

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

доктор технических наук,

профессор кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Serediuk Mariia

Doctor of Technical Sciences, Professor of the

Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ОСОБЛИВОСТІ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ГАЗОВИХ
МЕРЕЖ СЕРЕДНЬОГО І ВИСОКОГО ТИСКУ ЗА
ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ
ОСОБЕННОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
ГАЗОВЫХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ
ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ГАЗО-ВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ
FEATURES OF GAS DYNAMIC PROCESSES IN MEDIUM AND HIGH
PRESSURE GAS NETWORK SYSTEMS FOR TRANSPORTATION
THE GAS-HYDROGEN MIXTURES**

Анотація. Шляхом математичного моделювання встановлено закономірності газодинамічних процесів у разі транспортування газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню в газових мережах середнього та високого тиску при збереженні витрат та енергоємності

елементів системи газопостачання, характерних для перекачування природного газу. Одержано прогнозні показники зміни енергетичного параметра газових мереж залежно від об'ємної частки водню в газо-водневій суміші.

Ключові слова: природний газ, водень, газо-воднева суміш, газові мережі середнього та високого тиску, нижча об'ємна теплота згорання, витрата, втрати тиску від тертя, енергетичний параметр

Аннотация. С использованием методов математического моделирования установлены закономерности газодинамических процессов при транспортировании газо-водородных смесей с различной объемной долей водорода в газовых сетях среднего и высокого давления при сохранении расходов и энергоемкости элементов системы газоснабжения, характерных для перекачки природного газа. Получены прогнозныe показатели изменения энергетического параметра газовых сетей в зависимости от объемной доли водорода в газо-водородной смеси.

Ключевые слова: природный газ, водород, газо-водородная смесь, газовые сети среднего и высокого давления, низшая теплота сгорания, расход, потери давления от трения, энергетический параметр

Summary. The patterns of gas dynamic processes in the case of transportation of gas-hydrogen mixtures with different volume fraction of hydrogen in medium and high pressure gas network systems with the same flows and energy consumption for the elements of the supply system as in the case of pumping natural gas were established by means of mathematical modelling. Predictive indicators of change the energy parameter of gas network systems depending on the volume fraction of hydrogen in the gas-hydrogen mixture were obtained.

Key words: *natural gas, hydrogen, gas-hydrogen mixture, medium and high pressure gas network systems, lower volumetric heat of combustion, flow, pressure loss from friction, energy parameter.*

Вступ. Одним із пріоритетних завдань сучасного суспільства є пошук альтернативних джерел енергії. Багато вчених світу вважають, що одним із перспективних рішень є поступовий перехід на водневу економіку, оскільки це дасть змогу вирішити не тільки енергетичні, але і екологічні проблеми, спричинені, насамперед, викидами діоксиду вуглецю в атмосферу при використанні традиційних видів палива. Основна проблема впровадження водню як енергоносія полягає в необхідності розроблення нових та удосконалення існуючих технологій його виробництва, транспортування та зберігання.

Найбільш економічним способом транспортування як водню, так і сумішей природного газу з воднем, є трубопроводи. Результати попередніх досліджень засвідчили, що при додаванні до природного газу до 20 % водню одержану газо-водневу суміш можна транспортувати існуючими газотранспортними системами [1]. Транспортування сталевими газопроводами газо-водневих сумішей з більшою часткою водню вимагатиме модернізації систем з метою підвищення їх герметичності та надійності.

Слід відзначити актуальність та важливість досліджень поведінки водню в газорозподільній мережі, що проводяться на п'яти полігонах в Україні. Ці дослідження повинні дати конкретну відповідь щодо можливості застосування газових мереж населених пунктів для транспортування газо-водневих сумішей з точки зору забезпечення герметичності системи, нормального режиму експлуатації технологічного обладнання та газових приладів споживачів [1].

Не дивлячись на значну кількість публікацій, присвячених перспективам застосування водню як альтернативного енергоносія, конкретні питання, пов’язані з прогнозуванням режимів експлуатації газопроводів у разі транспортування газо-водневих сумішей з різною об’ємною часткою водню поки що недостатньо висвітлені.

Нами у роботі [1] встановлено, як залежать фізико-хімічні властивості газо-водневої суміші від концентрації у ній водню. Досліджена газодинамічна енерговитратність сталевих газових мереж низького тиску при транспортуванні газо-водневої суміші з різною об’ємною часткою водню. Дана робота присвячена висвітленню зазначених питань стосовно газових мереж середнього і високого тиску.

Мета роботи – встановлення впливу об’ємної концентрації водню на газодинамічну енерговитратність газо-водневої суміші в умовах газових мереж середнього і високого тиску.

Дослідження проведено для природного газу, склад компонентів якого в об’ємних частках наведено в [1]. Природний газ зазначеного складу використовувався для газопостачання споживачів Івано-Франківської області в 2019 році. Числові значення фізико-хімічних властивостей індивідуальних компонентів газо-водневої суміші взяті із [2].

Розрахунок фізико-хімічних властивостей газо-водневої суміші, які необхідні для проведення газодинамічних розрахунків газових мереж середнього і високого тиску, виконано за методикою, що наведена в [1,2]. При цьому враховано, що згідно з ДБН В.2.5-20-2018 [3], при проектуванні та експлуатації систем газопостачання населених пунктів фізико-хімічні властивості газу і газодинамічні параметри експлуатації газопроводів середнього і високого тиску повинні відповідати нормальним фізичним умовам, а саме абсолютному тиску $p_n=101325$ Па і температурі $t_n=0$ °С (термодинамічна температура $T_n=273,15$ К).

