№ 2(46) 2026



НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 25.06.2026. Прорецензовано 22.09.2026. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 622.691.4:536.2 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-22-31**

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ҐРУНТУ ТА ЙОГО ВПЛИВУ НА ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ПІДЗЕМНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Тутко Т. Ф.
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9569-3035
e-mail: tetiana.tutko@nung.edu.ua

Анотація. У статті досліджено природне температурне поле верхніх шарів ґрунту та оцінено його вплив на тепловий режим підземних магістральних газопроводів. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення точності теплогідравлічних розрахунків газотранспортних систем в умовах сучасних кліматичних змін, оскільки природна температура ґрунту є одним із визначальних чинників теплообміну між транспортованим газом і навколишнім середовищем. Метою дослідження є удосконалення підходу до визначення природного температурного поля ґрунту з використанням сучасних кліматичних даних та встановлення його впливу на тепловий стан магістральних газопроводів. Для досягнення поставленої мети використано аналітичні методи математичного моделювання нестаціонарних процесів теплопровідності. Розглянуто одновимірне рівняння теплопровідності для напівобмеженого масиву ґрунту з відповідними початковими та граничними умовами. Як граничну умову на поверхні ґрунту прийнято гармонічний закон зміни температури атмосферного повітря. Для опису природного температурного поля використано сучасні кліматичні норми Івано-Франківська за період 1991–2020 рр., що дозволило врахувати особливості сучасних кліматичних тенденцій. Отримано аналітичні залежності для визначення температури ґрунту залежно від часу та глибини, встановлено закономірності згасання амплітуди сезонних температурних коливань і зсуву фазового максимуму із глибиною. Виконано моделювання зміни температури ґрунту на різних глибинах та побудовано відповідні графічні залежності. Проведено інженерний аналіз впливу природного температурного поля на тепловий режим магістрального газопроводу Ду 700. Показано, що врахування реальних сезонних коливань температури ґрунту дає змогу уточнювати прогнозні значення температури транспортованого газу, визначати характер зміни втрат тиску вздовж траси та підвищувати достовірність оцінювання енерговитрат компресорних станцій. Встановлено, що найбільш інтенсивні зміни температурного режиму спостерігаються у верхніх шарах ґрунту, тоді як на глибині прокладання магістральних газопроводів температурні коливання є менш вираженими, але залишаються достатніми для впливу на параметри транспортування газу. Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні підходу до визначення природного температурного поля верхніх шарів ґрунту шляхом використання сучасних кліматичних даних, що забезпечує підвищення точності прогнозування теплових режимів підземних магістральних газопроводів. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час розрахунку теплогідравлічних режимів експлуатації магістральних газопроводів, оцінювання втрат тиску, вибору раціональних режимів роботи компресорних станцій та вдосконалення методик проєктування й експлуатації об'єктів газотранспортної системи.

Ключові слова: магістральний газопровід; природне температурне поле ґрунту; теплопровідність; тепловий режим; температура ґрунту; математичне моделювання; сезонні коливання температури; теплогідравлічні процеси; втрати тиску; енерговитрати компресорних станцій.

Запропоноване посилання: Тутко Т. Ф. (2026). Дослідження природного температурного поля ґрунту та його впливу на тепловий режим підземних магістральних газопроводів. Нафтогазова енергетика, 2(46), 22-31. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-22-31.

* Відповідальний автор

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Вступ

Магістральні газопроводи є ключовими елементами енергетичної інфраструктури, від надійності та ефективності функціонування яких залежить стабільність забезпечення споживачів природним газом. Переважна більшість магістральних газопроводів експлуатується у підземному виконанні, внаслідок чого їхній тепловий стан визначається складною взаємодією процесів теплообміну між транспортованим газом, стінкою труби, ізоляційним покриттям та навколишнім ґрунтовим масивом. Температура ґрунту безпосередньо впливає на температуру газу вздовж траси, його фізико-хімічні властивості, величину гідравлічних втрат і, як наслідок, на енерговитрати компресорних станцій та економічність роботи газотранспортної системи в цілому.

Проблема визначення природного температурного поля ґрунту привертає увагу багатьох вітчизняних і зарубіжних дослідників. У світовій практиці значна кількість наукових робіт присвячена математичному моделюванню нестаціонарних процесів теплопровідності у напівобмежених середовищах, дослідженню теплообміну в системі «газ – трубопровід – ґрунт», а також удосконаленню методів прогнозування температурних режимів трубопровідного транспорту. У роботах зарубіжних авторів широко застосовуються аналітичні та числові методи розв'язування рівнянь теплопровідності, зокрема методи перетворення Лапласа, скінченних різниць і скінченних елементів. Водночас особлива увага приділяється врахуванню впливу кліматичних чинників та сезонної мінливості температурних умов на експлуатаційні характеристики трубопровідних систем.

