

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ

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 ГАЗОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ
ВНУТРІШНІХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ
ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ
ОСОБЕННОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
ВНУТРЕННИХ ГАЗОВЫХ СЕТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ГАЗОВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ
FEATURES OF GASDYNAMIC CALCULATION INTERNAL GAS
NETWORKS WHEN APPLYING GAS-HYDROGEN MIXTURES**

Анотація. Встановлено особливості газодинамічних розрахунків внутрішніх газових мереж при застосуванні замість природного газу газоводневих сумішей з об'ємною часткою до 20 % водню включно. Одержано аналітичні залежності, що дають змогу оцінити зростання втрат тиску від тертя та гідростатичного тиску у внутрішніх

газопроводах за збільшених витрат, що компенсують зменшення теплоти згорання газоводневої суміші.

Ключові слова: природний газ, водень, газоводнева суміш, внутрішні газові мережі, нижча теплота згорання, витрата енергоносія, втрати тиску від тертя, гідростатичний тиск.

Аннотація. Установлены особенности газодинамических расчетов внутренних газовых сетей при использовании газоводородных смесей с объемной долей до 20 % включительно. Получены аналитические зависимости, позволяющие оценить рост потерь давления от трения и гидростатического давления для внутренних газопроводов при увеличенных расходах, компенсирующих уменьшения теплоты сгорания газоводородной смеси.

Ключевые слова: природный газ, водород, газоводородная смесь, внутренние газовые сети, низшая теплота сгорания, расход энергоносителя, потери давления от трения, гидростатическое давление.

Summary. The peculiarities of gas-dynamic calculations of internal gas networks when using gas-hydrogen mixtures with a volume fraction of up to 20 % of hydrogen instead of natural gas have been established. Analytical dependences are obtained, which make it possible to estimate the increase in friction pressure losses and hydrostatic pressure in internal gas pipelines at increased costs, which compensate for the decrease in the heat of combustion of the hydrogen-gas mixture.

Key words: natural gas, hydrogen, hydrogen-gas mixture, internal gas networks, lower heat of combustion, energy consumption, friction pressure losses, hydrostatic pressure.

Вступ. За думкою експертів, воднева енергетика може стати стратегічною галуззю для України. Щорічне виробництво водню може

становити еквівалент 30 млрд м³ природного газу. Наявна система вітчизняних газових мереж, розрахована на транспортування 120 млрд м³/рік природного газу, сьогодні завантажена лише на 25 % [1]. Аналогічна ситуація із магістральними газопроводами України. Таким чином, в Україні є можливості транспортувати та використовувати енергоносії що містять певну частку водню.

Оскільки магістральні газопроводи та газові мережі населених пунктів суттєво відрізняються матеріалом труб, технічним станом, умовами транспортування енергоносіїв: робочим тиском, температурою, витратами, гідравлічним режимом експлуатації, то вирішення проблем, пов'язаних з транспортуванням газоводневих сумішей, прийдеться вишукувати окремо для кожної системи газопроводів.

Для вирішення проблем транспортування газоводневих сумішей системою розподільних газопроводів важливе значення мають експерименти, що проводяться Регіональною газовою компанією (РГК) на спеціально створених полігонах, розміщених у п'яти областях України [1; 2; 3]. При реалізації водневого проєкту РГК встановлено, що при закачуванні водню ділянки газових мереж середнього тиску не забезпечують достатньої герметичності через витоки у різьбових з'єднаннях, зварних швах та за рахунок проникності водню у матеріали. У той же час ділянки низького тиску за попередніми даними відповідають вимогам герметичності [1]. Повністю замінити природний газ на водень в системі газопостачання у найближчі роки неможливо з технічних причин. Тому більш ймовірним варіантом є застосування газоводневих сумішей, для яких можна використовувати існуючу газову мережу. Фахівці РГК спільно з науковцями хочуть експериментальним шляхом встановити концентрацію водню у газоводневій суміші, за якої можна буде безпечно експлуатувати газові мережі середнього і низького тиску. За попередніми результатами досліджень фахівців РГК максимально допустимою з точки

зору безпеки може бути тридцятивідсоткова частка водню в газоводневій суміші, а оптимальною – двадцятивідсоткова. При застосуванні таких газоводневих сумішей є можливість досягти деякої декарбонізації в газовому секторі без необхідності модернізації існуючої інфраструктури [4; 5].

Не дивлячись на значну кількість публікацій, присвячених перспективам застосування водню як альтернативного енергоносія, конкретні питання, пов’язані з проєктуванням та експлуатацією систем газопостачання населених пунктів у разі транспортування газоводневих сумішей з різною об’ємною часткою водню недостатньо висвітлені. У роботі [6] наведено детальну характеристику водню як альтернативного енергоносія, розкрито його позитивні та негативні характеристики. У роботах [7; 8] знайдено закономірності зміни фізико-хімічних властивостей газоводневих сумішей з об’ємною часткою водню від нуля до 100 % . Встановлено закономірності газодинамічних процесів у сталевих та поліетиленових газових мережах у разі транспортування газоводневих сумішей з різною об’ємною часткою водню при подачі споживачу тієї ж кількості енергії, що мала місце при застосуванні природного газу.

