

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

На правах рукопису

ДОРОШЕНКО ЮЛІЯ ІВАНІВНА

УДК 622.691.4

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ МІСЦЕВИХ ОПОРІВ НА
ГІДРАВЛІЧНУ ЕНЕРГОВИТРАТНІСТЬ
ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Всі примірники дисертації ідентичні за змістом
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 20.052.0
28.10.2010р.

І.П.Д. Милитів /
Науковий керівник

кандидат технічних наук,
доцент Михалків В.Б.



Підпис І.П.Д. Милитіва особистою
Вчений секретар

І.В.Р. Процюк /
28.10.2010р.



Івано-Франківськ, 2010

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ	9
1.1 Аналіз методів розрахунку газових мереж.....	10
1.1.1 Іноваційні методи розрахунку газових мереж.....	11
1.1.1.1 Теорія графів.....	11
1.1.1.2 Метод сіток.....	11
1.1.1.3 Методи Кірхгофа.....	12
1.1.1.4 Агрегативний метод.....	13
1.1.2 Існуючі методи розрахунку газових мереж.....	15
1.1.2.1 Методи розрахунку розгалужених розподільних газових мереж.....	20
1.1.2.2 Методи розрахунку кільцевих розподільних газових мереж.....	21
1.2 Аналіз методик проектування газових мереж довільної конфігурації...	25
1.3 Аналіз математичних моделей нестационарних процесів в газових мережах.....	32
1.4 Проектування газових мереж із поліетиленових труб.....	37
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ГАЗУ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИМИ З'ЄДНАННЯМИ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБОПРОВІДІВ	45
2.1 Теоретичні дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів.....	45
2.2 Експериментальні дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів.....	86
2.2.1. Задачі експериментальних досліджень.....	86
2.2.2 Методика експериментальних досліджень.....	86
2.2.3 Результати експериментальних досліджень.....	94

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2.....	102
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ ТА КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ТИСКУ У ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ.....	104
3.1 Удосконалення методики проектування газових мереж із поліетиленових труб.....	104
3.2 Удосконалення конструкцій терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів та дослідження ефективності їх застосування	110
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3.....	127
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ІЗ УРАХУВАННЯМ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	130
4.1 Вплив аварійних витоків на експлуатаційні параметри мереж із поліетиленових труб.....	130
4.2 Моделювання нестационарних процесів у газових мережах.....	134
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 4.....	158
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	162
ДОДАТКИ.....	180

ВСТУП

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 необхідна розробка нових та удосконалення створених раніше методик, математичних моделей та програмного забезпечення.

Питаннями оптимізації на етапі проектування нових систем газопостачання та реконструкції вже існуючих займалися такі вчені як Бер А.М., Бобровський С.А., Галіулін З.Т., Євдокімов А.Г., Середюк М.Д., Сухарев М.Г., Щербаков В.І., Яковлев Є.І. [26, 27, 47, 48, 54, 69, 70, 145–147, 153, 155–159, 188, 189]. Ними було розроблено ряд методик та математичних моделей для гідравлічних розрахунків газових мереж.

Актуальність теми дисертації. 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, дозволяють 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 [14, 45, 46, 56, 58, 72, 130].

Основним чинним нормативним документом для проектування газових мереж як зі сталевих, так і із поліетиленових труб в Україні є ДБН В.2.5 – 20 [44]. Одна і та сама методика наведена у цьому нормативному документі застосовується для проектування газових мереж як із сталевих, так і із поліетиленових труб. Такий уніфікований підхід до проектування газових мереж із 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 [44] 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 наближеними 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.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є оцінювання впливу місцевих опорів на гідравлічну енерговитратність поліетиленових газових мереж при стаціонарних та нестаціонарних процесах. Розробка заходів для зменшення втрат тиску у газових мережах.

Досягнення цієї мети передбачає розв'язок наступних задач:

1. Дослідити методичні аспекти проектування та розрахунку газових мереж із поліетиленових труб. Встановити як визначається вплив місцевих опорів поліетиленових трубопроводів на втрати енергії газового потоку при довільних режимах течії середовища. Розглянути конструкції місцевих опорів поліетиленових трубопроводів.

2. Теоретично та експериментально дослідити динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів та визначити коефіцієнти їх місцевих опорів.

3. Розробити методологічні і конструктивні рішення для зменшення втрат енергії газового потоку у поліетиленових газових мережах.

4. Дослідити нестаціонарні процеси у поліетиленових газових мережах.