В Україні питання дослідження теплових процесів у магістральних газопроводах висвітлені у працях науковців Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та інших наукових установ. Отримані результати створили наукове підґрунтя для розвитку методів теплогідравлічного розрахунку газопроводів, оцінювання втрат тиску та визначення енергоефективних режимів транспортування природного газу. Разом із тим більшість існуючих підходів до визначення природного температурного поля ґрунту базується на використанні кліматичних даних, отриманих у минулому столітті, або спрощених залежностей, що не враховують сучасних тенденцій зміни клімату. За останні десятиліття спостерігається підвищення середньорічної температури повітря, зміна амплітуди сезонних коливань та тривалості окремих періодів року, що може істотно впливати на температурний режим верхніх шарів ґрунту і, відповідно, на умови експлуатації підземних магістральних газопроводів.

Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є уточнення закономірностей формування природного температурного поля ґрунту на основі сучасних кліматичних даних та оцінювання його впливу на теплові процеси, що відбуваються під час транспортування природного газу. Це дозволить підвищити точність прогнозування температурного режиму газопроводів, удосконалити методики теплогідравлічних розрахунків і сприятиме прийняттю більш обґрунтованих рішень щодо забезпечення енергоефективної експлуатації газотранспортних систем.

У статті передбачено з'ясувати закономірності формування природного температурного поля верхніх шарів ґрунту в сучасних кліматичних умовах, охарактеризувати особливості зміни температури ґрунту залежно від глибини та пори року, а також виявити вплив природного температурного поля на тепловий режим і експлуатаційні параметри підземних магістральних газопроводів.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Дослідження теплових процесів у підземних трубопровідних системах базуються на фундаментальних положеннях теорії теплопровідності та теплообміну в багатошарових середовищах. Одними з перших наукових праць, присвячених опису нестаціонарних процесів перенесення теплоти в суцільних середовищах, стали дослідження Ж. Фур'є, які заклали основи математичного моделювання температурних полів. Подальший розвиток аналітичних методів розв'язування задач теплопровідності представлено у працях Carslaw і Jaeger, де наведено класичні розв'язки для напівобмежених тіл із періодичними граничними умовами [1, 2]. Незважаючи на універсальність запропонованих підходів, їх практичне застосування до трубопровідного транспорту потребує врахування конструктивних особливостей газопроводів та специфічних умов їх експлуатації.

У сучасних закордонних дослідженнях значна увага приділяється числовому моделюванню теплових процесів у системі «газ – трубопровід – ґрунт». Зокрема, для визначення температурних режимів магістральних трубопроводів використовують методи скінченних

різниць та скінченних елементів, які дозволяють враховувати неоднорідність ґрунтового середовища, складні граничні умови та змінні режими транспортування [3, 4]. Разом із тим застосування числових моделей часто супроводжується значною обчислювальною складністю та потребує великого обсягу вихідних даних, що обмежує можливість їх використання під час оперативних інженерних розрахунків.

Окремий напрям досліджень присвячений впливу кліматичних факторів на експлуатаційні характеристики трубопровідних систем. У роботах останніх років встановлено, що зміна середньорічної температури повітря та трансформація сезонних температурних циклів можуть призводити до зміни теплового режиму підземних споруд, впливаючи на інтенсивність теплообміну та величину енергетичних витрат [5, 6]. Водночас більшість зарубіжних моделей орієнтовані на конкретні природно-кліматичні умови окремих регіонів і не можуть бути безпосередньо використані для умов функціонування газотранспортної системи України без відповідної адаптації.

У вітчизняній науковій школі значний внесок у розвиток методів дослідження теплових і гідравлічних процесів у магістральних газопроводах зробили науковці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. У їхніх працях розглянуто питання визначення температури транспортованого газу, оцінювання втрат тиску, розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та удосконалення теплогідравлічних моделей газотранспортних систем [7, 8]. Отримані результати мають важливе практичне значення, проте переважно базуються на спрощених підходах до опису природного температурного поля ґрунту.

Дослідження природного температурного режиму верхніх шарів ґрунту знайшли відображення у працях, присвячених моделюванню сезонних коливань температури та визначенню глибини проникнення температурної хвилі [9, 10]. У більшості випадків температура на поверхні ґрунту описується гармонічною функцією часу, що дозволяє отримати аналітичні залежності для визначення температури на різних глибинах. Перевагою такого підходу є його відносна простота та можливість використання в інженерних розрахунках. Водночас значна частина існуючих досліджень ґрунтується на кліматичних даних другої половини XX століття, які вже не повною мірою відображають сучасні кліматичні умови.

Аналіз літературних джерел свідчить, що на сьогодні недостатньо дослідженим залишається питання впливу сучасних кліматичних змін на природне температурне поле ґрунту та, відповідно, на тепловий режим магістральних газопроводів. Відсутність адаптованих моделей, побудованих із використанням актуальних кліматичних норм, може призводити до зниження точності прогнозування температури транспортованого газу, визначення втрат тиску та оцінювання енергоефективності роботи компресорних станцій.

Отже, проведений аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень показав, що існує потреба в удосконаленні підходів до визначення природного температурного поля верхніх шарів ґрунту на основі сучасних кліматичних даних та встановленні його впливу на тепловий режим підземних магістральних газопроводів. Це обумовлює доцільність проведення подальших досліджень у зазначеному напрямі та визначає наукову проблематику даної роботи.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проведений аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень показав, що питання визначення природного температурного поля ґрунту та його врахування під час теплогідравлічних розрахунків магістральних газопроводів є достатньо опрацьованими з теоретичної точки зору. Разом із тим, наявні наукові підходи мають низку обмежень, що знижують точність прогнозування експлуатаційних параметрів газотранспортних систем у сучасних умовах.