Дана робота присвячена висвітленню зазначених питань стосовно внутрішніх газових мереж, що прокладаються всередині будинків.

Мета роботи – встановлення впливу об’ємної концентрації водню на газодинамічну енерговитратність внутрішніх газових мереж.

Для дослідження використано природний газ, склад компонентів якого в об’ємних частках наведено в таблиці 1.

Природний газ зазначеного складу застосовувався для газопостачання споживачів Івано-Франківської області в 2021 році. Числові значення фізико-хімічних властивостей індивідуальних компонентів природного газу та водню взяті із [9].

Склад природного газу для проведення досліджень

Назва компонента	Об'ємна частка, %
Метан	93,0354
Етан	3,4887
Пропан	0,9413
ізо-Бутан	0,1195
н-Бутан	0,1511
нео-Пентан	0,0007
ізо-Пентан	0,0335
н-Пентан	0,0251
Генсан	0,0198
Кисень	0,0085
Азот	1,1698
Діоксид вуглецю	1,0068

Розрахунок фізико-хімічних властивостей газоводневої суміші, які необхідні для проведення газодинамічних розрахунків внутрішніх газових мереж виконано за методикою, що наведена в [7]. При цьому враховано, що згідно з ДБН В.2.5-20-2018 [10] фізико-хімічні властивості енергоносія при розрахунках систем газопостачання повинні відповідати нормальним фізичним умовам, а саме абсолютному тиску $p_n = 101325$ Па і температурі $t_n = 0$ °C ($T_n = 273,15$ К).

Внутрішні газові мережі відносять до газопроводів низького тиску. Газодинамічний розрахунок газових мереж житлових будинків має низку особливостей, порівняно із розрахунком зовнішніх газових мереж низького тиску. На загальну величину втрат тиску від тертя суттєво впливають втрати тиску в місцевих опорах. Згідно з [10] допускається так визначати втрати тиску газу на місцеві опори (у відсотках від лінійних втрат): на газопроводах від введів у будинок до стояка – 25, на стояках – 20; на

внутрішньоквартирній розводці при довжині розводки (1-2) м – 450, при довжині розводки (3-4) м – 300, при довжині розводки (5-7) м – 120, при довжині розводки (8-12) м – 50. При розрахунку вертикальних ділянок слід враховувати додатковий перепад тиску, зумовлений впливом профілю траси на величину абсолютного тиску газу, так званий гідростатичний напір [10; 11]. Для прокладання внутрішніх газових мереж використовують виключно сталеві труби. Згідно з [10] абсолютна еквівалентна шорсткість сталевих газових труб становить $k_e = 0,01$ см.

Як модельний газопровід вибрали сталевий газопровід низького тиску із зовнішнім діаметром 26,3 мм та товщиною стінки 2,8 мм. Такі газопроводи широко застосовуються для внутрішньоквартирної розводки та газових стояків житлових будинків.

Спочатку газодинамічні розрахунки проводились для випадку перекачування газопроводом природного газу, що не містить водню. Далі розглядали випадки використання газоводневих сумішей, що містять об’ємну частку водню від 5 % до 20 % з кроком 5 %.

Після визначення розрахункових величин фізико-хімічних властивостей кожного варіанта суміші, що характеризується певним значенням об’ємної частки водню, для повного діапазону завантаження модельного газопроводу з урахуванням режиму руху газу визначали гідравлічний нахил I_r , спричинений лінійними втратами тиску від тертя. Одержані результати наведені на рисунках 1 і 2.