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. Обробка результатів теоретичних та експериментальних досліджень виконувалась із використанням:

- скінченно-об'ємних методів розв'язання рівнянь газодинаміки;
- методів математичного планування і проведення експериментів та обробки їх результатів;
- методів модульного та об'єктно-орієнтовного програмування;
- методів візуального програмування;
- методів чисельного інтегрування диференціальних рівнянь у часткових похідних (у тому числі методів інтегрального співвідношення);
- методів оптимізації, насамперед динамічного програмування та інших методів числового аналізу;
- методів математичної статистики та регресійного аналізу.

Наукова новизна результатів досліджень.

У дисертаційній роботі у результаті виконання експериментальних та теоретичних досліджень вперше:

- 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 поліетиленових трубопроводів та досліджено його залежність від типорозміра з'єднання;
- виявлено додатковий поділ турбулентної зони та відповідні проміжні числа Рейнольдса для газових мереж середнього та низького тисків із поліетиленових труб;
- встановлено, що втрати тиску у терморезисторних з'єднаннях поліетиленових трубопроводів значно перевищують 10 % від загальних втрат по

довжині, обґрунтовано необхідність здійснення проектних розрахунків газових мереж із урахуванням коефіцієнта місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання та визначено коефіцієнт еквівалентної довжини залежно від типу місцевих опорів та їх кількості на 1 км довжини газової мережі;

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

- запропоновано новий підхід до моделювання нестационарних процесів у газових мережах із поліетиленових труб із урахуванням гідравлічного опору ділянок. Розроблено метод пошуку квазіоптимальних рішень у задачах керування газовими мережами при нестационарному режимі руху.

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

Положення, що захищаються.

Закономірності газодинамічних процесів у газових мережах низького та середнього тисків із поліетиленових труб при стаціонарних та нестационарних газових потоках.

Особистий внесок дисертанта. Автором самостійно вперше:

- теоретично та експериментально досліджено динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів [74, 75, 77];

- визначено коефіцієнт місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання поліетиленових трубопроводів [74];

- встановлено, що втрати тиску у терморезисторних з'єднаннях поліетиленових трубопроводів значно перевищують 10 % від загальних втрат по довжині, та обґрунтовано необхідність здійснення проектних розрахунків газових мереж із урахуванням коефіцієнта місцевого опору кожного терморезисторного

з'єднання та визначено коефіцієнт еквівалентної довжини залежно від типу місцевих опорів та їх кількості на 1 км довжини газової мережі [73, 76, 79, 145];

- удосконалено конструкції з'єднань поліетиленових трубопроводів та обґрунтовано ефективність їх застосування;

- проведено моделювання нестационарних процесів у газових мережах із поліетиленових труб.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених “Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії” (Івано-Франківськ, 2008); Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи” (Івано-Франківськ, 20.10-23.10.2009); V Міжнародній навчально-науково-практичній конференції “Трубопровідний транспорт-2009” (Уфа, 5.11-6.11.2009); науково-практичній конференції “Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовки кадрів галузі” (Івано-Франківськ, 2.09-3.09.2010).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на засіданні кафедри транспорту і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ та розширеному науковому семінарі факультету нафтогазопроводів.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано дев'ять друкованих праць, у тому числі одна одноосібна. Усі публікації у фахових виданнях України.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація викладена на 161 сторінці, складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, 115 рисунків, 9 таблиць, списку використаних джерел, який містить 203 найменування та 4 додатків.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

Однією із складових частин паливно-енергетичного комплексу України є трубопровідні системи газо-, нафто-, тепло- і водопостачання. В свою чергу однією з найскладніших підсистем трубопровідних систем є інженерні мережі, основне призначення яких є транспортування і розподіл рідких або газоподібних продуктів між споживачами.

Газова мережа на усіх стадіях свого існування перебуває у невинному розвитку, ускладнюється її структура, збільшуються обсяги постачання газу, здійснюється модернізація та реновація мережі, застосовуються нові трубопровідні матеріали. Такий розвиток вимагає дослідження його впливу на методи проектування газових мереж.

Ускладнення структури газових мереж населених пунктів вимагає застосовувати точніші методи їх розрахунку та проектування. Оптимальні параметри відповідають мінімуму приведених затрат при умові забезпечення міцності та необхідних експлуатаційних параметрів системи, а також інших вимог, пов'язаних із специфікою роботи об'єкту.

Основними параметрами, які треба враховувати при моделюванні течій рідин та газів трубопроводами є:

- вхідні параметри (швидкість, тиск, масова та об'ємна витрата, температура, концентрація домішок);
- характеристики місцевих опорів;
- типи стінок, їх шорсткість;
- джерела газопостачання.

Гідравлічні розрахунки проводяться з метою вибору конструктивних та експлуатаційних параметрів системи. Конструктивні параметри – діаметр труб, експлуатаційні параметри – витрата та тиск транспортованого середовища.