Більшість аналітичних моделей формування температурного поля верхніх шарів ґрунту базується на використанні кліматичних даних, отриманих у другій половині XX століття, коли температурні умови характеризувалися відносною стабільністю. Водночас сучасні кліматичні зміни супроводжуються підвищенням середньорічної температури повітря, зміною амплітуди сезонних коливань та тривалості окремих сезонів, що може істотно впливати на глибину проникнення температурної хвилі та температурний режим ґрунтового масиву. Використання застарілих кліматичних характеристик призводить до невідповідності між розрахунковими та фактичними умовами експлуатації підземних магістральних газопроводів.

Крім того, у більшості досліджень природне температурне поле ґрунту розглядається як самостійний об'єкт вивчення без подальшого

аналізу його впливу на процес транспортування природного газу. Недостатньо уваги приділено встановленню кількісних закономірностей впливу сезонної зміни температури ґрунту на температуру транспортованого газу, величину втрат тиску вздовж траси та енерговитрати компресорних станцій. У результаті природне температурне поле часто враховується у вигляді усереднених або постійних значень температури ґрунту, що не відображає реальних умов експлуатації газотранспортної системи.

Також потребує подальшого розвитку питання адаптації відомих аналітичних розв'язків задачі нестаціонарної теплопровідності до сучасних природно-кліматичних умов України. Незважаючи на наявність значної кількості теоретичних досліджень, відсутні комплексні роботи, у яких поєднувалося б використання актуальних кліматичних норм, визначення природного температурного поля верхніх шарів ґрунту та оцінювання його впливу на тепловий режим підземних магістральних газопроводів.

Таким чином, невирішеною частиною загальної проблеми є недостатнє врахування сучасних кліматичних умов під час визначення природного температурного поля ґрунту та відсутність кількісного оцінювання його впливу на теплогідравлічні процеси в магістральних газопроводах. Вирішення зазначеної проблеми дозволить підвищити достовірність прогнозування температурних режимів транспортування природного газу, уточнити результати розрахунку втрат тиску та сприятиме вдосконаленню методів забезпечення енергоефективної експлуатації газотранспортних систем.

Саме дослідженню закономірностей формування природного температурного поля верхніх шарів ґрунту з використанням сучасних кліматичних даних та встановленню його впливу на тепловий режим магістральних газопроводів присвячена дана стаття.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є дослідження закономірностей формування природного температурного поля верхніх шарів ґрунту з використанням сучасних кліматичних даних та оцінювання його впливу на тепловий режим підземних магістральних газопроводів з метою підвищення точності прогнозування теплогідравлічних параметрів їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати сучасні вітчизняні та закордонні наукові підходи до опису природного температурного поля ґрунту та оцінювання теплових процесів у магістральних газопроводах;

– обґрунтувати вибір математичної моделі нестаціонарної теплопровідності для визначення температурного режиму верхніх шарів ґрунтового масиву;

– адаптувати аналітичний розв'язок задачі теплопровідності до сучасних природно-кліматичних умов шляхом використання кліматичних норм Івано-Франківська за період 1991–2020 рр.;

– визначити закономірності зміни температури ґрунту залежно від глибини залягання та пори року, а також встановити особливості згасання амплітуди сезонних температурних коливань і зсуву їх фаз у ґрунтовому масиві;

– виконати моделювання природного температурного поля на характерних глибинах прокладання підземних магістральних газопроводів та проаналізувати отримані результати;

– дослідити вплив природного температурного поля ґрунту на тепловий режим магістрального газопроводу D_y =700 мм , зокрема на зміну температури транспортованого газу та величину втрат тиску вздовж траси;

– оцінити практичне значення врахування сучасних температурних умов ґрунтового масиву під час виконання теплогідравлічних розрахунків і визначення енергоефективних режимів роботи газотранспортних систем.

Реалізацію поставлених завдань здійснено за таким алгоритмом. На першому етапі проведено аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню температурних полів ґрунту та теплових процесів у магістральних газопроводах. На другому етапі обрано математичний апарат для опису нестаціонарного процесу теплопровідності в напівобмеженому ґрунтовому масиві та сформульовано відповідні початкові й граничні умови задачі. Третій етап передбачав використання сучасних кліматичних норм для апроксимації сезонної зміни температури атмосферного повітря та визначення природного температурного поля ґрунту. На четвертому етапі виконано розрахунок температури ґрунту на різних глибинах і побудовано графічні залежності, що характеризують її зміну протягом року. На завершальному етапі проведено інженерне оцінювання впливу отриманих температурних залежностей на тепловий режим магістрального газопроводу та сформульовано висновки щодо доцільності врахуван-

ня сучасних кліматичних умов під час проєктування та експлуатації об'єктів газотранспортної системи.

