

РОЗРОБКА КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ТИСКУ У ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Ю.І. Дорошенко

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: tzn g @ n u n g . e d u . u a

Нові газові мережі, а також реконструкція діючих систем газопостачання виконується в основному з використанням поліетиленових труб. Проектування, будівництво та експлуатація поліетиленових газових мереж має ряд особливостей, які не стали предметом наукових досліджень вітчизняних вчених і не знайшли відображення в науковій літературі. Особливістю структури поліетиленових газових мереж є велика кількість з'єднувальних деталей (фітінгів), які встановлюються в місцях повороту, відводів, зміни діаметра, місцях установки різної трубопровідної арматури. З точки зору газової динаміки фітінги є місцевими опорами. Вони безумовно впливають на загальний гідравлічний опір газових мереж.

Метою роботи є оцінка впливу місцевих опорів на гідравлічну енерговитратність поліетиленових газових мереж, а також розроблення заходів щодо зменшення втрат тиску в газових мережах.

Досягнення цієї мети передбачає вирішення наступних завдань:

- розглянути конструкції місцевих опорів поліетиленових трубопроводів;
- теоретично і експериментально дослідити динаміку руху газу терморезисторними сполуками поліетиленових трубопроводів і визначити коефіцієнти їх місцевих опорів;
- розробити конструктивні рішення для зменшення втрат енергії газового потоку в поліетиленових газових мережах.

Оброблення результатів досліджень виконувалася з використанням методів:

1. Модульного та об'єктно-орієнтованого програмування;
2. Візуального програмування.

Теоретичні дослідження динаміки руху газу місцевими опорами поліетиленових трубопроводів дали змогу виявити, що в терморезисторних з'єднаннях спостерігається вихороутворення, присутній реверсний рух газу, відбувається відривання потоку від стінки терморезисторного з'єднання, що, в свою чергу, призводить до значних втрат тиску. Теоретично визначено коефіцієнти місцевих опорів кожного терморезисторного з'єднання, адекватність чого підтверджено експериментально.

Запропоновано конструктивні напрямки зменшення коефіцієнта місцевого опору терморезисторних сполук поліетиленових трубопроводів. Теоретичними розрахунками підтверджено ефективність застосування удосконалених конструкцій терморезисторних сполук (коефіцієнт місцевого опору удосконалених конструкцій зменшується на 11,5-80 %).

Ключові слова: динаміка руху, муфта, сідловий трійник, терморезисторний трійник, коліно, редуційний перехідник, математична модель, рівняння Нав'є-Стокса.

Новые газовые сети, а также реконструкция действующих систем газоснабжения выполняется в основном с использованием полиэтиленовых труб. Проектирование, строительство и эксплуатация полиэтиленовых газовых сетей имеет ряд особенностей, которые не стали предметом научных исследований отечественных ученых и не нашли отображения в научной литературе. Особенностью структуры полиэтиленовых газовых сетей является большое количество соединительных деталей (фитингов), которые устанавливаются в местах поворота, отводов, смены диаметра, местах установки различной трубопроводной арматуры. С точки зрения газовой динамики фитинги являются местными сопротивлениями. Они безусловно влияют на общее гидравлическое сопротивление газовых сетей.

Целью работы является оценка влияния местных сопротивлений на гидравлическую энергозатратность полиэтиленовых газовых сетей, а также разработка мероприятий для уменьшения потерь давления в газовых сетях.

Достижение этой цели предполагает решение следующих задач:

- рассмотреть конструкции местных сопротивлений полиэтиленовых трубопроводов;
- теоретически и экспериментально исследовать динамику движения газа терморезисторными соединениями полиэтиленовых трубопроводов и определить коэффициенты их местных сопротивлений;
- разработать конструктивные решения для уменьшения потерь энергии газового потока в полиэтиленовых газовых сетях.

Обработка результатов исследований выполнялась с использованием методов:

1. Модульного и объектно-ориентированного программирования;
2. Визуального программирования.

Теоретические исследования динамики движения газа местными сопротивлениями полиэтиленовых трубопроводов дали возможность определить, что в терморезисторных соединениях наблюдается вихреобразование, присутствует реверсное движение газа, происходит отрывание потока от стенки терморезисторного соединения, что, в свою очередь, приводит к значительным потерям давления. Теоретически определены коэффициенты местных сопротивлений каждого терморезисторного соединения, адекватность чого подтверждена экспериментально.

Предложены конструктивные направления уменьшения коэффициента местного сопротивления терморезисторных соединений полиэтиленовых трубопроводов. Теоретическими расчетами подтверждена эффективность применения усовершенствованных конструкций терморезисторных соединений (коэффициент местного сопротивления усовершенствованных конструкций уменьшается на 11,5-80%).

Ключевые слова: динамика движения, муфта, седловой тройник, терморезисторный тройник, колено, редуцирующий переходник, математическая модель, уравнения Навье-Стокса.

New gas networks, as well as the reconstruction of the operating gas supply systems, are mainly made of polyethylene pipes. Design, construction, and operation of polyethylene gas networks have a number of peculiarities which have not become the subject of our scientists' studies and have not been depicted in the scientific literature. The peculiarity of the polyethylene gas networks structure is a large number of fittings (pipe fittings), which are installed in the places of bends, branches, diameter changes, and in the places of various pipe fittings installation. From the point of view of gas dynamics the fittings are local resistances. They certainly affect the overall hydraulic resistance of the gas networks.

The aim of the study is to assess the local resistances influence onto the hydraulic energy consumption of polyethylene gas networks and also to develop the measures for pressure losses reduction in the gas networks.

Achieving of this aim requires solving of the following tasks:

- considering the design of local resistances of polyethylene pipelines;*
- theoretically and experimentally studying the gas movement dynamics through the thermistor connections of polyethylene pipelines and determining the coefficients of their local resistances;*
- developing constructive solutions for reduction of the gas flow energy losses in the polyethylene gas networks.*

Processing of the study results has been carried out using the following methods:

- 1. Modular and object-oriented programming;*
- 2. Visual programming.*

Theoretical studies of the gas movement dynamics through the local resistances of the polyethylene pipelines have provided an opportunity to determine the fact that in the thermistor connections vortex formation is observed, reverse gas movement is present, and the flow loses contact with the thermistor connection wall which, in its turn, leads to a significant pressure loss. The coefficients of local resistances of each thermistor connection have been calculated theoretically the adequacy of which has been confirmed experimentally.

Constructive ways for reduction of the local resistance coefficient of the polyethylene pipes thermistor connections have been developed. Theoretical calculations have confirmed the effectiveness of the improved thermistor connection designs (the local resistance coefficient of the improved designs is reduced by 11,5-80%).

Key words: movement dynamics, coupling, saddle tee, thermistor tee, elbow, reducing adapter, mathematical model, Navier and Stokes equations.

Газова галузь є провідною в енергетичному комплексі України. Протяжність газотранспортної системи України складає 283,2 тис. км, із них на системи магістрального транспортування газу припадає 37,1 тис.км, а на розподільні системи газопостачання – 246,1 тис. км. Керування функціонуванням та розвитком цих систем ставить різноманітні технічні та економічні задачі, які ускладнюються з часом. Для наукового обґрунтованого розв'язку цих задач необхідною умовою є розроблення нових та удосконалення створених раніше методик, математичних моделей та програмного забезпечення.

Обсяги застосування поліетиленових труб у вітчизняній та світовій практиці спорудження, ремонту та реконструкції газових мереж з кожним роком зростають.

Поліетиленові труби усе ширше застосовуються у вітчизняній та світовій практиці спорудження, ремонту та реконструкції газових мереж. Вони є дешевші, ніж сталеві, їх легко монтувати, зварювання максимально автоматизоване, вони не піддаються корозії, дають змогу проводити реконструкцію газової мережі безтраншейними технологіями (метод “труба в трубі”). Спорудження або реконструкція газових мереж із застосуванням поліетиленових труб дає економію до 40% коштів порівняно із традиційними методами [1- 6].

