



Прийнято 02.06.2025. Прорецензовано 18.11.2025. Опубліковано 26.12.2025.

УДК 622.691.4

DOI: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-170-183

ГАЗОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ ПІСЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЄЮ ПРОТЯГУВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ТРУБИ В СТАЛЕВИЙ ГАЗОПРОВІД

Середюк М. Д. *

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-2748-926X>

e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua

Цюрак В. Ю.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0009-0002-4373-2239>

e-mail: vadyim.tsiurak-a18524@nung.edu.ua

Анотація. Газорозподільні мережі України, що споруджені зі сталевих труб, характеризуються тривалим терміном експлуатації. Важливою умовою забезпечення надійного газопостачання є їх реконструкції із заміною зношених сталевих труб на поліетиленові. Однією із прогресивних технологій реконструкції є протягування поліетиленового газопроводу у зношену сталеву трубу. Реалізація такої технології реконструкції в умовах України не тільки відновить функціонування системи газопостачання, але і створить умови для надійного транспортування не тільки газу, але і газоводневих сумішей. Реконструкція газорозподільної мережі передбачає зміну діаметрів ділянок, шорсткості поверхні труб та властивостей транспортованого середовища, що суттєво впливає на режими експлуатації. Метою роботи є встановлення закономірностей зміни газодинамічної енерговитратності газорозподільних мереж після реконструкції технологією протягування поліетиленового газопроводу в зношеній сталевий газопровід за транспортування як природного газу, так і газоводневих сумішей. Визначено фізичні, термодинамічні та енергетичні характеристики природного газу та газоводневих сумішей згідно з вимогами чинних стандартів. Встановлено закономірності зміни газодинамічної енерговитратності елемента системи газопостачання після заміни сталевих газопроводів на поліетиленовий за різного ступеня його завантаження при транспортуванні природного газу. Підтверджено необхідність зміни робочого тиску у поліетиленовому газопроводі після реконструкції з низького на середній. Визначено збільшені витрати газоводневих сумішей у поліетиленовому газопроводі для збереження обсягу енергії, яку забезпечував природний газ до реконструкції мережі. Одержані аналітичні залежності питомої газодинамічної енерговитратності поліетиленових газопроводів від ступеня їх завантаження та молярної концентрації водню в газоводневій суміші для низки рекомендованих нормативним документом варіантів заміни сталевих труб на поліетиленову.

Ключові слова: відновлення працездатності газових мереж; безтраншейна заміна труб; природний газ; газоводневі суміші; об'ємна теплота згоряння; зміна витрат та робочого тиску.

Запропоноване посилання: Середюк, М. Д. & Цюрак, В. Ю. (2025). Газодинамічні параметри газорозподільних мереж після реконструкції технологією протягування поліетиленової труби в сталевий газопровід. Нафтогазова енергетика, 2(44), 170-183. doi: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-170-183.

* 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

Наукові установи, промислові компанії та урядові організації в різних країнах активно підтримують впровадження таких проєктів, як HyDeploy, GRHYD, THyGA, HyBlend та інші. Вони скеровані на розроблення ефективних шляхів скорочення викидів вуглецю в атмосферу в найближчі десятиліття. Одним із шляхів успішного вирішення проблеми декарбонізації є застосування водню та метановодневих сумішей у різних сферах економіки, в тому числі, у газопостачанні.

При реалізації глобального переходу до екологічно чистих джерел енергії, зокрема водню та газоводневих сумішей, виникає необхідність у модернізації газорозподільних мереж. Реконструкція зношених сталевих газопроводів шляхом протягування поліетиленової (ПЕ) труби всередину, відома як технологія "pipe-in-pipe" або "slip-lining", є економічно вигідним рішенням для подовження терміну служби трубопровідної інфраструктури. Цей метод реконструкції дає змогу відновити герметичність системи, зменшити витоки газу та адаптувати газопровідні мережі до нових умов, таких як транспортування газоводневих сумішей. Однак, такі зміни суттєво впливають на газодинамічні параметри газорозподільних мереж, такі як тиск, витрата, швидкість потоку, що вимагає детального аналізу для забезпечення ефективності та безпеки. Замість різкого переходу від використання природного газу до чистого водню доцільно здійснювати поступове введення водневих домішок у газову мережу, що забезпечить здійснення енергетичного переходу з мінімальними ризиками щодо надійного постачання енергоносіїв споживачам.

Сучасні дослідження у даному напрямі зосереджені на вивченні фізико-хімічних властивостей метановодневих сумішей, зокрема їхньої густини, в'язкості та енергетичної спроможності. Ці фактори впливають як на можливість масштабного транспортування альтернативних енергоносіїв трубопроводами, так і на їх ефективність у кінцевому використанні – в пальниках, котлах, плитах, двигунах та паливних елементах.

Хоча водень є екологічно чистим джерелом енергії, його використання у вигляді газових сумішей з природним газом у системах газопостачання вимагає вирішення низки завдань. Будівництво нових трубопроводів, спеціально пристосованих для транспортування водню і газоводневих сумішей, вимагає значних витрат. Застосування існуючої газопровідної мережі зі сталевих труб для транспорту-

вання газоводневих сумішей зі значним вмістом водню вимагає вирішення проблем водневої крихкості металу, недостатньої герметичності системи та потенційних витоків енергоносія. У той же час, на думку більшості вітчизняних та зарубіжних експертів, використання існуючої газорозподільної мережі із поліетиленових труб дає змогу спростити і скоротити процес переходу від природного газу до застосування газоводневих сумішей.

Будь-яка технологія реконструкції системи газопостачання пов'язана зі змінами геометричних характеристик елементів газорозподільних мереж, властивостей транспортованих газів, режимних параметрів експлуатації. Робота, що пропонується, встановлює закономірності впливу зазначених чинників на газодинамічні процеси в газорозподільних мережах після реконструкції.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Серед активних масштабних проєктів та досліджень щодо перспектив застосування газоводневих сумішей в існуючих газопровідних системах можна виділити HyBlend (США) [1], де тестують режими транспортування природного газу з вмістом водню до 20 %. Попередні дані досліджень засвідчили, що низькі концентрації водню (5–10) % мало впливають на механічні властивості трубопроводів, але більші концентрації водню вимагають значних змін та реконструкції наявної газопровідної мережі. Слід відзначити також низку європейських проєктів (Німеччина, Нідерланди), які присвячені практичній реалізації технології домішування водню до природного газу у місцевих газових мережах. Вони досліджують умови застосування існуючої інфраструктури та можливості переобладнання трубопроводів для транспортування як газоводневих сумішей, так і чистого водню. Австралійські фахівці реалізують проєкт "Hydrogen Park South Australia" [2], який передбачає додавання 5 % водню до природного газу в існуючу газову мережу і містить плани необхідної реконструкції системи газопостачання за необхідності транспортування газоводневих сумішей з більшим вмістом водню. У рамках зазначеного проєкту досліджують поведінку поліетиленових труб у водневому середовищі.

Режими експлуатації газопровідних систем у випадку транспортування газоводневих сумішей та водню значною мірою залежать від властивостей енергоносіїв. Це визначає важливість досліджень особливостей газодина-

мічних процесів в газопроводах при застосуванні альтернативних енергоносіїв. У роботі [3] встановлено зміни об'ємної витрати, швидкості та інших газодинамічних характеристик під час транспортування газоводневих сумішей та водню в існуючих трубопроводах за тисків, характерних для магістральних газопроводів. Автори роботи стверджують, що адаптація існуючої газотранспортної інфраструктури для використання водню є практичною стратегією переходу від природного газу до водню, яка дає можливість уникнути будівництва нових магістралей. Крім газодинамічних аспектів, у роботі [3] розглянуті питання оцінювання кількості енергії, яка надходить споживачам при транспортуванні газоводневих сумішей замість природного газу. Встановлено, що для передачі енергетичного еквіваленту, що забезпечував природний газ, об'ємна витрата водню у трубопроводі повинна бути збільшена більш, ніж у три рази. Це обумовлено відмінностями об'ємної теплоти згоряння енергоносіїв. Висновки зазначеної роботи підтверджуються результатами робіт [4,5], в яких всесторонньо досліджено вплив вмісту водню у газоводневій суміші на фізико-хімічні, термодинамічні та енергетичні властивості енергоносія. Встановлено закономірності зміни газодинамічної енерговитратності сталевих та поліетиленових газових мереж різних категорій тиску залежно від їх завантаження та молярної концентрації водню в газоводневій суміші.

