№ 2(46) 2026

НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 18.08.2026. Прорецензовано 01.10.2026. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 622.691.4 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-32-49**

ВРАХУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕНЕРГОНОСІЇВ ЗА УМОВ ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРИ ГАЗОДИНАМІЧНОМУ РОЗРАХУНКУ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Середюк М. Д. *
Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-6874-6947
e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua

Цюрак В. Ю.
Аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0009-0002-4373-2239
e-mail: vadym.tsiurak-a18524@nung.edu.ua

Анотація. Ефективне функціонування газорозподільних мереж є однією із умов надійного забезпечення споживачів природним газом та відновлювальними енергоресурсами. Процеси проєктування, реконструкції та експлуатації газових мереж супроводжуються газодинамічними розрахунками, які сьогодні в Україні переважно виконують за спрощеними методиками, що може стати причиною отримання неточних результатів. Метою роботи є встановлення впливу реальних властивостей природного газу та газоводневих сумішей на газодинамічні параметри газорозподільних мереж різних категорій робочого тиску з урахуванням особливостей профілю траси. З використанням розробленої комп'ютерної програми, яка реалізує рівняння стану AGA8 відповідно до міжнародного стандарту, встановлені закономірності впливу робочого тиску і температури на властивості енергоносіїв за умов транспортування та розподілу в газорозподільних мережах різних категорій робочого тиску. Оцінено ступінь впливу реальних властивостей енергоносіїв на газодинамічну енерговитратність горизонтальних ділянок газорозподільних мереж. Одержано, що для газопроводів низького тиску при транспортуванні природного газу та газоводневих сумішей з молярною концентрацією 10 % уточнення газодинамічних втрат тиску досягає 10 %, а для газопроводів середнього і високого тиску 9 % та 7 % відповідно. Встановлено величину впливу профілю траси на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж, визначену з урахуванням реальних властивостей енергоносіїв. Максимальний вплив зазначеного чинника виявлено для газопроводів низького тиску за неповного їх завантаження. При зміні геометричного нахилу ділянки низького тиску від 0 до 0,2 уточнення різниці перепаду тиску варіюється від 9,5 % до 121,5 % залежно від витрати енергоносія. Для газопроводів середнього та високого тиску додаткове врахування гравітаційного чинника уточнює різницю газодинамічної енерговитратності за двома методиками розрахунку на величину до 22 %.

Ключові слова: рівняння стану AGA8; газоводнева суміш; вплив тиску; вплив температури; профіль траси; газодинамічна енерговитратність.

Запропоноване посилання: Середюк, М. Д. & Цюрак, В. Ю. (2026). Врахування властивостей енергоносіїв за умов транспортування при газодинамічному розрахунку газорозподільних мереж. Нафтогазова енергетика, 2(46), 32-49. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-32-49.

* 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

Однією з умов забезпечення енергетичної безпеки України є надійне та ефективне функціонування системи газорозподільних мереж. Це протяжна та складна за геометричною структурою система газопроводів з різним матеріалом труб та різними категоріями робочого тиску. Станом на сьогодні значна частка газорозподільних мереж характеризується тривалим терміном експлуатації і потребує ремонту або реконструкції. У процесі проєктування, реконструкції та експлуатації газорозподільних мереж необхідним є виконання газодинамічних розрахунків. Чинні вітчизняні нормативні документи пропонують переважно спрощені методи газодинамічних розрахунків газових мереж, які не враховують реальних властивостей енергоносіїв як за стандартних умов, так за умов транспортування та розподілу, що може призвести до неточності прогнозування проєктних та експлуатаційних параметрів систем газопостачання населених пунктів. Це визначає актуальність та важливість досліджень, що стосуються удосконалення методів газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж з урахуванням сучасних підходів. Робота, що пропонується, дає можливість з'ясувати вплив реальних властивостей енергоносіїв та особливостей траси трубопроводів на режимні параметри газових мереж.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Як зазначають автори роботи [1], прогнозування закономірностей зміни температури і тиску по довжині газопроводів має важливе значення у процесі їх проєктування та експлуатації. За останнє десятиліття розроблені потужні засоби моделювання, які все частіше використовуються для розрахунків стаціонарних та перехідних режимів експлуатації газопроводів з урахуванням робочих профілів температури та тиску, перепаду геодезичних висот тощо. Базові методи числового розв'язання таких симуляторів трубопроводів значною мірою усувають необхідність введення припущень в аналітичні рівняння, що підвищує точність одержаних результатів. У роботі [2] представлено стратегію оптимізації газопостачання, яка розроблена на основі результатів стаціонарного та перехідного моделювання всієї газової мережі на гідравлічному симуляторі. Дослідження надає інформацію, необхідну для прийняття критично важливих рішень щодо експлуатації існуючої трубопровідної мережі, а також допомагає в розробленні стратегії розвитку інфраструктури.

Дослідження [3] зосереджено на моделюванні та симуляції мережі газорозподільних трубопроводів у рамках стаціонарного ізотермічного руху природного газу. Представлені дві спрощені моделі, отримані з набору диференціальних рівнянь з частинними похідними, що описують динаміку процесу. Ці моделі включають геометричний нахил, який не враховується в більшості робіт. Показано, що перепад тиску вздовж труби помітно залежить від геометричного нахилу. У статті [4] представлено аналіз результатів розподілу надлишкового тиску та витрат, отриманих шляхом моделювання потоку газу в мережі трубопроводів низького тиску. Розрахунки проведені для ділянки існуючої газової мережі та фактичних даних, що описують динаміку споживання газу. Показано, що врахування при розрахунку різниці геодезичних висот впливає на вибір граничних значень надлишкового тиску потоку газу, що живить мережу.

Робота [5] представляє порівняння фактичного розподілу тиску в реальній газовій мережі низького тиску з результатами гідравлічних розрахунків, отриманих за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу газових мереж: STANET (версія 10.0.26), SimNet SSGas 7, SONET та емпіричних рівнянь Дарсі-Вайсбаха і Ренуара. Розрахунки виконувались як з урахуванням, так і без урахування профілю траси. Автори підкреслюють, що для газових мереж низького тиску врахування висотного положення є критичним через наявність явища відновлення тиску, яке не відбувається в мережах середнього та високого тиску. Досліджений режим роботи газової мережі при використанні сумішей природного газу та водню. Результати підтвердили важливість врахування гравітаційного чинника при моделюванні газових мереж низького тиску.

Автори роботи [6] дослідили закономірності газодинамічних процесів в газорозподільних мережах за зміни температури навколишнього середовища. Ними розроблена нейронна модель для прогнозування обсягів транспортування газу залежно від температури довкілля. У роботі [7] запропонована оригінальна модель газопровідної мережі із зосередженими параметрами. Для визначення коефіцієнта гідравлічного опору використано рівняння Хофера як апроксимація узагальненої формули Кулбрука–Уайта. Робота [8] представляє результати дослідження впливу сезонного завантаження газорозподільної мережі на параметри газоди-

намічних режимів транспортування та розподілу природного газу.

Значна кількість робіт присвячена вибору рівняння стану для визначення термодинамічних властивостей транспортованого енергоносія. Так у роботі [9] при розрахунку потоків газу в газопровідній системі із замкнутими контурами для визначення коефіцієнта стисливості газу використано модифіковане рівняння AGA. Робота [10] представляє результати прогнозування термодинамічних властивостей природного газу з використанням десяти рівнянь стану. Автори робіт [11,12] відзначають, що точне прогнозування термодинамічних властивостей природного газу є важливою вимогою для оптимального проєктування та експлуатації трубопроводів. Ними розроблені прості, але достатньо точні кореляції для обчислення термодинамічних властивостей природного газу. Кореляції розроблені на основі виміряних в реальному часі температури, тиску і густини природного газу. На думку авторів, одержані моделі можна застосовувати для визначення термодинамічних властивостей природного газу при інженерних розрахунках газопровідних систем. У роботах [12,13] для визначення коефіцієнта стисливості природного газу перевагу віддають застосуванню рівняння AGA8.

У роботі [14] для прогнозування профілів тиску та температури вздовж горизонтального трубопроводу в стаціонарних умовах досліджено неізотермічний потік газу в прямій трубі. Вибрані аналітичні моделі, які враховують конвективний член у рівнянні імпульсу та член кінетичної енергії в рівнянні енергії. Ентальпія розглядається як функція тиску та температури. Для замикання системи рівнянь обрано рівняння стану GERG 2004. Встановлено, що у випадку газотранспортної системи високого тиску вплив конвективного члена в рівнянні імпульсу та члена кінетичної енергії в рівнянні енергії є незначним для точності розрахунку тиску та температури в трубопроводі.

Низка робіт представляє результати досліджень закономірностей перехідних процесів у газопровідних системах високого тиску [15,16]. У роботі [16] для врахування змін тиску, температури та витрати використано метод скінченних елементів на основі ANSYS FLOTRAN. При моделюванні враховано залежність коефіцієнта стисливості природного газу від температури та тиску. На думку авторів, метод скінченних елементів забезпечив точний прогноз тиску, температури та витрати в газопроводі.

Одним із реальних шляхів вирішення проблеми декарбонізації є використання в існуючих системах газопостачання газоводневих сумішей як альтернативи природному газу. Вплив домішування водню до природного газу на фізичні, термодинамічні та енергетичні властивості енергоносіїв детально досліджений у роботах [17,18,19]. Встановлений вплив специфічних властивостей газоводневих сумішей на газодинамічні режими експлуатації газорозподільних мереж різних категорій робочого тиску. Однак газодинамічна енерговитратність газових мереж при цьому оцінювалась за спрощеними нормативними методами.

Питанням удосконалення методів проєктних та експлуатаційних розрахунків газорозподільних мереж присвячено роботи [20,21,22]. Уточнені методи газодинамічних розрахунків, що пропонуються у зазначених роботах, базуються на застосуванні рекомендацій чинних нормативних документів, що не враховують реальні властивості енергоносіїв. Робота [23] пропонує метод та оригінальну комп'ютерну програму для проєктних та експлуатаційних розрахунків газорозподільних мереж з урахуванням впливу профілю траси та фізичних властивостей енергоносіїв. Для визначення коефіцієнта стисливості енергоносіїв тут застосовано двопараметричне рівняння стану Рарау. Слід відзначити роботу [24], яка представляє результати розрахунку властивостей газоводневих сумішей на базі фундаментального рівняння стану AGA. Однак у цій роботі не враховано вплив профілю траси на газодинамічні режими експлуатації газових мереж.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз публікацій засвідчив, що питання удосконалення методів газодинамічних розрахунків газотранспортних систем, у тому числі газорозподільних мереж, є актуальними не тільки для України, але і для інших країн. Вчені та фахівці закордоном, які мають можливість застосовувати сучасні програмні комплекси, успішно досліджують закономірності стаціонарних та перехідних процесів у газотранспортних системах з різним, переважно, високим робочим тиском. При цьому використовують сучасні рівняння стану та враховують вплив тиску і температури на фізичні властивості природного газу та альтернативних енергоносіїв. В Україні ключові нормативні документи [25,26] містять спрощену методику гідравлічного розрахунку газових мереж, яка не враховує реальних властивостей природного

газу і передбачає, що його властивості є сталими по довжині газопроводу і відповідають нормальним фізичним умовам.