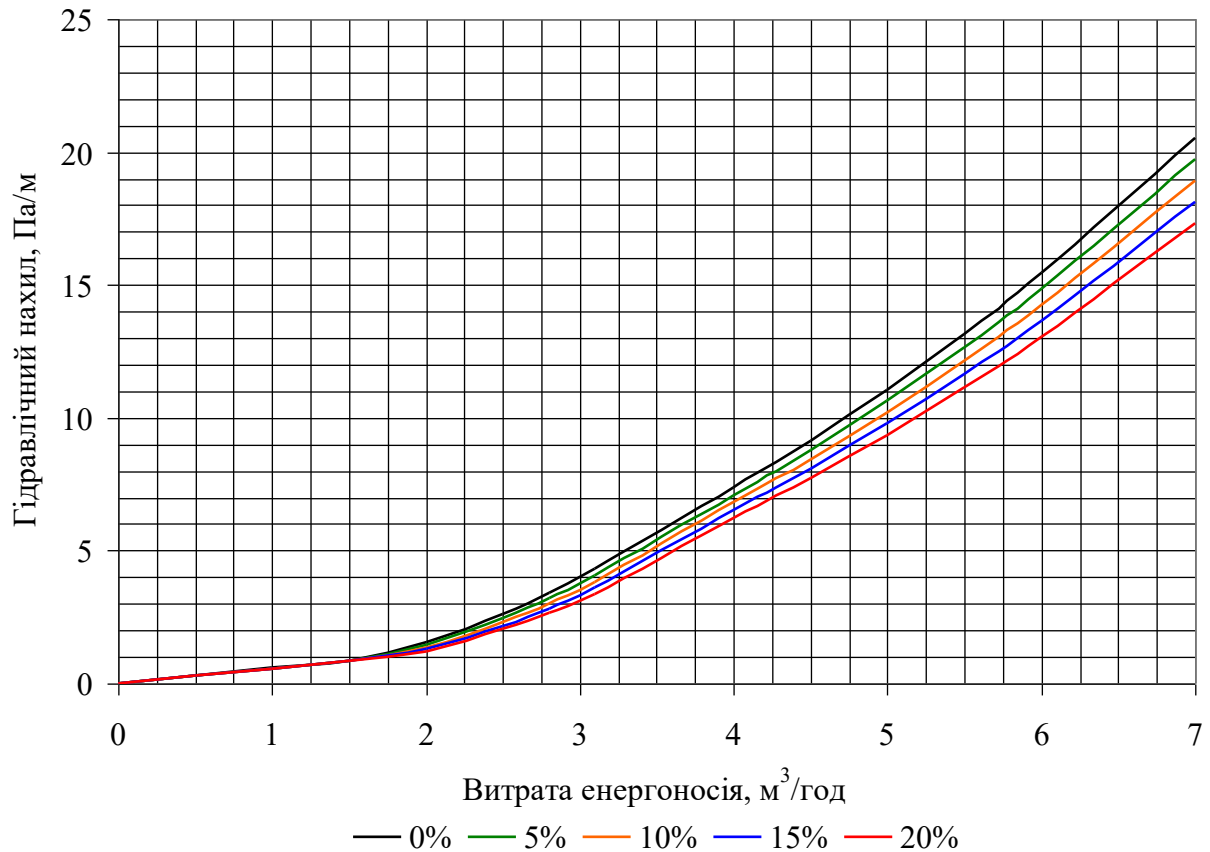


Рис. 1. Залежність гідравлічного нахилу від витрати енергоносія на ділянці внутрішнього газопроводу при застосуванні газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню

Рисунок 2 ілюструє залежність відносного зменшення гідравлічного нахилу в модельному газопроводі як функцію об'ємної частки водню у газоводневій суміші окремо для ламінарного, перехідного і турбулентного режимів руху енергоносія. Значення гідравлічного нахилу, що порівнювались, відповідали однаковим витратам енергоносія в модельному газопроводі.

Як зазначено у роботах [7; 8], якщо подавати газопроводом за одиницю часу об'єм газоводневої суміші, що відповідає розрахованому об'єму природного газу, то через зниження нижчої об'ємної теплоти згорання неприпустимо зменшиться кількість енергії, що надається споживачу.