Газодинамічний розрахунок газових мереж середнього і високого тиску виконуємо за методикою, яка рекомендована [3]. Для оцінювання газодинамічної енерговитратності газових мереж середнього і високого тиску прийнято використовувати енергетичний параметр A

$$A = \frac{P_1^2 - P_2^2}{l}, \quad (1)$$

де P_1 - абсолютний тиск газу на початку газопроводу, МПа;

P_2 - абсолютний тиск газу в кінці газопроводу, МПа;

l - довжина газопроводу, м.

Рух газу в газових мережах середнього і високого тиску відбувається виключно за розвинутого турбулентного режиму та значних числах Рейнольдса [4]. Енергетичний параметр A так залежить від геометричних характеристик трубопроводу та фізико-хімічних властивостей транспортованого середовища

$$A = 1,4 \cdot 10^{-5} \left(\frac{k_e}{d} + 1922 \frac{v_n d}{Q_n} \right)^{0,25} \cdot \frac{Q_n^2 \rho_n}{d^5}, \quad (2)$$

де k_e - абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби, для сталевих труб $k_e = 0,01$ см, для поліетиленових труб $k_e = 0,002$ см [3];

d - довжина газопроводу, см;

Q_n - об'ємна витрата газу за нормальних фізичних умов, м³/год;

v_n - кінематична в'язкість газу за нормальних фізичних умов, м²/с;

ρ_n - густина газу за нормальних фізичних умов, кг/м³.

Спочатку дослідження проводились для випадку перекачування газопроводом природного газу, що не містить водню. Далі моделювались газо-водневі суміші, що містять об'ємну частку водню від 10 % до 100 % з кроком 10 % [1].

Як зазначено у роботі [1], зниження величини нижчої об'ємної теплоти згорання газо-водневої суміші, порівняно з випадком перекачування природного газу, зменшує кількість енергії, що подається споживачу за певного значення об'ємної витрати у газопроводі. Для врахування зазначеного явища доцільно ввести коефіцієнт зменшення енергоємності газо-водневої суміші за умовою [1]

$$\alpha_e = \frac{\tilde{H}}{\tilde{H}_g},$$

де \tilde{H} - значення нижчої об'ємної теплоти згорання газо-водневої суміші;

\tilde{H}_g - значення нижчої об'ємної теплоти згорання природного газу, основи газо-водневої суміші;

Після визначення розрахункових величин густини, кінематичної в'язкості та коефіцієнта зменшення енергоємності для кожного варіанта суміші, що характеризується певним значенням об'ємної частки водню, за формулами (1)-(2) виконували газодинамічний розрахунок газопроводу. Він полягав в знаходженні втрат тиску від тертя, яким відповідає певне значення енергетичного параметра A та величина тиску у кінці газопроводу за заданого значення витрати газо-водневої суміші. Необхідний діапазон витрат газо-водневої суміші визначали так. Обчислювали максимальне значення енергетичного параметра за формулою

$$A_{max} = \frac{P_{1max}^2 - P_{2min}^2}{l}, \quad (3)$$

де P_{1max} - максимальне значення абсолютного тиску газу на початку газопроводу середнього чи високого тиску згідно з [3], МПа;

P_{2min} - мінімальне значення абсолютного тиску газу у кінці газопроводу середнього чи високого тиску згідно з [3], МПа.

Газодинамічні розрахунки газопроводів виконували за комп'ютерною програмою. Алгоритм передбачав зміну витрати газо-водневої суміші з певним кроком з перевіркою виконання умови

$$A < A_{max}. \quad (5)$$

Геометричні параметри модельних трубопроводів середнього тиску, для яких проведено дослідження, такі:

- сталевий газопровід із зовнішнім діаметром 108 мм, товщиною стінки 3 мм і довжиною 1000 м;
- поліетиленовий газопровід із зовнішнім діаметром 110 мм, товщиною стінки 6,3 мм і довжиною 1000 м;

Геометричні параметри модельних трубопроводів високого тиску I категорії такі:

- сталевий газопровід із зовнішнім діаметром 108 мм, товщиною стінки 3 мм і довжиною 1000 м;
- поліетиленовий газопровід із зовнішнім діаметром 110 мм, товщиною стінки 10 мм і довжиною 1000 м.

Труби зазначених діаметрів широко застосовують в газових мережах середнього та високого тиску населених пунктів [4].

Перший етап досліджень стосувався транспортування газо-водневих сумішей в газових мережах середнього тиску. За результатами багатоваріантних обчислень побудовано графічні залежності енергетичного параметра A у газопроводі від витрати газо-водневої суміші за різних значень об'ємної частки водню.

Рисунок 1 ілюструє одержані результати газодинамічних розрахунків для різних значень об'ємної частки водню у газо-водневій суміші стосовно поліетиленового газопроводу середнього тиску.