Робочий тиск та температура в газорозподільних мережах помітно відрізняється від значень за нормальних фізичних умов, що впливає на величину коефіцієнта стисливості газу, густину та кінематичну в'язкість транспортованого енергоносія. Це, в свою чергу, призводить до того, що фактичний режим експлуатації газорозподільної мережі може помітно відрізнятись від розрахованого за нормативною методикою. Нормативні формули не враховують особливості профілю траси газових мереж, що може спричинити зростання похибки результатів газодинамічних розрахунків. В Україні вже є певні напрацювання окремо щодо врахування реальних властивостей енергоносіїв [23,24] та впливу гравітаційного чинника [22,23] при проєктних та експлуатаційних газодинамічних розрахунках газорозподільних мереж. У роботі, що пропонується, досліджується спільний вплив обох чинників на режими експлуатації газових мереж з використанням методів, передбачених міжнародними стандартами.

Мета та завдання досліджень

Метою досліджень є встановлення впливу реальних властивостей природного газу та газоводневих сумішей на газодинамічні параметри газорозподільних мереж різних категорій робочого тиску з урахуванням особливостей профілю траси.

Мета дослідження передбачає вирішення таких завдань:

- встановлення закономірностей впливу тиску і температури на властивості енергоносіїв за умов транспортування та розподілу в газорозподільних мережах різних категорій робочого тиску;
- оцінювання ступеня впливу реальних властивостей енергоносіїв на газодинамічну енерговитратність горизонтальних ділянок газорозподільних мереж різних категорій робочого тиску;
- встановлення додаткового впливу профілю траси на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж, визначену з урахуванням реальних властивостей енергоносіїв.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Аналіз результатів досліджень закордонних та вітчизняних вчених засвідчив, що стаціонарне та динамічне моделювання руху газу в газопроводі без урахування залежності стисливості газу від тиску та температури може призвести до суттєвих розбіжностей при розрахунках витрат і тисків в елементах газової мережі. Встановлено, що для діапазону робочих тисків та температур, властивих газорозподільним мережам України, при перекачуванні природного газу та газоводневих сумішей з невеликим вмістом водню, достатню точність забезпечує рівняння стану AGA8, яке закладено у міжнародний стандарт [27]. Зазначений стандарт набув чинності в Україні з 2022 року. В основу методу покладене стандартне рівняння стану Американської газової асоціації (American Gas Association, звіт № 8), призначене для обчислення коефіцієнта стисливості, густини та термодинамічних властивостей природного газу і багатокомпонентних сумішей. Воно широко використовується у світовій практиці при комерційному обліку енергоносіїв, в також при проєктуванні та експлуатації газотранспортних систем.

Ідеологія методу AGA8 базується на обчисленні властивостей природного газу через фундаментальне рівняння стану для вільної енергії Гельмгольца. Тут реалізовано молекулярний підхід, що враховує індивідуальні властивості кожної молекули газів та їхні перехресні взаємодії.

У методі використано значну кількість коефіцієнтів математичних моделей, одержаних за результатами експериментальних вимірювань властивостей реальних газів.

Нами для основі рекомендацій стандарту [27] розроблено обчислювальний алгоритм та комп'ютерна програма в середовищі Microsoft Visual Basic for Applications, яка реалізує рівняння стану AGA8 і створює можливість визначати реальні властивості енергоносіїв з урахуванням складу компонентів за робочих тисків і температур в газопроводах. Валідація розробленого програмного забезпечення здійснена шляхом виконання тестових розрахунків для кількох варіантів природного газу, точні результати властивостей яких наведено у відповідному стандарті. Метод розрахунку та комп'ютерну програму планується впровадити в навчальний процес.

Для досліджень вибрано природний газ, який використовувався для газопостачання західних областей України в 2026 році. Природний газ містять 12 компонентів, молярна частка метану становить 91,7 %. На базі природного газу сформований склад компонентів газоводневої суміші з молярною концентрацією 10 %. Розглядали весь діапазон робочих тисків

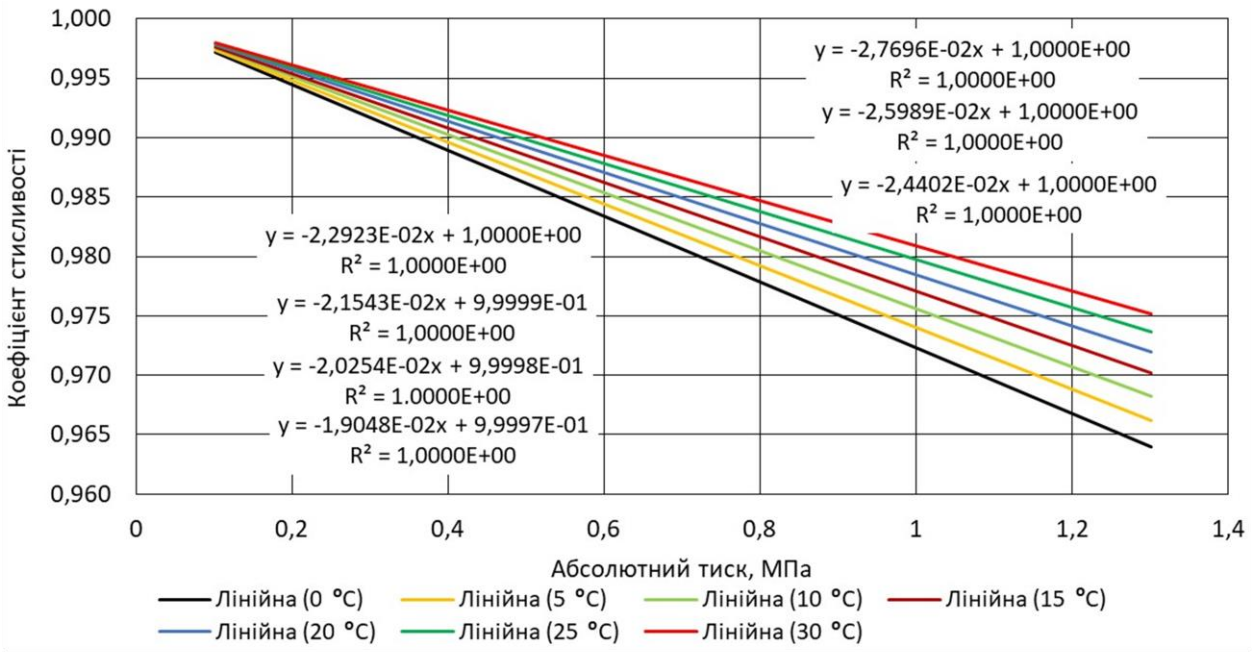


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта стисливості природного газу від абсолютного тиску за різних температур

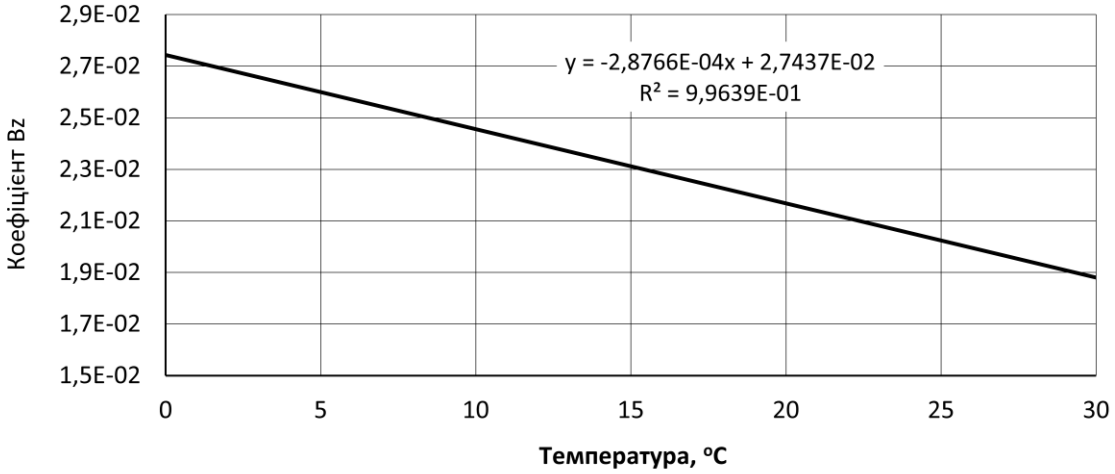


Рисунок 2 – Коефіцієнт математичної моделі B_z залежності коефіцієнта стисливості природного газу від тиску і температури в газорозподільних мережах

в газорозподільних мережах України. Діапазон робочих температур приймали рівним (0-30)°С з урахуванням наявності надземних ділянок газових мереж.

За результатами багатоваріантних розрахунків за розробленою комп'ютерною програмою, що реалізує метод AGA8 згідно з нормативним документом [27], одержані такі графічні залежності коефіцієнта стисливості природного газу від абсолютного тиску за фіксованих значень температури. Виконано математичне моделювання отриманих графічних залежностей засобами Excel (рисунок 1).

Як видно із рисунка 1, за умов транспортування газорозподільними мережами залежність коефіцієнта стисливості природного газу від абсолютного тиску (МПа) за фіксованої температури (°С) можна достовірно описати лінійною функцією

$$z = 1 - B_z p \ , \qquad (1)$$

де B_z – коефіцієнт математичної моделі, величина якого залежить від температури природного газу.

Результати математичного опрацювання даних рисунка 1, дали можливість встановити лінійну залежність коефіцієнта B_z від температури (рисунок 2).