Запропонований підхід дозволяє поєднати класичні аналітичні методи дослідження процесів теплопровідності з актуальними кліматичними даними та забезпечує більш достовірне визначення температурних умов експлуатації підземних магістральних газопроводів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Під час руху реального газу газопроводом його температура знижується за рахунок теплообміну з навколишнім середовищем і термодинамічної неідеальності газу. Теплообмін, у свою чергу, залежить від температурного поля, яке створюється навколо газопроводу. А на останнє суттєво впливає природне температурне поле ґрунту. Це означає, що для підвищення точності визначення параметрів газу, що транспортується, необхідно враховувати природне температурне поле навколо газопроводу.

Визначимо природне температурне поле у верхніх шарах ґрунту.

Температура даної точки на земній поверхні залежить головним чином від сонячної радіації, теплообміну між атмосферою і поверхнею Землі і від випромінювання, яке віддається Землею в навколишній простір .

Природна температура ґрунту T_1 може бути знайдена в результаті розв'язку такої крайової задачі :

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}, \quad y \geq 0, \tag{1}$$

$$\lambda_t \frac{\partial T_1}{\partial y}|y = 0 = \alpha_{П}(T_1 - T_{П})|y = 0 ,$$

$$T_{1|y\to\infty} = T_1^0(y) , \; T_{1|\tau=0} = T_1^0(y) , \tag{2}$$

де T_1^0– температурне поле в ґрунті, викликане тепловим потоком з надр Землі і певною сталою температурою на поверхні Землі;

y – ордината, напрямлена до центра Землі.

Функцію температури повітря можна описати за допомогою формули

$$T_{П} = T_{ср} + A\cos(\omega\tau - \varepsilon), \tag{3}$$

де $T_{\text{ср}}, A$ – кліматичні характеристики для певного району;

ω, ε – параметри закону $T_{\text{П}}$.

Постійна складова природного температурного поля ґрунту формується під впливом теплового потоку, що надходить із надр Землі. Відомо, що в стаціонарному випадку температура ґрунту змінюється за лінійним законом із глибиною, а її градієнт визначається величиною геотермічного потоку. З урахуванням цього температурне поле, обумовлене дією геотермічного потоку та сталою температурою на поверхні Землі, описується залежністю

$$\mathrm{T}_1^0(\mathrm{y}) = \mathrm{T}_{\text{ср}} + \Gamma\mathrm{e}\left(\frac{1}{\mathrm{h}} + \mathrm{y}\right), \tag{4}$$

де Тср – середньорічна температура на поверхні ґрунту, °С;

Ге – геотермічний градієнт, град/м;

у – глибина від поверхні ґрунту, м.

Отриманий вираз характеризує стаціонарну складову температурного поля ґрунту та враховує вплив внутрішнього теплового потоку Землі. Реальний температурний режим верхніх шарів ґрунту формується під спільною дією геотермічного потоку та періодичних сезонних коливань температури атмосферного повітря. Для визначення повного температурного поля використано розв'язок крайової задачі (1), (2), отриманий операційним методом із застосуванням перетворення Лапласа. У результаті одержано аналітичний вираз для природної температури ґрунту:

$$T_1 = T_{ср} + \Gamma e\left(\frac{1}{h} + y\right) + \tag{5}$$

$$+\frac{Ah\,exp\left(-\omega' y\right)cos\left(\omega\tau - \varepsilon - \omega' y - \delta\right)}{\sqrt{(h+\omega')^2 + \omega'^2}} - \frac{2a^2 Ah}{\pi}\times$$

$$\times\int_0^{\infty}\frac{(h\,sin\,y\,u + u\,cos\,y\,u)u^3}{(a^2u^4 + \omega^2)(h^2 + u^2)}e^{[-au^2(\tau - \varepsilon/\omega)]}du.$$

Інтеграл справа в (5) зображає швидко затухаючий перехідний процес. Після його затухання природна температура виражається першими трьома доданками формули (5). Це є квазістаціонарна температура. Перші два доданки відповідають температурі, яка була б у ґрунті за умови постійної температури повітря і рівної $T_{ср}$, врахуванні як теплообміну між ґрунтом і повітрям, так і теплового потоку з глибини Землі. Третій доданок враховує вплив на природну температуру ґрунту коливань температури повітря. Із (5) видно, що коливання температури повітря викликають і коливання температури в ґрунті. При цьому амплітуда коливань залежить не тільки від амплітуди коливань температури повітря, але і від коефіцієнта тепловіддачі між ґрунтом і повітрям, теплофізичних характеристик ґрунту, частоти коливань температури повітря ω і глибини точок в ґрунті. Із збільшенням глибини амплітуда коливань температури в ґрунті зменшується.

Як і для температури повітря функція температурних коливань у ґрунті є косинусоїдальною, але має місце зміщення по фазі.