Автори роботи [6] розглядають газодинамічні особливості транспортування газоводневих сумішей у реальній газорозподільній мережі з нерівномірним профілем висот. Дослідження показали, що концентрація водню в суміші може суттєво впливати на витрату газу та тиск у мережі, що необхідно враховувати при проєктуванні та експлуатації газових систем.

Крім газодинамічних аспектів транспортування альтернативних енергоносіїв в існуючих трубопроводах, активно досліджуються питання забезпечення надійності та безпеки систем газопостачання. У роботі Tian X., Pei J. [7] розглянуто вплив водню на безпеку транспортування газоводневих сумішей у сталевих трубопроводах. Встановлено, що водень може підвищувати ризик водневої крихкості, що призводить до зниження механічної міцності сталевих труб та збільшення ймовірності утворення мікротріщин, особливо при тривалій експлуатації газопроводу. У зазначеній роботі відзначено, що використання поліетиленових труб може підвищити герметичність і безпеку газопровідних мереж, що не применшує важ-

ливості контролю газодинамічних параметрів для запобігання аварійним ситуаціям.

Робота [8] узагальнює перспективи використання існуючої газової інфраструктури для транспортування водню в європейському контексті. Автори зазначають, що однією із ключових проблем практичної реалізації нової технології є явище водневої крихкості сталевих труб, що може призводити до утворення мікротріщин і зниження механічних характеристик сталі. Це важливо враховувати при реконструкції газопроводів та віддавати перевагу застосуванню поліетиленових труб для транспортування газоводневих сумішей з підвищеним вмістом водню [6].

National Renewable Energy Laboratory [9] аналізує економічні аспекти реконструкції газопровідних систем. Встановлено, що збільшення масштабу проєктів з реконструкції призведе до зниження витрат на одиницю об'єму транспортування водню, оскільки фіксовані витрати розподіляються на більший обсяг. Трубопроводи, зокрема поліетиленові, розглядаються як більш економічно вигідний варіант для транспортування великих обсягів водню порівняно з іншими методами, такими як транспортування в зрідженому або стисненому стані.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

В Україні значна частка газорозподільних мереж, що збудована із сталевих труб, характеризуються тривалим терміном експлуатації та значною зношеністю матеріалу труб. Такий стан речей вимагає здійснення широкомасштабних робіт з їх ремонту та реконструкції. У сучасних умовах реконструкція систем газопостачання повинна проводитись з використанням прогресивних технологій, що знайшли застосування у світовій практиці. Однією із таких технологій вважають протягування поліетиленового газопроводу у зношену сталеву трубу, яка надалі буде слугувати своєрідним каркасом для нової труби. Реалізація такої технології реконструкції в умовах України не тільки відновить функціонування системи газопостачання, але і створить умови для надійного транспортування замість природного газу газоводневих сумішей. Важливо, що особливості реалізації зазначеної технології безтраншейного відновлення працездатності елементів системи газопостачання передбачено чинним нормативним документом [10]. Тут наведено рекомендації щодо оптимальних з технологічних міркувань співвідношень діаметрів сталевих

вих і поліетиленових труб. Однак зазначений документ не містить методів прогнозування газодинамічної енерговитратності та режимів експлуатації елементів газорозподільних мереж, що були реконструйовані за даною технологією. Слід відзначити роботу [11], яка аналізує зміну пропускної здатності сталевих газопроводів низького тиску при заміні його на поліетиленовий низького тиску. Через неприпустиме зростання витрат тиску автори пропонують при реконструкції передбачити використання поліетиленового газопроводу не низького, а середнього тиску. Всі дослідження у роботі [11] виконано для випадку транспортування виключно природного газу. На відміну від зазначеної роботи, у роботі, що пропонується, реалізовано комплексний підхід до встановлення впливу низки чинників, а саме діаметра, матеріалу труби, фізичних, термодинамічних та енергетичних характеристик енергоносіїв на газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж та передачу ними енергії після їх реконструкції.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи – встановлення закономірностей зміни газодинамічної енерговитратності газорозподільних мереж при застосуванні технології протягування поліетиленового газопроводу всередину зношеної сталевих труби з метою відновлення працездатності та можливості транспортування газозводневих сумішей.

Реалізація мети досліджень передбачає виконання таких завдань для кожного із рекомендованих варіантів заміни сталевих труби на поліетиленову:

- розрахунок фізичних та термодинамічних властивостей природного газу та газозводневих сумішей за різного молярного вмісту водню;
- знаходження газодинамічної енерговитратності сталевих газопроводів низького тиску за різного ступеня його завантаження при транспортуванні природного газу;
- встановлення газодинамічної енерговитратності поліетиленового газопроводу при транспортуванні природного газу за витрат, що були у сталевому газопроводі;
- знаходження збільшених витрат газозводневих сумішей у поліетиленовому газопроводі для збереження обсягу енергії, яку забезпечував природний газ до реконструкції мережі;
- встановлення газодинамічної енерговитратності поліетиленового газопроводу при транспортуванні газозводневих сумішей зі збільшеними витратами.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Дослідження проведено для природного газу, який в 2024 році застосовувався для газопостачання споживачів Івано-Франківської області. Компонентний склад природного газу у молярних відсотках наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Склад природного газу для проведення досліджень

Назва компонента	Молярна частка, %
Метан	94,1545
Етан	3,1397
Пропан	0,8704
Ізобутан	0,1224
н-Бутан	0,1389
нео-Пентан	0,0004
ізопентан	0,0345
н-Пентан	0,0264
Генсан	0,0412
Кисень	0,0026
Азот	0,8460
Діоксид вуглецю	0,6230

На базі зазначеного природного газу нами сформовано склад газозводневих сумішей з різним молярним вмістом водню від нуля до 100 %. За методами, які наведено в [12], визначено фізичні, термодинамічні та енергетичні властивості природного газу та газозводневих сумішей, які необхідні для газодинамічних розрахунків газорозподільних мереж. Згідно з вимогами нормативних документів [13,14], властивості енергоносія розраховано за таких стандартних умов для вимірювання об'єму енергоносія: тиск $p_2 = p_n = 101325$ Па, температура $t_2 = t_n = 0$ °C; для згоряння енергоносія температура $t_1 = 25$ °C. Результати обчислень властивостей газу та газозводневих сумішей за зазначених стандартних умов наведено у таблицях 2 і 3.