Якщо при розрахунках використовувати температуру за шкалою Кельвіна T, то аналі-

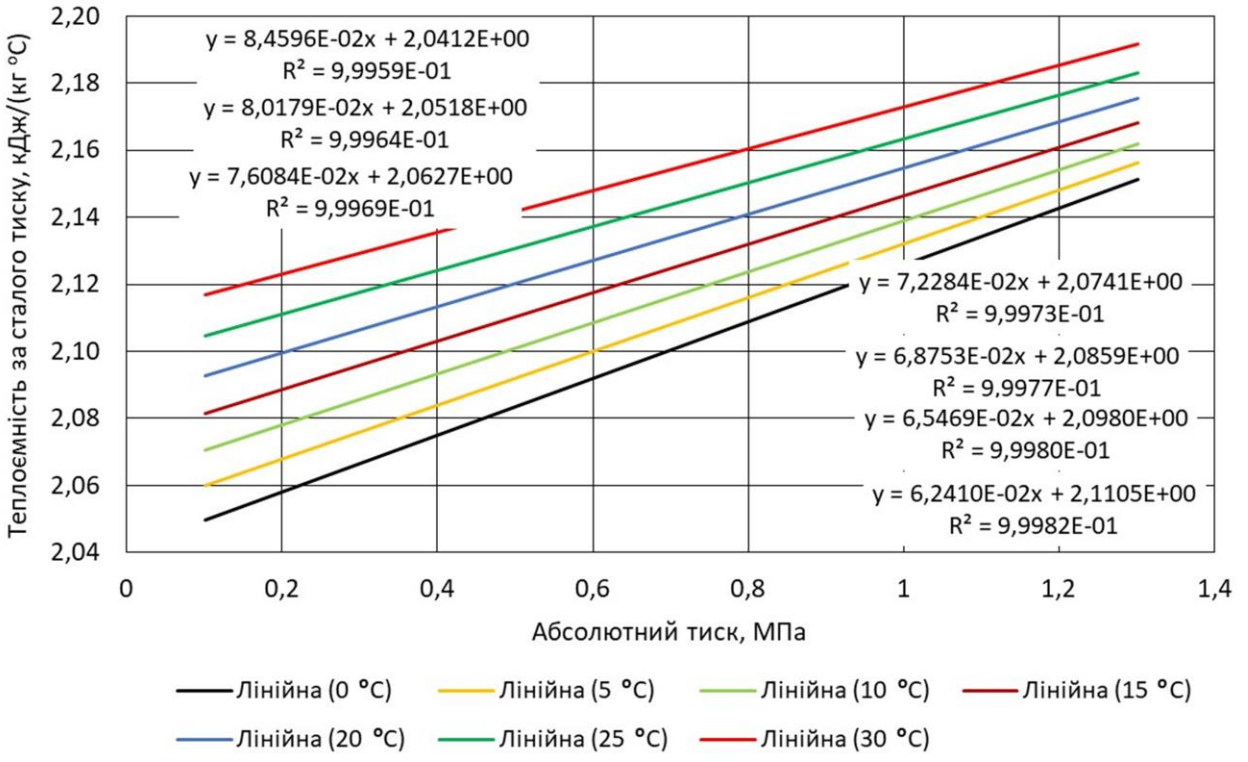


Рисунок 3 – Залежність теплоємності природного газу за сталого тиску від тиску за різних температур

тичний вираз для коефіцієнта B_z набуває вигляду

$$B_z = 1{,}0601 \cdot 10^{-1} - 2{,}8766 \cdot 10^{-4} T \,. \qquad (2)$$

Рисунок 3 ілюструє результати дослідження впливу тиску і температури на теплоємність природного газу за сталого тиску за умов транспортування в газорозподільних мережах.

Як свідчить рисунок 3, за фіксованої температури залежність теплоємності природного газу за сталого тиску (кДж/(кг·°С) від абсолютного тиску (МПа) достовірно описується лінійною функцією

$$c_p = A_{C_p} + B_{C_p} p \,. \qquad (3)$$

У свою чергу залежність коефіцієнтів математичної моделі (3) від температури можна з достовірністю апроксимації понад 99 % описати такими лінійними функціями (рис. 3 і 4):

$$A_{C_p} = 1{,}4091 + 2{,}3107 \cdot 10^{-3} T \,, \qquad (4)$$

$$A_{C_p} = 2{,}0402 + 2{,}3107 \cdot 10^{-3} t \,, \qquad (5)$$

$$B_{C_p} = 2{,}8546 \cdot 10^{-1} - 7{,}3792 \cdot 10^{-4} T \,, \qquad (6)$$

$$B_{C_p} = 8{,}3894 \cdot 10^{-2} - 7{,}3792 \cdot 10^{-4} t \,. \qquad (7)$$

Аналогічні дослідження проведено для інших властивостей природного газу, які можуть використовуватись при уточнених тепло-газодинамічних розрахунках газорозподільних мереж.

За результатами математичного моделювання графічних залежностей одержані такі аналітичні вирази (абсолютний тиск p у МПа, температура T в К):

для густини (кг/м^3)

$$\rho = A_\rho + B_\rho p \,, \qquad (8)$$

$$A_\rho = -1{,}1595 + 6{,}5882 \cdot 10^{-3} T - 9{,}6438 \cdot 10^{-6} T^2 \,, \qquad (9)$$

$$B_\rho = 16{,}192 - 2{,}9684 \cdot 10^{-2} T \,, \qquad (10)$$

для теплоємності за сталого об'єму (кДж/(кг·К))

$$c_V = A_{C_V} + B_{C_V} p \,, \qquad (11)$$

$$A_{C_V} = 9{,}4902 \cdot 10^{-1} + 2{,}2800 \cdot 10^{-3} T \,, \qquad (12)$$

$$B_{C_V} = 5{,}9509 \cdot 10^{-2} - 1{,}5708 \cdot 10^{-4} T \,, \qquad (13)$$

для коефіцієнта Джоуля-Томсона (К/МПа)

$$D_j = A_{D_j} + B_{D_j} p + C_{D_j} p^2 \,, \qquad (14)$$

$$A_{D_j} = 16{,}255 - 3{,}8321 \cdot 10^{-2} T \,, \qquad (15)$$

$$B_{D_j} = 8{,}0694 \cdot 10^{-1} - 5{,}5401 \cdot 10^{-3} T + 8{,}9919 \cdot 10^{-6} T^2 \,, \qquad (16)$$

$$C_{D_j} = -2{,}8400 \cdot 10^{-2} + 7{,}4194 \cdot 10^{-5} T \,, \qquad (17)$$

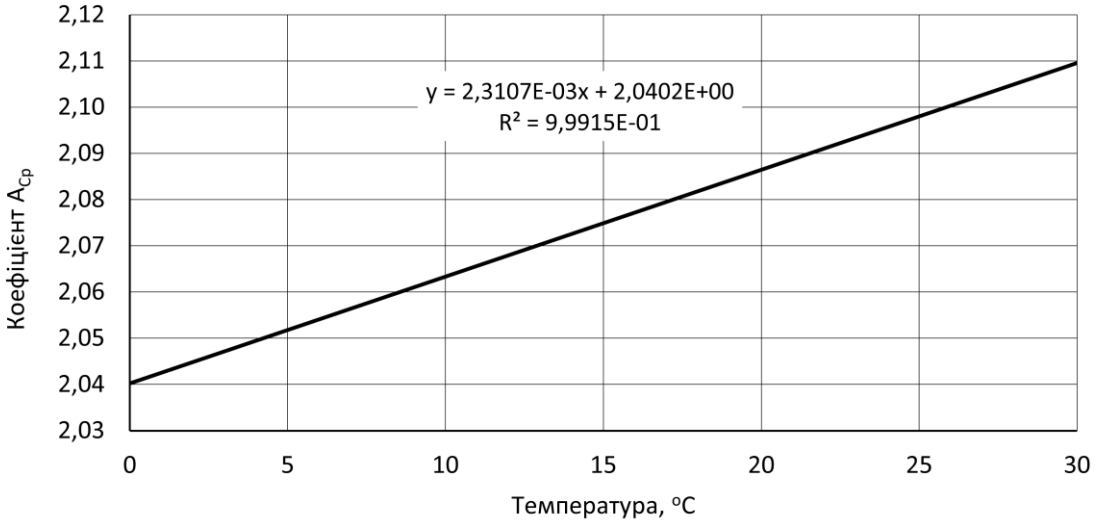


Рисунок 4 – Коефіцієнт математичної моделі A_{C_p} залежності теплоємності природного газу за сталого тиску від тиску і температури в газорозподільних мережах

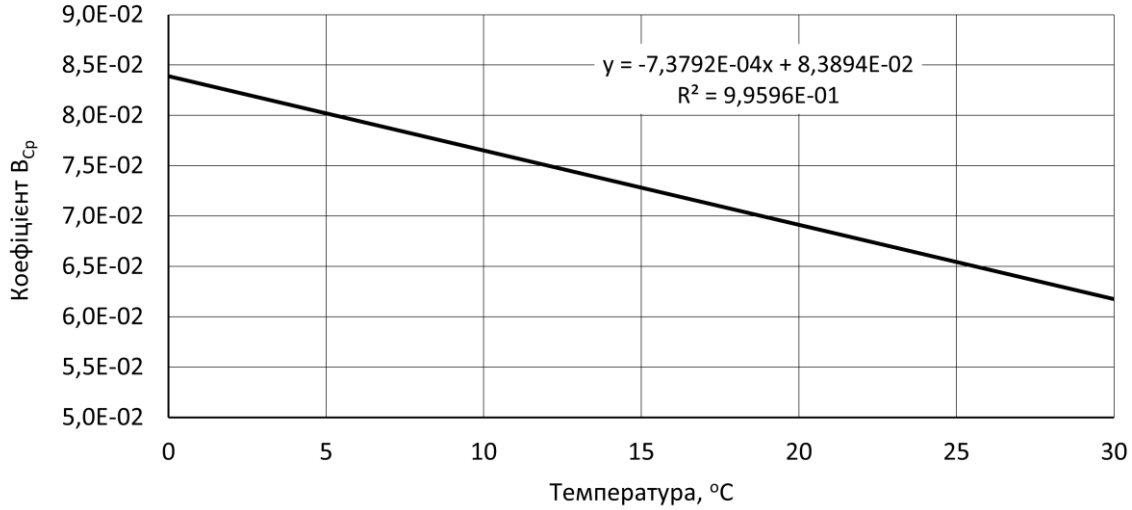


Рисунок 5 – Коефіцієнт математичної моделі B_{C_p} залежності теплоємності природного газу за сталого тиску від тиску і температури в газорозподільних мережах

для коефіцієнта адіабати

$$k = A_k + B_k p + C_k p^2, \quad (18)$$

$$A_k = 1,4128 - 4,1643 \cdot 10^{-4} T, \quad (19)$$

$$B_k = -1,8016 \cdot 10^{-2} + 6,5406 \cdot 10^{-5} T, \quad (20)$$

$$C_k = 4,1088 \cdot 10^{-3} - 1,0080 \cdot 10^{-5} T. \quad (21)$$

Достовірність апроксимації всіх наведених вище залежностей перевищує 99 %. З метою підвищення точності для опису залежностей коефіцієнта Джоуля-Томсона і коефіцієнта адіабати природного газу від тиску і температури застосовані поліноміальні моделі не першого, а другого порядку.

