 разів нижчий за сталеві труби.

Застосування інших методів збільшення  $R_1$  – заповнення міжтрубного простору повітрям (чи іншим газом) на всій глибині чи 1/3 глибини (верхню частину свердловини) пов'язані з істотними додатковими витратами і встановленням додаткового промислового устаткування. При цьому температура на гирлі свердловини, коли міжтрубний простір заповнений водою, досягає 76 °С, повітрям 80 °С, при використанні склопластикових труб 81 °С, при температурі пластової води 82 °С.

Змінити коефіцієнт термічного опору  $R_2$  можна лише шляхом подовження терміну безперервної експлуатації свердловини та вибору оптимального діаметра свердловини. Залежність  $R_2$  від часу експлуатації свердловин різного діаметра наведено на рис. 3.

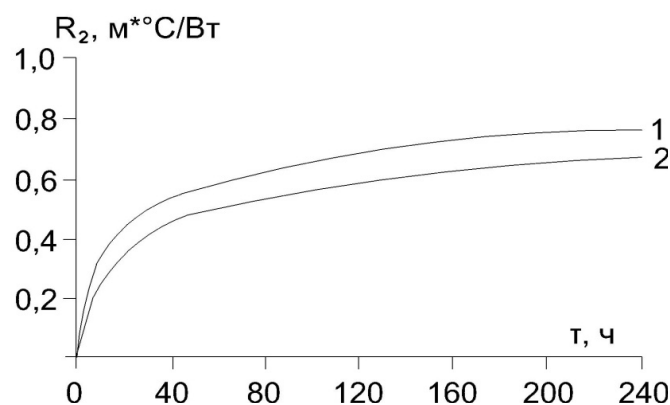


Рис. 3. Залежність термічного опору гірських порід розрізу свердловини

$R_2$  від часу експлуатації при діаметрі свердловини:

$$1 - d_c = 0,186 \text{ м}; 2 - d_c = 0,26 \text{ м}.$$

Теплофізичні властивості гірських порід прийняті такі:  $\lambda = 1,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $a = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{год}$ . У початковий період експлуатації (близько 10 діб)  $R_2$

характеризується низькими значеннями, але потім різко зростає до значень 06-08 м·К/Вт. Зі збільшенням діаметра свердловини (понад 250 мм)  $R_2$  збільшується менше. Але при цьому оптимальні значення діаметрів експлуатаційної колони залежать від гідродинамічних умов експлуатованих водоносних горизонтів і, як правило, значення їх більше –  $d = 0,186$  м. При цьому різко збільшується дебіт свердловини.

Для збільшення обсягів видобутку та зниження теплових втрат у стовбурі експлуатованої геотермальної свердловини застосовується конструкція свердловини на рис. 4.

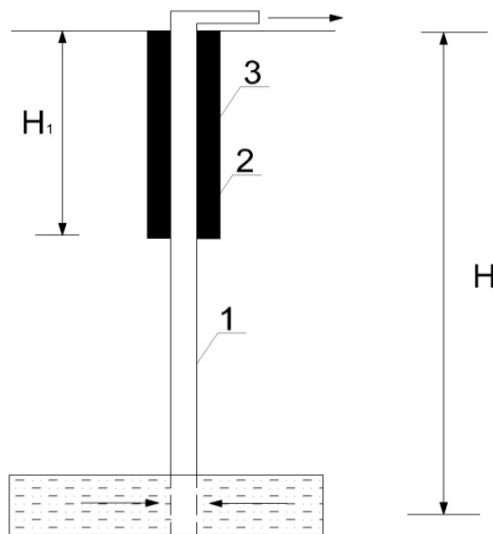


Рис. 4. Конструкція теплоізоляованої термальної свердловини.  
1 – ліфтова колона; 2 – зовнішня колона; 3 – теплоізоляція.

Свердловина буриться із збільшенням діаметром на глибину  $H_1$ , м, і обсаджується колоною великого діаметра. Далі свердловина з меншим діаметром буриться до підошви пласта, що експлуатується, і від гирла до вибою обсаджується колоною обсадних труб. Міжтрубний кільцевий простір свердловини, в одному випадку заповнений теплоізоляційним матеріалом (керамзит мінеральна вата та ін.), в іншому – труби виконані зі склопластику.

Аналіз показує, що збільшення діаметра й глибини зовнішньої обсадної колони зменшує втрати теплоти в стовбурі свердловини. У той же час збільшення діаметра та глибини свердловини призводить до збільшення капітальних витрат.

Виконані розрахунки для різних діаметрів зовнішніх обсадних колон показали, що мінімальні капітальні витрати отримані при діаметрі склопластикових труб 146 мм, а для сталевих труб – при діаметрі 219 мм.

Застосування теплоізоляції міжтрубного простору є доцільним для глибоких свердловин при малих дебітах, наприклад, у літній час при



використанні геотермальної енергії для потреб гарячого водопостачання.

Таким чином, ефективність отримання геотермальної теплоти підвищується при будівництві глибоких свердловин зі склопластикових труб великого діаметру ( $d = 146$  мм і вище), зі спусканням додаткових колон для теплоізоляції верхніх свердловин при експлуатації на малих дебітах.