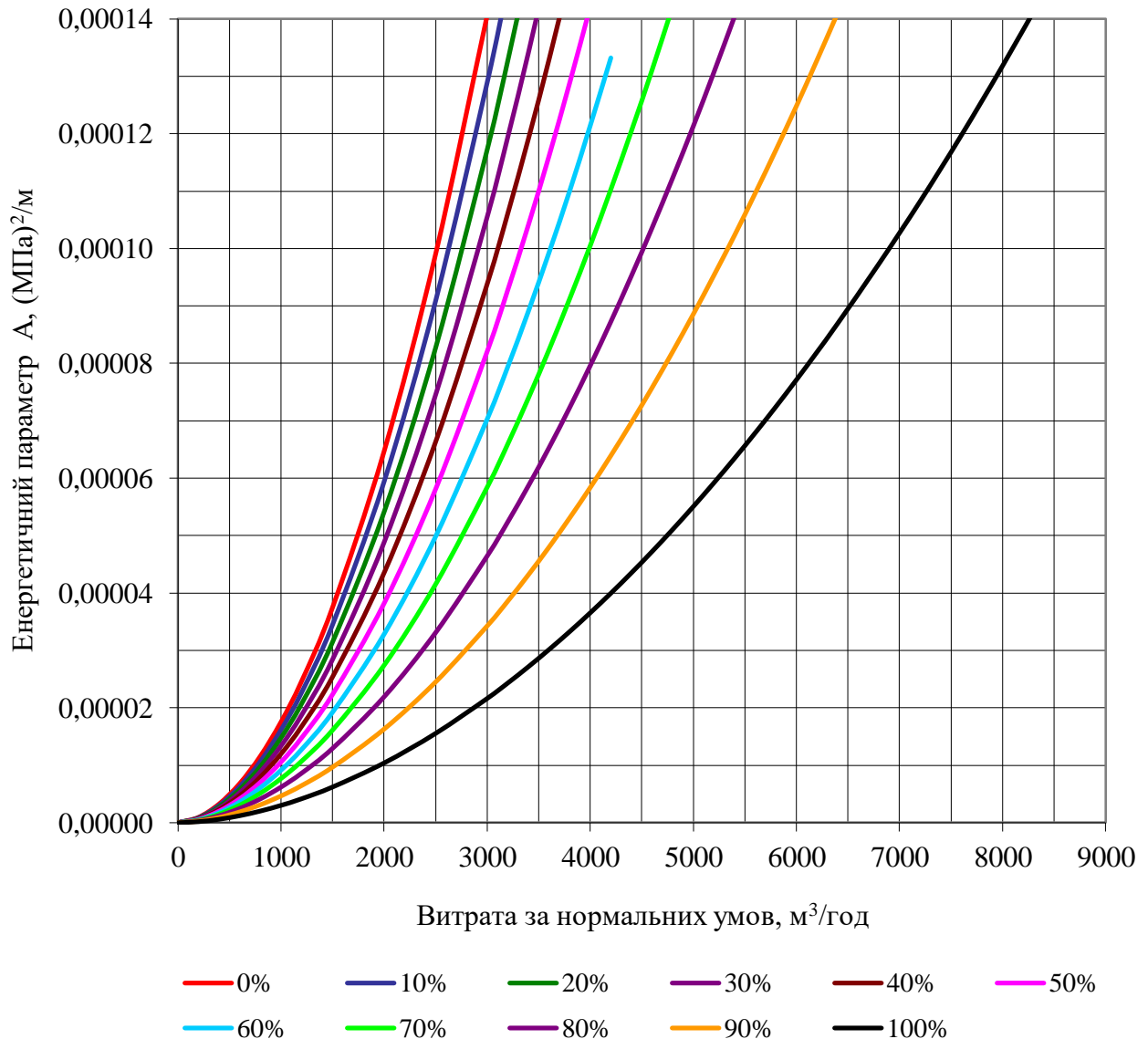


Рис. 1. Залежність енергетичного параметра A від витрати газо-водневої суміші у поліетиленовому газопроводі середнього тиску за різних значень об'ємної частки водню

Використовуючи результати газодинамічних розрахунків, знаходимо відносне зменшення енергетичного параметра у модельному газопроводі при перекачуванні газопроводом середнього тиску газо-водневої суміші з різною об'ємною часткою водню з витратами, що мали місце при транспортуванні природного газу. Одержані результати для поліетиленового газопроводу середнього тиску наведено на рисунку 2.