Для виконання обчислень природної температури в ґрунті необхідно знати числові значення параметрів функції температури повітря. Для району Івано-Франківська одержано ана-

Таблиця 1 – Середньомісячні температури повітря в Івано-Франківську

Місяці року	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
Середні температури, °С	-3,2	-1,7	2,4	8,7	13,9	17,4
Місяці року	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Середні температури, °С	19,0	18,5	14,0	8,7	3,12	-1,4

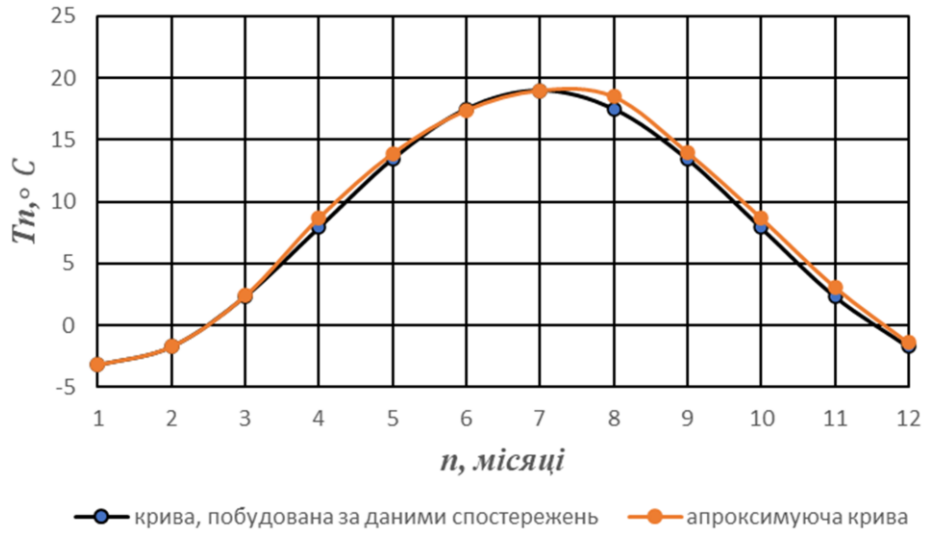


Рисунок 1 – Зміна температури повітря протягом року в Івано-Франківську

літичний вираз функції $T_{П}$. За даними багаторічних спостережень обчислено середньомісячні температури для Івано-Франківська, які подані в таблиці 1. Температура повітря обчислювалася за формулою (3). Параметр ε прийнято рівним нулеві. Величину A було визначено за формулою

$$A = -(T_{лип} - T_{січ})/2 =$$
$$= -\big(19{,}0 - (-3{,}2)\big)/2 = -11{,}1°C,$$

де $T_{лип}$, $T_{січ}$– температури відповідно липня і січня.

Відрахунок часу йде від початку січня, тому маємо рівняння $T_{січ} = T_{ср} + A$, звідси $T_{ср} = T_{січ} - A = -3{,}2 + 11{,}1 = 7{,}9C$.

Таким чином, формула (3) набуває вигляду

$$T_{П} = 7{,}9 - 11{,}1\cos\omega\tau. \qquad (6)$$

У формулі (6) $-\tau$ час в год. Величина ω знаходиться з рівняння $\omega\tau_p = 2\pi$, τ_p – кількість годин у році.

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_p} = \frac{2\pi}{365\cdot 24} = 0{,}717259\cdot 10^{-3} год^{-1}.$$

Приймаємо, що в кожному місяці однакова кількість годин, $\tau_м = 365\cdot 24/12 = 730 год$ ($\tau_м$– кількість годин в 1 місяці року). У такому разі формулу (2.54) можна записати у дещо іншому вигляді

$$T_{П} = 7{,}9 -$$
$$-11{,}1\cos[0{,}717259\cdot 10^{-3}(n-1)\tau_м], \qquad (7)$$

де n – порядковий номер місяця в році.

На рисунку 1 зображено два графіки. Перший графік – крива середніх температур повітря в Івано-Франківську, побудована за даними багаторічних спостережень і другий графік апроксимуюча крива середніх температур, побудована за формулою (7). З рисунка видно, що аналітичний вираз (7) досить точно описує зміну середніх температур в Івано-Франківську. Очевидно, що ця формула може бути використана для визначення природного температурного поля в ґрунті, а отже, і при дослідженні температурних полів навколо газопроводів.

Крім того, був проведений розрахунок природного температурного поля в ґрунті при таких вихідних даних:

$$\lambda_t = 1\,Вт/(м\cdot град),\ T_{ср} = 7{,}9°C,$$
$$A = -11{,}1°C,\ \omega = 0{,}717259\cdot 10^{-3} год^{-1},$$
$$a = 0{,}002\,м^2/год,\ \alpha_{П} = 10\,Вт/(м^2\cdot град),$$
$$Ге = 0{,}04167\,град/м.$$

На рисунку 2 зображена зміна природної температури на різних глибинах від часу протягом року. З рисунка видно, що максимуми температур з ростом глибини зміщаються вправо, і різниця між T_{1max} і T_{1min} зменшуєть-