Використаний метод та розроблена комп'ютерна програма дають змогу врахувати реальні властивості не тільки природного газу, але і газоводневих сумішей. Враховуючи фактичний діапазон робочих тисків і температур в газорозподільних мережах України, можна стверджувати, що даний метод та комп'ютерна програма забезпечують достатню для інженерних розрахунків точність прогнозування властивостей газоводневих сумішей з різним вмістом водню. Однак на думку вітчизняних та закордонних фахівців, у найближчій перспективі найбільш імовірною є практична реалізація на існуючих газорозподільних ме-

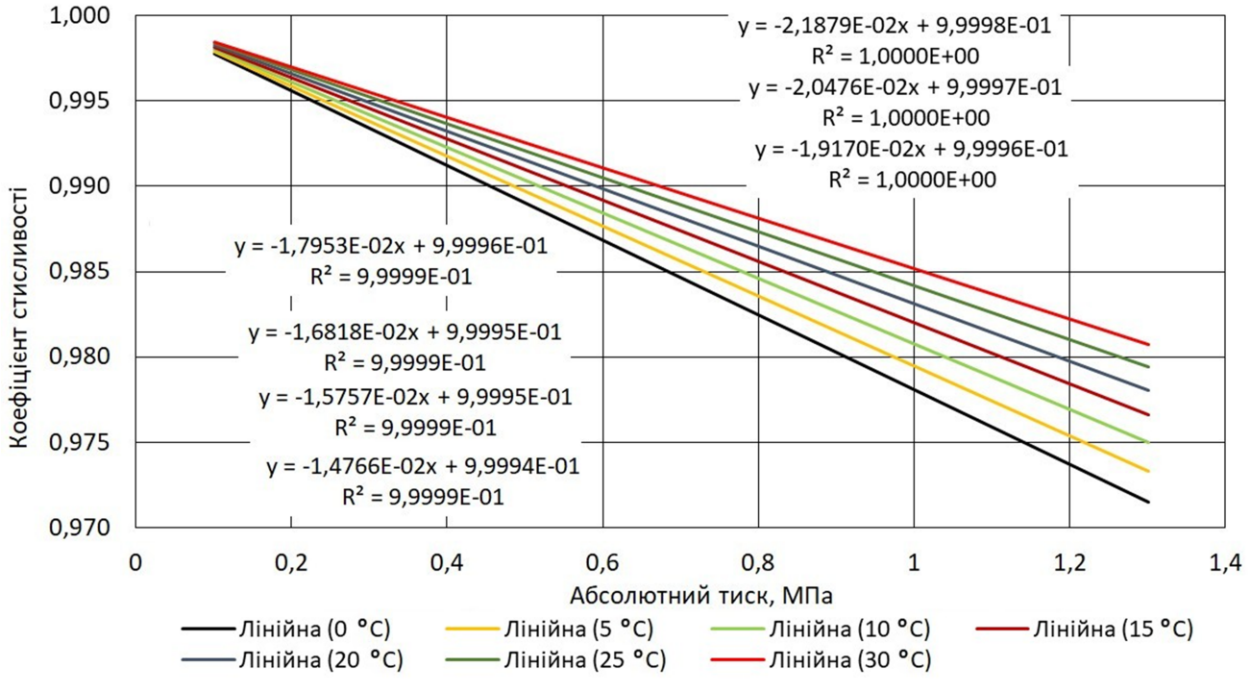


Рисунок 6 Залежність коефіцієнта стисливості газоводневої суміші з молярною концентрацією водню 10 % від абсолютного тиску за різних температур

режах технології транспортування газоводневої суміші з молярною концентрацією до 10 % включно. Додавання 10 % водню до природного газу не вимагає перепрофілювання або значної модернізації існуючих газорозподільних мереж, оскільки така газоводнева суміш вкладається в межі безпечної експлуатації наявних матеріалів, арматури та споживчого обладнання. За такої технології можна безпечно експлуатувати не тільки поліетиленові, але і сталеві газові мережі, оскільки небезпека розвитку водневої крихкості сталі незначна. Дослідження та практичні тести встановили стабільний процес згоряння газоводневої суміші з молярною концентрацією до 10 % в газовому обладнанні споживачів. Наразі в рамках європейської ініціативи *Horizon Europe* розробляються масштабні транскордонні проєкти, які передбачають подачу сумішей від 5 % до 10 % водню через українську ГТС до країн ЄС.

За описаним вище методом та розробленою програмою проведені дослідження впливу тиску і температури на властивості газоводневої суміші з молярною концентрацією 10 %, створеної на базі зазначеного вище природного газу. За результатами досліджень встановлено, що для газоводневої суміші за зміни тиску і температури у аналогічному діапазоні закономірності зміни її фізичних та термодинамічних властивостей близькі до отриманих для природного газу, але з іншими числовими коефіцієнтами відповідних математичних моделей.

Як приклад, на рисунку 6 показані одержані закономірності зміни коефіцієнта стисливості газоводневої суміші з молярною концентрацією 10 % від абсолютного тиску для різних значень температури.

Одержані коефіцієнти математичних моделей (1), (3), (8), (11), (14) і (18) для властивостей газоводневої суміші з молярною концентрацією водню 10 % (абсолютний тиск p у МПа, температура T в К) мають такий вигляд:

для коефіцієнта стисливості

$$B_z = 8,6304 \cdot 10^{-2} - 2,3664 \cdot 10^{-4} T, \quad (22)$$

для густини (кг/м^3)

$$A_\rho = -8,4218 \cdot 10^{-1} + 4,7900 \cdot 10^{-3} T - \\ -7,0067 \cdot 10^{-6} T^2, \quad (23)$$

$$B_\rho = 14,503 - 2,6346 \cdot 10^{-2} T, \quad (24)$$

для теплоємності за сталого тиску (кДж/(кг·К))

$$A_{C_p} = 1,5579 + 2,3343 \cdot 10^{-3} T, \quad (25)$$

$$B_{C_p} = 2,5656 \cdot 10^{-1} - 6,5908 \cdot 10^{-4} T, \quad (26)$$

для теплоємності за сталого об'єму (кДж/(кг·К))

$$A_{C_V} = 1,0489 + 2,3036 \cdot 10^{-3} T, \quad (27)$$

$$B_{C_V} = 5,3736 \cdot 10^{-2} - 1,4120 \cdot 10^{-4} T, \quad (28)$$

для коефіцієнта Джоуля-Томсона (К/МПа)

$$A_{D_j} = 13,925 - 3,2900 \cdot 10^{-2} T\,, \qquad (29)$$

$$B_{D_j} = 2,8938 \cdot 10^{-1} - 2,4547 \cdot 10^{-3} T + \\ + 4,3233 \cdot 10^{-6} T^2\,, \qquad (30)$$

$$C_{D_j} = -2,8645 \cdot 10^{-2} + 7,9520 \cdot 10^{-5} T\,, \qquad (31)$$

для коефіцієнта адіабати

$$A_k = 1,4184 - 4,0643 \cdot 10^{-4} T\,, \qquad (32)$$

$$B_k = -1,0044 \cdot 10^{-2} + 4,5648 \cdot 10^{-5} T\,, \qquad (33)$$

$$C_k = 3,9716 \cdot 10^{-3} - 9,9927 \cdot 10^{-6} T\,. \qquad (34)$$

Наступний етап досліджень полягав у встановленні впливу реальних властивостей енергоносіїв на газодинамічний режим експлуатації газорозподільних мереж різних категорій робочого тиску.

Як зазначалось вище, проєктні та експлуатаційні газодинамічні розрахунки газорозподільних мереж переважно виконують за методом, що наведений у чинних нормативних документах [26,27]. Зазначений метод передбачає, що обсяги транспортування газу зводяться до стандартних умов, що відповідають нормальним фізичним умовам, а саме до абсолютного тиску $p_н$ = 101325 Па і температури $T_н$ =273,15 К. Розрахункові формули не враховують реальних властивостей газу ні за нормальних, так і за робочих умов в газорозподільних мережах. Втрати тиску від тертя визначають для густини і в'язкості газу, що відповідають не робочим, а нормальним умовам. Не враховано вплив особливостей профілю траси на зміну тиску енергоносія в системі газопостачання. Введення таких припущень може спричинити помітні похибки результатів газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж.

Уточнений метод газодинамічного розрахунку, що пропонується, передбачає урахування реальних властивостей транспортованого середовища згідно з рекомендаціями AGA8 [27] за фактичних величин робочого тиску і температури в газорозподільній мережі.

Для визначення динамічної в'язкості енергоносія (Па·с) залежно від тиску і температури застосоване рівняння Lee66, яке передбачено обчислювальним алгоритмом програмного комплексу SIMONE

$$\eta = k_2 \exp(x_2 \cdot \rho^{\mathrm{Y}}) \cdot 10^{-7}\,, \qquad (35)$$

$$k_2 = \frac{(9,379 + 0,0160 \cdot M) \cdot T^{1,5}}{209,2 + 19,26 \cdot M + T}\,, \qquad (36)$$

$$x_2 = 3,448 + \frac{986,4}{T} + 0,01009 \cdot M\,, \qquad (37)$$

$$\mathrm{Y} = 2,4 - 0,2 \cdot x_2\,, \qquad (38)$$

де ρ – густина транспортованого енергоносія, г/см^3;

T – робоча температура енергоносія за шкалою Ранкіна, ^{o}Ra;

M – молярна маса енергоносія, г/моль.

Комплекс досліджень виконаний для стаціонарних ізотермічних газодинамічних режимів експлуатації газових мереж різних категорій робочого тиску при перекачуванні природного газу та газоводневої суміші. Спочатку розглядали варіант горизонтального газопроводу.

Зовнішні газорозподільні мережі здебільшого прокладають підземно. Для умов України температура ґрунту на глибині укладання газорозподільних мереж знаходиться у діапазоні (0-20) ^{o}C. Для встановлення максимального впливу температурного чинника на режим роботи підземного газопроводу робочу температуру енергоносія приймали рівною 20 ^{o}C.

Параметри газопроводів низького тиску вибрані такі: довжина 200 м, стандартні діаметри сталевих труб 57х3 мм, 108х3 мм та 219х3 мм. Абсолютний тиск на початку газопроводу приймали рівним 104325 Па [25]. При дослідженнях враховували, що газодинамічну енерговитратність газопроводів низького тиску характеризує гідравлічний нахил [22]

$$I = \frac{\Delta p}{l}\,, \qquad (39)$$

де Δp – різниця тиску на початку і в кінці газопроводу;

l – довжина газопроводу.