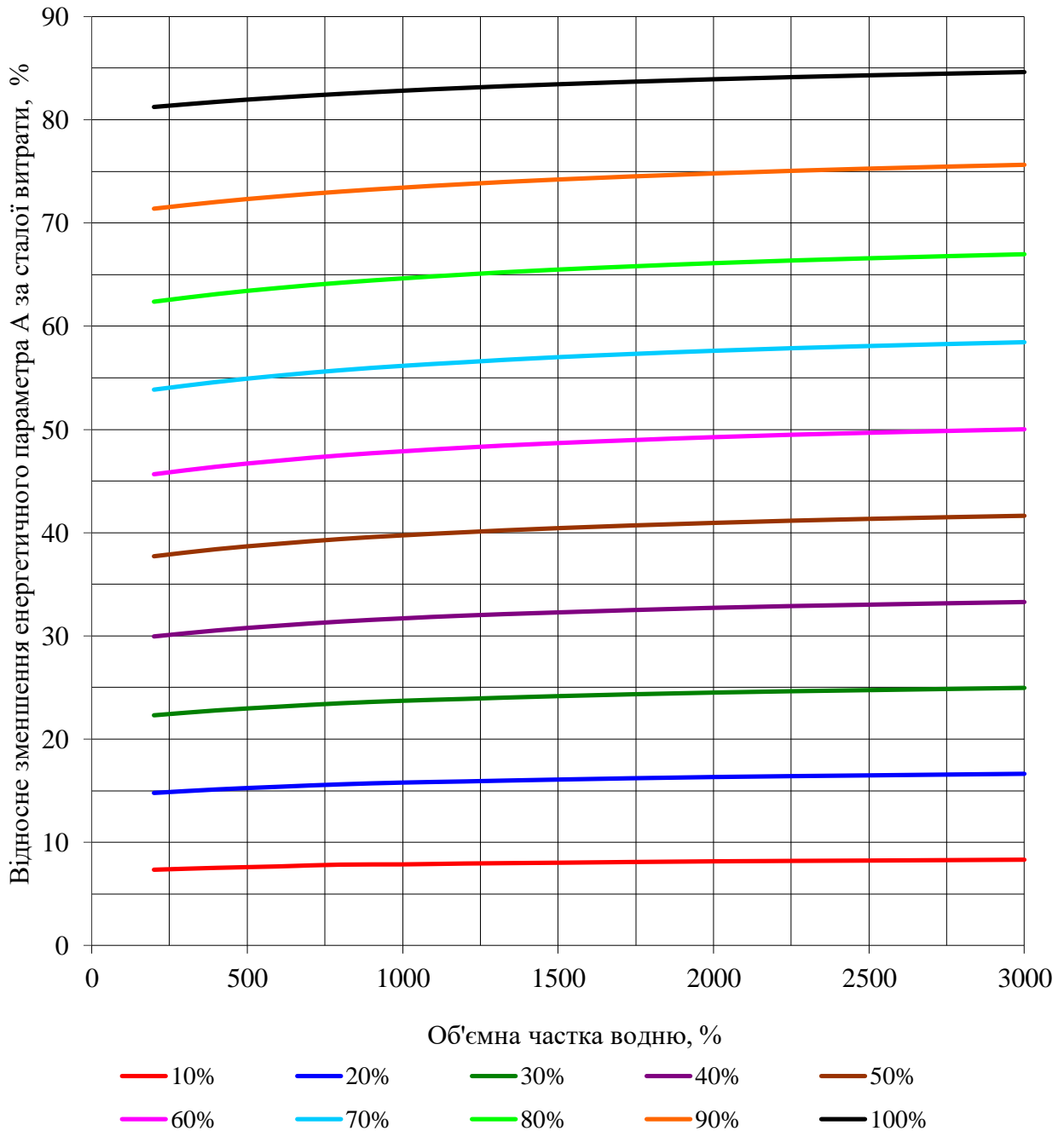


Рис. 2. Залежність відносного зменшення енергетичного параметра A від витрати при транспортуванні газо-водневої суміші поліетиленовим газопроводом середнього тиску

Як впливає із рисунку 2, при збільшенні об'ємної частки водню та підтриманні у поліетиленовому газопроводі середнього тиску витрат, що мали місце при перекачуванні природного газу, газодинамічна енерговитратність зменшується, що знаходить відображення у зменшенні

енергетичного параметра A . При цьому для конкретного значення об'ємної частки водню відносно зменшення параметра A мало залежить від витрати. Чим вища концентрація водню у суміші, тим більш явно проявляється залежність зміни енерговитратності від витрати у газопроводі. Для проведення прогнозних розрахунків можна використовувати усереднені за витратою значення відносного зменшення енергетичного параметра A , які залежать від об'ємної частки водню у суміші.

Як зазначалось у роботі [1], при переведенні газової мережі з транспортування природного газу на перекачування газо-водневої суміші, що характеризується меншим значенням нижчої об'ємної теплоти згорання, для забезпечення подавання тієї ж кількості енергії споживачам необхідно збільшити об'ємну витрату в кожному елементі системи газопостачання за формулою

$$Q_{нзв} = \frac{Q_{нг}}{\alpha_e}, \quad (5)$$

де $Q_{нг}$ - розрахункова витрата для елемента системи газопостачання у разі транспортування природного газу.

За формулою (5) визначено зведені витрати при перекачуванні газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню. Далі за комп'ютерною програмою виконано багатоваріантні газодинамічні розрахунки газопроводу середнього тиску із сталевих і поліетиленових труб.

Величина енергетичного параметра у разі перекачування газо-водневої суміші зі зведеною витратою $Q_{нзв}$ порівнювалась із значенням енергетичного параметра у разі транспортування природного газу газопроводом середнього тиску з витратою $Q_{нг}$, тобто за однакової

кількості транспортованої енергії. За результатами багатоваріантних обчислень побудовано графічні залежності енергетичного параметра A від кількості енергії, що транспортується газопроводом середнього тиску у разі застосування газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню. Рисунок 3 ілюструє одержані результати газодинамічних розрахунків поліетиленового газопроводу середнього тиску.