Теоретичні основи проектування газових мереж зі сталевих та поліетиленових труб були закладені такими вченими як: Бер А.М., Боб-

ровський С.А., Галіулін З.Т., Євдокімов А.Г., Середюк М.Д., Сухарев М.Г., Щербаков В.І., Яковлев Є.І. [7-24]. Основним чинним нормативним документом для проектування газових мереж як зі сталевих, так і з поліетиленових труб в Україні є ДБН В.2.5 – 20 [25].

Основним чинним нормативним документом для проектування газових мереж як зі сталевих, так і з поліетиленових труб в Україні є ДБН В.2.5 – 20 [25]. Одна і та сама методика наведена у цьому нормативному документі застосовується для проектування газових мереж як зі сталевих, так і з поліетиленових труб. Такий уніфікований підхід до проектування газових мереж з труб із різною шорсткістю внутрішньої поверхні та з різними за конструкціями місцевими опорами є сумнівним і вимагає досліджень. Так місцеві опори поліетиленових трубопроводів на сьогодні практично не вивчені. Для них відсутні довідкові дані значень їх коефіцієнтів, а рекомендацій їх розрахунку немає. До того ж у ряді випадків вони мають значно складнішу конфігурацію внутрішньої поверхні, ніж аналогічні місцеві опори сталевих трубопроводів, а, отже, і їх коефіцієнти є значно більші. Тому прийняті у ДБН В.2.5 – 20 [25] припущення про те, що втрати напору у місцевих опорах рівні 10% від загальних втрат по довжині для поліетиленових трубопроводів, шорсткість внутрішньої поверхні яких у декілька разів менша, ніж сталевих, вимагає перегляду. Тільки газові мережі, проектування яких здійснюється за методиками максимально на-



Рисунок 1 – Терморезисторні з'єднання

ближеними до реальних умов є мінімально гідравлічно енерговитратні, завжди здатні забезпечити мінімально-допустимий тиск усім споживачам, мають найбільшу перспективу розвитку. Тому теоретичні та експериментальні дослідження газових мереж із поліетиленових труб на сьогодні є актуальними.

Метою роботи є оцінка впливу місцевих опорів на гідравлічну енерговитратність поліетиленових газових мереж, а також розроблення заходів щодо зменшення втрат тиску в газових мережах.

Досягнення цієї мети передбачає вирішення наступних завдань:

- розглянути конструкції місцевих опорів поліетиленових трубопроводів;
- теоретично і експериментально дослідити динаміку руху газу терморезисторними сполучками поліетиленових трубопроводів і визначити коефіцієнти їх місцевих опорів [26-28];
- розробити конструктивні рішення для зменшення втрат енергії газового потоку в поліетиленових газових мережах.

Обробка результатів досліджень виконувалася з використанням методів:

1. Модульного та об'єктно-орієнтованого програмування;
2. Візуального програмування.

Об'єктом досліджень є поліетиленові газові мережі довільної конфігурації (розгалужене дерево, кільцева).

Предметом досліджень є газодинамічні процеси в поліетиленових газових мережах низького та середнього тисків.

Методи дослідження. Оброблення результатів теоретичних та експериментальних досліджень виконувалась із використанням методів:

1. Модульного та об'єктно-орієнтованого програмування;
2. Візуального програмування.

Наукова новизна результатів досліджень:

- досліджено динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів, виявлено місця утворення вихорів, реверсного руху газу, відривання потоку газу від стінки терморезисторного з'єднання;
- визначено коефіцієнт місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання поліети-

ленових трубопроводів та досліджено його залежність від типорозміра з'єднання;

- запропоновано конструктивні шляхи зменшення втрат тиску у газовій мережі із поліетиленових труб, підтверджено ефективність застосування удосконалених конструкцій терморезисторних з'єднань.

Провівши аналіз сформованої практики проектування газових мереж, було встановлено, що проектування газових мереж із сталевих та поліетиленових труб здійснюється за одними й тими ж методиками. В усіх методиках, у тому числі наведеній у нормативному документі, втрати тиску у місцевих опорах приймаються рівними 10% від втрат тиску по довжині. Таке положення для поліетиленових труб є сумнівним, оскільки шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленових труб є в декілька разів менше, ніж сталевих, а місцеві опори в ряді випадків мають значно складнішу конструкцію, ніж аналогічні місцеві опори сталевих трубопроводів і їх коефіцієнти є значно більшими. Місцеві опори поліетиленових трубопроводів на сьогодні практично не вивчені, для них відсутні довідкові дані значень їх коефіцієнтів, а рекомендацій їх розрахунку немає.

Поліетиленові газові мережі містять різні місцеві опори. Їх конфігурація залежать від способу зварного з'єднання поліетиленових труб. Найскладнішу конфігурацію внутрішньої поверхні, а отже найбільші коефіцієнти місцевих опорів, мають терморезисторні з'єднання поліетиленових труб, дослідженню яких присвячено роботу.

Терморезисторні з'єднання зображено на рисунку 1.

Для визначення коефіцієнтів їх місцевих опорів було проведено аналіз конструкції кожного з'єднання та встановлено, що кожне з'єднання складається з декількох простих місцевих опорів, які близько розміщені один до одного (різких розширень, різких звужень, поворотів тощо). А отже, попередній місцевий опір впливає на місцевий опір розміщений за ним, що унеможливило проведення розрахунків коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів.

Дослідити динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубо-

проводів із складною конфігурацією внутрішньої поверхні. визначити значення коефіцієнтів їх гідравлічних місцевих опорів дають змогу сучасні програмні комплекси математичного моделювання тривимірних потоків рідин та газів ANSYS CFX, Flow Vision, Flow3D. Для наших досліджень будемо застосовувати програмний комплекс Flow Vision, який базується на кінцево-об'ємному методі розв'язку рівнянь гідрогазодинаміки та містить прямокутну адаптивну сітку з локальним подібненням. Flow Vision дає можливість моделювати стаціонарні та нестаціонарні, стисливі, слабостисливі і нестисливі потоки рідин та газів. Застосування різних моделей турбулентності та адаптивної розрахункової сітки дає змогу моделювати складні потоки, включаючи потоки з сильним завихренням, горінням, потоки з вільною поверхнею.

Математичною моделлю руху рідини (газу), яка застосовується в Flow Vision, є сукупність рівнянь конвективно-дифузного переносу. У загальній диференційній формі ці рівняння мають такий вигляд:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(Vf) = \nabla(D\nabla f) + Q, \quad (1)$$

де f – змінна, яка розраховується;

t – час;

∇ – оператор Гамільтона;

V – швидкість;

D – коефіцієнт дифузії;

Q – вхідний параметр.

У Flow Vision застосовується метод скінчених об'ємів для розв'язку рівняння (1). У цьому методі рівняння (1) інтегрується по об'єму кожної i -ої комірки розрахункової сітки та по часу (крок часу) τ :

$$\int_{V_i} fdV \Big|_{t=t_{n+1}} - \int_{V_i} fdV \Big|_{t=t_n} + \int_{\tau S_i} \oint fV ds dt = \int_{\tau S_i} \oint D\nabla f ds dt + \int_{\tau V_i} \oint Q dV dt, \quad (2)$$

де V_i – об'єм комірки;

S_i – площа комірки;

t_n, t_{n+1} – моменти початку і кінця кроку по часу

$$t_{n+1} = t_n + \tau. \quad (3)$$

Комірка розрахункової сітки має форму довільного багатогранника. Назвемо “вільними гранями” комірки ті грані, якими вона межує з іншими комірками. Площу j -тої вільної грані в i -тій комірці позначимо s_i^j . “Твердими гранями” назвемо грані комірки, які не межують з іншими комірками (містяться на вході та виході, по контакту газу з стінкою). Площу j -тої твердої грані в i -тій комірці позначимо g_i^j . Запишемо рівняння (2) в такій формі:

$$V_i(f_{n+1}^i - f_n^i) + \sum_j F_i^j s_i^j + \sum_j G_i^j g_i^j + Q_i = 0, \quad (4)$$

де Q_i – об'ємний вхідний параметр змінної f ;

f_n – середнє значення змінної по об'єму комірки в момент часу t_n .

$$V_i f_i^n = \int_{V_i} fdV \Big|_{t^n}. \quad (5)$$

Середні густини потоків розрахункових змінних F_i^j і G_i^j через вільні грані s_i^j і твердої грані g_i^j за крок по часу рівні:

$$F_i^j = \int_{\tau} (fV + D\nabla f) dt \Big|_{s_i^j}, \quad (6)$$

$$G_i^j = \int_{\tau} (f_{w_j} V_{w_j} + D(\nabla f)_{w_j}) dt \Big|_{g_i^j}, \quad (7)$$

де w – індекс, який відповідає значенню відповідних величин на границі розрахункової області, яка відповідає грані g_i^j .