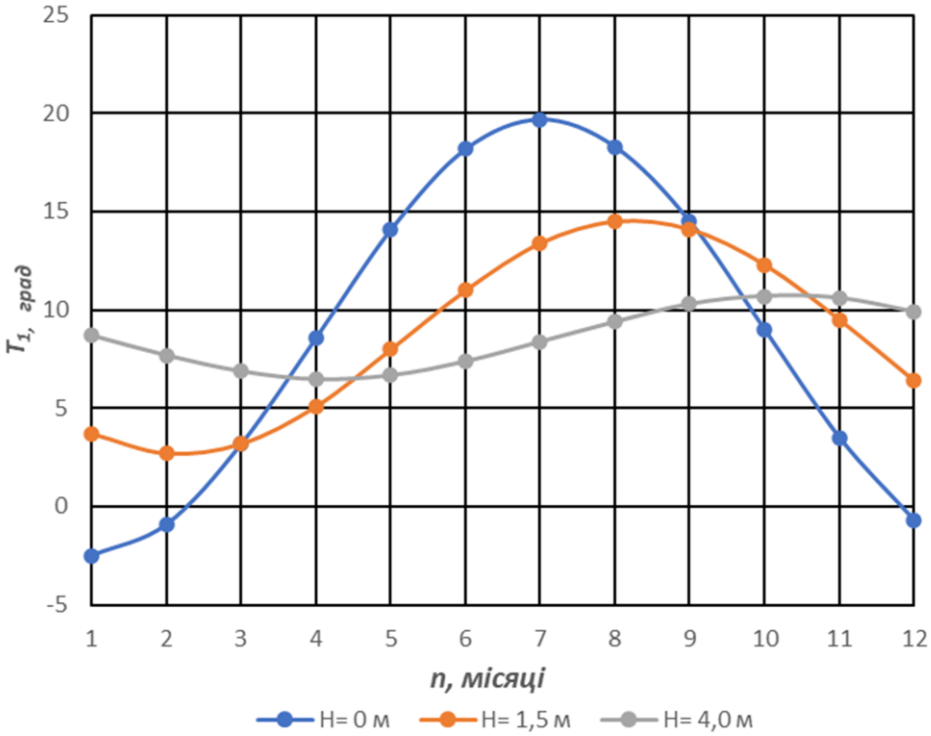


Рисунок 2 – Залежність природної температури ґрунту на різних глибинах від часу

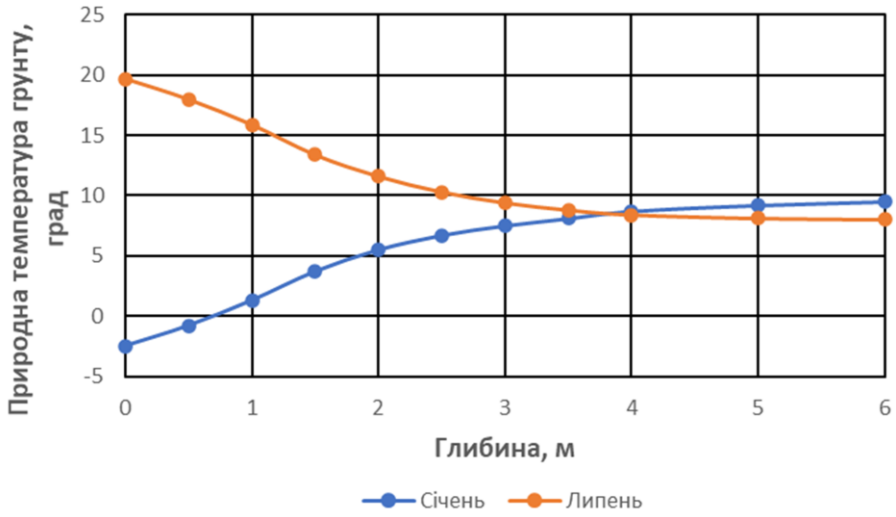


Рисунок 3 – Залежність природної температури ґрунту від глибини в різні місяці року

ся. Представляє інтерес графік для глибини $H = 1{,}5м$ (на цій глибині розміщаються осі сучасних газопроводів). Для $H = 1{,}5м$ протягом року від'ємних температур немає і її коливання складає приблизно $11{,}8^0$С.

На рисунку 3 наведено залежності температури ґрунту від глибини для січня та липня. На глибині близько 4 м січнева та липнева температури набувають близьких значень. Подальше збільшення глибини призводить до зменшення різниці між температурами в різні пори року. На глибинах понад 10 м ця різниця не перевищує десятих часток градуса, що свідчить про практичне згасання сезонних температурних коливань. Отже, глибину 10–12 м можна вважати нейтральним шаром, температура якого практично не залежить від змін температури на поверхні Землі. Температура нейтрального шару для умов Івано-Франківська становить близько 9,1 °С.

Наведені числові результати слід розглядати як наближені, оскільки реальні теплофізичні характеристики ґрунту можуть відрізнятися від прийнятих при даному розрахунку.

Для оцінювання впливу природного температурного поля ґрунту на тепловий режим магістрального газопроводу виконано розрахунок умовної ділянки газопроводу

D_y =700 мм довжиною 100 км. У розрахунках прийнято витрату природного газу 10 млн м³/добу, тиск на вході 5,5 МПа, температуру газу на вході 30 °С та глибину прокладання трубопроводу 1,5 м. Температуру навколишнього ґрунту визначали за результатами моделювання природного температурного поля для кліматичних умов Івано-Франківська за базовий період 1991–2020 рр.