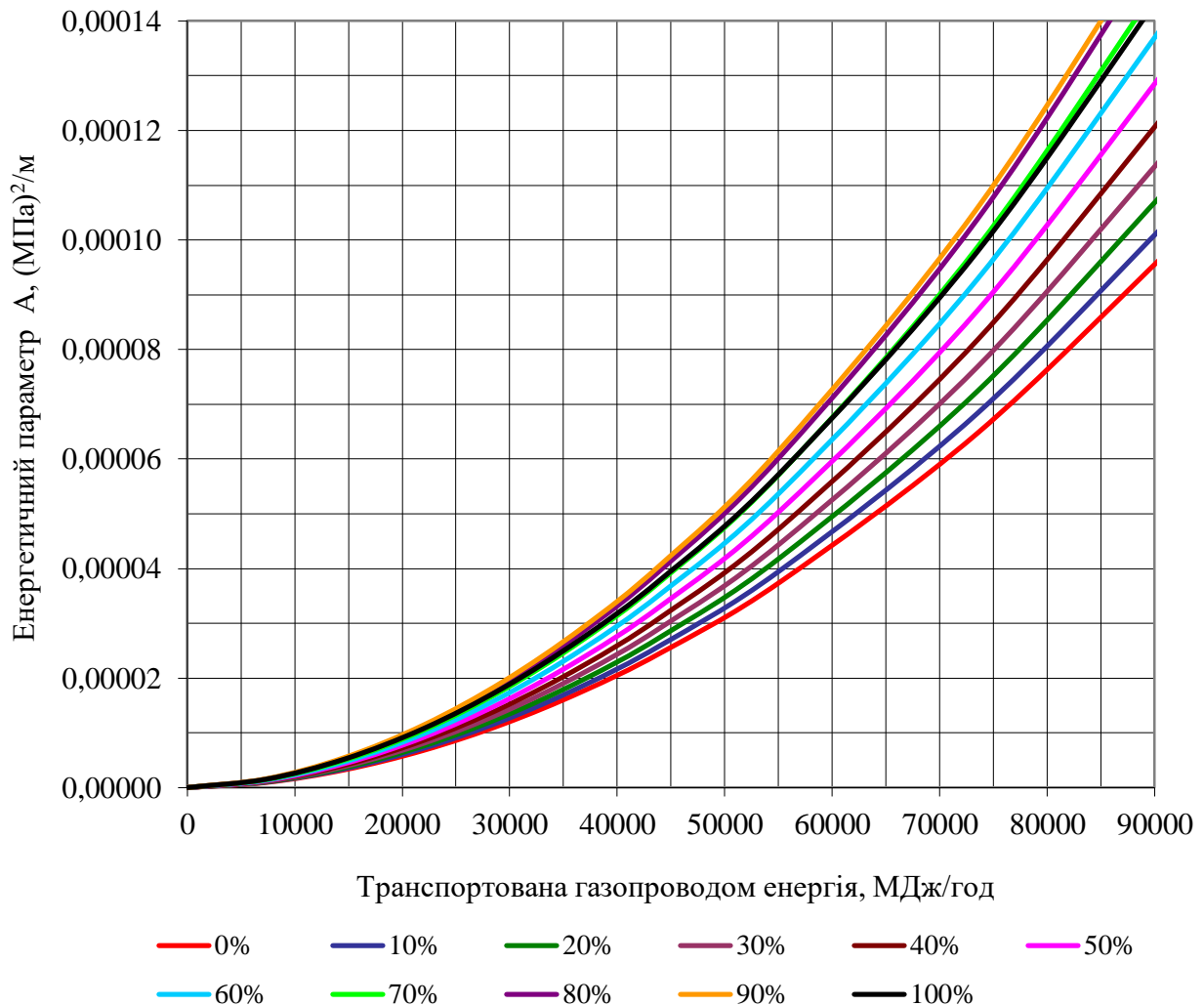


Рис. 3. Залежність енергетичного параметра A від кількості енергії, що транспортується поліетиленовим газопроводом середнього тиску у разі застосування газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню

Використовуючи результати багатоваріантних газодинамічних розрахунків, знаходимо відносне збільшення енергетичного параметра A у газових мережах середнього тиску для всього діапазону зміни

концентрації водню у суміші за умови збереження енергії, яку забезпечував природний газ. Одержані результати стосовно поліетиленового газопроводу середнього тиску ілюструє рисунок 4.