Досліджувався весь можливий діапазон витрат енергоносія в газопроводі. Для кожного значення витрати обчислювали гідравлічний нахил газопроводу за нормативною методикою та з урахуванням реальних властивостей газу. Знаходили відносну різницю гідравлічних нахилів в газопроводі за двома методиками розрахунку. Приклад одержаних результатів для горизонтально прокладеного газопроводу низького тиску діаметром 108х3 мм ілюструє таблиця 1.

Узагальнені результати дослідження впливу реальних властивостей природного газу на газодинамічну енерговитратність горизонтальних газопроводів низького тиску наведені на рисунку 7.

Як свідчить рисунок 7, врахування реальних властивостей природного газу дає можли-

Таблиця 1 – Результати порівняння розрахованої за двома методиками газодинамічної енерговитратності газопроводу низького тиску діаметром 108х3 мм

Назва параметра	Значення за витрати природного газу, м^3/год					
	20	50	100	150	200	250
Число Рейнольдса	5045	12614	25227	37841	50454	63068
Гідравлічний нахил за нормативною методикою, Па/м	0,066	0,330	1,158	2,443	4,178	6,362
Гідравлічний нахил за уточненою методикою, Па/м	0,072	0,361	1,262	2,659	4,542	6,911
Відносне уточнення гідравлічного нахилу, %	9,63	9,28	9,00	8,83	8,72	8,64

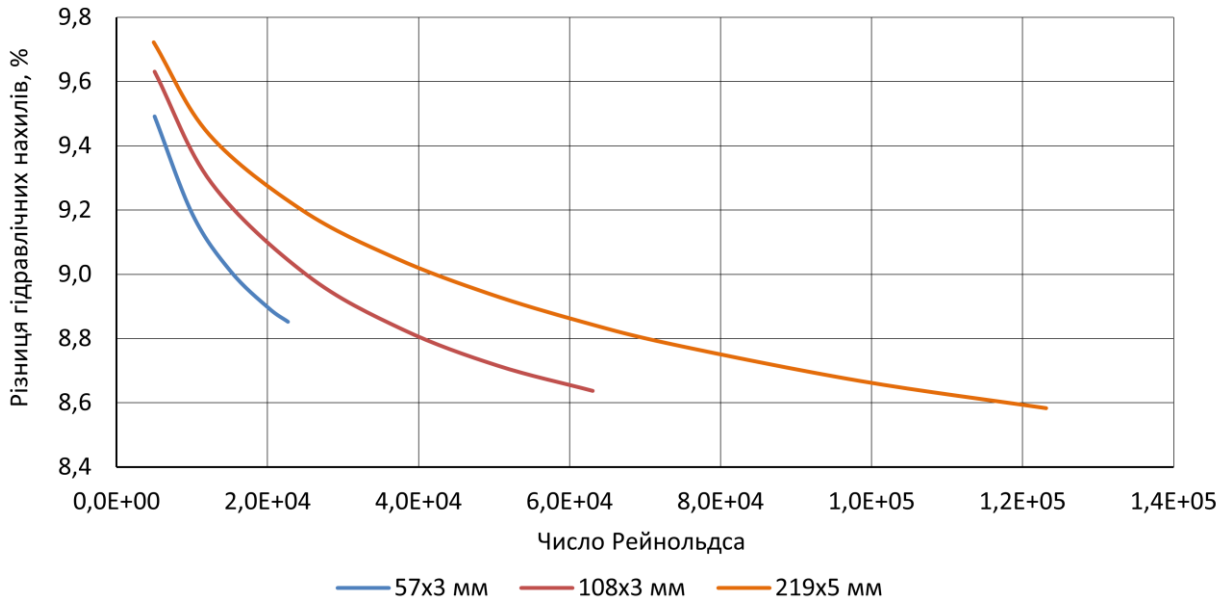


Рисунок 7 – Різниця газодинамічної енерговитратності горизонтальних газопроводів низького тиску за двома методиками розрахунку (транспортування природного газу)

вість на (8,5-9,7) % уточнити втрати тиску від тертя в горизонтальному газопроводі низького тиску. Різниця гідравлічних нахилів нелінійно залежить від діаметра та ступеня завантаження газопроводу.

Аналогічні дослідження виконано для горизонтальних сталевих газопроводів середнього та високого тиску для стандартних діаметрів, що досліджувались за низького тиску. Довжина газопроводів середнього та високого тиску приймалась рівною 2000 м. Абсолютний початковий тиск становив 401325 Па для газопроводу середнього тиску та 1301325 Па для газопроводу високого тиску. На відміну від газопроводів низького тиску, газодинамічну енерговитратність газопроводів середнього ти високого тиску характеризує енергетичний параметр A в (МПа)^2/м [22]

$$A = \frac{p_П^2 - p_K^2}{l}, \qquad (40)$$

де $p_П, p_K$ – абсолютний тиск енергоносія на початку та в кінці газопроводу відповідно.

Результати дослідження впливу реальних властивостей природного газу на газодинамічну енерговитратність горизонтально прокладених газопроводів середнього та високого тиску наведені на рисунках 8 і 9.

Як свідчать рисунки 8 і 9, вплив реальних властивостей природного газу на газодинамічну енерговитратність горизонтально прокладених газових мереж середнього та високого тиску дещо відрізняється від встановленого вище для газових мереж низького тиску. При малих завантаженнях газопроводів різниця енергетичних параметрів за двома методиками розрахунку досягає 9 % у газопроводі середнього тиску і 6,6 % у газопроводі високого тиску, при збільшенні завантаження газопроводів вона нелінійно зменшується, а при максимальних витратах газу починає зростати.

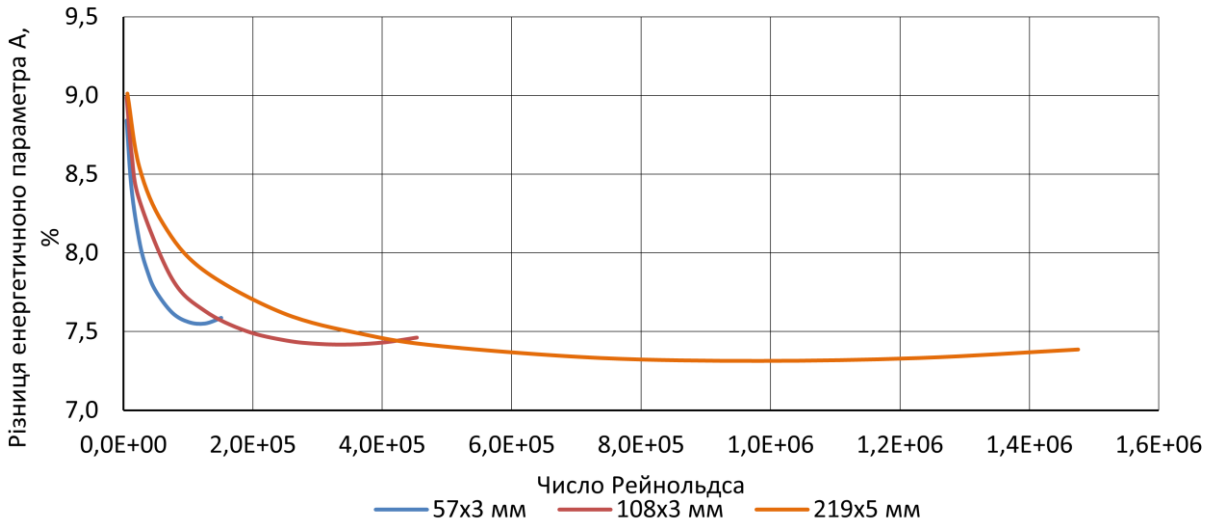


Рисунок 8 – Різниця газодинамічної енерговитратності горизонтальних газопроводів середнього тиску, одержана за двома методиками розрахунку (транспортування природного газу)

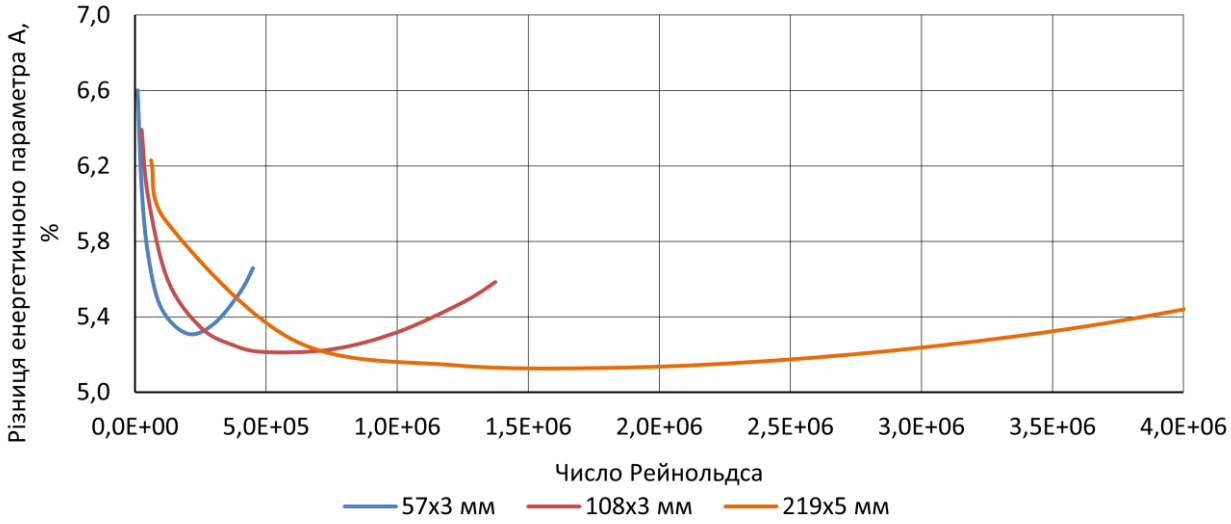


Рисунок 9 – Різниця газодинамічної енерговитратності горизонтальних газопроводів високого тиску, одержана за двома методиками розрахунку (транспортування природного газу)

Аналогічні дослідження проведено при транспортуванні горизонтально прокладеними газопроводами газоводневої суміші з молярною концентрацією водню 10 %. Одержано, що основні закономірності впливу реальних властивостей енергоносія на газодинамічну енерговитратність горизонтальних газопроводів різних категорій робочого тиску, які виявлені для природного газу, справедливі для випадків використання газоводневих сумішей. Про це свідчить рисунок 10, який представляє результати досліджень для газопроводів низького тиску при перекачуванні газоводневої суміші, що містить 10 мол. % водню.

Ділянки газорозподільних мереж населених пунктів нечасто прокладають горизонтально, вони зазвичай характеризуються певним профілем траси. Нами у роботі [22] показано, що для підвищення якості проєктних рішень та результатів експлуатаційних газодинамічних розрахунків газових мереж необхідно враховувати особливості профілю траси, тобто гравітаційний чинник.