Газопроводи із поліетиленових труб є досить новим технічним рішенням, їх властивості та властивості їх з'єднувальних елементів є недостатньо вивченими і дослідженими, методи гідравлічних розрахунків, якими користуються проєктанти, є аналогічними як для сталених труб. Проте газові мережі із поліетиленових труб на сьогодні вивчені недостатньо.

1.1. Аналіз методів розрахунку газових мереж .

Газові мережі мають дві геометричні структури: розгалуженого дерева та кільцеву. Тому у разі проєктування вказаних структур треба застосовувати математичні методи, які якомога точніше відображають б їх структуру. Сьогодні існують наступні методи математичного моделювання структур газових мереж складної конфігурації:

- теорія графів [21, 80, 124];
- методи сіток [19, 135, 141];
- методи Кірхгофа [163];
- агрегативні методи [121].

Мета розрахунку газової мережі будь-якої структури зводиться до задачі оптимального розподілу ресурсів.

До методів моделювання газових мереж складної конфігурації ставляться наступні вимоги:

- простота використання;
- формування однорідних рівнянь;
- забезпечення необхідної швидкодії.

Із цієї точки зору розглянемо інноваційні та існуючі методи проєктування газових мереж.

1.1.1. Іноваційні методи розрахунку газових мереж

1.1.1.1. Теорія графів

Основною задачею розрахунку складної газової мережі є так звана „задача комівояжера”, яка полягає у знаходженні найвигіднішого маршруту, що проходить через указані точки хоча б по одному разу [106]. В умовах завдання вказується критерій вигідності маршруту (найкоротший, найдешевший, сукупний тощо) і відповідні матриці відстаней, вартості тощо. Зазвичай вказується, що маршрут повинен проходити через кожену точку тільки один раз, у такому разі вибір здійснюється серед гамільтонових циклів.

Всі ефективні (такі, що скорочують повний перебір) методи розв'язання “задачі комівояжера” — евристичні. У більшості евристичних методів знаходиться не оптимальний маршрут, а наближений розв'язок. Користуються популярністю алгоритми, що поступово покращують деякий поточний наближений розв'язок.

Часто на “задачах комівояжера” проводять випробування нових підходів до евристичного скорочення повного перебору.

Детальний опис методів розв'язання “задачі комівояжера” здійснив Є. Майник [106].

1.1.1.2. Метод сіток

Еколого-аналітичний центр газової промисловості розглядає питання використання гео-інформаційних систем (ГІС) для комплексного аналізу стану довкілля і розв'язання екологічних задач [49, 62, 125].

Можливе створення електронної карти із використанням ГІС, яка буде містити інформацію про власність землі, об'єми капітальних вкладень та інвестицій, зонування територій тощо.

У разі наявності вичерпної інформації про об'єкти можна уникнути багатьох проблем і прийняти раціональніші рішення.

Використання ГІС дає можливість прив'язати цифрову інформацію до траси газопроводів, до координат ділянок будівництва. З допомогою ГІС моделюють різні аварійні ситуації і вплив їх на довкілля та споруди.

1.1.1.3. Методи Кірхгофа

У середині ХІХ століття інженер-електрик Г.Кірхгоф розробив теорію дерев для досліджень електричних мереж.

Торчинським Я. М. подана аналогія між методом електричного моделювання і розрахунком кільцевих газових мереж [164]. Викладено ряд спільних рис і науково доведених висновків, які підтверджують ідентичність процесів, що відбуваються в електричних і газових мережах.

Закони розподілу газу кільцевою мережею аналогічні законам Кірхгофа для електричної мережі.

У роботах [161, 194] розкрито суть основних понять (аксіом), на базі яких можлива побудова математичної моделі (системи нелінійних рівнянь потокорозподілу) та встановлено їх взаємозв'язок із законами Кірхгофа.

Чернов Д. Л. також підняв питання електричного моделювання газових мереж і розглянув гідравлічний розрахунок кільцевої газової мережі [180]. Метод електричного моделювання застосовується для розв'язання різних питань прикладних наук, у тому числі і для розрахунків кільцевих мереж як газових, так і особливо водопровідних.

При створенні електричної моделі в першу чергу повинна зберігатися геометрична подібність газової мережі і електромоделі. Кожній лінії модельованої газової мережі повинна відповідати визначена лінія електромоделі.

Проаналізувавши результати застосування електромоделювання, можна зробити наступний висновок: електрична модель повністю описує властивості нестисливої рідини, а у випадку застосування стисливої рідини (газу) ця модель не є адекватною.