Другий член суми підінтегрального виразу в (6), який відповідає дифузному потоку f , апроксимується в Flow Vision другим порядком точності просторової змінної.

Першим кроком моделювання руху газу терморезисторними з'єднаннями є створення тривимірної геометричної моделі терморезисторних з'єднань із прилеглими ділянками трубопроводу. Тривимірні моделі терморезисторних з'єднань створювались в програмному комплексі MSC Nastran, після чого вони імпортувались в програмний комплекс Flow Vision. Конструкція та геометричні розміри створених тривимірних геометричних моделей терморезисторних з'єднань ідентичні промисловим зразкам.

Після імпортування геометричної моделі терморезисторного з'єднання в Flow Vision задавалась математична модель руху газу. Математична модель руху газу це система рівнянь, які визначають закони збереження (енергії, маси, імпульсу) та рівнянь стану газу. Математична модель модифікувалась через інтерфейс Flow Vision шляхом відключення частини рівнянь моделі (разом із цим і непотрібних розрахункових змінних), що зменшувало час розрахунку, та через зміну констант моделі.

Для дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями використано математичну модель турбулентного нестисливого потоку, яка базується на застосуванні для розв'язку задач рівняння Нав'є-Стокса, що дає змогу розрахувати розподіл швидкості та тиску вздовж трубопроводу.

Рівняння Нав'є-Стокса – система диференціальних рівнянь у часткових похідних, що описує рух ньютонівських рідин. Рівняння Нав'є-Стокса є одним із базових у гідродинаміці і застосовується в математичному моделюванні багатьох природних процесів.

Система складається з двох рівнянь:

- рівняння руху (закон збереження імпульсу);

- рівняння нерозривності (закон збереження маси).

У векторному вигляді для нестисливої рідини вони записуються таким чином:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (9)$$

де $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторне поле швидкостей;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;
 Δ – оператор Лапласа;
 p – тиск;
 \vec{f} – векторне поле масових сил.

Невідомі p і \vec{v} є функціями часу t і координати $x \in \Omega$, де $\Omega \subset R^n$, $n = 2, 3$ – дво- або тривимірна область, в якій рухається газ (рідина).

Після вибору математичної моделі в програмному комплексі Flow Vision створювались граничні умови. Було створено наступні типи граничних умов:

- стінка (тверда стінка, немає протікання);
- вхід (вхідна стінка потоку);
- вихід (вихідна стінка потоку).

Під час створення граничної умови “стінка” задавався коефіцієнт шорсткості стінки поліетиленових труб. Під час створення граничної умови “вхід” задавався тиск на вході в прилеглу до терморезисторного з'єднання ділянку поліетиленового трубопроводу.

Створені граничні умови в програмному комплексі Flow Vision розставлялись на гранях імпортованої тривимірної геометричної моделі терморезисторних з'єднань із прилеглими ділянками трубопроводу.

Після розстановки граничних умов проводився вибір моделі турбулентності. У Flow Vision доступні наступні моделі турбулентності:

- стандартна k-ε модель;
- квадратична k-ε модель;
- низькорейнольдсова k-ε модель AKN;
- низькорейнольдсова k-ε модель HL;
- низькорейнольдсова k-ε модель LS;
- SST (Shear Stress Transport);
- SA (Spalart-Allmaras).

Для моделювання динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів було задано стандартну k-ε (k – турбулентна енергія, ε – швидкість дисипації турбулентної енергії) модель турбулентності, яка дозволяє отримати достатньо точні результати, а час розрахунку є значно менший, ніж у разі використання інших моделей турбулентності і в середньому складає 5 годин для кожного варіанта.

Для стандартної k-ε моделі турбулентності турбулентна динамічна в'язкість дорівнює:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (10)$$

де C_μ – коефіцієнт, який приймається рівним $C_\mu = 0,09$.

Рівняння переносу турбулентної енергії k:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho v k) = \\ = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \end{aligned} \quad (11)$$

де μ – молекулярна динамічна в'язкість;

σ_k – коефіцієнт (дорівнює одиниці);

G – параметр, який визначається за формулою:

$$G = D_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (12)$$

Параметр D_{ij} рівний:

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla v + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}, \quad (13)$$

де S_{ij} – тензор швидкостей деформації:

$$S_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, \quad (14)$$

δ_{ij} – параметр, який рівний:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}. \quad (15)$$

Рівняння переносу турбулентної дисипації ε

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho v \varepsilon) = \\ = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (16)$$

де σ_ε – коефіцієнт, який рівний $\sigma_\varepsilon = 1,3$;

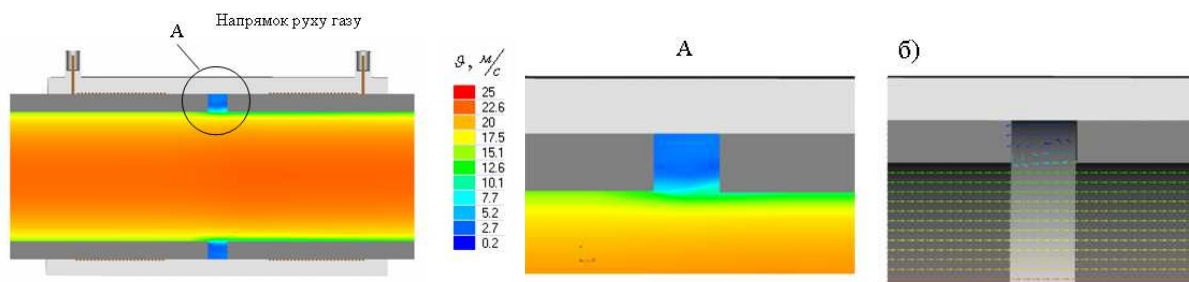
C_1 – коефіцієнт, який рівний $C_1 = 1,44$;

C_2 – коефіцієнт, який рівний $C_2 = 1,92$.

У якості досліджуваного газу з бази речовин Flow Vision було вибрано природний газ.

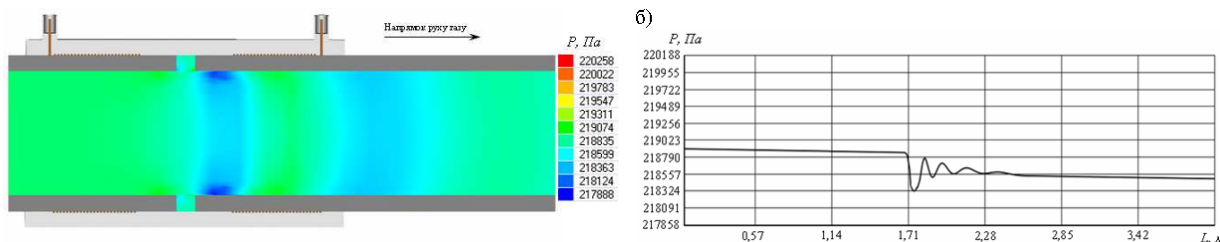
Останнім кроком перед проведенням розрахунку є задання вихідної розрахункової сітки та критеріїв її адаптації. У Flow Vision використовується прямокутна адаптивна локально подіблена сітка для розв'язку рівнянь математичної моделі. Адаптація розрахункової сітки дає змогу розраховувати деталі незначних розмірів геометрії шляхом подрібнення сітки.