На базі розробленого методу газодинамічного розрахунку газорозподільних мереж з врахуванням профілю траси [22], виконані комплексні дослідження спільного впливу реальних властивостей транспортованого енергоносія та гравітаційного чинника на газодинамічну енерговитратність газових мереж різних категорій робочого тиску. Діаметр модельних газопроводів приймали 57х3 мм, всі інші параметри такі, як у попередніх дослідженнях. Геометричний нахил газопроводу змінювали

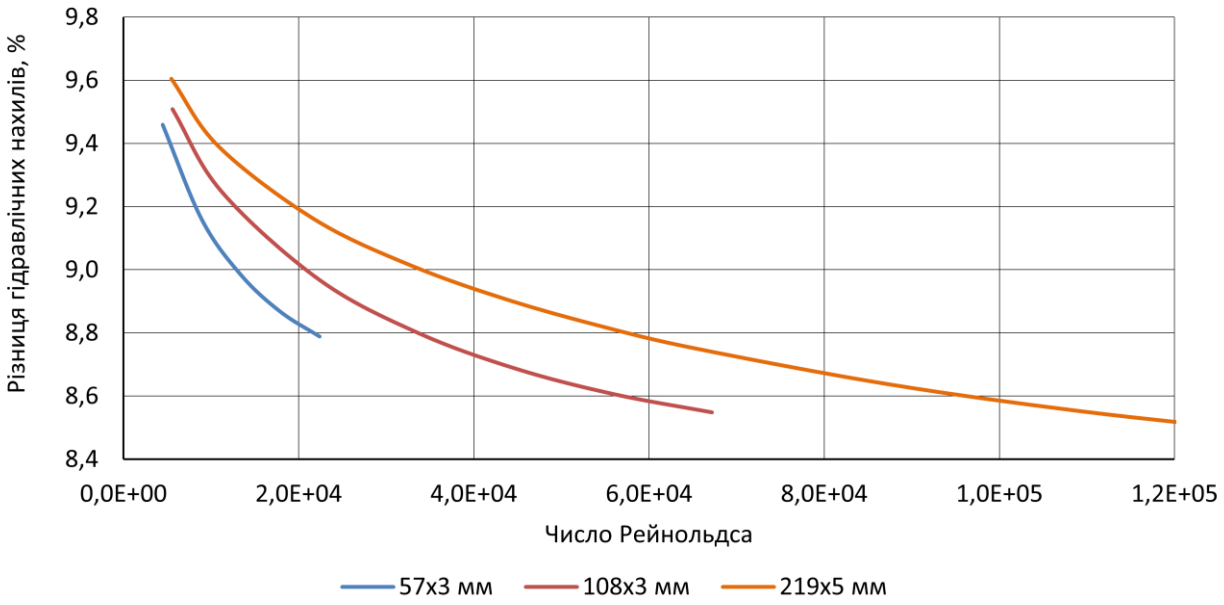


Рисунок 10 – Різниця газодинамічної енерговитратності горизонтальних газопроводів низького тиску за двома методиками розрахунку (транспортування газоводневої суміші, що містить 10 мол. % водню)

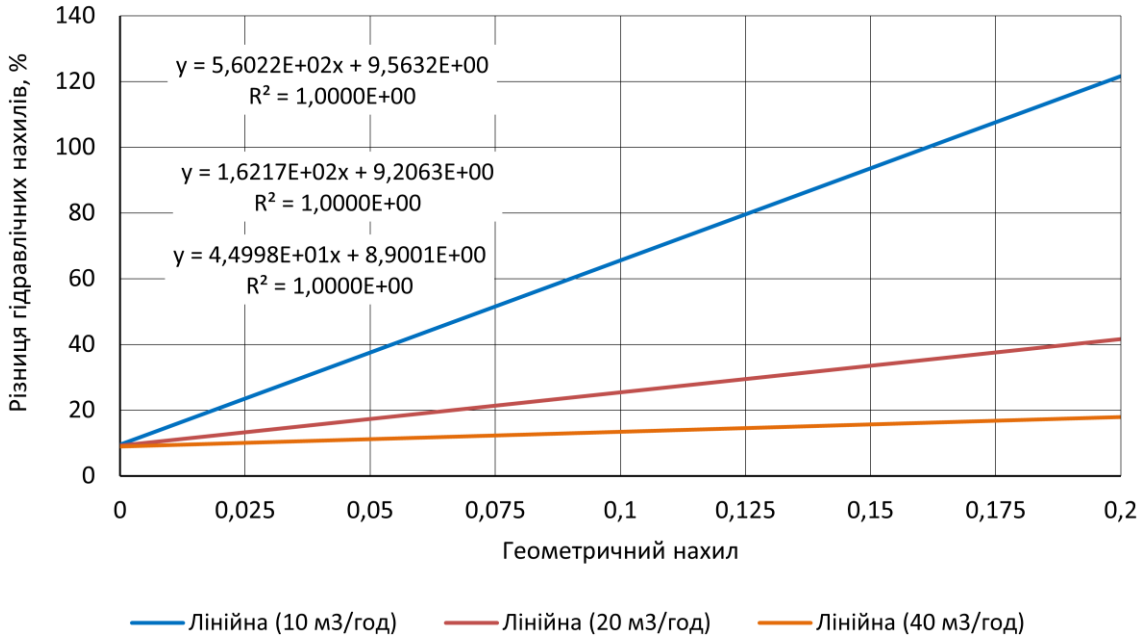


Рисунок 11 – Різниця газодинамічної енерговитратності газопроводу низького тиску діаметром 57х3 мм з урахуванням профілю траси за двома методиками розрахунку (транспортування природного газу)

від нуля до 0,2. Спочатку газопроводи розраховували за спрощеною нормативною методикою. Потім виконували розрахунки за тих самих витрат з урахуванням профілю траси та реальних властивостей транспортованого середовища. При дослідженнях враховано, що газові мережі низького тиску, на відміну від мереж середнього та високого тиску, безпосередньо зв'язані із споживачами енергоносіїв. Режим роботи газових приладів залежить від надлишкового тиску, з яким енергоносій надходить із мережі низького тиску до споживача. Відмінності закономірностей зміни абсолютного тиску з висотою для повітря і природного газу або газоводневої суміші спричинюють так званий гідростатичний напір, який змінює величину надлишкового тиску, що подається споживачу. Цей додатковий чинник, що опису-

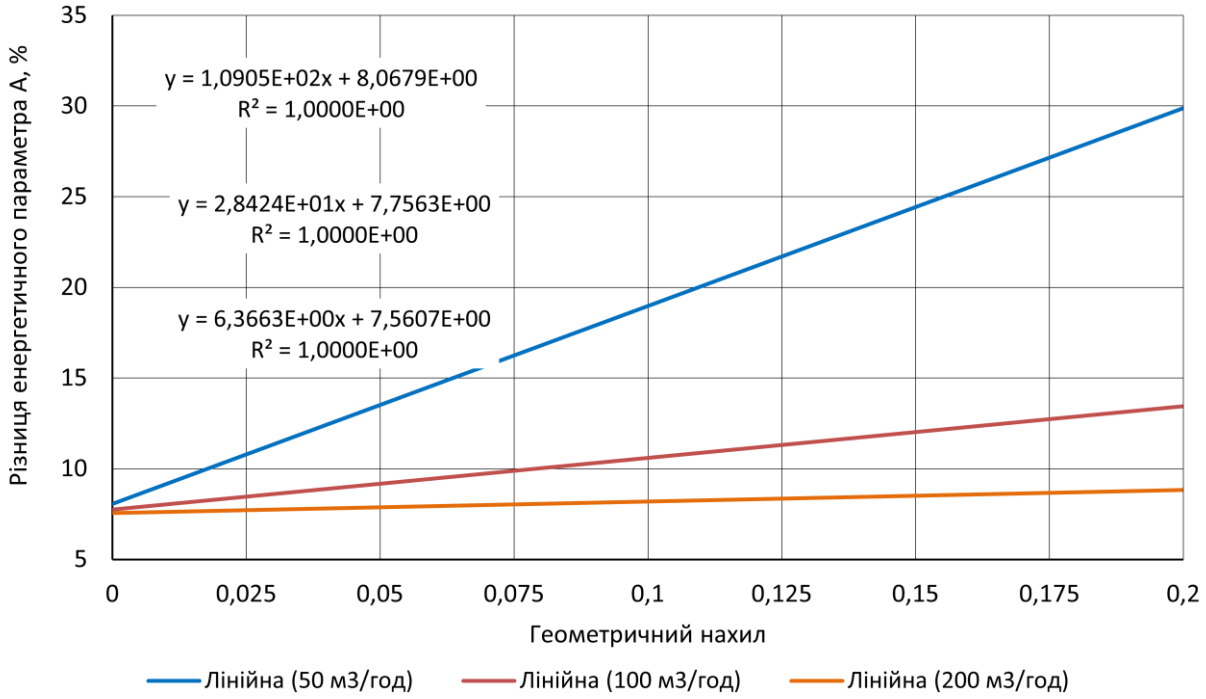


Рисунок 12 – Різниця газодинамічної енерговитратності газопроводу середнього тиску діаметром 57х3 мм з урахуванням профілю траси за двома методиками розрахунку (транспортування природного газу)

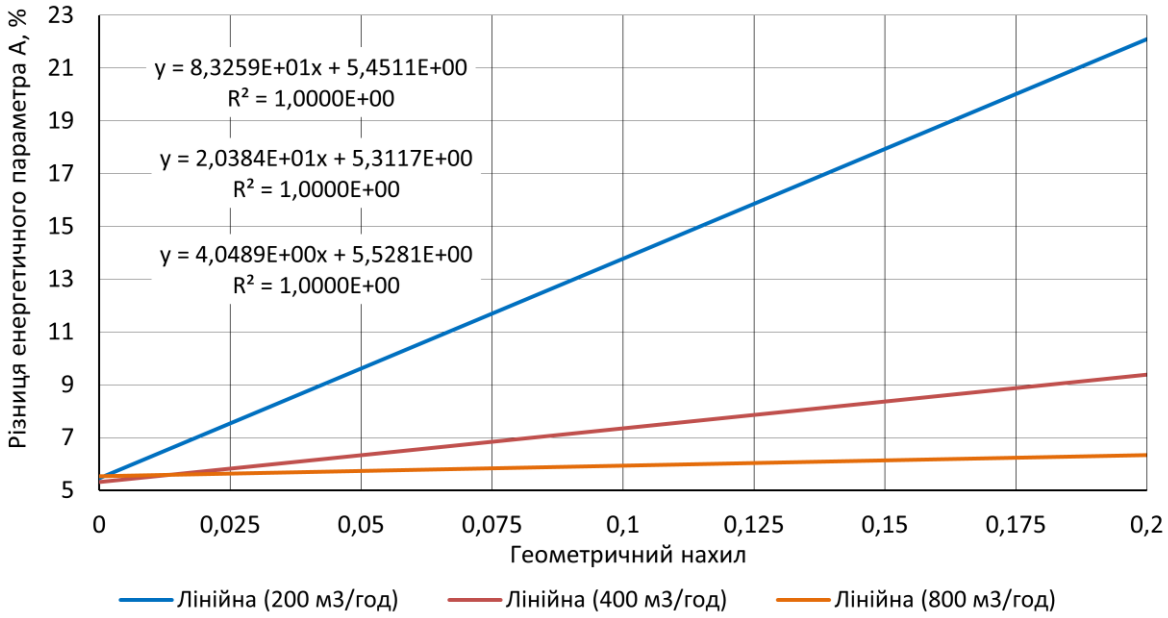


Рисунок 13 – Різниця газодинамічної енерговитратності газопроводу високого тиску діаметром 57х3 мм з урахуванням профілю траси за двома методиками розрахунку (транспортування природного газу)

ється барометричної формулою, врахований при уточненому газодинамічному розрахунку газових мереж низького тиску.