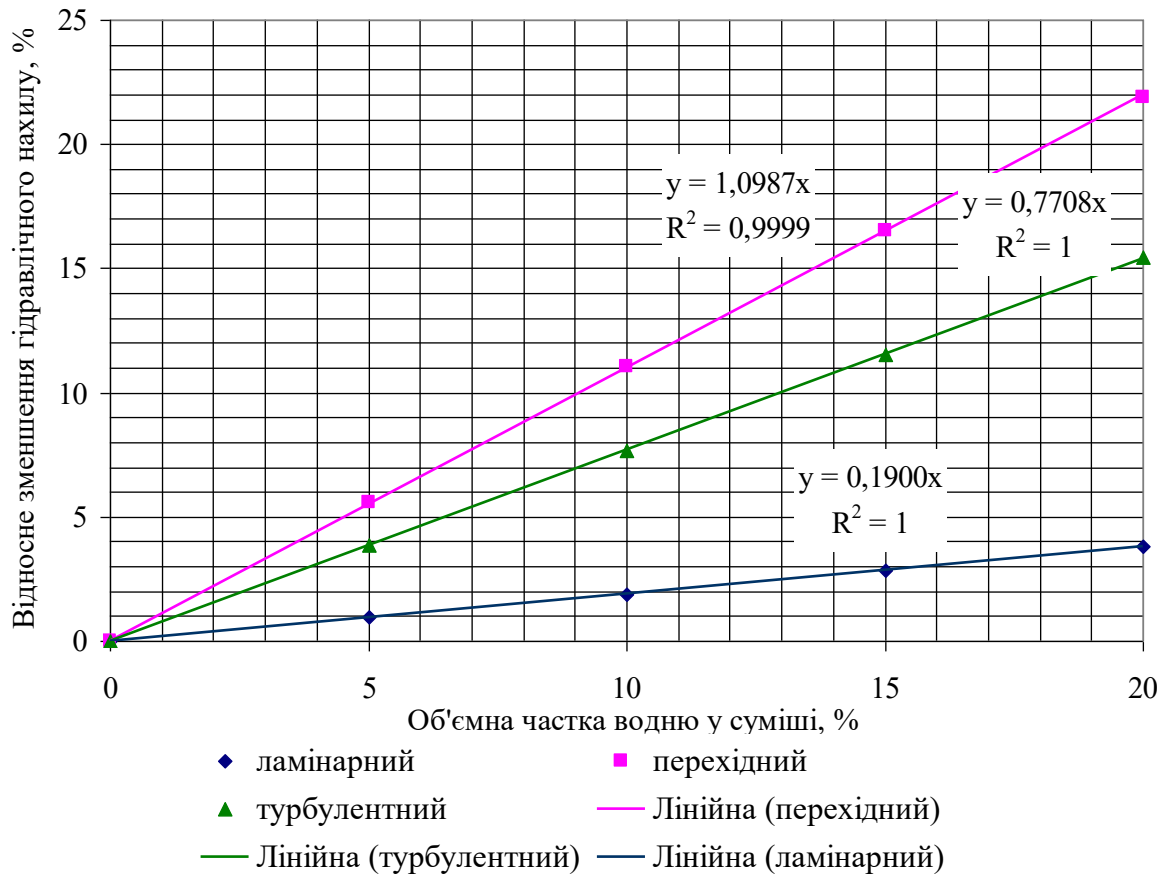


Рис. 2. Залежність відносного зменшення гідравлічного нахилу в модельному газопроводі від об'ємної частки водню у газоводневій суміші для різних режимів руху енергоносія

Для збереження необхідної енергоємності газопостачання при застосуванні газоводневої суміші необхідно на кожній ділянці газової мережі збільшити розрахункові значення витрат енергоносія за нормальних фізичних умов від величини Q_{H_2} для природного газу до значення $Q_{H_{2в}}$ для газоводневої суміші за умовою

$$Q_{H_{2в}} = Q_{H_2} \frac{\tilde{H}_2}{\tilde{H}_{2в}}, \quad (1)$$

де \tilde{H}_2 - нижча об'ємна теплота згорання природного газу, основи газо-водневої суміші;

$\tilde{H}_{2в}$ - нижча об'ємна теплота згорання газоводневої суміші.

За формулою (1) знайдено зведені витрати в модельному газопроводі при перекачуванні газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню. Далі за комп'ютерною програмою виконано багатоваріантні газодинамічні розрахунки модельного газопроводу. Гідравлічний нахил при перекачуванні газоводневої суміші з витратою Q_{H_2} порівнювався із значенням гідравлічного нахилу при транспортуванні внутрішнім газопроводом природного газу з витратою Q_{H_2} , тобто за подачі споживачу однакової кількості енергії. За результатами обчислень побудовано графічні залежності гідравлічного нахилу від кількості енергії, що транспортується внутрішнім газопроводом у разі застосування газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню (рисунок 3).