За описаною вище методикою проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу довжиною $L = 4$ м, посередині якої встановлено терморезисторне з'єднання. Зовнішній діаметр поліетиленових труб приймаємо рівним $D_m = 40$ мм, товщину стінки $\delta_m = 3,5$ мм.



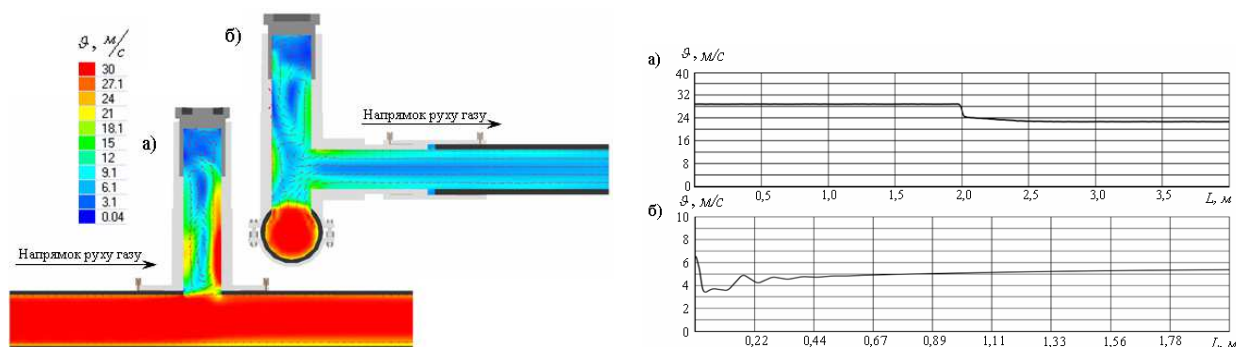
а) розподіл модуля швидкості; б) вектори швидкості

Рисунок 2 – Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу у вертикальному повздовжньому перерізі терморезисторної муфти



а) розподіл тиску; б) зміна тиску

Рисунок 3 – Розподіл та зміна тиску у вертикальному повздовжньому перерізі терморезисторної муфти



а) вздовж основної магістралі; б) вздовж відводу

Рисунок 4 – Розподіл модуля швидкості та вектора швидкості в перерізах сідлового трійника при русі газового потоку основною магістраллю та відводом

Результати розрахунків візуалізувались в постпроцесорі програмного комплексу шляхом тонового заливання перерізу терморезисторного з'єднання по модулю швидкості, векторів швидкості, які вказують напрям руху газу, тонової заливки перерізу терморезисторного з'єднання по тиску та графіків зміни швидкості та тиску вздовж трубопроводу.

Як видно з тонової заливки перерізу терморезисторної муфти по модулю швидкості та векторів швидкості (рисунок 2) у місці встановлення терморезисторної муфти між поліетиленовими трубами утворюється стійкий вихор, який призводить до незначного падіння тиску, що видно на заливці по тиску та графіку зміни тиску вздовж трубопроводу (рисунок 3).

У сідловому трійнику при русі газу основною магістраллю та відводом у сідловині трійника на заливці перерізу по швидкості (рисунок 4) ми можемо спостерігати реверсний рух газу та відривання потоку від стінки на вході у

відвід, що призводить до значного зменшення швидкості та значного падіння тиску у відводі, що видно із заливки перерізу по тиску та графіків зміни тиску (рисунок 5).

Аналогічна картина спостерігається при русі газу тільки відводом сідлового трійника (рисунок 6-7).

Під час проходження газового потоку терморезисторним коліном, у місці різкого розширення біля зовнішньої стінки утворюється незначний вихор, а біля внутрішньої стінки відбувається значне зниження швидкості потоку із відривом потоку від стінки і утворенням значного вихору [29-32]. Такий розподіл швидкостей є нехарактерним для колін і зумовлений наявністю різкого розширення та різкого звуження та є однією з причин значного падіння тиску на виході коліна, що видно з заливки перерізу коліна по тиску та графіку зміни тиску (рисунок 8 – 9).

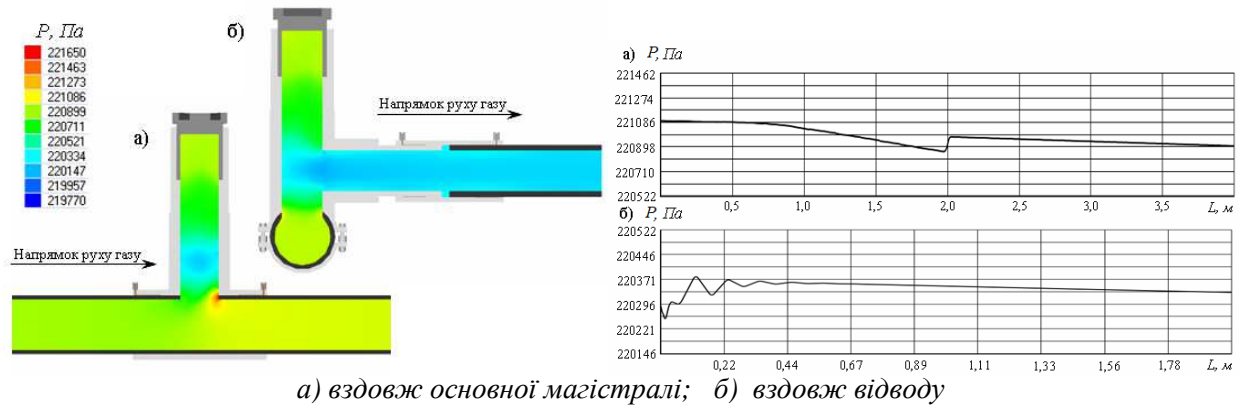


Рисунок 5 – Розподіл тиску в перерізах сідлового трійника при русі газового потоку основною магістраллю та відводом

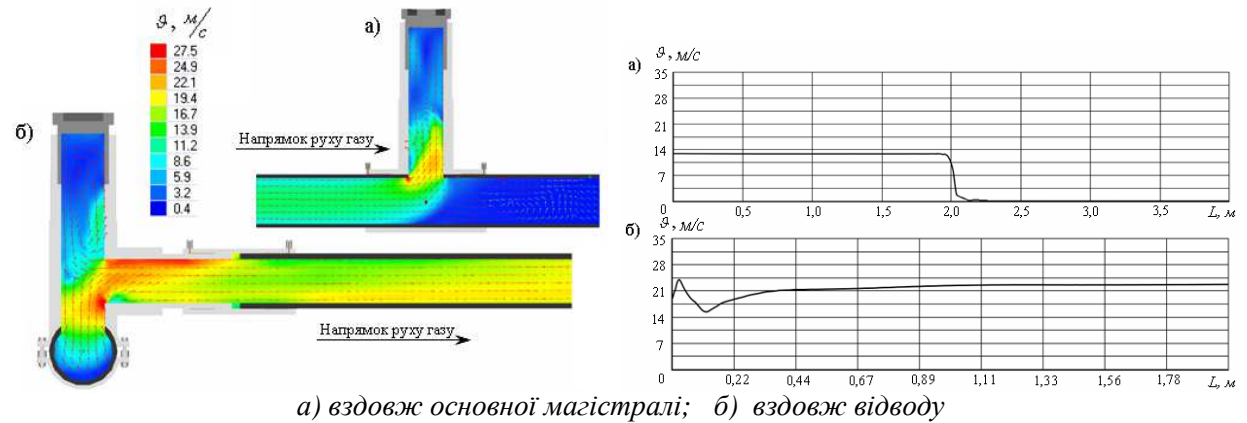


Рисунок 6 – Розподіл модуля швидкості та вектора швидкості в перерізах сідлового трійника при русі газового потоку тільки відводом