Нами досліджено всі рекомендовані нормативним документом [10] варіанти співвідношень діаметрів зношених сталевих труб як каркасу для розміщення у них нових поліетиленових газопроводів. Розтлумачимо методику досліджень для варіанта реконструкції з такими даними: діаметр зношеного сталевих газопроводу низького тиску 108х3 мм, діаметр поліетиленового газопроводу 63х3,6 мм. Довжина газопроводу 200 м. Вважали, що сталевий газопровід укладено після газорегуляторного пункту, тому надлишковий тиск газу на його початку приймали рівним 3000 Па. Абсолютну

Таблиця 2 – Результати розрахунку густини та в'язкості газоводневої суміші за стандартних умов

Молярна частка водню, %	Газова стала, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт стисливості	Густина газоводневої суміші, кг/м ³	Відносна густина газоводневої суміші	Кінематична в'язкість, м ² /с
0	481,13	0,9972	0,7732	0,5979	1,338·10 ⁻⁵
20	584,37	0,9984	0,6358	0,4917	1,617·10 ⁻⁵
40	744,02	0,9992	0,4990	0,3859	2,041·10 ⁻⁵
60	1023,69	0,9998	0,3624	0,2803	2,762·10 ⁻⁵
70	1260,63	0,9999	0,2943	0,2276	3,353·10 ⁻⁵
85	1931,04	1,0000	0,1921	0,1486	4,938·10 ⁻⁵
100	4124,48	0,9999	0,0899	0,0696	9,339·10 ⁻⁵

Таблиця 3 – Результати розрахунку теплоти згоряння та числа Воббе газоводневої суміші за стандартних умов

Молярна частка водню, %	Вища об'ємна теплота згоряння, МДж/м ³	Нижча об'ємна теплота згоряння, МДж/м ³	Вище число Воббе, МДж/м ³	Нижче число Воббе, МДж/м ³
0	41,794	37,738	54,049	48,804
20	35,950	32,316	51,268	46,085
40	30,130	26,916	48,504	43,329
60	24,328	21,531	45,950	40,668
70	21,432	18,843	44,924	39,499
85	17,091	14,815	44,342	38,438
100	12,754	10,790	48,355	40,909

еквівалентну шорсткість поверхні сталевих та поліетиленових газопроводів приймали згідно з рекомендаціями нормативних документів [13,14].

Спочатку визначали газодинамічну енерговитратність наявного сталевих газопроводу низького тиску за різних витрат природного газу. Діапазон витрат природного газу у сталевому газопроводі визначали із умови забезпечення турбулентного режиму перекачування та обмеження швидкості руху значенням до 7 м/с [13]. Для різних значень витрати природного газу у сталевому газопроводі, використовуючи формули, які рекомендовані нормативними документами, визначали число Рейнольдса та втрати тиску від тертя (Па) [13,14] за формулами

$$Re = 0,0354 \frac{Q}{d\nu}, \quad (1)$$

$$\Delta p = 69 \left(\frac{k_e}{d} + 1922 \frac{vd}{Q} \right)^{0,25} \frac{Q^2 \rho}{d^5} l, \quad (2)$$

де Q – витрата енергоносія за стандартних умов, що відповідають нормальним фізичним умовам, м³/год;

d – внутрішній діаметр газопроводу, см;

ν, ρ – кінематична в'язкість енергоносія та густина за стандартних умов, що відповідають нормальним фізичним умовам, м²/с та кг/м³ відповідно;

k_e – абсолютна еквівалентна шорсткість поверхні труби, для сталевих труб $k_e = 0,01$ см, для поліетиленових труб $k_e = 0,002$ см [13];

l – довжина газопроводу, м.

Обчислювали надлишковий тиск газу у кінці сталевих газопроводу

$$p_k = p_{nc} - \Delta p, \quad (3)$$

де p_{nc} – надлишковий тиск газу на початку сталевих газопроводу низького тиску.

Знаходили енергетичний параметр I , який характеризує газодинамічну енерговитратність газорозподільних мереж низького тиску

$$I = \frac{\Delta p}{l}. \quad (4)$$

Рисунок 1 характеризує закономірності зміни втрат тиску від тертя у сталевому газопроводі діаметром 108х3 мм за різних витрат природного газу, які відповідають певним числам Рейнольдса.

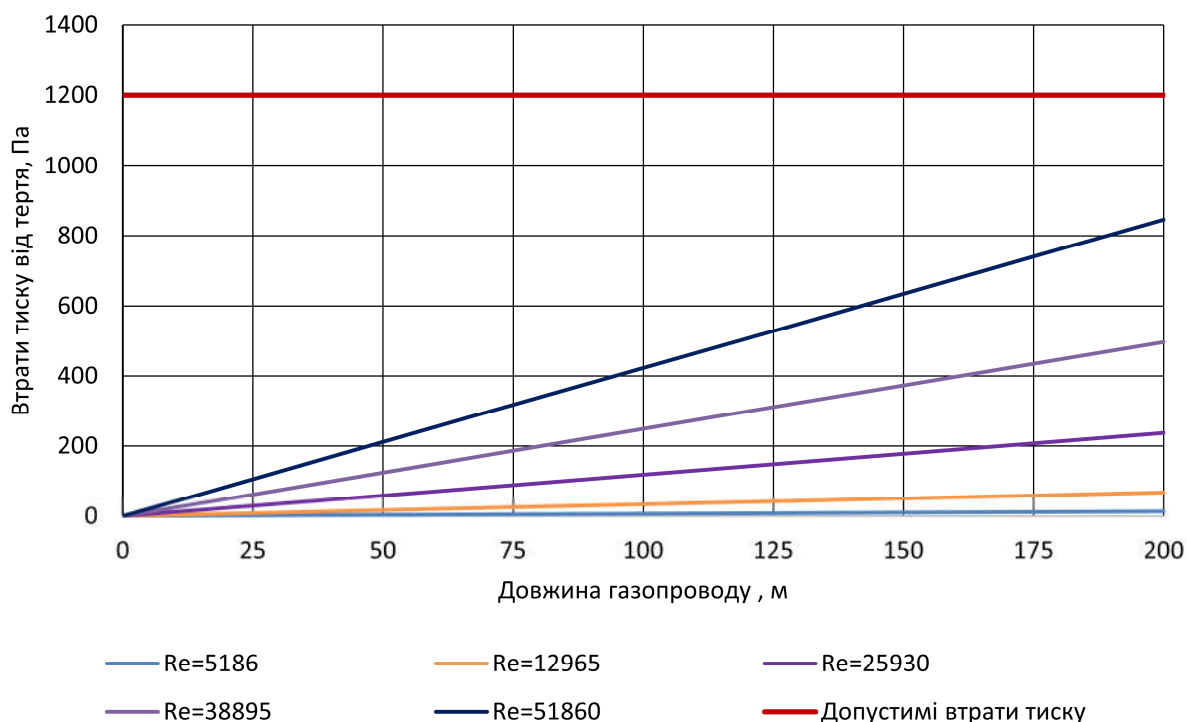


Рисунок 1 – Втрати тиску від тертя у сталевому газопроводі низького тиску за різних витрат природного газу

Таблиця 4 – Порівняння газодинамічної енерговитратності сталевого газопроводу діаметром 108х3 мм і поліетиленового діаметром 63х3,6 мм

Витрата природного газу, м ³ /год	Число Рейнольдса сталевому газопроводу	Енергетичний параметр сталевому газопроводу, Па/м	Число Рейнольдса поліетиленовому газопроводу	Енергетичний параметр поліетиленовому газопроводу, Па/м	Відношення гідрравлічних нахилів газопроводів до і після реконструкції
20	5186	0,0666	9480	1,1622	17,5
50	12965	0,3393	23700	5,8771	17,3
100	25930	1,1839	47399	20,2951	17,1
150	38895	2,4850	71099	42,2560	17,0
200	51860	4,2291	94799	71,4448	16,9

Як видно із рисунка 1, для всього діапазону завантаження сталевому газопроводу до його реконструкції втрати тиску від тертя значно менші за допустимі втрати тиску у газовій мережі низького тиску відповідно до вимог нормативних документів [13,14].

Після протягування поліетиленового газопроводу в порожнину сталевій труби одержують елемент газорозподільних мереж, що має таку ж довжину, але помітно менший внутрішній діаметр та меншу шорсткість поверхні труби.

Застосовуючи формули (1)–(4), визначали газодинамічну енерговитратність поліетиленової труби за витрат природного газу, що відпо-

відали завантаженню існуючого сталевому газопроводу.

Результати порівняння газодинамічної енерговитратності елемента газорозподільних мереж низького тиску при транспортуванні природного газу до і після його реконструкції характеризує таблиця 4.

Рисунок 2 характеризує закономірності зміни втрат тиску від тертя у поліетиленовому газопроводі за витрат природного газу, що мали місце для сталевому газопроводу.