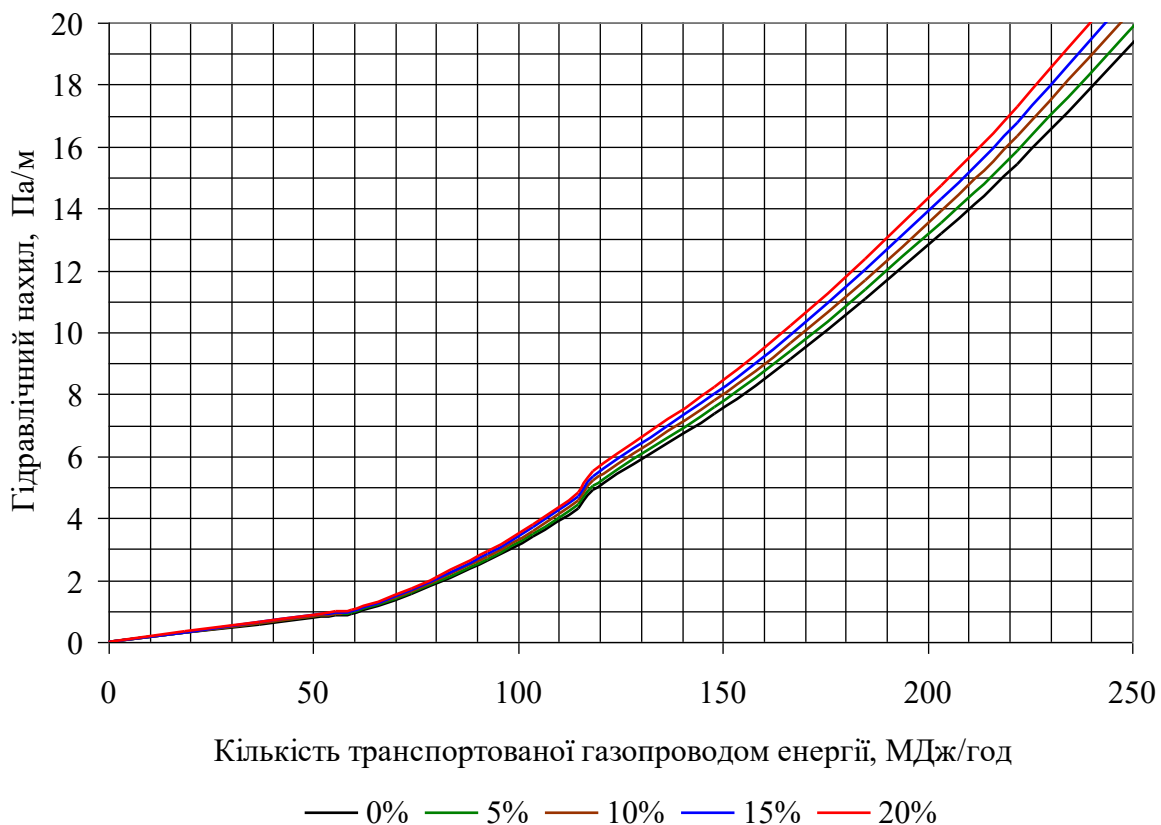


Рис. 3. Залежність гідравлічного нахилу від кількості енергії, що транспортується внутрішнім газопроводом при застосування газоводневих сумішей з різною об'ємною часткою водню

Використовуючи результати газодинамічних розрахунків, знаходимо відносне збільшення гідравлічного нахилу у внутрішніх газових мережах для різних концентрацій водню у суміші за умови збереження кількості енергії, яку забезпечував природний газ. Одержані результати ілюструє рисунок 4.

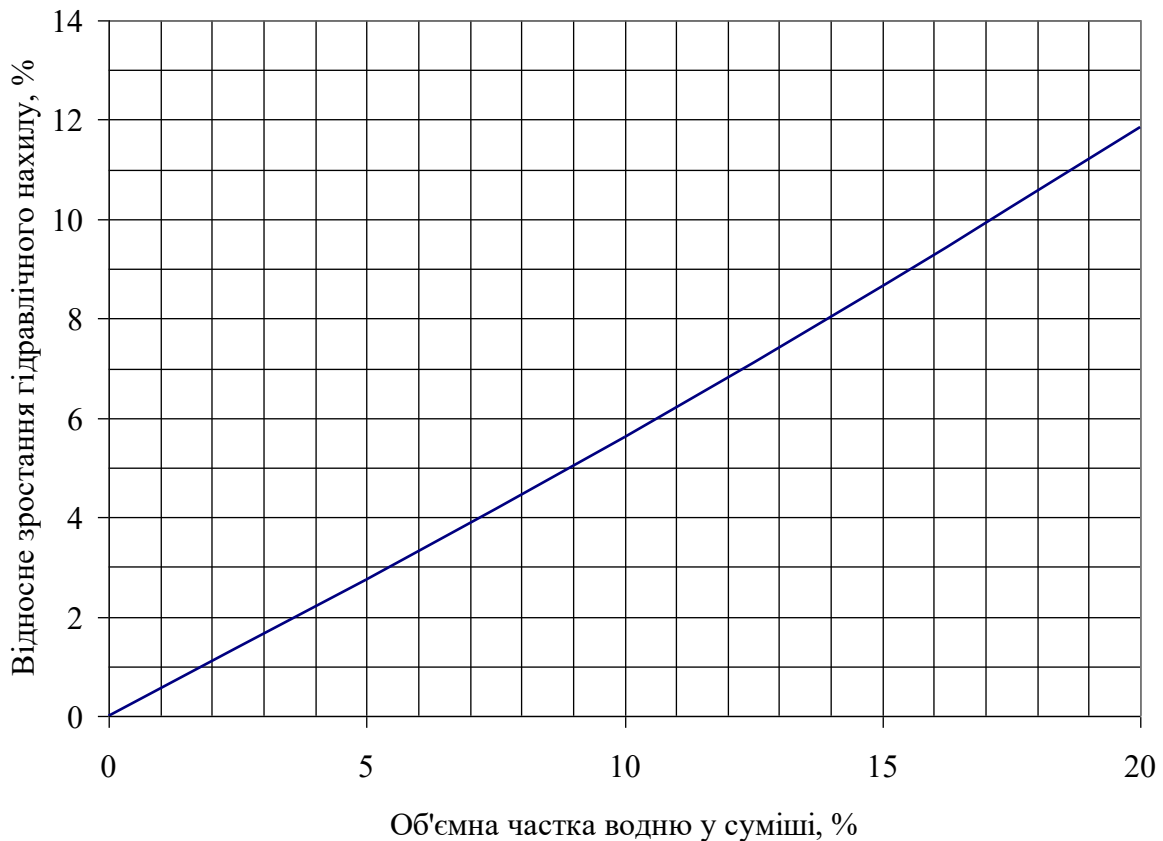


Рис. 4. Відносне збільшення гідравлічного нахилу у внутрішніх газових мережах при транспортуванні газоводневих сумішей і збереженні кількості енергії, яку забезпечував природний газ

Як впливає із рисунка 4, при збільшенні об'ємної частки водню та створенні у внутрішньому газопроводі збільшених витрат, що забезпечують кількість енергії, яка була при перекачуванні природного газу, газодинамічна енерговитратність газопроводу зростає, що знаходить відображення у збільшенні гідравлічного нахилу. Для конкретного

значення об'ємної частки водню у суміші відносно зростання гідравлічного нахилу практично не залежить від витрати та режиму руху енергоносія.