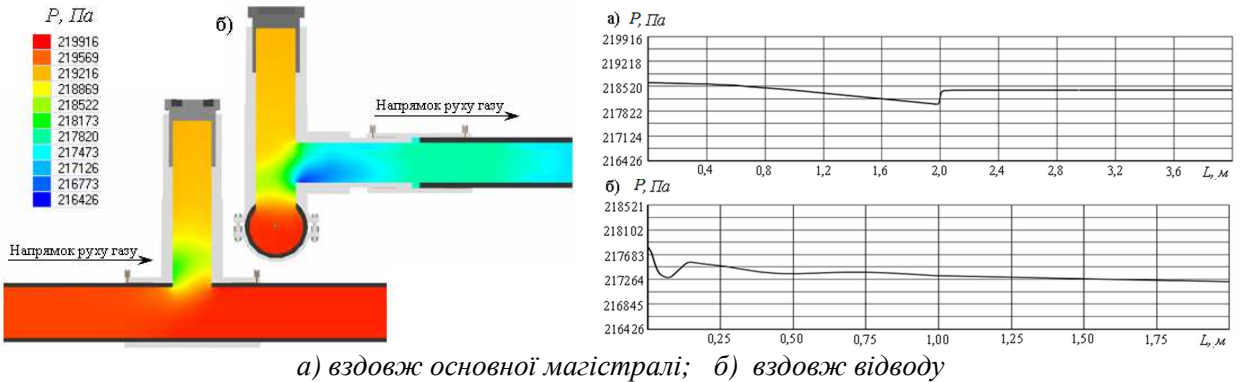


Рисунок 7 – Розподіл тиску в перерізах сідлового трійника при русі газового потоку тільки відводом

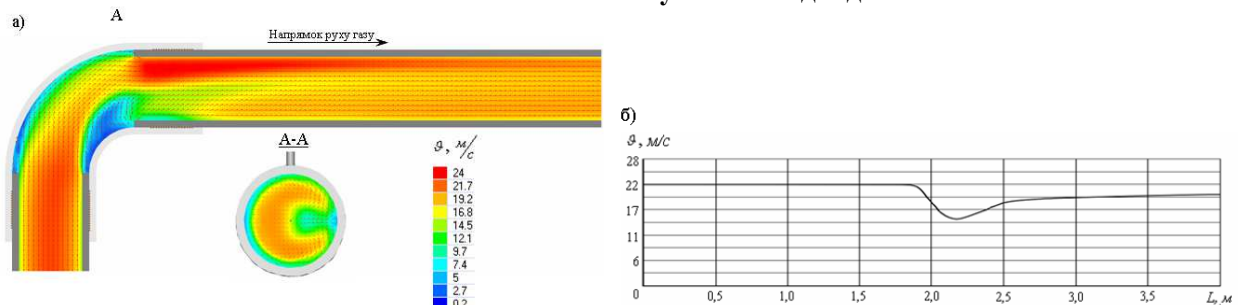
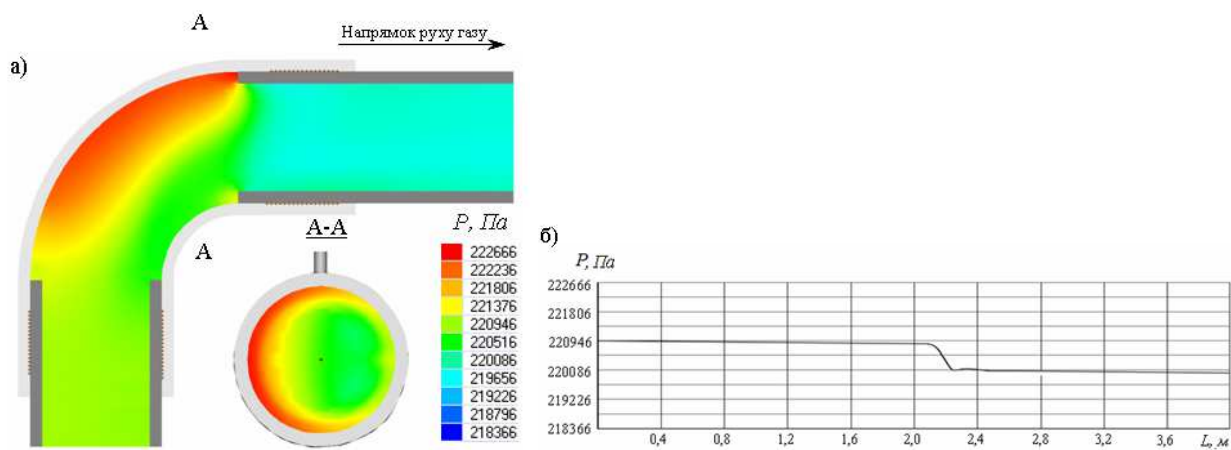
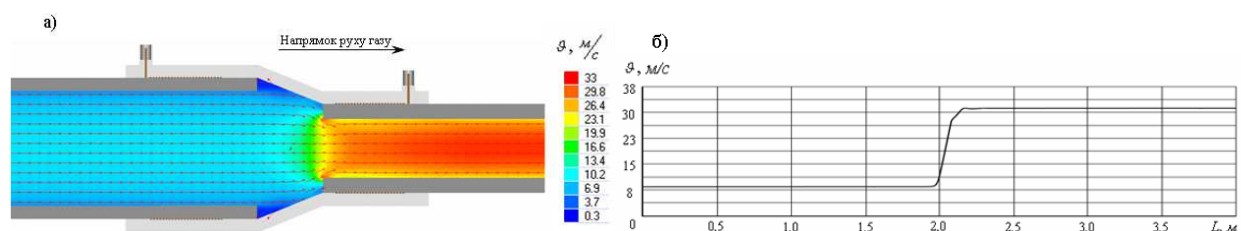


Рисунок 8 – Розподіл модуля швидкості, вектори швидкості та зміна швидкості потоку газу в горизонтальному повздовжньому перерізі терморезисторного коліна



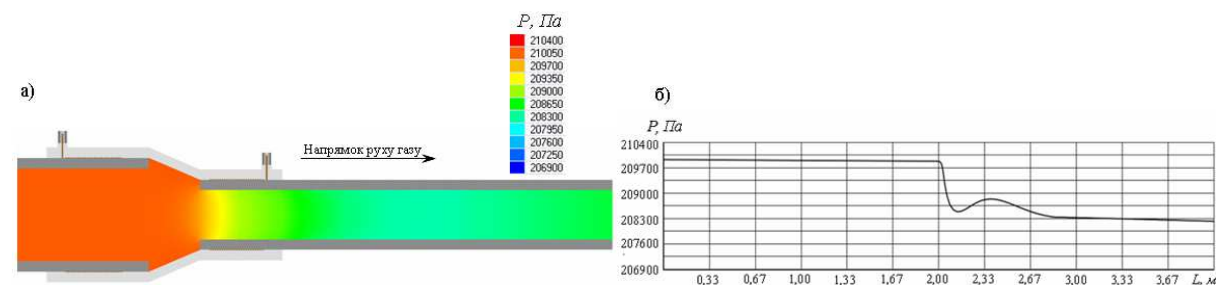
а) розподіл тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна; б) зміна тиску вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна

Рисунок 9 – Розподіл та зміна тиску газу в горизонтальному повздовжньому перерізі терморезисторного коліна



а) розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного перехідника; б) зміна швидкості потоку газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного редуційного перехідника

Рисунок 10 – Розподіл модуля швидкості, вектори швидкості та зміна швидкості потоку газу у вертикальному повздовжньому перерізі терморезисторного редуційного перехідника