Одержані результати сумарного впливу реальних властивостей природного газу та гравітаційного чинника на газодинамічну енерговитратність газопроводу низького тиску наведені на рисунку 11. Рисунки 12 і 13 представляють результати досліджень сумарного впливу зазначених чинників на газодинамічну енерговитратність газопроводів середнього та високого тиску.

Аналіз рисунків 11-13 засвідчує помітний вплив профілю траси газопроводів на величину уточнення газодинамічної енерговитратності газорозподільних мереж шляхом врахування

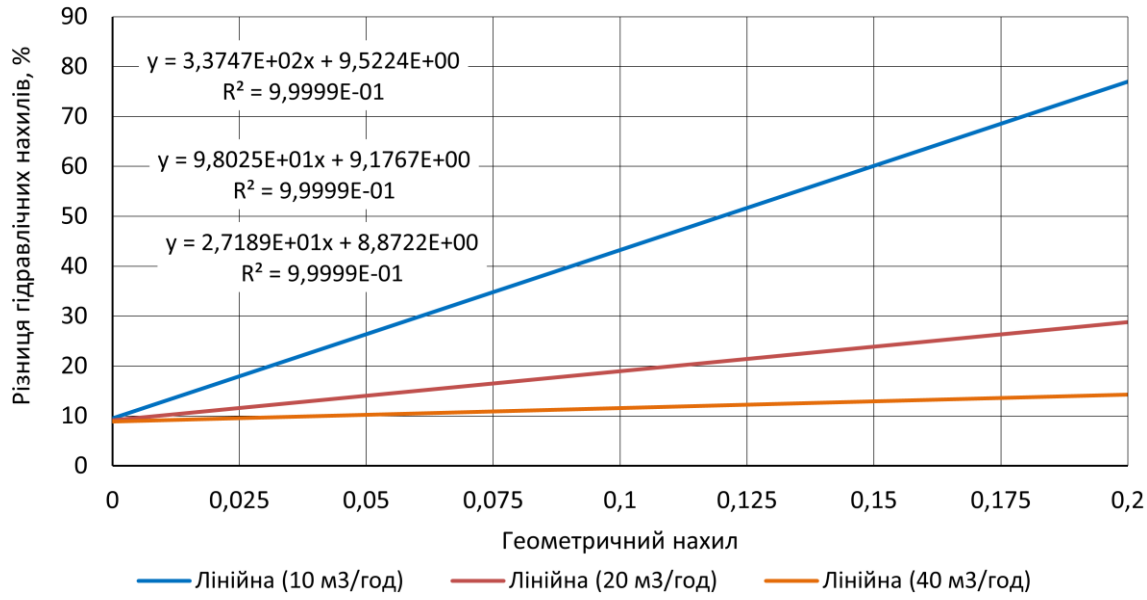


Рисунок 14 – Різниця газодинамічної енерговитратності газопроводу низького тиску діаметром 57х3 мм з урахуванням профілю траси за двома методиками розрахунку (транспортування газоводневої суміші, що містить 10 мол. % водню)

реальних властивостей транспортованих енергоносіїв. Найбільший вплив профілю траси встановлено для газопроводів низького тиску. Так за витрати природного газу 10 м^3/год у газопроводі діаметром 57х3 мм різниця уточнення газодинамічної енерговитратності при зміні геометричного нахилу ділянки від нуля до 0,2 змінюється від 9,5 % до 121,5 %. За сталої витрати вплив геометричного нахилу газопроводу всіх категорій робочого тиску на ступінь уточнення газодинамічної енерговитратності лінійний. Встановлено, що ступінь впливу профілю траси на режимні параметри газопроводів суттєво залежать від ступеня завантаження мережі.

Аналогічні дослідження щодо врахування впливу профілю траси газопроводів проведені при транспортуванні газоводневої суміші, що містить 10 мол. % водню. Приклад одержаних результатів для газопроводу низького тиску представлено на рисунку 14.

Висновки

1. Реалізація методу AGA8, що регламентований чинним міжнародним стандартом, у розробленій авторами комп'ютерній програмі дали можливість встановити величину похибок результатів газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж України, спричинену застосуванням спрощеної методики.

2. Встановлено, що для діапазону надлишкових тисків до 1,2 МПа включно і температури (0-30) ^{o}C, за яких функціонують газорозподільні мережі, коефіцієнт стисливості, густина і теплоємність природного газу та газоводневих сумішей за фіксованої температури лінійно залежить від абсолютного тиску. Коефіцієнти відповідних лінійних моделей з достовірністю понад 99 % описуються лінійною або поліноміальною функцією другого порядку від температури. Закон зміни коефіцієнта Джоуля-Томсона та коефіцієнта адіабати від тиску за фіксованої температури нелінійний, його можна достовірно описати поліноміальною функцією другого порядку.

3. Одержано, що для горизонтального газопроводу низького тиску врахування коефіцієнта стисливості, впливу робочих значень тиску і температури на густину і в'язкість природного газу та газоводневих сумішей на (8,5-9,7) % збільшує перепад тиску залежно від ступеня завантаження системи. Уточнення результатів газодинамічного розрахунку становить (7,4-9) % для горизонтальних газопроводів середнього тиску та (5,5-6,6) % для газопроводів високого тиску.

4. Встановлено помітний вплив особливостей профілю траси на величину коригування газодинамічної енерговитратності газорозподільних мереж, спричинену врахуванням реальних властивостей енергоносіїв. Максимальний вплив до 122 % виявлено для газопроводів низького тиску за неповного їх завантаження. Для газопроводів високого тиску при непов-

ному завантаженні додаткове врахування гравітаційного чинника уточнює різницю газодинамічної енерговитратності на величину до 22 %. Домішування водню до природного газу зменшує вплив гравітаційного чинника на ступінь коригування параметрів газодинамічних режимів експлуатації газових мереж при застосуванні уточненої методики розрахунку.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. F. A. Demneh, A. Mebah, A. Jaberi. Comparative Evaluation of Natural Gas Pipeline Simulators. Petromin Pipeliner. 2008. https://www.researchgate.net/publication/257355437_Comparative_Evaluation_of_Natural_Gas_Pipeline_Simulators.

2. S. A. Lone, N. Ramzan, A. R. Saleemi, and I. A. Karimi. Modeling and simulation of gas pipeline network for operational and infrastructural decisions. Computer Aided Chemical Engineering. 2009. vol. 26, 453–458. DOI: 10.1016/S1570-7946(09)70076-8.

3. A. H. González, J. M. de la Cruz, B. De Andrés-Toro, J. L. Risco-Martín. Modeling and Simulation of a Gas Distribution Pipeline Network. Applied Mathematical Modelling. 2008, 33(3),1584-1600. DOI: 10.1016/j.apm.2008.02.012.

4. J. Szoplik. Changes in gas flow in the pipeline depending on the network foundation in the area. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. vol. 43, 1-12. DOI : 10.1016/j.jngse.2017.03.020.

5. K. Kogut, P. Narloch, K. Kapusta, E. Zięba. Changes in the Operating Conditions of Distribution Gas Networks as a Function of Altitude Conditions and the Proportion of Hydrogen in Transported Natural Gas. MDPI Journal. 2025, *6*(4), 82. https://doi.org/10.3390/fuels6040082.

6. M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari. Response of natural gas distribution pipeline networks to ambient temperature variation (unsteady simulation. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018, 52, 94-105. https://doi.org /10.1016/j.jngse.2018.01.024.

7. K.Wen, Z. Xia, W. Yu, J Gong , A New Lumped Parameter Model for Natural Gas Pipelines in State Space. *Energies*, 1971, *11/8* . https://doi.org/10.3390/en11081971.

8. J. Szoplik. Improving the natural gas transporting based on the steady state simulation results. Energy,2016, 109, 105-116. ISSN 0360-5442. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.104 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216305175).

9. D. Brkić. Two efficient methods for gas distributive network calculation. 23rd International Conference on Efficiency. Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy System (ECOS2010). 2010. Lausanne, Switzerland. https://hal.science/hal–01857345v1/document.

10. K. Nasrifar, O. Bolland. Prediction of Thermodynamic Properties of Natural Gas Mixtures Using 10 Equations of State Including a New Cubic Two-Constant Equation of State. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006, 51(3), 253-266. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.01.004.

11. M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari. Developing novel correlations for calculating natural gas thermodynamic properties. Chemical and Process Engineering. 2011, 32 (4), 435-452. DOI: 10.2478/v10176-011-0035-1.

12. M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari. Numerical procedures for natural gas accurate thermodynamic properties calculation. Journal of Engineering Thermophysics. 2012, 21(4). DOI: 10.1134/S1810232812040017.

13 M. Farzaneh-Gord, A. Niazmand, M. Deymi-Dashtebayaz, H. R. Rahbari. Effects of natural gas compositions on CNG (compressed natural gas) reciprocating compressors performance. Energy.2015, 90. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.056.

14. M. Chaczykowski,A. J. Osiadacz. Comparative assesment of steady-state pipeline gas flow. Archives of Mining Sciences. View journal. 2012, 57(1), 23-38. DOI: 10.2478/v10267-012-0002-9.

15. A.-A. Alghlam,V. Stevanovic, E. A. Elgazdori, M. Banjac. Numerical Simulation of Natural Gas Pipeline Transients. 2019. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2019, 141(10),1. DOI: 10.1115/1.4043436.

16. N. Ya. Asiedu. Transient Modeling and Simulations with Ansys Flotran of Natural Gas in Pipelines. MDPI AG. https://doi.org/10.20944/PREPRINTS201807.0150.V1

17. С. Я. Григорський, О. В. Іванов. Особливості гідравлічного розрахунку газорозподільних мереж при транспортуванні суміші природного газу з воднем. Інтернаука. 2022. № 6 (125). С. 24-35. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-6.