Опрацювання результатів досліджень засобами Microsoft Excel дало змогу одержати таку аналітичну залежність відносного зростання гідравлічного нахилу у внутрішньому газопроводі δI_{τ} (%) від об'ємної концентрації водню у газоводневій суміші k_g (%) у діапазоні від 0 до 20 %

$$\delta I_{\tau} = 0,5818 \cdot k_g. \quad (2)$$

Величина вірогідності апроксимації математичної моделі (2) становить 0,999.

Сумарні гідравлічні втрати тиску на ділянці внутрішніх газових мереж включають лінійні втрати тиску від тертя та втрати тиску у місцевих опорах. Якщо внутрішній газопровід буде виконувати функцію ділянки газового стояка, то відповідно до [10] при застосуванні газоводневої суміші, що містить 20 % водню, скориговане з урахуванням місцевих опорів значення гідравлічного нахилу становитиме 14 %. Якщо газопровід буде елементом квартирної розводки довжиною (1-2) м, то за тих же умов сумарні гідравлічні втрати тиску від тертя зростуть на 65 %, порівняно з випадком використання природного газу.

Як зазначалось вище, особливістю внутрішніх газових мереж є наявність вертикальних ділянок, насамперед газових стояків. Оскільки природний газ (газоводнева суміш) і повітря характеризуються різною газовою сталою, то відповідно до барометричної формули їх абсолютний тиск з висотою змінюється неоднаково. Внаслідок цього для вертикальних ділянок виникає так званий гідростатичний тиск. Згідно з чинним нормативним документом [10] гідростатичний тиск обчислюють за формулою

$$\Delta P_{zc} = g(h_n - h_k)(\rho_{новн} - \rho_{zn}), \quad (3)$$

де g - прискорення сили тяжіння, $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ [9];

h_n - геодезична позначка початку ділянки газопроводу (за рухом газу);

h_k - геодезична позначка кінця ділянки газопроводу (за рухом газу);

$\rho_{нов}$ - густина повітря за нормальних умов, $\rho_{нов} = 1,2929 \text{ кг/м}^3$ [9];

$\rho_{н_2}$ - густина газу за нормальних умов.

Якщо газ рухається ділянкою газової мережі вверх, то гідростатичний тиск від'ємний і компенсує частину втрат тиску від тертя. При русі газу ділянкою газової мережі вниз гідростатичний тиск додатний і збільшує сумарний перепад тиску на ділянці.

Нами у роботі [12] запропоновано таку уточнену залежність для гідростатичного тиску в газових мережах низького тиску

$$\Delta P_{zc} = (P_{n_2} - P_{нов}) - P_{n_2} \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{z_2 R_2 T}\right] + P_{нов} \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{z_{нов} R_{нов} T}\right], \quad (4)$$

де P_{n_2} - абсолютний тиск газу на початку ділянки газових мереж;

$P_{к_2}$ - абсолютний тиск газу у кінці ділянки газових мереж;

$P_{нов}$ - барометричний тиск на початку ділянки;

z_2 - середнє значення коефіцієнта стисливості природного газу на ділянці газових мереж;

$z_{нов}$ - коефіцієнт стисливості повітря, за нормальних фізичних умов $z_{нов} = 0,99941$ [9];

R_2 - газова стала природного газу;

$R_{нов}$ - газова стала повітря, $R_{нов} = 287,077 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ [9];

T - середня температура газу на ділянці газових мереж.

Рисунок 5 ілюструє величину втрат тиску від тертя, що компенсуються за рахунок гідростатичного тиску при русі газу вверх вертикальною ділянкою залежно від довжини ділянки і концентрації

водню у газоводневій суміші. Розрахунки виконано за нормативною формулою (3).