Рисунок 2 і дані таблиці 4 свідчать, що рекомендована нормативним документом [10] заміна сталевому газопроводу діаметром 108х3 мм на поліетиленовий газопровід діаметром

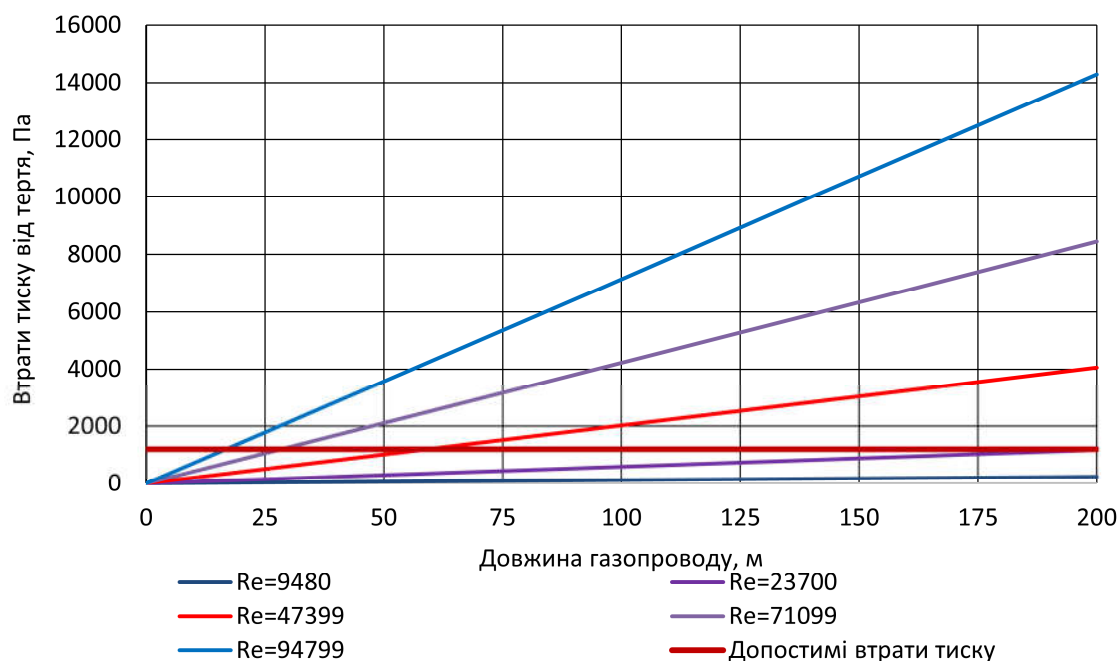


Рисунок 2 – Втрати тиску від тертя у поліетиленовому газопроводі низького тиску за витрат природного газу, що мали місце у сталевому газопроводі

63х3,6 мм призведе до суттєвого зростання втрат тиску від тертя за транспортування природного газу. Це зростання мало залежить від завантаження поліетиленового газопроводу. Середня величина збільшення газодинамічної енерговитратності для даного варіанта реконструкції становить 17,2 рази. За таких неприпустимих втрат тиску при транспортуванні природного газу в обсягах, що мали місце до реконструкції мережі, поліетиленовий газопровід не може зберегти статус газопроводу низького тиску. Його прийдеться експлуатувати за тисків, що відповідають критеріям газових мереж середнього тиску.

Зміна величини робочого тиску в поліетиленовому газопроводі спричинить кардинальні зміни самої системи розподілу газу в населеному пункті. Постачання побутових споживачів прийдеться здійснювати через будинкові регулятори тиску, які забезпечать зниження тиску газу із середнього на низький. Враховуючи паспортні характеристики типових будинкових регуляторів тиску, можна прийняти номінальне значення надлишкового тиску на їх вході рівним 0,1 МПа.

Газодинамічну енерговитратність поліетиленового газопроводу середнього тиску за витрат газу, що були у сталевому газопроводі до реконструкції, знаходили за нормативною формулою [13]

$$A = \frac{p_n^2 - p_k^2}{l} = 1,4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{k_e}{d} + 1922 \frac{vd}{Q} \right)^{0,25} \frac{Q^2 \rho}{d^5}. \quad (5)$$

де p_n, p_k – абсолютний тиск газу на початку і в кінці поліетиленового газопроводу відповідно, МПа.

Для всіх інших параметрів одиниці вимірювання такі ж, як у формулах (1) і (2).

Обчислювали необхідний надлишковий тиск на початку поліетиленового газопроводу за витрат газу, які були у сталевому газопроводі до реконструкції (МПа)

$$p_{n_{\text{над}}} = \sqrt{p_k^2 + Al} - 0,101325. \quad (6)$$

Одержані результати газодинамічних розрахунків поліетиленового газопроводу середнього тиску при транспортуванні природного газу зведено у таблицю 5.

Наведені вище результати газодинамічних розрахунків врахували лише той факт, що сталевий газопровід був замінений поліетиленовою трубою меншого діаметра. Властивості енергоносія не змінились, оскільки в обох випадках вважали, що транспортується природний газу з певним компонентним складом. Витрати газу для сталевих і поліетиленових газопроводів приймали однаковими, тому кількість енергії, яка подавалась споживачам також буде однаковою до і після реконструкції.

Газоводневі суміші, як свідчать результати досліджень [4,5], характеризуються меншою величиною як вищої, так і нижчої об'ємної теплоти згоряння. Згідно з [14], обсяг енергії, що надається споживачу, сьогодні визначає вища об'ємна теплота згоряння енергоносія. При переході у системі газопостачання від природ-

Таблиця 5 – Результати розрахунку газодинамічної енерговитратності поліетиленового газопроводу середнього тиску діаметром 63х3,6 мм

Витрата газу у сталевому газопроводі до реконструкції, м ³ /год	Число Рейнольдса в поліетиленовому газопроводі	Енергетичний параметр поліетиленового газопроводу середнього тиску А, МПа ² /м	Необхідний надлишковий тиск газу на початку поліетиленового газопроводу середнього тиску, МПа
20	9480	$2,358 \cdot 10^{-7}$	0,10012
50	23700	$1,192 \cdot 10^{-6}$	0,10059
100	47399	$4,118 \cdot 10^{-6}$	0,10204
150	71099	$8,574 \cdot 10^{-6}$	0,10421