### **Висновки**

В результаті чисельних досліджень обґрунтовується застосування склопластикових труб у системах вилучення та перетворення геотермальної енергії, що забезпечують відсутність корозійних процесів при русі геотермальної рідини (сольового розчину) у свердловинах та теплообмінному устаткуванні, зниження теплових втрат, запропоновано методику розрахунку коефіцієнта теплопровідності композиційних склопластикових труб.

### **References**

1. Alhasov A.B., Ramazanov M.M., Abasov G.M. «Ispolzovanie geotermalnoi energii v goriachem vodosnabzhenii.» Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika, no. 3, 1998, pp. 24-25.
2. Bikman Y.S., Redko O.F., Panchenko O.M., Shopen O.B. «Bahatosharova truba iz kompozytsiinykh materialiv». Patent of Ukraine №39881 10 March 2009
4. Yadav K., et al. Geothermal Energy. CRC Press, 2022
5. DiPippo R., Geothermal power plants: principles, applications, case studies, and environmental impact, 3th ed. Oxford, Elsevier Ltd, 2012
6. Karlsru G., Eger D. Teploprovodnost tvordykh tel. Nauka. 1964.
7. Van Fo Fy. Konstruktsii iz armirovannykh stekloplastikov. Tekhnika, 1971.
8. Shimchuk T.Ya., Kocherov V.L., Podosenko A.V. «Thermal conductivity of composite materials» Kompozitsionnye polimernye materialy, 1987, iss.34, p. 26-29.
9. Shlionskii O.F. Teplovye svoistva stekloplastikov. Khimiia, 1973.
10. Timrot D.L. Opredelenie teploprovodnosti stroitelnykh i izoliatsionnykh materialov. Gosenergoizdat, 1952.
11. Berlin A.A. Printsipy sozdaniia kompozitnykh materialov. Khimiia. 1999.
12. Alperin V.I. Konstruktivnye stekloplastiki. Khimiia. 1979.
13. Godovskii Yu.K. Teplofizika polimerov. Khimiia. 1982
14. Kudriachiova G.M. Modeling of thermal conductivity processes in polymer composite materials at high temperatures. Dis. abstract. MAI, 1977

UDC 620.9; 666.9-13

Ph.D., prof. **Andriy Redko**,  
[andrey.ua-mail@ukr.net](mailto:andrey.ua-mail@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2331-7273,  
Ph.D., prof. **Ihor Redko**,  
[ihor.redko1972@gmail.com](mailto:ihor.redko1972@gmail.com), ORCID: 0009-0005-1556-0830,  
Candidate of Architecture, PhD. **Dmytro Borodai**,  
[dimaboroday@gmail.com](mailto:dimaboroday@gmail.com), ORCID: 0000-0002-0771-9769,  
Ph.D., senior lecturer **Serhii Andruh**,  
[sl\\_a@ukr.net](mailto:sl_a@ukr.net), ORCID: 0000-0001-5041-885X,  
senior lecturer. **Hennadiy Tsyhanenko**,  
[tsyhanenkogm@gmail.com](mailto:tsyhanenkogm@gmail.com), ORCID: 0000-0002-3335-4804,  
Sumy National Agrarian University  
Ukrainian State University of Railway Transport

## APPLICATION OF FIBERGLASS PIPES IN GEOTHERMAL CIRCULATION SYSTEMS

**Abstract.** *The results of calculating the coefficient of thermal conductivity of the developed construction of the pipeline from multilayer composite spatially oriented fiberglass are given. A method of calculating the coefficient of thermal conductivity of a pipe wall with a complex structure of reinforcement has been developed. The fiberglass pipe is made by the continuous method of oblique-layer longitudinal-transverse winding on a self-feeding frame of reinforcing pseudo-tape moistened with a binder in the form of a rarefied mesh. With each rotation of the mandrel, it shifts by the amount of hardening of the obtained two-component material under the influence of temperature. A comparison of calculated and experimental data was made. When comparing various known calculated dependencies and experimental values, the accepted physical model and the real structure of the material are determined. The known dependences obtained for a medium with infinite long parallel cylindrical inclusions for unidirectional and orthogonally reinforced materials and therefore for materials with a complex structure and scheme of reinforcements give errors and deviations. The work assumes that fiberglass consists of two components - a reinforcing filler and a binder with pores, the reinforcing fibers are endless and have a circular cross-section, the reinforcing fibers are evenly distributed in the matrix of the binder; there is an ideal thermal contact at the boundaries of the distribution between the reinforcement and the binder. Experimental data on determining the transverse thermal conductivity of unidirectional fiberglass rods with reinforcement based on aluminoborosilicate or magnesium-aluminosilicate glass and epoxy binders showed the smallest error in comparison with the calculated ones (8-10%). They investigated the fact that the coefficient of thermal conductivity of a fiberglass pipe is*

*100 times lower than that of a steel pipe. It was determined that it is possible to replace a steel pipe with a diameter of 219 mm with a fiberglass pipe with a diameter of 146 mm.*

**Keywords:** thermal conductivity, pipeline design, fiberglass, reinforcement.