1.1.1.4. Агрегативний метод

Чисельні методи [13, 15-18, 34, 36, 79, 81, 89, 90, 96-99, 111, 112, 117, 123, 137, 176, 183, 192] — методи наближеного або точного розв'язування задач чистої або прикладної математики, які ґрунтуються на побудові послідовності дій над скінченною множиною чисел. Основні вимоги до чисельних методів, щоб вони були стійкими та збіжними. Чисельні методи називаються стійкими, якщо результати неперервно залежать від вхідних даних задачі або, якщо похибка округлення, пов'язана з реалізацією чисельних методів на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ), залишається обмеженою при заданих межах зміни параметрів чисельних методів.

Чисельні методи називаються збіжними, якщо результати прямують до точного розв'язання задачі при прямуванні параметрів чисельних методів до певних граничних значень.

Основне питання теорії чисельних методів: отримання чисельних методів, які відповідають вимогам високої точності, стійкості та економічності. Складання чисельних методів, що відповідають цим вимогам, представляє собою складну задачу оптимізації чисельних методів [112, 123, 127, 137, 184].

Статистична обробка експериментальних даних [25, 33, 50, 118, 119, 140, 144] зазвичай ґрунтується на граничних теоремах теорії імовірностей та вимагає обчислення оцінок у порівнянні з простими формулами.

Для розв'язання задач апроксимації та обчислення функцій різних класів застосовують чисельні методи інтерполювання [103, 108], найменших квадратів [102], ортогоналізації, урівноваження значень, умовної мінімізації тощо. Найактуальнішими є методи кусково-лінійної та раціональної апроксимації, а також адаптивної апроксимації та нелінійної за параметром апроксимації.

Під час експлуатації трубопроводів можливі зміни обумовлені відкриттям або закриттям запірної арматури. Тому під час розрахунків таких систем виникає ситуація, коли неможливо описати усі події та явища процесу функціонування модельованої системи. Одним із способів подолання бар'єра складності є

розчленування об'єкта на досить прості частини, а також вивчення взаємодії цих частин.

Після розчленування складної системи на окремі агрегати необхідно описати функціонування кожного елемента (агрегата) окремо. Для цього елемент розглядають як динамічну систему [143].

Кусково-лінійні агрегати (КЛА) [121, 164] є окремим випадком динамічної системи з дискретним втручанням. На відміну від систем, що описуються диференційними рівняннями, КЛА вміщає і переміщення, і стрибки, необхідні для моделювання аварійних ситуацій, або ситуацій, коли зміна параметрів мережі пов'язана з втручанням людини (при керуванні системою). Для опису елементів газотранспортної мережі потрібен повний набір характеристик.

Множина станів кусково-лінійного агрегату є кінцевим або розрахунковим набором підмножин, що не перетинаються.

Для кусково-лінійних агрегатів характерне те, що стан змінюється за лінійним законом

$$v(\tau) = \text{const}, \quad \frac{dZ_v}{d\tau} = \alpha_v, \quad (1.1)$$

де α_v - постійний вектор вигляду $\alpha_v = \{\alpha_{v_1}, \alpha_{v_2}, \dots, \alpha_{v_n}(v)\}$; Z_v - вектор додаткових координат $Z_v = \{Z_{v_1}, Z_{v_2}, \dots, Z_{v_n}(v)\}$; v - дискретна складова; τ - момент часу.

Процес перекачування газу лінійними ділянками трубопроводу описується системою диференційних рівнянь у часткових похідних. Розв'язок цієї системи здійснюється методом сіток із кроком інтегрування за часом. Для цього будують вузлові точки, в яких знаходяться значення температур, тиску, масової витрати газу та значення температури сітки.

1.1.2. Існуючі методи розрахунку газових мереж

Газові мережі, якими газ транспортується від газорегуляторних пунктів (ГРП) до будівель та інших об'єктів газифікації, можуть споруджуватись за кільцевою, радіальною або тупиковою схемами. Найчастіше газопостачання об'єктів сільської місцевості здійснюється за схемами, в яких поєднуються ознаки усіх перерахованих схем.

У більшості випадків система газопостачання складається із сукупності за кільцеваних газових магістралей і тупикових розгалужених мереж, що відходять від магістралей [37, 42, 43, 52, 55].

Конфігурація мереж низького тиску [73, 76, 77, 107, 110, 148, 155, 185, 191] вибирається залежно від характеру і місця розміщення навантажень на газову мережу, планування населеного пункту і типу його забудов.

При заданих навантаженнях і вибраній конфігурації задача розрахунку мережі зводиться до визначення розрахункових витрат газу V_i , втрат тисків Δp_i і діаметрів d_i ділянок мережі.