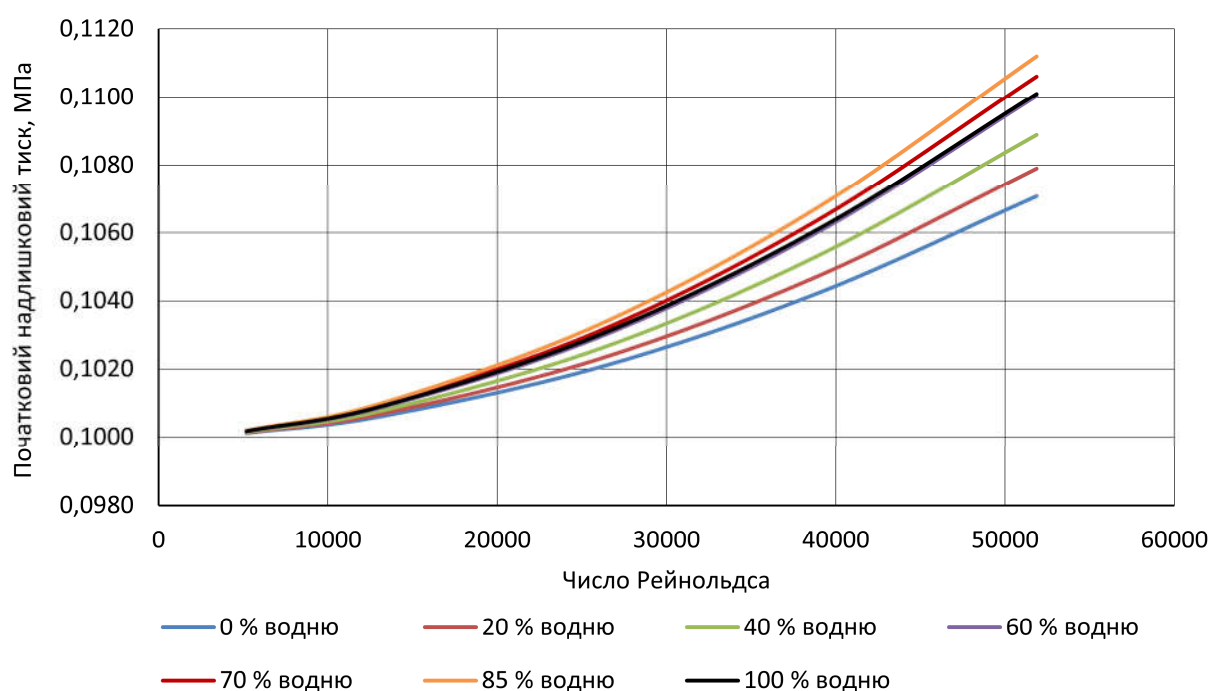


Рисунок 3 – Залежність надлишкового початкового тиску у поліетиленовому газопроводі середнього тиску від його завантаження та молярної концентрації водню у газодивній суміші

ного газу до газодивної суміші для збереження обсягу енергії, яку забезпечував природний газ, прийде́ться збільшити витрати газу у газопроводі згідно з таким виразом:

$$Q_{кв} = \alpha_{кв} Q_2, \quad (7)$$

де $\alpha_{кв}$ – коефіцієнт збільшення витрати в газопроводі, функція молярної концентрації водню в газодивній суміші,

$$\alpha_{кв} = \frac{(Hv)_{\text{г}}}{(Hv)_{\text{зв}}}, \quad (8)$$

Q_2 – витрата природного газу у сталевому газопроводі до реконструкції,

$(Hv)_{\text{г}}, (Hv)_{\text{зв}}$ – вища об'ємна теплота згоряння природного газу і створеної на його базі газодивної суміші з певною молярною концентрацією водню.

Розрахунки проводили у такій послідовності. Задавали певну молярну концентрацію водню. Використовуючи дані таблиці 3, за формулами (7) і (8) знаходили збільшені витрати газодивної суміші в поліетиленовому газопроводі. За формулами (5) і (6) визначали газодинамічну енерговитратність поліетиленового газопроводу середнього тиску при транспортуванні газодивної суміші.

За результатами досліджень побудовані графічні залежності надлишкового тиску на початку поліетиленового газопроводу середнього тиску від його завантаження і молярної концентрації водню у газодивній суміші (рис. 3).

За результатами досліджень одержані графічні залежності енергетичного параметра

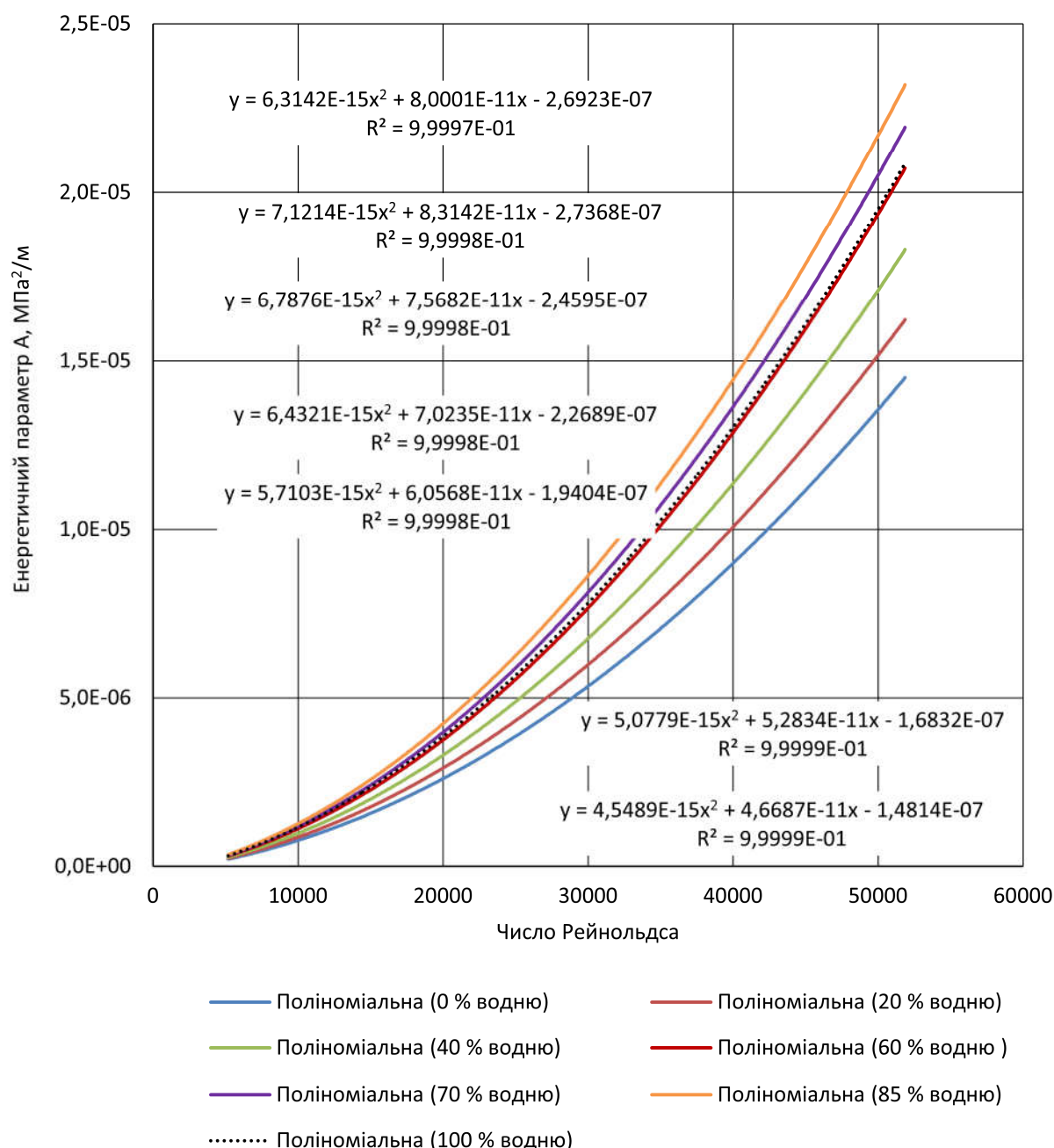
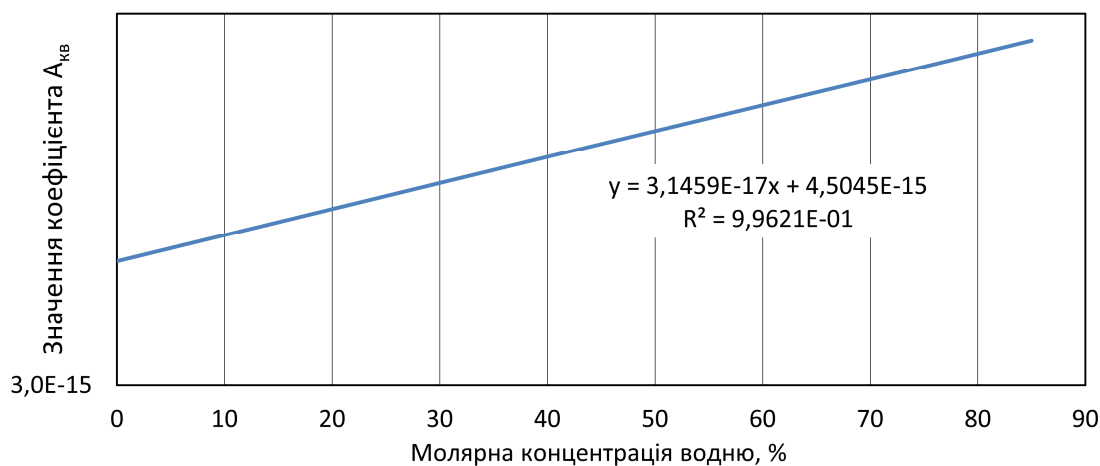
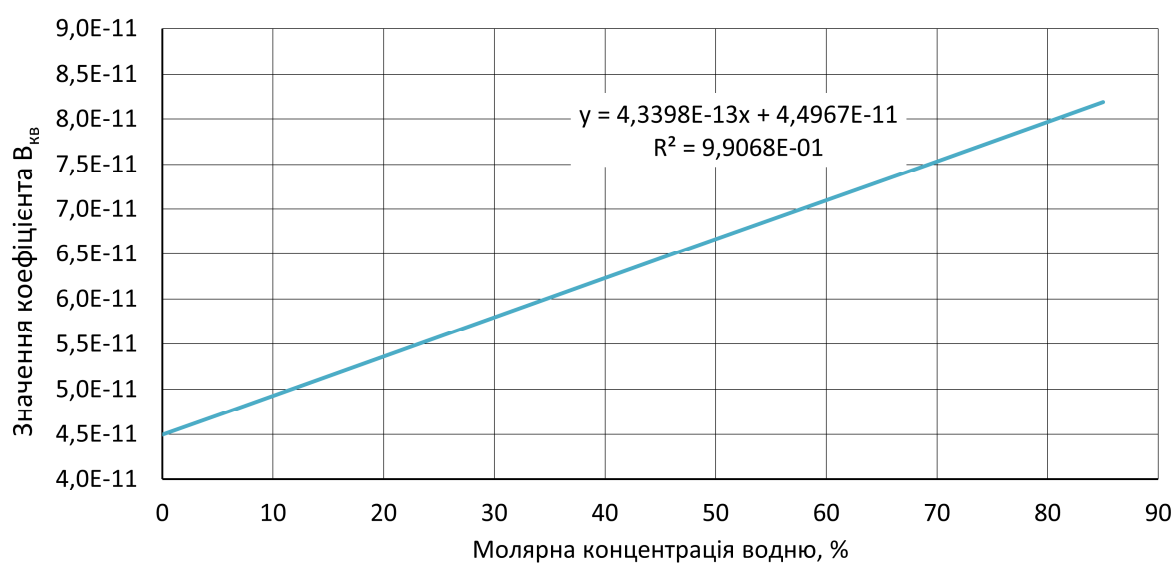
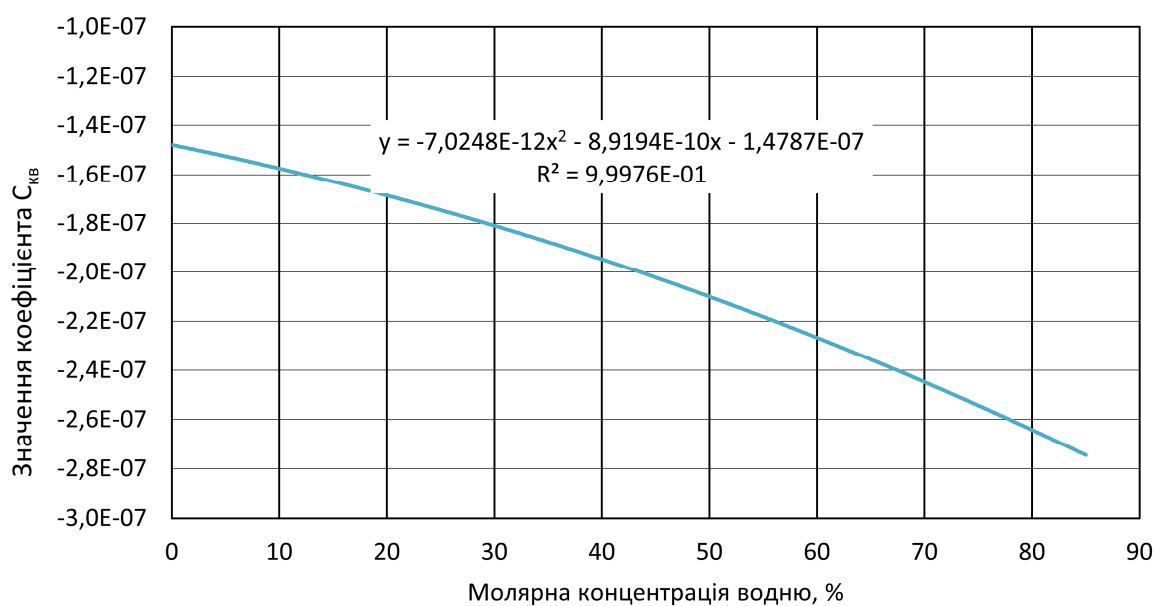