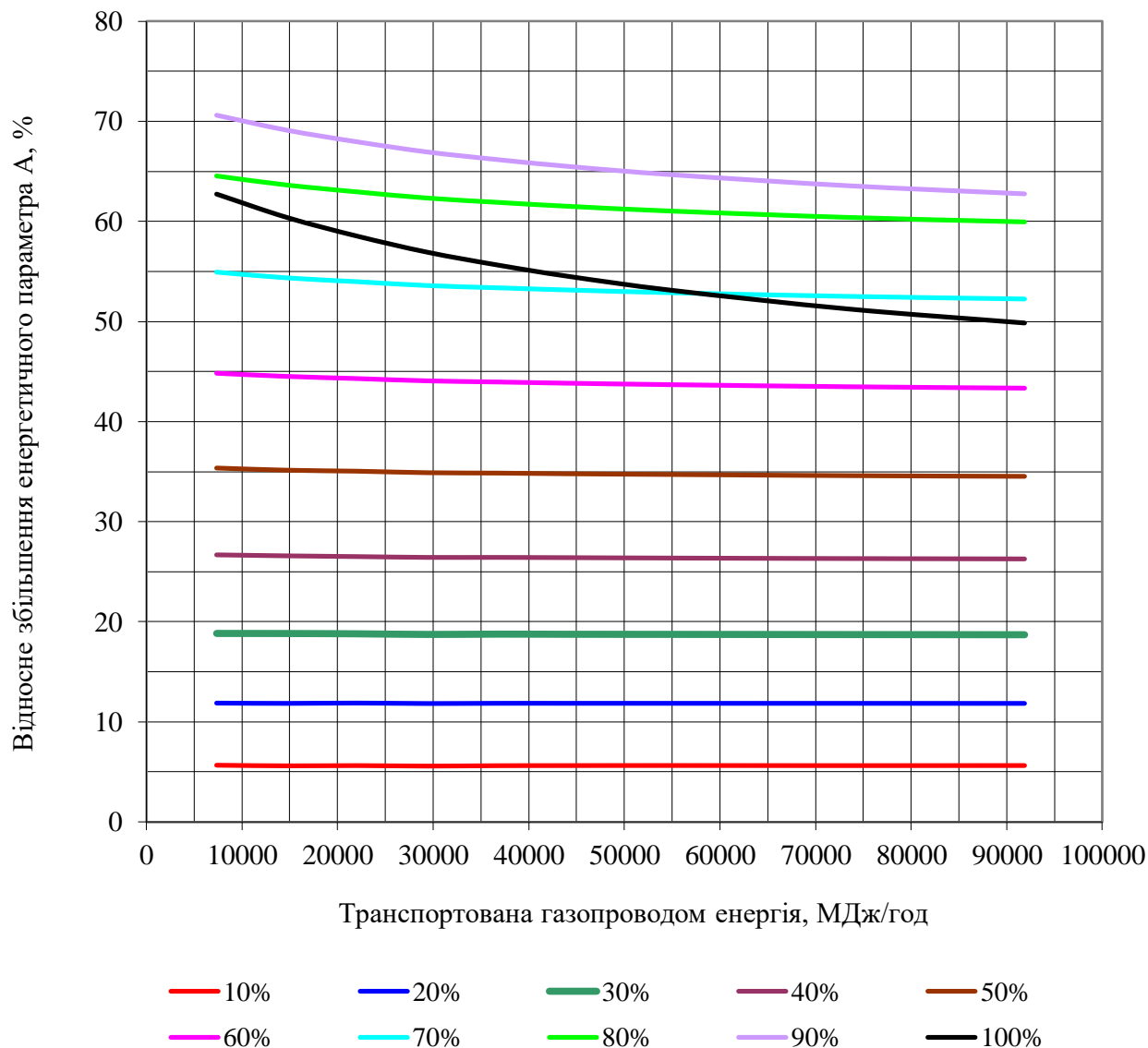


Рис. 4. Відносне збільшення енергетичного параметра A у поліетиленових газових мережах середнього тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей і збереженні кількості енергії, яку забезпечував природний газ

Як випливає із рисунку 4, при збільшенні об'ємної частки водню та створенні у поліетиленовому газопроводі середнього тиску збільшених витрат, що забезпечують кількість енергії, яка була при перекачуванні природного газу, газодинамічна енерговитратність газопроводу зростає,

що знаходить відображення у збільшенні енергетичного параметра A . Винятком є випадок перекачування трубопроводом виключно водню.

При цьому для конкретного значення об'ємної частки водню у суміші відносно зростання параметра A мало залежить від витрати. Чим вища концентрація водню у суміші, тим більше проявляється залежність зміни енерговитратності від завантаженості газопроводу. Для проведення прогнозних розрахунків параметрів системи газопостачання також можна використовувати усереднені значення відносного збільшення енергетичного параметра A , які залежать тільки від об'ємної частки водню у суміші.

Газопроводи високого тиску систем газопостачання населених пунктів згідно з [3] передбачають транспортування газу за надлишкових тисках до 1,2 МПа. Це значно збільшує їх пропускну здатність, порівняно з газопроводами середнього тиску, і формує ще більш розвинутий турбулентний режим руху газу. Тому нами проведено аналогічні дослідження впливу концентрації водню у газо-водневій суміші на газодинамічну енерговитратність сталевих і поліетиленових газових мереж високого тиску першої категорії.

На рисунку 5 наведено одержані шляхом математичного моделювання графічні залежності енергетичного параметра A від кількості транспортованої енергії газо-водневими сумішами з різною об'ємною часткою водню для поліетиленового газопроводу високого тиску.