Існує два способи розрахунку газових мереж середнього та низького тиску: двоетапний (спочатку з допомогою номограм, а потім проводиться уточнення аналітичним методом) та одноетапний (чисто аналітичний).

Нижче наведено результати аналізу та узагальнено результати досліджень усіх аспектів технології проектування регіональних розподільних газових мереж, сформульовані задачі, пов'язані з реалізацією різних методик проектування газових мереж.

Основними факторами, які чинять вплив на параметри поточкорозподілу і споживання газу є зміна коефіцієнта гідравлічного опору трубопроводу (обумовлені зміною шорсткості внутрішньої поверхні внаслідок корозії та відкладень) і зміна внутрішнього діаметра труб обумовлена їх реновацією [156].

Гідравлічні розрахунки газових мереж виконуються на базі загальних рівнянь газової динаміки, які встановлюють зв'язок між діаметром, витратою газу і перепадом тиску для газових мереж відомої довжини і конфігурації. Із цих рівнянь

можна визначити будь-який параметр за заданими значеннями двох інших. Використання загальних рівнянь газової динаміки для гідравлічних розрахунків міських газопроводів проводиться з урахуванням експлуатаційних та економічних факторів, які відображають специфіку систем розподілу газу.

Основним питанням при проведенні гідравлічних розрахунків трубопроводів є визначення коефіцієнта гідравлічного опору, який входить у вихідне рівняння руху газу і визначає гідравлічну характеристику трубопроводу. Для ламінарного режиму течії цей коефіцієнт, як показує світова практика, може бути досить точно визначений за відомою формулою Гагена-Пуазейля. Явища, які відбуваються в турбулентному потоці, через свою складність довгий час не піддавались теоретичному аналізу. Тому для розрахунків коефіцієнтів гідравлічного опору були запропоновані емпіричні формули, які не враховували фізичні властивості середовища та характер внутрішньої поверхні труби. Більш пізні формули являють математичні моделі дослідних кривих, побудованих у безрозмірних координатах без урахування механізму турбулентного руху. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень отримані формули для визначення коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі руху для труб із рівномірнозернистою та нерегулярною шорсткістю внутрішньої поверхні труб. Завдяки цьому з'явилась можливість використання рівняння руху газу та підвищилась ступінь точності розрахунків [9, 10, 29, 59, 82, 100, 114, 129, 179].

Для прийняття оптимального рішення проблеми транспорту газу можуть бути застосовані два методи: метод диференційних розрахунків та метод моделювання.

Метод диференційних розрахунків – це класичний підхід для розв'язання проблем оптимізації систем під тиском. У випадку транспортування газу з урахуванням складності постановки задачі, яка включає велику кількість нелінійних рівнянь, необхідно значно спростити функції оптимізації, число факторів і параметрів, які впливають на пошук повного рішення. Тому для розв'язку типових задач метод диференційних розрахунків застосовується рідко.

Метод моделювання полягає у знаходженні певного числа варіантів, які відносяться до характеристик транспортної системи (траса, діаметр,

місцерозташування). Це веде до вибору оптимального рішення, якщо варіанти були вибрані достатньо вичерпно. Цей метод застосовується до розв'язку складних задач. Недоліком методу є великий обсяг розрахунків, який у разі застосування ЕОМ усувається.

Питання про оптимальний розвиток газової мережі є відкритим.

Застосування ЕОМ дозволяє розв'язати ряд якісно нових задач і не обмежуватись гідравлічним розрахунком мережі тільки при одному розподілі навантажень.

Для здійснення розрахунків вихідними даними є: геометрична структура газової мережі; об'єми споживання газу певними категоріями споживачів; сортамент і вартість труб; типорозміри газорозподільної станції (ГРС) і ГРП, витрати на їх будівництво, характеристика і потужність обладнання. Крім того, серед вихідних даних є: мінімальний тиск газу біля споживачів, фізичні властивості газу, середня температура ґрунту на ділянках [181, 182].

Різні варіанти порівнюються, і вибирається оптимальний за основним економічним критерієм, за який прийнято вважати вартість будівництва чи витрати на будівництво в сумі з експлуатаційними витратами за певний період.

У [126, 151, 157, 161] розглянуто мережеві моделі розподілу потоків, наведено критерії оптимального розподілу потоків:

- максимум подачі газу (максимум прибутків від реалізації);
- пропускна здатність і питомі витрати;
- мінімум попиту, максимум споживання і ціна газу.

Для проведення оптимізації математично описаних процесів застосовується динамічне програмування [60, 61, 66-68, 101, 116, 120, 136, 173, 174, 190].

Перевагами застосування динамічного програмування є:

- принципово інший підхід до задачі;
- розв'язок задач варіаційного розрахунку;
- зменшення об'єму комбінаторних задач.