Рисунок 4 – Залежність величини енергетичного параметра A від завантаження поліетиленового газопроводу середнього тиску за різних значень молярної концентрації водню в газоводневій суміші

A поліетиленового газопроводу середнього тиску від числа Рейнольдса та молярної концентрації водню у газоводневій суміші (рис. 4).

Математичне моделювання графічних залежностей на рисунку 4 засобами Excel дало змогу встановити, що за конкретної молярної концентрації водню в газоводневій суміші величину енергетичного параметра A поліетиленового газопроводу середнього тиску від числа Рейнольдса з достовірністю апроксимації понад 99 % можна описати поліноміальною функцією другого порядку.

Аналіз коефіцієнтів одержаних математичних моделей на рисунку 4 засвідчив, що їх значення монотонно зростають або зменшуються за зміни молярної концентрації водню у газоводневій суміші від нуля до 85 %. Ця закономірність порушується при концентраціях водню, більших за 85 %. При молярній концентрації водню у газоводневій суміші 100 % відповідний графік практично співпадає із залежністю, що одержана при 60 % водню. Для варіанта реконструкції, що розглядався, запропоновано аналітичні залежності енергетичного

Рисунок 5 – Результати моделювання коефіцієнта $A_{кв}$ Рисунок 6 – Результати моделювання коефіцієнта $B_{кв}$ Рисунок 7 – Результати моделювання коефіцієнта $C_{кв}$

Таблиця 6 – Коефіцієнти математичної моделі (9) для різних варіантів реконструкції газорозподільних мереж при транспортуванні природного газу та газоводневих сумішей