Оскільки стаття присвячена саме впливу природного температурного поля ґрунту, достатньо розглянути два граничні режими: зимовий (січень) – $T_{\text{гр}}$=3,7^0C; літній (липень) – $T_{\text{гр}}$=13,4^0C.

Результати розрахунків приведені в таблицях 2, 3, 4.

Виконані розрахунки показали, що сезонна зміна природної температури ґрунту на глибині прокладання газопроводу від 3,7 °С до 13,4 °С призводить до зміни температури газу на виході зі 100-кілометрової ділянки приблизно на 4,4 °С. При цьому втрати тиску змінюються майже на 10 %, що підтверджує суттєвий вплив температурного режиму ґрунту на теплогідравлічні параметри магістральних газопроводів. Отримані результати свідчать про необхідність врахування сучасних кліматичних умов під час розрахунку режимів роботи газотранспортних систем та оцінювання їх енергоефективності.

Таблиця 2 – Розрахункова температура газу вздовж траси газопроводу

Відстань, км	Січень, °С	Липень, °С
0	30,0	30,0
10	27,0	28,1
20	24,6	26,5
30	22,6	25,2
40	20,9	24,0
50	19,5	23,0
60	18,3	22,1
70	17,3	21,4
80	16,5	20,7
90	15,8	20,1
100	15,2	19,6

Таблиця 3 – Зміна середньої температури газу та втрат тиску

Показник	Січень	Липень
Температура ґрунту, °С	3,7	13,4
Середня температура газу, °С	20,8	24,2
Температура газу на виході, °С	15,2	19,6
Тиск на вході, МПа	5,50	5,50
Тиск на виході, МПа	4,79	4,86
Втрати тиску, МПа	0,71	0,64

Таблиця 4 – Вплив температурного режиму ґрунту на експлуатаційні параметри газопроводу

Показник	Значення
Зміна температури ґрунту між січнем і липнем, °С	9,7
Зміна температури газу на виході, °С	4,4
Зміна втрат тиску, МПа	0,07
Відносна зміна втрат тиску, %	9,9

Висновки

1. Розроблено математичну модель визначення природного температурного поля верхніх шарів ґрунту, яка базується на розв'язані нестаціонарної задачі теплопровідності для напів обмеженого середовища та враховує сезонні коливання температури атмосферного повітря і вплив геотермічного теплового потоку. На відміну від поширених підходів, у розрахунках використано сучасні кліматичні норми м. Івано-Франківська за базовий період 1991–2020 рр.

2. Встановлено закономірності формування природного температурного поля ґрунту залежно від глибини залягання та пори року. Показано, що зі збільшенням глибини відбувається згасання амплітуди сезонних температурних коливань і фазове зміщення температурної хвилі. Для глибини прокладання магістральних газопроводів 1,5 м температура ґрунту змінюється протягом року від 3,7 °С до 14,5 °С, тоді як на глибинах понад 7 м вплив сезонних коливань стає незначним.

3. Отримано залежності зміни температури ґрунту від глибини для характерних зимового та літнього режимів. Встановлено, що найбільші температурні градієнти спостерігаються у верхніх шарах ґрунтового масиву, а на глибинах понад 4 м температура наближається до середньорічного значення, що узгоджується з відомими теоретичними положеннями та результатами попередніх досліджень процесів теплоперенесення в ґрунтах.

4. Виконано оцінювання впливу природного температурного поля ґрунту на тепловий режим магістрального газопроводу D_y =700 мм. Встановлено, що сезонна зміна температури ґрунту на глибині прокладання трубопроводу зумовлює зміну температури

газу на виході зі 100-кілометрової ділянки приблизно на 4,4 °С, що підтверджує необхідність врахування реальних температурних умов ґрунтового масиву під час теплових розрахунків.

5. Показано, що зміна температурного режиму ґрунту впливає на гідравлічні параметри транспортування природного газу. Для розглянутих умов різниця втрат тиску між зимовим і літнім режимами становить близько 10 %, що свідчить про чутливість результатів теплогідравлічного розрахунку до прийнятих температурних умов навколишнього середовища.

6. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для уточнення граничних умов під час теплогідравлічного моделювання магістральних газопроводів, оцінювання їх енергоефективності та прогнозування режимів експлуатації з урахуванням сучасних кліматичних змін.

7. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування неоднорідності теплофізичних властивостей ґрунтів, впливу вологості та багаторічних кліматичних трендів, а також на розроблення комплексних моделей взаємодії температурного режиму ґрунту з гідравлічними процесами транспортування природного газу в реальних умовах експлуатації газотранспортних систем.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. 2nd ed. Oxford : Clarendon Press ; New York : Oxford University Press, 1986. 510 p.
2. Fourier J.-B.-J. The Analytical Theory of Heat. Mineola, N.Y. : Dover Publications, 2003. 466 p.
3. Menon E. S. Gas Pipeline Hydraulics. Boca Raton : CRC Press, 2005. 600 p.
4. Osiadacz A. Simulation and Analysis of Gas Networks. Houston : Gulf Publishing Company, 1987. 278 p.
5. Cengel Y. A., Ghajar A. J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. New York : McGraw-Hill Education, 2020. 944 p.
6. Pipkin B. W., Trent D. D., Hazlett R., Bierman P. Geology and the Environment. Boston : Cengage Learning, 2018. 672 p.
7. Яворський А. В., Грудз В. Я., Тимків Д. Ф. Теплогідравлічні процеси в магістральних газопроводах : монографія. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2014. 312 с.
8. Грудз В. Я., Яворський А. В., Тимків Д. Ф. Експлуатація магістральних газопроводів : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. 286 с.
9. Кудінов В. А., Карташов Е. М. Теорія тепломасообміну : підручник. Київ : Кондор, 2008. 564 с.
10. Долинський А. А., Басок Б. І. Тепломасообмін і термодинаміка в енергетичних установках : монографія. Київ : Наукова думка, 2005. 560 с.

References

1. Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1986). *Conduction of Heat in Solids* (2nd ed.). Oxford: Clarendon Press.
2. Fourier, J. (2003). *The Analytical Theory of Heat*. Mineola, New York: Dover Publications.
3. Menon, E. S. (2005). Gas pipeline hydraulics. CRC Press.
4. Osiadacz, A. (1987). Simulation and analysis of gas networks. Gulf Publishing Company.
5. Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (6th ed.). McGraw-Hill Education.
6. Pipkin, B. W., Trent, D. D., Hazlett, R., & Bierman, P. (2018). Geology and the environment. Cengage Learning.
7. Yavorskyi, A. V., Grudz, V. Ya., & Tymkiv, D. F. (2014). Teplohidravlichni protsesy v mahistralnykh hazoprovodakh [Thermo-hydraulic processes in main gas pipelines] (Monograph). IFNTUNG. (in Ukrainian)

8. Grudz, V. Ya., Yavorskyi, A. V., & Tymkiv, D. F. (2013). Ekspluatatsiia mahistralnykh hazoprovodiv [Operation of main gas pipelines] (Study guide). IFNTUNG. (in Ukrainian)

9. Kudinov, V. A., & Kartashov, E. M. (2008). Teoriia teplomasoobminu [Theory of heat and mass transfer] (Textbook). Kondor. (in Ukrainian)

10. Dolinskyi, A. A., & Basok, B. I. (2005). Teplomasoobmin i termodynamika v enerhetychnykh ustanovkakh [Heat and mass transfer and thermodynamics in power plants] (Monograph). Naukova Dumka. (in Ukrainian)

STUDY OF THE NATURAL SOIL TEMPERATURE FIELD AND ITS EFFECT ON THE THERMAL REGIME OF UNDERGROUND MAIN GAS PIPELINES

Tutko T. F.
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-9569-3035
e-mail: tetiana.tutko@nung.edu.ua

Abstract. This article investigates the natural temperature field of the upper soil layers and assesses its impact on the thermal regime of underground gas transmission pipelines. The study is relevant because there is a need to improve the accuracy of thermal-hydraulic calculations for gas transmission systems in the context of current climate change, since natural soil temperature is one of the key factors governing heat exchange between transported gas and the surrounding environment. The study aims to refine the method of determining the natural soil temperature field by utilising modern climatic data, and to ascertain its impact on the thermal state of main gas pipelines. Analytical methods of mathematical modelling of non-stationary heat conduction processes were employed. A one-dimensional heat conduction equation for a semi-infinite soil mass, with the relevant initial and boundary conditions, was considered. The boundary condition at the soil surface was a harmonic law of atmospheric air temperature variation. Modern climatic normals for Ivano-Frankivsk for the period 1991–2020 were employed to account for current climatic trends. Analytical relationships were obtained to describe soil temperature as a function of depth and time, and the regularities of attenuation of seasonal temperature fluctuations and phase shifts with increasing depth were established. Numerical simulations of soil temperature changes at different depths were performed and presented graphically. An engineering assessment was carried out to analyse the impact of the natural temperature field on the thermal regime of a DN 700 main gas pipeline. The study showed that accounting for actual seasonal soil temperature variations enables more accurate predictions of transported gas temperature, helps to determine pressure loss patterns along the pipeline route and improves the reliability of compressor station energy consumption assessments. The study revealed that the most intensive temperature changes occur in the upper soil layers. At the depth at which the pipeline is laid, temperature fluctuations become less pronounced, but are still sufficient to affect gas transportation parameters. The study's scientific novelty lies in its improved approach to determining the natural temperature field of the upper soil layers using modern climatic data, thereby increasing the accuracy of thermal regime forecasting for underground main gas pipelines. The practical significance of the results lies in their applicability to thermal-hydraulic calculations for gas pipeline operation, estimation of pressure loss, optimisation of compressor station operating conditions and improvement of design and operating methodologies for gas transmission systems.

Keywords: main gas pipeline; natural soil temperature field; heat conduction; thermal regime; soil temperature; mathematical modelling; seasonal temperature fluctuations; thermal-hydraulic processes; pressure losses; compressor station energy consumption.