а) розподіл тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного перехідника; б) зміна тиску газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного редуційного перехідника

Рисунок 11 – Розподіл та зміна тиску газу у вертикальному повздовжньому перерізі терморезисторного редуційного перехідника

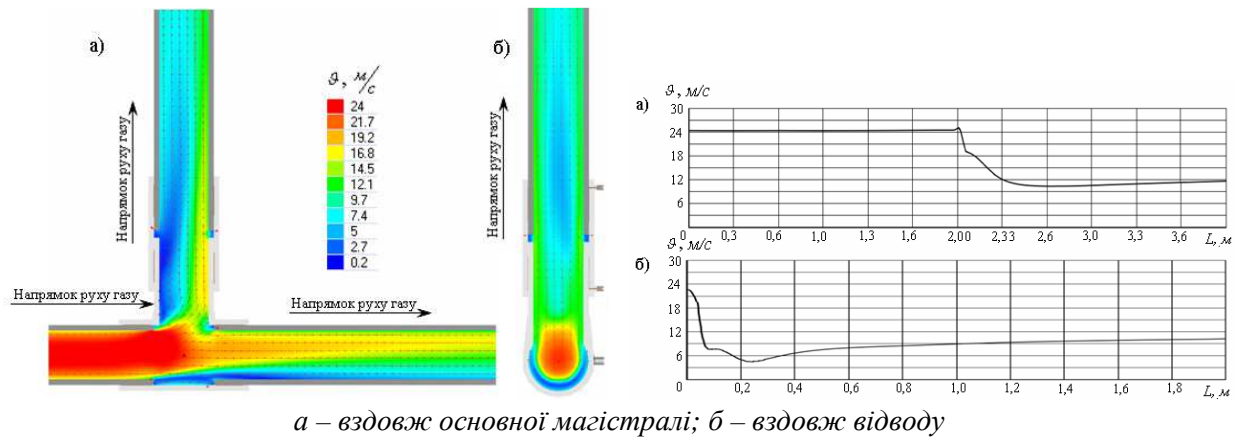
Під час проходження газового потоку редуційним перехідником у місці різкого розширення утворюється стійкий вихор та незначне відривання потоку газу від стінки на початку трубопроводу меншого діаметру, що зумовлене різким звуженням. Ці процеси є однією з причин падіння тиску на виході редуційного перехідника (рисунок 10 – 11).

Під час проходження газового потоку відводом та основною магістраллю терморезисторного трійника між поліетиленовими трубами навпроти відводу спостерігається реверсний рух газу, що є однією з причин падіння тиску у

основній магістралі, а на початку відводу відривання газового потоку від стінки, що є однією з причин падіння тиску у відводі, що видно з тонової заливки перерізу трійника по тиску (рисунок 12 – 13).

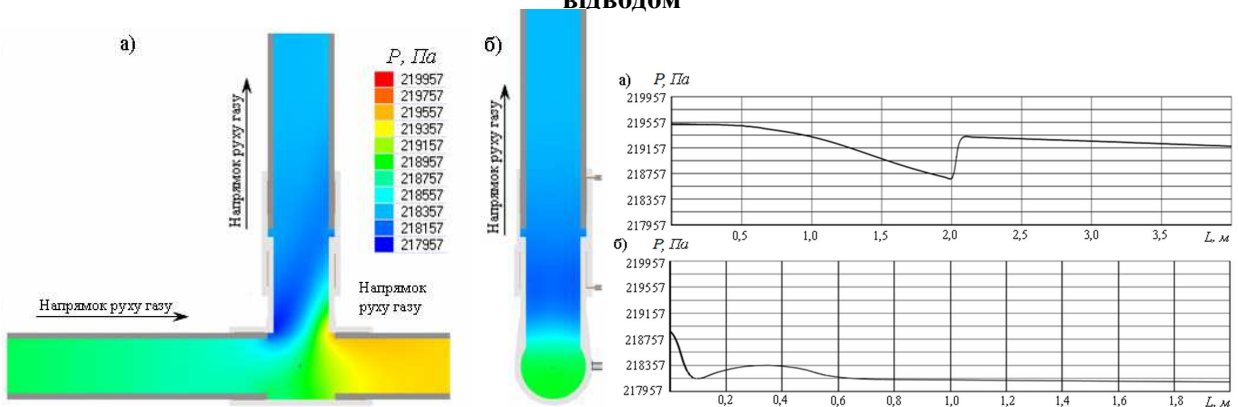
При русі газу тільки відводом теж спостерігається відривання потоку від стінки на початку відводу, а при русі тільки основною магістраллю утворюються вихори у місці різкого розширення та звуження, що є причиною падіння тиску в основній магістралі.

За падінням тиску на терморезисторних з'єднаннях визначених з графіків зміни тиску



а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

Рисунок 12 – Розподіл модуля швидкості, вектори швидкості та зміна швидкості потоку газу в перерізах терморезисторного трійника при русі газового потоку основною магістраллю та ВІДВОДОМ



а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

Рисунок 13 – Розподіл та зміна тиску газу в перерізах терморезисторного трійника при русі газового потоку основною магістраллю та відводом

Таблиця 1 – Коефіцієнти місцевих опорів терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів, визначені експериментально та теоретично

Коефіцієнт місцевого опору терморезисторного з'єднання	Терморезисторне з'єднання						
	муфта	коліно	сідловий трійник		трійник		перехід редуційний
			газ рухається тільки основною магістраллю	газ рухається тільки відводом	газ рухається тільки основною магістраллю	газ рухається тільки відводом	
Теоретичний	0,2	2,1	0,15	26	0,2	5,4	16,6
Експериментальний	0,2	2,8	0,20	35	0,2	6,5	20,8

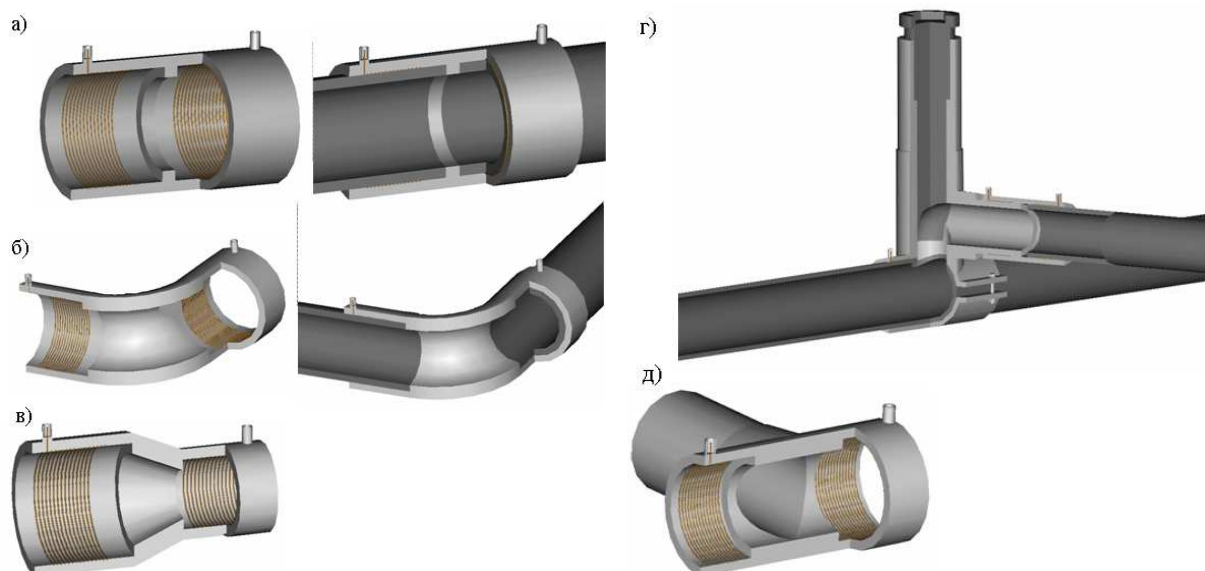
вздовж з'єднання та швидкості газу перед входом у з'єднання визначено коефіцієнт місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання.