18. М. Д. Середюк, С. В. Великий. Вплив концентрації водню на властивості газоводневих сумішей та газодинамічні процеси в розподільних газових мережах. Нафтогазова енергетика. 2023. №2(40) . С.25-37. DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-25-37.

19. М. Д. Середюк, С. В. Великий. Зміна режимних параметрів газорозподільних мереж при переведенні їх на транспортування газоводневих сумішей. Нафтогазова енергетика. 2024. № 1(41). С. 96-104. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-96-104.

20. М. Д. Середюк, С. В. Великий. Аналіз методів визначення газодинамічної енерговитратності газових мереж населених пунктів. Нафтогазова енергетика. 2022. №2(38). С. 51-61. DOI 10.31471/1993-9868-2022-2(38)-51-61.

21. М. Д. Середюк, Н. В. Мотрук Розрахункові витрати газу в газорозподільних мережах. Нафтогазова енергетика . 2024.№ 1(41).С. 52-61. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-52-61.

22. М. Д. Середюк, Н. В. Мотрук Розрахунок газорозподільних мереж з урахуванням профілю траси. *Нафтогазова енергетика*. 2024. № 2(42). С. 37-49. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-2(42)-37-49.

23 M. D. Serediuk; V. B. Volovetskyi; N.V. Motruk. Improving the method of technological design of gas distribution networks of settlements. Archives of Materials Science and Engineering. 2025-08-01. DOI: 10.5604/01.3001.0055.6208.

24 С. Я. Григорський, О. В. Іванов. Розрахунок фізичних властивостей суміші природного газу з воднем на основі фундаментального рівняння стану AGA. Нафтогазова енергетика. 2022. № 1 (37). С. 60-68. https://doi.org/10.31471/10.31471/1993-9868-2022-1(37)-60-68.

25. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. [Чинний від 2019-07-01]. Вид. офіц. Київ: *Мінрегіон України*, 2019. 113 с.

26. Кодекс газорозподільних мереж. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15/en/ed20260430#Text (дата звернення: 06.08.2026).

27. ДСТУ EN ISO 20765-1:2022 Природний газ. Обчислювання термодинамічних властивостей. Частина 1. Властивості газової фази за умов транспортування та розподіляння (EN ISO 20765-1:2018, IDT).

References

1. F. A. Demneh, A. Mebah, A. Jaberi. Comparative Evaluation of Natural Gas Pipeline Simulators. Petromin Pipeliner. 2008. https://www.researchgate.net/publication/257355437_Comparative_Evaluation_of_Natural_Gas_Pipeline_Simulators.

2. S. A. Lone, N. Ramzan, A. R. Saleemi, and I. A. Karimi. Modeling and simulation of gas pipeline network for operational and infrastructural decisions. Computer Aided Chemical Engineering. 2009. vol. 26, 453–458. DOI: 10.1016/S1570-7946(09)70076-8.

3. A. H. González, J. M. de la Cruz, B. De Andrés-Toro, J. L. Risco-Martín. Modeling and Simulation of a Gas Distribution Pipeline Network. Applied Mathematical Modelling. 2008, 33(3),1584-1600. DOI: 10.1016/j.apm.2008.02.012.

4. J. Szoplik. Changes in gas flow in the pipeline depending on the network foundation in the area. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. vol. 43, 1-12. DOI : 10.1016/j.jngse.2017.03.020.

5. K. Kogut, P. Narloch, K. Kapusta, E. Zięba. Changes in the Operating Conditions of Distribution Gas Networks as a Function of Altitude Conditions and the Proportion of Hydrogen in Transported Natural Gas. MDPI Journal. 2025, *6*(4), 82. https://doi.org/10.3390/fuels6040082.

6. M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari. Response of natural gas distribution pipeline networks to ambient temperature variation (unsteady simulation. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018, 52, 94-105. https://doi.org /10.1016/j.jngse.2018.01.024.

7. K.Wen, Z. Xia, W. Yu, J Gong , A New Lumped Parameter Model for Natural Gas Pipelines in State Space. *Energies*, 1971, *11/8* . https://doi.org/10.3390/en11081971.

8. J. Szoplik. Improving the natural gas transporting based on the steady state simulation results. Energy,2016, 109, 105-116. ISSN 0360-5442. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.104 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216305175).

9. D. Brkić. Two efficient methods for gas distributive network calculation. 23rd International Conference on Efficiency. Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy System (ECOS2010). 2010. Lausanne, Switzerland. https://hal.science/hal–01857345v1/document.

10. K. Nasrifar, O. Bolland. Prediction of Thermodynamic Properties of Natural Gas Mixtures Using 10 Equations of State Including a New Cubic Two-Constant Equation of State. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006, 51(3), 253-266. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.01.004.

11. M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari. Developing novel correlations for calculating natural gas thermodynamic properties. Chemical and Process Engineering. 2011, 32 (4), 435-452. DOI: 10.2478/v10176-011-0035-1.

12. M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari. Numerical procedures for natural gas accurate thermodynamic properties calculation. Journal of Engineering Thermophysics. 2012, 21(4). DOI: 10.1134/S1810232812040017.

13 M. Farzaneh-Gord, A. Niazmand, M. Deymi-Dashtebayaz, H. R. Rahbari. Effects of natural gas compositions on CNG (compressed natural gas) reciprocating compressors performance. Energy.2015, 90. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.056.

14. M. Chaczykowski,A. J. Osiadacz. Comparative assesment of steady-state pipeline gas flow. Archives of Mining Sciences. View journal. 2012, 57(1), 23-38. DOI: 10.2478/v10267-012-0002-9.

15. A.-A. Alghlam,V. Stevanovic, E. A. Elgazdori, M. Banjac. Numerical Simulation of Natural Gas Pipeline Transients. 2019. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2019, 141(10),1. DOI: 10.1115/1.4043436.

16. N. Ya. Asiedu. Transient Modeling and Simulations with Ansys Flotran of Natural Gas in Pipelines. MDPI AG. https://doi.org/10.20944/PREPRINTS201807.0150.V1

17. S. Ya. Grigorsky, O. V. Ivanov. Peculiarities of hydraulic calculation of gas distribution networks when transporting a mixture of natural gas with hydrogen. Internauka. 2022. No. 6 (125). P. 24-35. https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-6.

18. M. D. Serediuk, S. V. Velikiy. The influence of hydrogen concentration on the properties of gas-hydrogen mixtures and gas-dynamic processes in gas distribution networks. Oil and Gas Energy. 2023. No. 2(40). P. 25-37. DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-25-37.

19. M. D. Serediuk, S. V. Velikiy. Changing the operating parameters of gas distribution networks when converting them to transport gas-hydrogen mixtures. Oil and Gas Energy. 2024. No. 1(41). P. 96-104. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-96-104.

20. M. D. Serediuk, S. V. Velikiy. Analysis of methods for determining gas-dynamic energy consumption of gas networks of settlements. Oil and Gas Energy. 2022. No. 2(38). P. 51-61. DOI 10.31471/1993-9868-2022-2(38)-51-61.

21. M. D. Serediuk, N. V. Motruk Estimated gas consumption in gas distribution networks. Oil and Gas Energy. 2024.№ 1(41). P. 52-61. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-52-61.

22. M. D. Serediuk, N. V. Motruk Calculation of gas distribution networks taking into account the profile of the route. Oil and gas energy. 2024.№ 2(42). P. 37-49. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-2(42)-37-49.

23. M. D. Serediuk; V. B. Volovetskyi; N.V. Motruk. Improving the method of technological design of gas distribution networks of settlements. Archives of Materials Science and Engineering. 2025-08-01. DOI: 10.5604/01.3001.0055.6208.

24. S. Ya. Grigorsky, O. V. Ivanov. Calculation of physical properties of a mixture of natural gas with hydrogen based on the fundamental equation of state AGA. Oil and Gas Energy. 2022. No. 1 (37). P. 60-68. https://doi.org/10.31471/10.31471/1993-9868-2022-1(37)-60-68.

25. DBN V.2.5-20:2018. Gas supply. [Valid from 2019-07-01]. Official edition. Kyiv: Ministry of Agriculture of Ukraine, 2019. 113 p.

26. Code of Gas Distribution Networks. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15/en/ed20260430#Text (access date: 06.08.2026).

27. DSTU EN ISO 20765-1:2022 Natural gas. Calculation of thermodynamic properties. Part 1. Properties of the gas phase under conditions of transportation and distribution (EN ISO 20765-1:2018, IDT

CONSIDERATION OF ENERGY CARRIERS PROPERTIES UNDER TRANSPORTATION CONDITIONS IN GAS-DYNAMIC CALCULATION OF GAS DISTRIBUTION NETWORKS

Serediuk M. D.
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-6874-6947
e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua

Tsiurak V. Yu.
Postgradute student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0009-0002-4373-2239
e-mail: vadym.tsiurak-a18524@nung.edu.ua

Abstract. Efficiently operating gas distribution networks is essential for reliably supplying natural gas and renewable energy resources to consumers. Designing, reconstructing and operating gas networks involves gas-dynamic calculations. In Ukraine, these are currently primarily performed using simplified methods, which can lead to inaccurate results. This study aims to determine the impact of the real properties of natural gas and gas-hydrogen mixtures on the gas-dynamic parameters of gas distribution networks across different operating pressure categories, while taking into account the characteristics of the pipeline route profile. The study uses a custom-developed computer program that implements the AGA8 equation of state in accordance with international standards to establish the relationships between operating pressure, temperature, and the properties of these energy carriers during transport and distribution. The impact of the real properties of these energy carriers on the gas-dynamic energy consumption of horizontal network sections was also evaluated. The results indicate that accounting for these real properties refines calculated gas-dynamic pressure losses by up to 10% for low-pressure pipelines transporting natural gas and gas-hydrogen mixtures (with a 10% molar concentration) and by 9% and 7% for medium- and high-pressure pipelines, respectively. The study also quantified the influence of the route profile on gas-dynamic energy consumption when factoring in the real properties of the energy carriers. The most signify-cant impact of this factor was observed in low-pressure pipelines operating at partial load. When the geometric slope of a low-pressure section varies from 0 to 0.2, the refinement of the pressure drop difference ranges from 9.5% to 121.5%, depending on the medium's flow rate. For medium- and high-pressure gas pipelines, accounting for the gravitational factor in addition to the real properties of the energy carriers refines the difference in gas-dynamic energy consumption by up to 22%.

Key words: AGA8 equation of state, gas-hydrogen mixtures, pressure effect, temperature effect, route profile, gas-dynamic energy consumption.