Недоліками застосування динамічного програмування є:

- труднощі у формулювання задач у термінах динамічного програмування;



- складність підходу до багатомірних задач.

За наведеними вище рівняннями здійснюється розрахунок поточкорозподілу в газовій мережі. Результатами розрахунку є:

- витрати і втрати напору на ділянках мережі;
- тиск і густина газу в усіх вузлах мережі;
- фактична подача газу в ГРС, ГРП.

Розрахунок втрат тиску на ділянках газової мережі низького, середнього та високого тиску можна виконувати як із урахуванням температури, яка відповідає нормальним умовам згідно [142], так і з урахуванням температури, що відрізняється від нормальних умов.

При розрахунку газопроводів високого, середнього та низького тиску слід урахувати додатковий гідростатичний тиск, який виникає через різницю геодезичних відміток кінцевої та початкової точок газопроводу, та втрати в місцевих опорах [1-4, 7, 8, 28, 74, 75, 82, 152, 172].

Додатковий тиск газу $\Delta P_{\text{гид}}$ з висотою виникає тому, що абсолютний тиск у газопроводі падає в меншому ступені, ніж барометричний тиск. Додатковий надлишковий тиск ураховується при різко вираженому змінному рельєфі місцевості.

Загальні втрати тиску із урахуванням місцевих опорів (коліна, трійники, запірні арматури, редуційні перехідники тощо) допускається визначати шляхом збільшення фактичної довжини газопроводу на 5 ÷ 10 % за формулою

$$\Delta P = k_m \cdot \Delta P_n, \quad (1.2)$$

де ΔP_n - втрати тиску по довжині газопроводу, Па (МПа); $k_m = (1,05 \div 1,1)$ - коефіцієнт місцевих втрат тиску.

У випадку, коли всі місцеві опори відомі, розрахункову довжину ділянки газопроводу можна визначати за формулою

$$l = l_o + l_e, \quad (1.3)$$

де l_0 - дійсна довжина ділянки, м; l_e - еквівалентна довжина прямолінійної ділянки газопроводу, м, втрати тиску на якій дорівнюють втратам тиску у місцевих опорах із значенням коефіцієнта $\zeta = 1$.

Еквівалентна довжина прямолінійної ділянки газопроводу може бути визначена за формулою

$$l_e = \sum \zeta \cdot \frac{d}{\lambda}, \quad (1.4)$$

де $\sum \zeta$ - сума коефіцієнтів місцевих опорів розрахункової ділянки; λ - коефіцієнт гідравлічного опору; d - внутрішній діаметр газопроводу, м.

Таким чином вводяться емпіричні коефіцієнти, які можуть бути некоректні для конкретної мережі.

У роботах [155-159] для гідравлічного розрахунку газопроводів середнього та високого тиску пропонується наступна формула

$$P_n^2 - P_k^2 = 0,1273 \cdot 10^{-3} \lambda_{mp} \rho L D^{-5} q^2. \quad (1.5)$$

Розрахунковий запас на відміну від магістральних газопроводів вноситься не в коефіцієнт гідравлічного опору, а в довжину. Розрахункова довжина L визначається за формулою

$$L = L_1 + \sum \zeta L_d, \quad (1.6)$$

де L_1 - дійсна довжина; $\sum \zeta$ - сума коефіцієнтів місцевих опорів ділянки газопроводу довжиною L ; L_d - еквівалентна довжина прямолінійної ділянки, втрати тиску на якій дорівнюють втратам тиску у місцевому опорі із значенням коефіцієнта $\zeta = 1$.

Еквівалентна довжина визначається залежно від режиму течії:

- для ламінарного режиму $Re \leq 2000$

$$L_d = 0,155 \cdot 10^{-3} D \cdot Re; \quad (1.7)$$

- для критичного режиму течії $2000 < Re \leq 4000$

$$L_d = 4,12D \cdot Re^{-0,335}; \quad (1.8)$$

- для турбулентної течії $Re > 4000$

$$L_d = \frac{D}{100\lambda_{mp}}. \quad (1.9)$$

Для розрахунку газових мереж низького тиску розрахункова формула має вигляд

$$P_n - P_k = \begin{cases} 4 \cdot 10^4 Re^{-1} \rho L D^{-5} q^2, & Re \leq 2000 \\ 1,57 Re^{1/3} \rho L D^{-5} q^2, & 2000 < Re \leq 4000. \\ 627 \lambda_{mp} \rho L D^{-5} q^2, & Re > 4000 \end{cases} \quad (1.10)$$

1.1.2.1. Методи розрахунку розгалужених розподільних газових мереж

Для розрахунку розгалуженої газової мережі, яка має одне джерело постачання та відомий початковий тиск і однакові тиски у кінці усіх ділянок, застосовується метод Комбета.