За результатами проведених експериментальних досліджень було визначено значення коефіцієнтів місцевих опорів. Із порівняльної таблиці бачимо, що експериментальні дослідження підтверджують адекватність теоретичних розрахунків здійснених за допомогою програмного комплексу Flow Vision.

Із теоретичних та експериментальних досліджень видно, що у терморезисторних з'єднаннях відбуваються значні втрати тиску, а

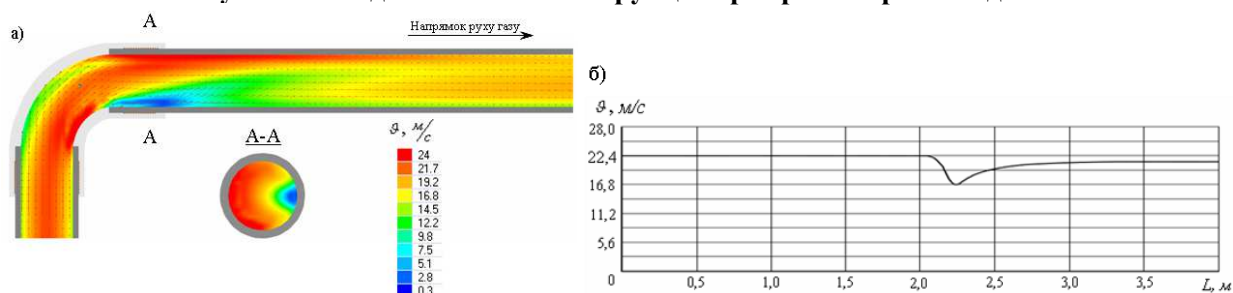
отже, не усі споживачі таких газових мереж будуть забезпечені мінімально допустимим тиском газу. Тому прийняті у державних будівельних нормах газопостачання положення про те, що втрати тиску у місцевих опорах дорівнюють 10% від втрат тиску по довжині для поліетиленових труб є сумнівними і вимагають досліджень.

Зменшити втрати тиску в газових мережах із поліетиленових труб можна зменшивши коефіцієнти місцевих опорів терморезисторних з'єднань, що досягається шляхом удосконалення їх конструкції. Удосконалення полягає у



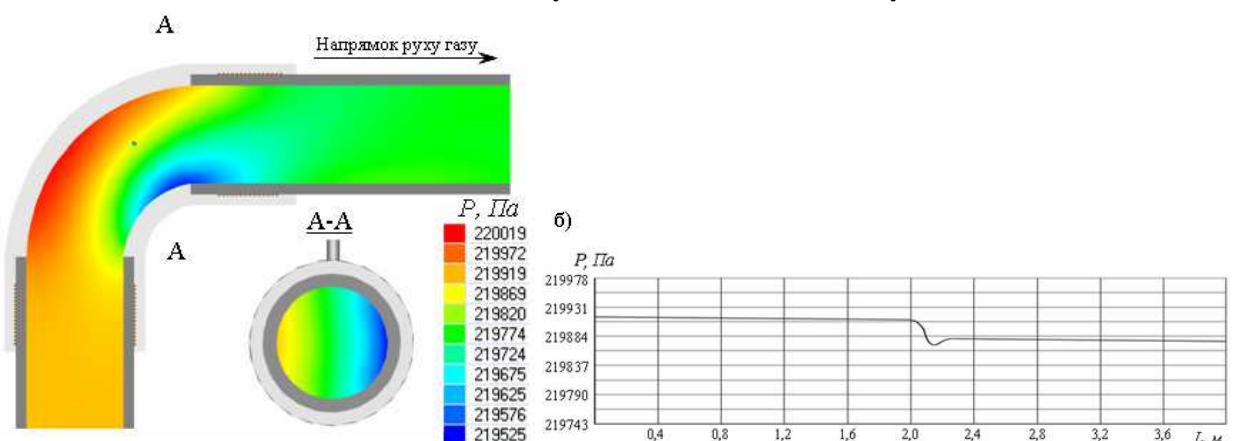
а) терморезисторна муфта; б) терморезисторне коліно; в) терморезисторний редуційний перехідник; г) сідловий трійник; д) терморезисторний трійник

Рисунок 14 – Удосконалені конструкції терморезисторних з'єднань



а) розподіл модуля швидкості, вектори швидкості в горизонтальному повздовжньому перерізі терморезисторного коліна з кільцевим виступом; б) зміна швидкості потоку газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна з кільцевим виступом

Рисунок 15 – Розподіл модуля швидкості, вектори швидкості та зміна швидкості потоку газу в терморезисторному коліні з кільцевим виступом



а) розподіл тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна з кільцевим виступом; б) зміна тиску вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна з кільцевим виступом

Рисунок 16 – Розподіл та зміна тиску газу в терморезисторному коліні з кільцевим виступом

виключенні чи суттєвому зменшенні втрат тиску у з'єднанні, які зумовлені вихороутворенням, відриванням потоку від стінки та реверсним рухом газу, місця розміщення яких були виявлені під час теоретичних досліджень.

Удосконалення полягає у виконанні кільцевих виступів для усунення кільцевих порожнин між поліетиленовими трубами стосовно терморезисторних муфт, перехідників, колін та

трійників. Та виконання подовженої заглушки стосовно сідлового трійника (рисунок 14).

Ефективність запропонованих удосконалень було підтверджено програмним комплексом Flow Vision.

Так, у терморезисторному коліні завдяки кільцевому виступу вихори, які були у місцях різкого розширення та звуження усуваються. Розподіл швидкостей стає характерним для повороту (рисунок 15-16).

У сідловому трійнику завдяки подовженій заглушці усувається реверсний рух газу у сідловині.

У редукційному перехіднику усувається вихор у місці різкого розширення, а за результатами досліджень встановлено, що оптимальним кутом звуження редукційного перехідника для усунення відривання потоку від стінки на початку трубопроводу меншого діаметру є кут від 15° до 20° .

У терморезисторному трійнику завдяки кільцевому виступу усувається реверсний рух газу між поліетиленовими трубами.

За результатами проведених досліджень визначено коефіцієнти місцевих опорів удосконалених терморезисторних з'єднань:

- у разі встановлення удосконаленої терморезисторної муфти падіння тиску у місці з'єднання труб не буде, а, відповідно, коефіцієнт місцевого опору визначати немає потреби;

- коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника з подовженою заглушкою під час руху газового потоку тільки відводом трійника рівний $\xi = 23$, що на 11,5 % менше, ніж сідлового трійника із стандартною заглушкою;

- коефіцієнт місцевого опору удосконаленого терморезисторного коліна з кільцевим виступом складає $\xi = 0,46$, що на 80% менше, ніж стандартного терморезисторного коліна;

- коефіцієнт місцевого опору удосконаленого терморезисторного редукційного перехідника з кільцевим виступом складає $\xi = 11,6$, на 30% менше, ніж стандартного терморезисторного редукційного перехідника;

- у разі встановлення удосконаленого терморезисторного трійника із кільцевим виступом при русі газу основною магістраллю та відводом падіння тиску у основній магістралі удосконаленого терморезисторного трійника є меншим, ніж у основній магістралі стандартного терморезисторного трійника.

За результатами моделювання течії газу удосконаленим терморезисторним редукційним перехідником із кільцевим виступом встановлено, що оптимальним кутом звуження терморезисторного редукційного перехідника є кут від 15° до 20° , коли не відбувається відривання потоку газу від стінки на початку трубопроводу меншого діаметра, і падіння тиску у місці розміщення перехідника є мінімальним.

Таким чином встановлено, що запропоновані удосконалень дають змогу зменшити значення коефіцієнтів місцевих опорів на величину від 11,5 до 80%.