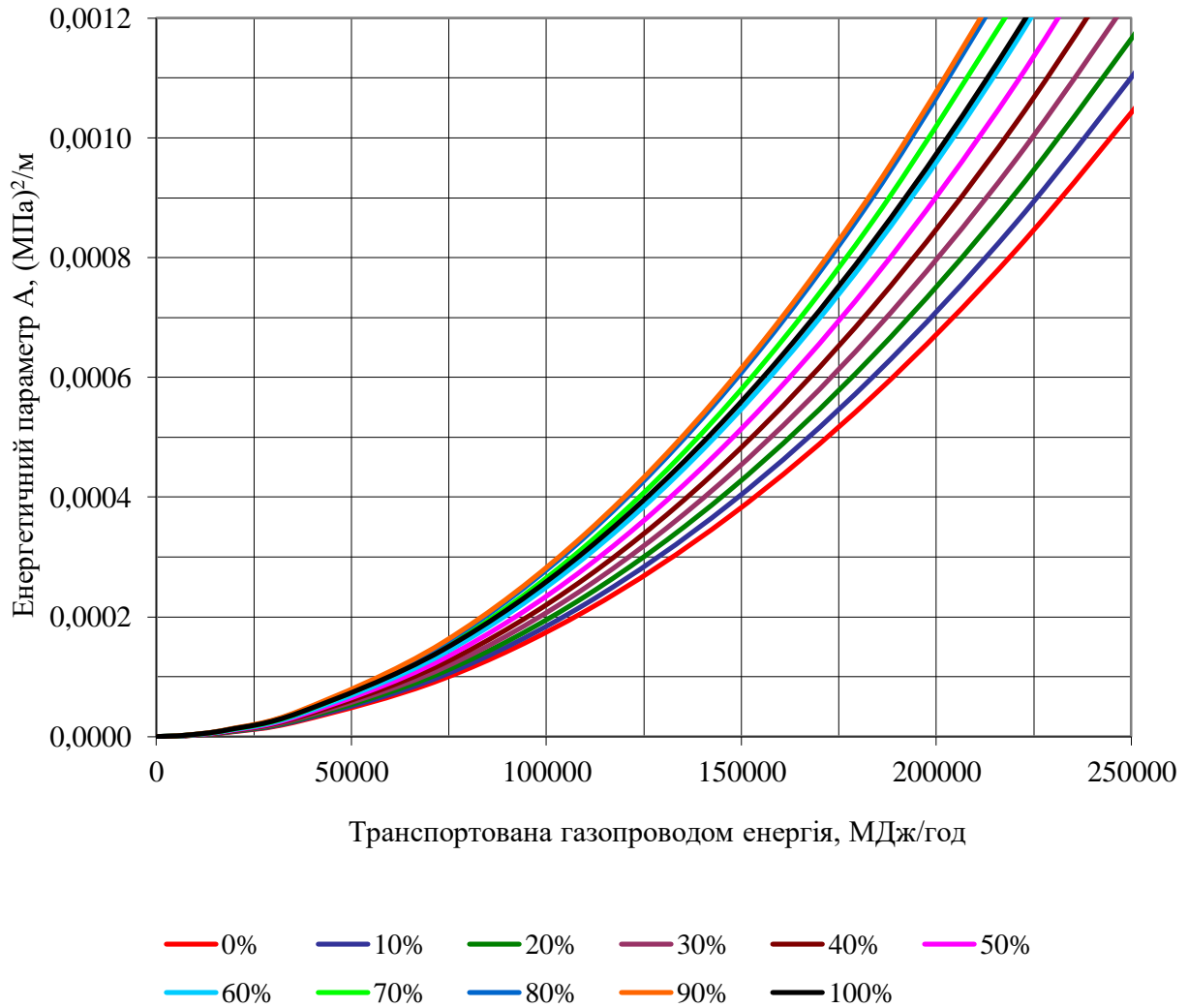


Рис. 5. Залежність енергетичного параметра A від кількості енергії, що транспортується поліетиленовим газопроводом високого тиску у разі застосування газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню

Використовуючи результати багатоваріантних газодинамічних розрахунків, знаходимо відносне збільшення енергетичного параметра A у газових мережах високого тиску для всього діапазону зміни концентрації водню у суміші за умови збереження енергії, яку забезпечував природний газ. Одержані результати стосовно поліетиленового газопроводу високого тиску ілюструє рисунок 6.