Діаметр сталевих зношеного газопроводу низького тиску, мм	Рекомендований [10] діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску, мм	Математичні моделі (10)-(12) для рекомендованих варіантів реконструкції газових мереж
57x3	40x3,7	$A_{\kappa\delta} = 1,3714 \cdot 10^{-16} k_{\delta} + 1,9315 \cdot 10^{-14}$ $B_{\kappa\delta} = 1,1319 \cdot 10^{-12} k_{\delta} + 1,2040 \cdot 10^{-10}$ $C_{\kappa\delta} = -1,1778 \cdot 10^{-11} k_{\delta}^2 - 1,6947 \cdot 10^{-9} k_{\delta} - 2,7593 \cdot 10^{-7}$
76x3	50x2,9	$A_{\kappa\delta} = 5,2343 \cdot 10^{-17} k_{\delta} + 7,3727 \cdot 10^{-15}$ $B_{\kappa\delta} = 5,6308 \cdot 10^{-13} k_{\delta} + 5,9965 \cdot 10^{-11}$ $C_{\kappa\delta} = -7,0205 \cdot 10^{-12} k_{\delta}^2 - 1,0223 \cdot 10^{-9} k_{\delta} - 1,6624 \cdot 10^{-7}$
108x3	63x3,6	$A_{\kappa\delta} = 3,1459 \cdot 10^{-17} k_{\delta} + 4,5045 \cdot 10^{-15}$ $B_{\kappa\delta} = 4,3398 \cdot 10^{-13} k_{\delta} + 4,4947 \cdot 10^{-11}$ $C_{\kappa\delta} = -7,0248 \cdot 10^{-12} k_{\delta}^2 - 8,9194 \cdot 10^{-10} k_{\delta} - 1,4787 \cdot 10^{-7}$
159x4,5	110x6,3	$A_{\kappa\delta} = 3,8663 \cdot 10^{-18} k_{\delta} + 5,4227 \cdot 10^{-16}$ $B_{\kappa\delta} = 9,1466 \cdot 10^{-14} k_{\delta} + 9,1789 \cdot 10^{-12}$ $C_{\kappa\delta} = -1,9925 \cdot 10^{-12} k_{\delta}^2 - 3,0921 \cdot 10^{-10} k_{\delta} - 4,9907 \cdot 10^{-8}$
219x5	160x9,1	$A_{\kappa\delta} = 1,0708 \cdot 10^{-18} k_{\delta} + 1,4851 \cdot 10^{-16}$ $B_{\kappa\delta} = 3,2577 \cdot 10^{-14} k_{\delta} + 3,5961 \cdot 10^{-12}$ $C_{\kappa\delta} = -9,9228 \cdot 10^{-13} k_{\delta}^2 - 1,6613 \cdot 10^{-10} k_{\delta} - 2,6566 \cdot 10^{-8}$
273x5	200x11,4	$A_{\kappa\delta} = 5,2715 \cdot 10^{-19} k_{\delta} + 7,3069 \cdot 10^{-17}$ $B_{\kappa\delta} = 1,9883 \cdot 10^{-14} k_{\delta} + 2,1717 \cdot 10^{-12}$ $C_{\kappa\delta} = -7,4214 \cdot 10^{-13} k_{\delta}^2 - 1,2476 \cdot 10^{-10} k_{\delta} - 1,9958 \cdot 10^{-8}$
273x5	225x12,8	$A_{\kappa\delta} = 2,9835 \cdot 10^{-19} k_{\delta} + 4,0697 \cdot 10^{-17}$ $B_{\kappa\delta} = 1,1493 \cdot 10^{-14} k_{\delta} + 1,2861 \cdot 10^{-12}$ $C_{\kappa\delta} = -3,9262 \cdot 10^{-13} k_{\delta}^2 - 7,5845 \cdot 10^{-11} k_{\delta} - 1,1973 \cdot 10^{-8}$
325x5	250x14,2	$A_{\kappa\delta} = 2,3549 \cdot 10^{-19} k_{\delta} + 3,2608 \cdot 10^{-17}$ $B_{\kappa\delta} = 1,1103 \cdot 10^{-14} k_{\delta} + 1,2264 \cdot 10^{-12}$ $C_{\kappa\delta} = -4,9089 \cdot 10^{-13} k_{\delta}^2 - 8,4247 \cdot 10^{-11} k_{\delta} - 1,3448 \cdot 10^{-8}$

параметра A (МПа²/м) поліетиленового газопроводу середнього тиску від ступеня його завантаження та молярної концентрації водню в газоводневій суміші (k_{δ} , %) у діапазоні від нуля до 85 %

$$A = A_{\kappa\delta} Re^2 + B_{\kappa\delta} Re + C_{\kappa\delta}, \quad (9)$$

де $A_{\kappa\delta}, B_{\kappa\delta}, C_{\kappa\delta}$ – коефіцієнти математичної моделі, функції молярної концентрації водню в газоводневій суміші,

$$A_{\kappa\delta} = a_2 k_{\delta} + a_3, \quad (10)$$

$$B_{\kappa\delta} = b_2 k_{\delta} + b_3, \quad (11)$$

$$C_{\kappa\delta} = c_1 k_{\delta}^2 + c_2 k_{\delta} + c_3. \quad (12)$$

Рисунки 5-7 ілюструють метод одержання числових значень коефіцієнтів математичних моделей (10)-(12) для варіанта реконструкції, що розглядався.

Аналогічні дослідження проведено для інших рекомендованих нормативним докумен-

том [10] варіантів реконструкції елементів газорозподільних мереж шляхом протягування поліетиленових газопроводів в порожнину зношених сталевих труб низького тиску.

Встановлено, що закономірності зміни газодинамічної енерговитратності, які виявлені нами для варіанта заміни сталевих труб діаметром 108х3 мм на поліетиленову трубу діаметром 63х3,6 мм, справедливі для всіх варіантів реконструкції. Поліетиленовий газопровід після реконструкції для всіх варіантів реконструкції повинен працювати при середньому тиску. Для всіх розглянутих варіантів реконструкції елемента газових мереж залежність енергетичного параметра A поліетиленового газопроводу середнього тиску від його завантаження та молярної концентрації водню в газоводневій суміші з вірогідністю апроксимації понад 99 % можна описати формулами (9)-(12) з відповідними значеннями коефіцієнтів. Одержані методом математичного моделювання числові значення коефіцієнтів математичних моделей у формулах (10)-(12) для розглянутих варіантів реконструкції газорозподільних мереж наведені у таблиці 6.

Висновки

1 Однією із прогресивних технологій реконструкції газорозподільних мереж населених пунктів є використання зношених сталевих труб як каркасу для протягування в них поліетиленових труб, що дасть змогу надійно транспортувати не тільки природний газ, але і газоводневі суміші.

2 Встановлено, що реалізація рекомендованих нормативним документом варіантів співвідношень діаметрів сталевих і поліетиленових труб призведе до суттєвого зростання газодинамічної енерговитратності мережі. Так для варіанта заміни сталевих газопроводів діаметром 108х3 мм на поліетиленову трубу діаметром 63х3,6 мм питомі втрати тиску від тєртя зростуть в 17 разів для природного газу і в 25 разів для водню.

3 Значне зростання втрат тиску призведе до необхідності зміни робочого тиску у поліетиленовому газопроводі з низького на середній, що спричинить радикальні зміни системи газопостачання населеного пункту після реконструкції.

4 Розроблені у роботі математичні моделі залежності газодинамічної енерговитратності поліетиленового газопроводу середнього тиску від його завантаження і молярної частки водню в газоводневій суміші дають можливість достовірно прогнозувати режим експлуатації газорозподільної мережі за транспортування як природного газу, так і газоводневих сумішей для всіх рекомендованих варіантів реконструкції.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Mahajan D., Tan K., Venkatesh T., Kileti P., Clayton C. R. Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15. No 10. P. 3582. DOI: [10.3390/en15103582](https://doi.org/10.3390/en15103582).
2. Hydrogen Park South Australia (HyP SA) Public knowledge sharing report. *ARENA*. May 2023. URL: <https://arena.gov.au/assets/2023/09/AHC-Hydrogen-Park-South-Australia-Public-Knowledge-Sharing-Report.pdf>.
3. Abbas A. J., Hassani H., Burby M., John I. J. An Investigation into the Volumetric Flow Rate Requirement of Hydrogen Transportation in Existing Natural Gas Pipelines and Its Safety Implications. *Gases*. 2021. No 1. P. 156–179. DOI: [10.3390/gases1040013](https://doi.org/10.3390/gases1040013).
4. Середюк М. Д., Великий С. В. Аналіз методів визначення газодинамічної енерговитратності газових мереж населених пунктів. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ. 2022. № 2(38). С. 51–61. DOI: [10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-51-61](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-51-61).
5. Середюк М. Д., Великий С. В. Вплив концентрації водню на властивості газоводневих сумішей та газодинамічні процеси в розподільних газових мережах. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ. 2023. № 2(40). С. 25–37. DOI: [10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-25-37](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-25-37).
6. Francesconi M., Guzzo G., Neri M., Marmorini M., Carcasci C. Impact of hydrogen blending on a real-world gas distribution network with a non-uniform elevation profile. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.02.123](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.123).
7. Tian X., Pei J. Study progress on the pipeline transportation safety of hydrogen-blended natural gas. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Article e21454. DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e21454](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21454).