У роботах [20, 47, 57, 109, 149, 175] пропонується аналітичний метод вибору оптимального варіанту траси газової мережі за мінімумом капітальних витрат.

Торчинським Я. М. викладена методика розрахунку розподільних газових мереж низького тиску та теорія оцінювання варіантів проектів з економічної точки зору за мінімумом металовитрат [162]. Смірнов В.А. описав ряд недоліків цієї

методики і обґрунтував необхідність розрахунків за мінімумом капіталовкладень у систему газопроводів [150].

У роботі [163] для розрахунків газопроводів високого і середнього тиску пропонується методика, яка дозволяє розраховувати економічний розподіл тисків для розгалужених трубопроводів.

У [23, 24, 31, 32, 35, 65, 71, 104-106] надано детальні пояснення до застосування методів оптимізації складних систем. Зокрема градієнтний метод пошуку, який є різновидом методу пошуку екстремума. Метод градієнта можна рахувати локально-оптимальним, так як рух у цьому напрямку призводить до найбільшої зміни показників якості.

Перший ефективний інженерний метод розв'язку розгалужених газопроводів – метод поконтурної ув'язки Лобачева-Кросса (у літературі часто називається просто методом Харді Кросса) [94, 195]. Цей метод широко застовується при проведенні ручних інженерних розрахунків. Результати розрахунків складних трубопровідних систем довели, що цей метод дає велику похибку результатів і може бути використаний тільки як оціночний.

1.1.2.2 Методи розрахунку кільцевих розподільних газових мереж

Питання, пов'язані з раціональним кільцюванням системи енергомасообміну (у тому числі систем газопостачання), зводяться до розв'язання задачі, математичне формулювання якої наступне: визначити найкоротшу замкнуту траєкторію між n вузлами при послідовному одноразовому проходженні кожного відрізка між вузлами. Матриця відстаней між вузлами задається і в більшості випадків вона несиметрична [160].

Одним із методів розв'язання задачі є метод перебору і співставлення варіантів можливих розв'язків за прийнятим критерієм якості. Число співставлень при цьому варіантів рішень дорівнює $N = (n - 1)!$, яке навіть для відносно невеликих значень n стає практично неувним.

У [22, 53, 84, 92] розглядаються і аналізуються пошукові алгоритми розв'язку екстремальних задач одно- і багатопараметричних, статистичних, динамічних тощо. Аналізуються регулярні і статистичні алгоритми пошуку.

Є два типи задач для розрахунку кільцевих мереж:

- відомі усі параметри мережі, а метою розрахунку є визначення витрат V_i і втрат тисків Δp_i по ділянках;
- вибирається конфігурація мережі, довжини ділянок, розміщення ГРП і визначаються значення V_i , Δp_i , d_i .

Задачу гідравлічного розрахунку кільцевих газових мереж розв'язують різними методами. Найпоширеніші методи: інтерполяцій, інженера М. М. Андріяшева (який є вдосконаленим варіантом методу інтерполяцій).

В усіх перелічених методиках не враховано додаткові втрати тиску на подолання місцевих опорів. Тому при їх використанні вводиться поняття розрахункової довжини ділянки газопроводу (збільшення довжини на 10 %). Також не враховано зміни з часом стану внутрішньої порожнини трубопроводу, що має вплива на початкові та кінцеві параметри.

У [55, 84, 191, 194] запропоновано визначати середній діаметр кільцевої мережі низького тиску залежно від радіуса дії ГРП та за середнім діаметром проводити економічну оцінку проекту.

Метою гідравлічного розрахунку є визначення витрат газу і втрат тиску на ділянках мережі, тисків у кожній вузловій точці.

До початку виконання гідравлічного розрахунку вважаються відомими: опори ділянок газової мережі, відбори у вузлових точках, тиски на ГРС та ГРП.

Закони Кірхгофа описуються емпіричним рівнянням падіння тиску на ділянці мережі

$$\Delta P = f(q). \quad (1.11)$$

Стосовно газових мереж прийнято використовувати функцію

$$f(q) = s|q|q. \quad (1.12)$$

Газова мережа, з математичної точки зору, є топологічно пов'язаний орієнтовний зважений граф. Дана структура складається з кінцевого числа вершин, вузлів, пов'язаних між собою дугами – орієнтованими ребрами (ділянками). В якості ваги ребер виступає гідравлічний опір ділянки.