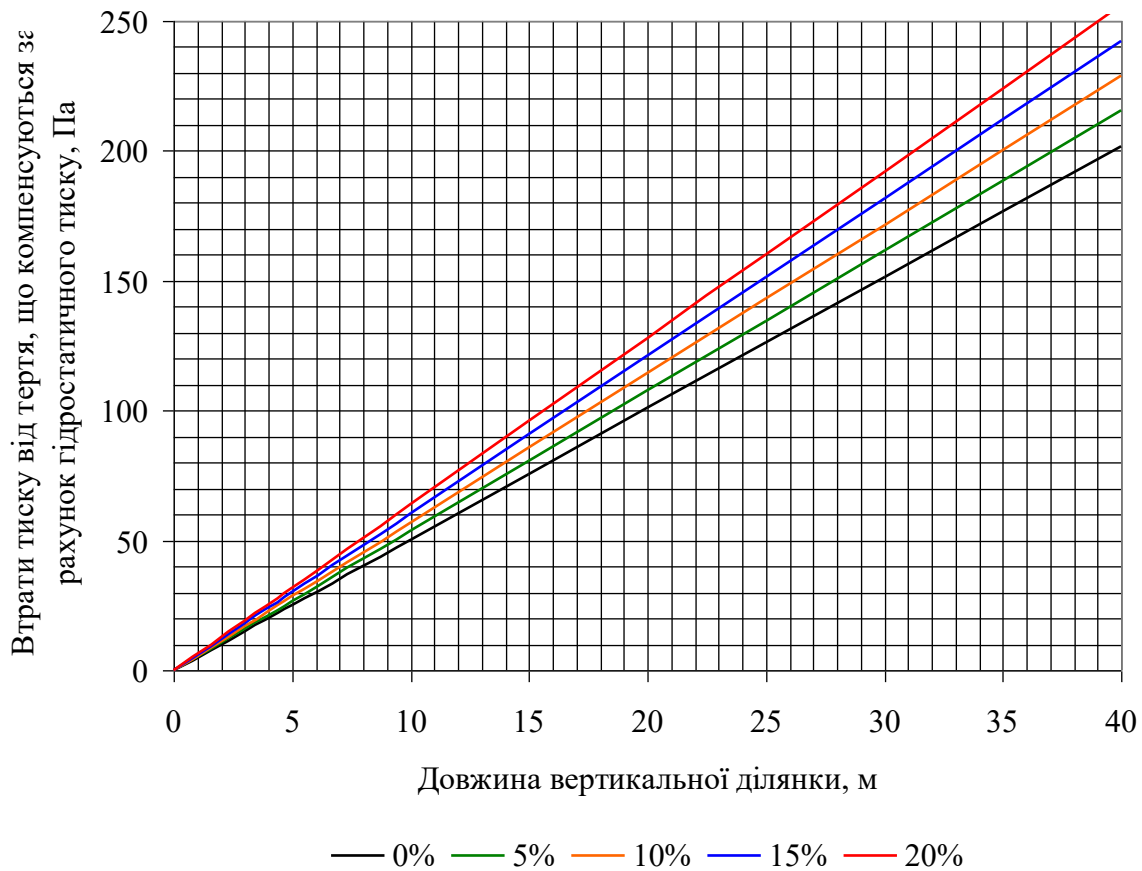


Рис. 5. Втрати тиску від тертя, що компенсуються гідростатичним тиском на вертикальній ділянці внутрішніх газових мереж при русі вверх газоводневої суміші, яка містить різну об'ємну частку водню

Введемо поняття питомого гідростатичного тиску для вертикальної ділянки внутрішнього газопроводу за умовою

$$I_{zc} = \frac{\Delta P_{zc}}{h_n - h_k}. \quad (5)$$

Рисунок 6 ілюструє залежність питомого гідростатичного тиску енергоносія на вертикальній ділянці внутрішнього газопроводу (за абсолютною величиною) від концентрації водню у газоводневій суміші. Розрахунки величини гідростатичного тиску виконані за нормативною формулою (3).