8. Lipiainen S., Lipiainen K., Ahola A., Vakkilainen E. Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. No 80. P. 31317–31329. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.283.
9. Topolski K., Reznicek E. P., Cakir Erdener B., San Marchi C. W., Ronevich J. A., Fring L., Simmons K., Guerra Fernandez O. J., Hodge B.-M., Chung M. Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. 2022. NREL/TP-5400-81704. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>.
10. ДБН В.2.5-41:2009. *Газопроводи з поліетиленових труб*. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Чинний від 2009-12-29. Київ: Мінрегіон України, 2010. 149 с. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25843
11. Ксеніч А. І., Середюк М. Д., Височанський І. І. Розробка рекомендацій щодо реконструкції сталевих газових мереж шляхом протягування в них поліетиленових труб. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. Івано-Франківськ. 2012. № 1(31). С. 114–123. URL: <http://repository.nung.edu.ua/handle/123456789/10007>.
12. ДСТУ EN ISO 6976:2020. *Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу*. Чинний від 2021-10-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 56 с. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91598
13. ДБН В.2.5-20:2018. *Газопостачання*. Чинний від 2019-07-01. Київ: Мінрегіон України, 2019. 113 с.
14. *Кодекс газорозподільних мереж*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> (дата звернення: 29.03.2025).

References

1. Mahajan D., Tan K., Venkatesh T., Kileti P., Clayton C. R. (2022). Hydrogen Blending in Gas Pipeline Networks—A Review. *Energies*, 15(10), 3582. <https://doi.org/10.3390/en15103582>.
2. AHC Hydrogen Park South Australia Public Knowledge Sharing Report. ARENA. <https://arena.gov.au/assets/2023/09/AHC-Hydrogen-Park-South-Australia-Public-Knowledge-Sharing-Report.pdf>. [in Ukrainian].
3. Abbas A. J., Hassani H., Burby M., John I. J. (2021). An Investigation into the Volumetric Flow Rate Requirement of Hydrogen Transportation in Existing Natural Gas Pipelines and Its Safety Implications. *Gases*, 1(4), 156–179. <https://doi.org/10.3390/gases1040013>.
4. Serediuk M. D., Velykyi S. V. (2022). Analiz metodiv vyznachennia hazodynamichnoi enerhovytratnosti hazovykh merezh naselennykh punktiv [Analysis of methods for determining the gas-dynamic energy consumption of gas networks populated points]. *Naftohazova enerhetyka [Oil and Gas Power Engineering]*, 2(38), 51–61. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-51-61](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-51-61) [in Ukrainian].
5. Serediuk M. D., Velykyi S. V. (2023). Vplyv kontsentratsii vodniu na vlastyvoli hazovodnevykh sumishei ta hazodynamichni protsesy v rozpodilnykh hazovykh merezhakh [Influence of hydrogen concentration on the properties of gas-hydrogen mixtures and gas-dynamic processes in gas distribution networks]. *Naftohazova enerhetyka [Oil and Gas Power Engineering]*, 2(40), 25–37. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-25-37](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-25-37) [in Ukrainian].
6. Francesconi M., Guzzo G., Neri M., Marmorini M., Carcasci C. (2024). Impact of hydrogen blending on a real-world gas distribution network with a non-uniform elevation profile. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.123>.
7. Tian X., Pei J. (2023). Study progress on the pipeline transportation safety of hydrogen-blended natural gas. *Heliyon*, 9, e21454. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21454>.
8. Lipiainen S., Lipiainen K., Ahola A., Vakkilainen E. (2023). Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(80), 31317–31329. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.283>.
9. Topolski K., Reznicek E. P., Cakir Erdener B., San Marchi C. W., Ronevich J. A., Fring L., Simmons K., Guerra Fernandez O. J., Hodge B.-M., Chung M. (2022). Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. NREL/TP-5400-81704. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/81704.pdf>.
10. ДБН В.2.5-41:2009. *Газопроводи з поліетиленових труб*. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди [Gas pipelines made of polyethylene pipes. Engineering equipment of buildings and structures. External networks and structures]. (2010). Kyiv: Minrehion Ukrainy. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25843 [in Ukrainian].

11. Ksenych A. I., Serediuk M. D., Vysochanskyi I. I. (2012). Rozrobka rekomendatsii shchodo rekonstruktsii stalevykh hazovykh merezh shliakhom protiahuvannia v nykh polietylenovykh trub [The development of recommendations for the reconstruction of steel gas networks by dragging polyethylene pipes]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu* [Scientific bulletin ivano-frankivsk national technical university of oil and gas], 1(31), 114–123. <http://repository.nung.edu.ua/handle/123456789/10007> [in Ukrainian].
12. DSTU EN ISO 6976:2020. *Pryrodnyi haz. Obchyslennia teploty zhoranni, hustyny, vidnosnoi hustyny ta chysla Vobbe na osnovi komponentnoho skladu* [Natural gas. Calculation of calorific value, density, relative density and Wobbe number based on component composition]. (2021). Kyiv: DP «UkrNDNTs». https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91598 [in Ukrainian].
13. DBN V.2.5-20:2018. *Hazopostachannia* [Gas supply]. (2019). Kyiv: Minhehion Ukrainy. [in Ukrainian].
14. *Kodeks hazorozpodilnykh merezh* [Code of gas distribution networks]. (n.d.). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text> (Accessed: 29.03.2025) [in Ukrainian].

GASDYNAMIC PARAMETERS OF GAS DISTRIBUTION NETWORKS AFTER RECONSTRUCTION USING THE TECHNOLOGY OF DRAWING OF A POLYETHYLENE PIPE INTO A STEEL GAS PIPELINE

Serediuk M. D.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2748-926X>
e-mail: mariia.serediuk@nung.edu.ua

Tsiurak V. Yu.

Postgraduate
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-4373-2239>
e-mail: vadyim.tsiurak-a18524@nung.edu.ua

Abstract. Gas distribution networks of Ukraine, which are constructed of steel pipes, are characterized by a long service life. An important condition for ensuring reliable gas supply is their reconstruction with the replacement of worn steel pipes with polyethylene ones. One of the progressive reconstruction technologies is the pulling of a polyethylene gas pipeline into a worn steel pipe. The implementation of such a reconstruction technology in the conditions of Ukraine will not only restore the functioning of the gas supply system, but also create conditions for reliable transportation of not only gas, but also gas-hydrogen mixtures. The reconstruction of the gas distribution network involves changing the diameters of sections, the roughness of the pipe surface and the properties of the transported medium, which significantly affects the operating modes. The purpose of the work is to establish the patterns of changes in the gas-dynamic energy consumption of gas distribution networks after reconstruction using the technology of pulling a polyethylene gas pipeline into a worn steel gas pipeline for the transportation of both natural gas and gas-hydrogen mixtures. The physical, thermodynamic and energy characteristics of natural gas and gas-hydrogen mixtures have been determined in accordance with the requirements of current standards. The patterns of change in the gas-dynamic energy consumption of an element of the gas supply system after replacing a steel gas pipeline with a polyethylene one at different degrees of its loading when transporting natural gas have been established. The need to change the operating pressure in a polyethylene gas pipeline after reconstruction from low to medium has been confirmed. The increased consumption of gas-hydrogen mixtures in a polyethylene gas pipeline has been determined to preserve the amount of energy that natural gas provided before the reconstruction of the network. Analytical dependences of the specific gas-dynamic energy consumption of polyethylene gas pipelines on the degree of their loading and the molar concentration of hydrogen in the gas-hydrogen mixture have been obtained for a number of cases recommended by the regulatory document for replacing steel pipes with polyethylene pipes.

Keywords: restoration of gas network performance; trenchless pipe replacement; natural gas; gas-hydrogen mixtures; volumetric heat of combustion; change in flow and operating pressure.