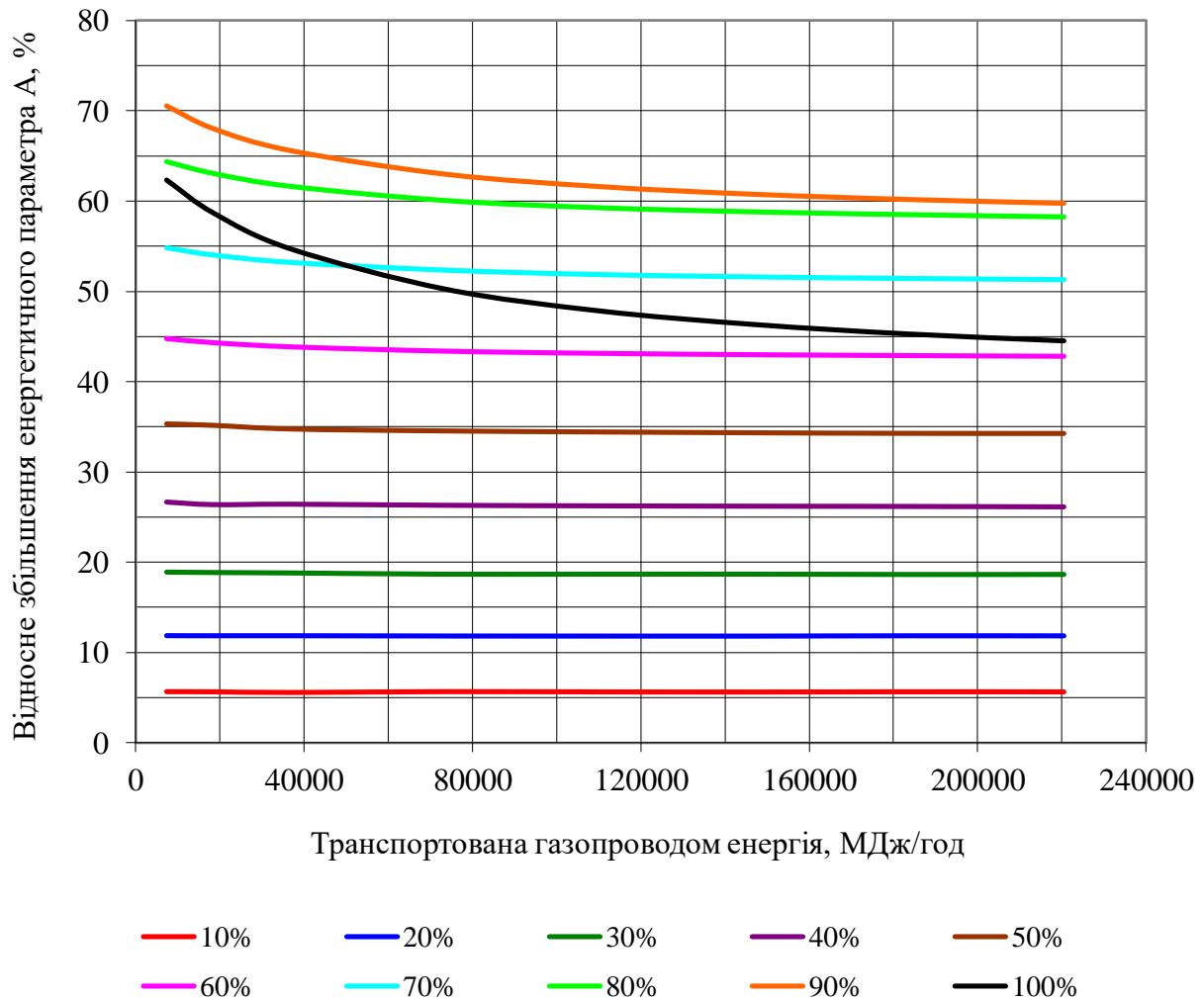


Рис. 6. Відносне збільшення енергетичного параметра A в поліетиленових газових мережах високого тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей і збереженні кількості енергії, яку забезпечував природний газ

Таблиці 1 і 2 містять узагальнені результати дослідження впливу об'ємної частки водню у газо-водневій суміші на газодинамічну енерговитратність сталевих та поліетиленових газових мереж середнього і високого тиску.

Таблиця 1

Усереднені значення зменшення енергетичного параметра при транспортуванні газовими мережами середнього і високого тиску газодневих сумішей з витратами, що мали місце при перекачуванні природного газу

Об'ємна частка водню у суміші, %	Відносне зменшення величини енергетичного параметра A , %			
	в газових мережах високого тиску		в газових мережах середнього тиску	
	сталевих	поліетиленових	сталевих	поліетиленових
10	9	8	8	8
20	17	17	17	16
30	26	25	25	24
40	34	33	33	32
50	43	41	42	40
60	52	50	50	48
70	60	58	58	56
80	69	67	67	65
90	78	75	76	74
100	86	85	85	83

Таблиця 2

Усереднені значення збільшення енергетичного параметра при транспортуванні газовими мережами середнього і високого тиску газодневих сумішей з збільшеними витратами, що забезпечують енергоємність, яка мала місце при перекачуванні природного газу

Об'ємна частка водню у суміші, %	Відносне збільшення величини енергетичного параметра A , %			
	в газових мережах високого тиску		в газових мережах середнього тиску	
	сталевих	поліетиленових	сталевих	поліетиленових
10	6	6	6	6
20	12	12	12	12
30	19	19	19	19
40	26	26	26	26
50	34	35	35	35
60	43	43	43	44

70	51	53	52	53
80	58	61	60	62
90	60	64	63	67
100	45	50	49	56

Висновки.

1. Шляхом математичного моделювання встановлено, що за умови збереження витрат газу, які мали місце при перекачуванні природного газу, при транспортуванні газо-водневих сумішей в газових мережах середнього і високого тиску втрати тиску будуть зменшуватись. Відносне зменшення енергетичного параметра A , порівняно з транспортуванням природного газу, мало залежить від витрати, що дає змогу використовувати для прогнозних розрахунків усереднені значення.
2. Усереднені величини зменшення енергетичного параметра у газових мережах середнього та високого тиску незначно залежать від матеріалу труб і робочого тиску і змінюються від нуля до (83-86) % при зростанні об'ємної частки водню у суміші від нуля до 100 %.
3. Встановлено, що випадку застосування замість природного газу газо-водневої суміші, внаслідок необхідності збільшення витрати з метою збереження необхідної кількості транспортованої газопроводом енергії, втрати тиску від тертя у газопроводах середнього та високого тиску будуть зростати. Усереднені значення відносного збільшення енергетичного параметра, порівняно з транспортуванням природного газу, змінюється від нуля до (60-67) % при зростанні об'ємної частки водню у суміші від нуля до 90 %. Для випадку транспортування водню енергетичний параметр зросте на (45-56) % залежно від матеріалу труб і робочого тиску.
4. Одержані результати можуть бути використані при проектуванні нових, реконструкції та експлуатації діючих газових мереж

середнього та високого тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей з різною об'ємною часткою водню.

Література

1. Середюк М. Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". 2021. 1.
2. SO 6976:2016.
3. ДБН В.2.5–20–2018 Газопостачання.
4. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: Сімик. 2006. 1313 с.