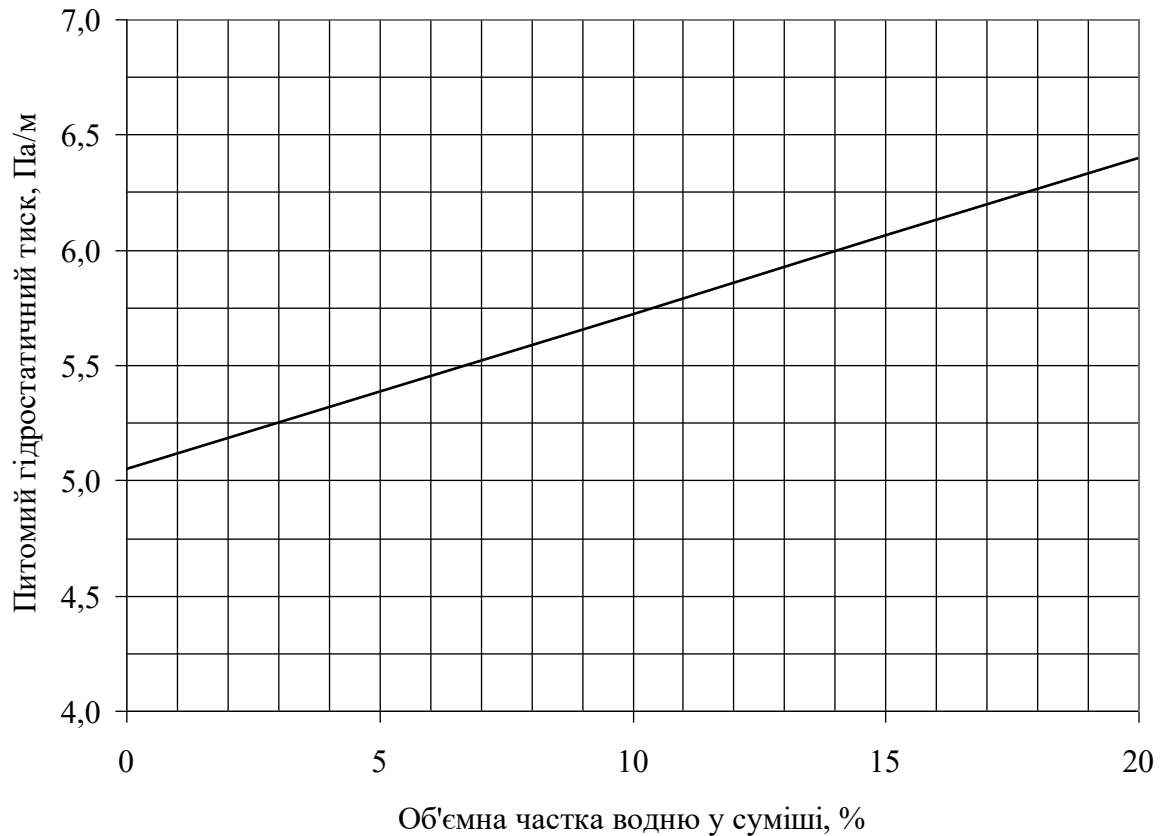


Рис. 6. Залежність питомого гідростатичного тиску енергоносія на вертикальній ділянці внутрішнього газопроводу від об'ємної частки водню у газоводневій суміші

Опрацювання результатів досліджень засобами Microsoft Excel дало змогу одержати такі аналітичні залежності питомого гідростатичного тиску для вертикальних ділянок внутрішніх газових мереж I_{zc} (Па/м) від об'ємної частки водню в газоводневій суміші k_g (%):

за застосування формули (3)

$$I_{zc} = 5,046 + 6,769 \cdot 10^{-2} k_g - 3,938 \cdot 10^{-6} k_g^2 + 2,140 \cdot 10^{-8} k_g^3, \quad (6)$$

за застосування уточненої формули (4)

$$I_{zc} = 4,944 + 7,221 \cdot 10^{-2} k_g - 4,558 \cdot 10^{-4} k_g^2 + 1,406 \cdot 10^{-5} k_g^3. \quad (7)$$

Висновки.

1. Встановлено, що за збереження витрат енергоносія, які мали місце при перекачуванні природного газу, у разі застосування газоводневих сумішей у внутрішніх газових мережах втрати тиску від тертя будуть зменшуватись. Відносне зменшення втрат тиску залежить від режиму руху газу і достовірно описується лінійними залежностями від об'ємної концентрації водню у газоводневій суміші.

2. При створенні у внутрішньому газопроводі збільшених витрат газоводневих сумішей, що забезпечать кількість енергії, яка мала місце при застосуванні природного газу, газодинамічна енерговитратність внутрішніх газопроводів зростає. Відносне зростання гідравлічного нахилу практично не залежить від витрати і режиму руху енергоносія та достовірно описується лінійною залежністю від об'ємної концентрації водню у газоводневій суміші.

3. У випадку застосування газоводневої суміші з об'ємною часткою водню 20 % втрати тиску від тертя з урахуванням втрат у місцевих опорах зростуть на 14 % для газових стояків і на 65 % для квартирної розводки довжиною до 2 м.

4. Застосування газоводневих сумішей помітно впливає також на величину гідростатичного тиску, який виникає на вертикальних ділянках внутрішніх газових мереж. Зростання питомого гідростатичного тиску при збільшенні концентрації водню у газоводневій суміші достовірно можна описати поліноміальною функцією третього порядку.

5. Встановлені особливості газодинамічних розрахунків слід враховувати як при проектуванні нових, так і переведенні існуючих газових мереж житлових будинків на застосування замість природного газу газоводневих сумішей.

Література

1. Никоноров О. Роль газотранспортної інфраструктури України в розвитку водневої енергетики. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2020. № 5 (47). С. 3-8.
2. Казда С., Уніговський Л. Наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2020. № 5 (47). С. 9-14.
3. Костогриз К. Перші випробування українських газових мереж на водні. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2020. № 5 (47). С. 24-28.
4. URL: <https://www.minprom.ua/digest/266734.html>
5. URL: https://tsoua.com/wp-content/uploads/2021/05/Skankopiya-TYNDR-2021-2030_compressed.pdf
6. Карп І., Уніговський Л. Водень: сучасний стан проблеми та напрями майбутнього використання. *Нафтогазова галузь України*. Київ, 2020. № 5 (47). С. 15-23.
7. Середюк М. Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 1 (101). Т.1. С. 52-62.
8. Середюк М. Д. Особливості газодинамічних процесів у газових мережах середнього і високого тиску за транспортування газо-водневих сумішей. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Київ, 2021. № 2 (102). С.87-95.
9. ISO 6976:2016.
10. ДБН В.2.5–20–2018. Газопостачання.
11. Гончарук М. І., Середюк М. Д., Шелудченко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: Сімік. 2006. 1313 с.

12. Середюк М. Д. Ксенич А. І. Використання барометричної формули для врахування впливу профілю траси на результати гідравлічного розрахунку газових мереж. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. Івано-Франківськ, 2010. № 3 (25). С. 97-101.