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів вирішено важливу наукову задачу зменшення гідравлічної енерговитратності поліетиленових газових мережах.

На основі досліджень та сучасної практики проектування газових мереж встановлено, що для газопроводів із поліетиленових труб втрати тиску в місцевих опорах приймаються рівними 10% від загальних втрат по довжині, тоді як значення еквівалентної шорсткості поліетиленових труб є значно меншим, ніж сталевих, а поліетиленові газові мережі містять місцеві опори, що мають складнішу конфігурацію. Теоретичні дослідження динаміки руху газу місцевими опорами поліетиленових трубопроводів дозволили виявити, що у терморезисторних з'єднаннях спостерігається вихороутворення, наявний реверсний рух газу, відбувається відривання потоку від стінки терморезисторного з'єднання, що, у свою чергу, приводить до значних втрат тиску. Теоретично визначено коефіцієнт місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання, адекватність чого підтверджена експериментально. Експериментально виявлено додатковий поділ турбулентної зони і відповідні перехідні числа Рейнольдса та виведено математичні залежності для визначення коефіцієнта місцевого опору кожної зони.

Запропоновано конструктивні шляхи зменшення коефіцієнта місцевого опору терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів. Теоретично підтверджено ефективність застосування удосконалених конструкцій терморезисторних з'єднань (коефіцієнт місцевого опору удосконалених конструкцій менший на 11,5–80%). Результати проведених досліджень та розроблені удосконалені конструкції терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів впроваджені у ТЗОВ “Прикарпатська полімерна компанія”, що дає змогу отримати економічний ефект в розмірі 20 тис. грн. в рік під час газифікації одного населеного пункту на 2000 жителів.

Практична цінність отриманих результатів. Запропоновані проектні та конструктивні рішення дають змогу зменшити гідравлічну енерговитратність поліетиленових газових мереж, забезпечувати усім споживачам мінімально-допустимий тиск та забезпечувати можливість розвитку газової мережі.

Література

1 Газопроводы и газовые сети. Надежность, диагностика, перспективы: монография / [Н. И. Крюков и др.]. - Челябинск; Уфа: Изд-во ЦНТИ, 2008. - 374 с. - ISBN 978-5-94218-085-0.

2 Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, строительству и эксплуатации / [А.Л. Шурайц, В.Ю. Каргин, Ю.Н. Вольнов]. - Саратов: Издательство “Журнал “Волга – XXI век””, 2007. - 612 с.

- 3 Гориловский М.И. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена / [М.И. Гориловский, Е.В. Калугина, А.Н. Иванов, Ф.К. Сатдинова] // Пластические массы. Структура и свойства. – 2005. – № 4. – С. 9-12
- 4 Гринюк А.Г. Микроструктура и качество стыковых сварных соединений полиэтилена / [А.Г. Гринюк, А.Г. Шадрин, А.В. Золотарь и др.] // Автоматическая сварка. – 1990. – № 11 (452). – С. 23-26
- 5 Зайцев К.И. Сварка полимерных материалов: [справочник] / [К.И. Зайцев, Л.Н. Мацюк, А.Г. Богдасhevский и др.] – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
- 6 Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб диаметром до 300 мм : СП 42-101-96. – [Чинний від 1996 - 08 - 01]. – М.: ВНИИСТ, 1996. – 101 с.
- 7 Бобровский С.А. Газовые сети и газохранилища / С.А. Бобровский, Е.И. Яковлев. – М.: Недра, 1980. – 413 с.
- 8 Бобровский С.А. Движение газа в газопроводе с путевым отбором / С.А. Бобровский, С.Г. Щербаков, М.А. Гусейн-заде. – М.: Недра, 1972. – 193 с.
- 9 Галиуллин З.Т. Аналитическое обоснование выбора оптимального варианта трасс сети газопроводов / З.Т. Галиуллин, Б.Л. Кривошеин, И.Е. Ходанович // Газовая промышленность. – 1965. – № 2. – С. 42-45.
- 10 Галиуллин З.Т. Новые методы проектирования газонефтепроводов / З.Т. Галиуллин, В.И. Черников. – М.: Недра, 1964. – С. 69-88.
- 11 Гончарук М.І. Довідник з газопостачання населених пунктів України / Гончарук М.І., Середюк М.Д., Шелудченко В.І. – Івано-Франківськ: Сімік, 2006. – 1314 с.
- 12 Евдокимов А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев, В.В. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с. – ISBN 5-274-0116-0
- 13 Евдокимов А.Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев. – Х.: Высшая школа, 1980. – 144 с.
- 14 Середюк М.Д. Визначення пропускної здатності розгалужених газових мереж високого і середнього тиску / М.Д. Середюк, А.С. Івоняк, Ю.І. Зарубіна // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – №38 (том 5). – С. 61-69.
- 15 Середюк М.Д. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів / М.Д. Середюк, В.Я. Малик, В.Т. Болонний. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003. – 436 с.
- 16 Середюк М.Д. Технологічні розрахунки газових мереж населених пунктів: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / Середюк М.Д., Пилипів Л.Д., Зарубіна Ю.І. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 183 с.
- 17 Ставровский Е.Р. Универсальная программа расчета газосборных сетей / Е.Р. Ставровский, М.Г. Сухарев // Газовая промышленность. – 1965. – №7. – С. 10-11.
- 18 Стаскевич Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
- 19 Сухарев М.Г. Алгоритм оптимального проектирования магистральных газопроводов с учетом динамики развития / М.Г. Сухарев // Газовая промышленность. – 1969. – №3. – С. 73-76.
- 20 Сухарев М.Г. Об одном методе расчета газосборных сетей на вычислительных машинах / М.Г. Сухарев // Газовая промышленность. – 1965. – №6. – С. 48-52.
- 21 Сухарев М.Г. Оптимальное развитие систем газоснабжения / М.Г. Сухарев, Е.Р. Ставровский, В.Е. Брянских. – М.: Недра, 1981. – 294 с.
- 22 Сухарев М.Г. Оптимизация систем транспорта газа / М.Г. Сухарев, Е.Р. Ставровский. – М.: Недра, 1976. – 318 с.
- 23 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: наука, 1974. – 711 с.
- 24 Щербаков В.И. Анализ, оптимальный синтез и реновация городских систем водоснабжения и газоснабжения / В.И. Щербаков, М.Я. Панов, И.С. Квасов. – Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2001. – 304 с.
- 25 Газопостачання. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди: ДБН В.2.5-20-2001. – [Чинні від 2001-09-01]. – К.: Держбуд України, 2001. – 286 с.
- 26 Зарубіна Ю.І. Вплив місцевих опорів на роботу систем газопостачання низького тиску / Ю.І. Зарубіна, В.Б. Михалків // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №1 (18). – С. 29-33
- 27 Зарубіна Ю.І. Експериментальне дослідження місцевих опорів / Ю.І. Зарубіна // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №2(7). – С. 24-27.
- 28 Зарубіна Ю.І. Оптимізація геометричних параметрів системи газопостачання / Ю.І. Зарубіна, В.Б. Михалків // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №3 (20). – С. 108-113.
- 29 Вилля Г. Теория вихрей / Г. Вилля. – Л.: ОВТИ-главная редакция общетехнической литературы, 1936. – 266 с.
- 30 Гельмгольц Г. Основы вихревой теории / Г. Гельмгольц. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 82 с.
- 31 Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения жидкостей в гладких трубах / И. Никурадзе. – Москва-Ленинград: ОНТИ, 1936. – 332 с.
- 32 Шехтер Р.С. Вариационный метод в инженерных расчетах / [Пер. с англ. под ред. А.С. Плешанова]. – М.: Мир, 1971. – 292 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
04.11.13

Рекомендована до друку
професором **Грудзом В.Я.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Банахевичем Ю.В.**
(Відділ магистральних газопроводів і ГРС
ДК «Укртрансгаз», м. Київ)