Відповідно до інцидентності графа закони Кірхгофа можна подати у вигляді

$$Aq = G, \quad (1.13)$$

$$A^T P = H - Sf(q), \quad (1.14)$$

де A - матриця інцидентності без останнього рядка; q - вектор витрат на ділянках; G - вектор витоків у вузлах; P - вектор тисків у вузлах; H - вектор діючих на ділянках напорів; S - діагональна матриця опорів ділянок. Верхній індекс T означає транспонування матриці.

Якщо для графа мережі вибрано остовне (від слова остов) дерево, тоді йому відповідає певна система базисних циклів, яка описується матрицею B , тоді отримаємо другу систему рівнянь

$$BSf(q) = BH, \quad (1.15)$$

де H - вектор діючих на ділянках напорів.

Розв'язок такої системи лінійних та нелінійних рівнянь можна шукати чисельно, використовуючи метод Ньютонa. Для досить великих газових мереж описаний підхід занадто об'ємний і потребує багато часу для розв'язання поставленої задачі. Прискорення процесу розв'язання було запропоновано ще Кірхгофом шляхом використання методу контурних витрат. Як невідомі величини вибираються контурні витрати, точніше витрати на ділянках мережі (хордах), які не

входять в остовне дерево. Кількість хорд значно менша, ніж кількість вузлів чи ділянок.

Відповідно до цього для розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь маємо рекурентну формулу

$$q_c^{(N+1)} = q_c^{(N)} - K^{-1} \cdot F. \quad (1.16)$$

Можна показати, що матриця K симетрична і позитивно визначена, тому для розв'язання рівняння можна застосувати метод Холецького. При цьому зберігання і обробку інформації можна робити не в матричній формі, а у вигляді списків.

Практично задачу гідравлічного розрахунку кільцевих мереж розв'язують різними способами. Найпоширеніші наступні методи:

- інтерполяцій (повторних операцій);
- інженера Андріяшева М. М. (який є вдосконаленням методу інтерполяцій).

Розглянемо кожен із цих методів.

Суть методу інтерполяцій зводиться до знаходження потоків газу за напередзаданими діаметрами шляхом послідовного наближення. Попереднє призначення діаметрів відбувається на основі бажаного розподілу потоків газу мережею.

Дуже важливо на початку розрахунку мережі правильно визначити діаметри, які забезпечуватимуть бажану схему розподілу потоків газу, та правильно вибрати падіння тиску на одиницю довжини.

У разі проведення розрахунків за методом Андріяшева М. М. вибирають бажану схему розподілу транзитів так само, як при розрахунку за методом інтерполяцій. Різниця полягає у тому, що тут визначають вузлові витрати замість шляхових. Крім того, для спрощення розрахунків Андріяшев М. М. рекомендує розбивати весь транзитний потік газової мережі на декілька потоків із визначеною трасою.

Визначенням опорів усіх ліній закінчують попередні операції із розрахунку газової мережі. Результати цього розрахунку наносять на допоміжні схеми мережі,

на яких нанесено наступну інформацію: перша схема - довжини, шляхові та вузлові витрати, друга схема - діаметри, опір (модуль втрати напору).

Після складання допоміжних схем приступають власне до ув'язки кілець, тобто знаходження розподілу витрат газу мережею і втрат тиску на усіх ділянках.

Для в'яснення порядку та послідовності перерозподілу транзитних витрат при кожній новій спробі Андріяшев М. М. увів поняття ув'язочної витрати (перерозподіл кількості газу за напрямками). Уведення поняття ув'язочної витрати газу спрощує розрахунки і зводить все до вдалого знаходження ув'язочної витрати.

1.2. Аналіз методик проектування газових мереж довільної конфігурації

Аспекти проектування систем газопостачання досліджуються протягом багатьох років і на сьогодні відомо багато робіт різних вчених, які пропонують свої методики та певні математичні залежності для гідравлічного розрахунку газових мереж високого, середнього та низького тиску. Ці методики та залежності відрізняються одна від іншої певними особливостями.

Існує два методи розрахунку газових мереж середнього та низького тиску: двоетапний (спочатку за допомогою номограм, а тоді проводиться уточнення аналітичним методом) та одноетапний (чисто аналітичний).

В Україні основним чинним нормативним документом для гідравлічних розрахунків є ДБН В.2.5 – 20 [44], в якому здійснено ряд припущень у нормативних формулах, що знижує точність розрахунків. Наприклад, у цих формулах не враховують профіль траси, втрати в місцевих опорах приймають рівними 10 % від втрат по довжині трубопроводу. Також вводять додаткові припущення: температуру газу на ділянці приймають рівною нормальній фізичній температурі, а коефіцієнт стисливості приймають рівним одиниці. Для газової мережі високого і середнього тиску режим руху газу виключно турбулентний, і тому немає потреби визначати режим руху газу в газопроводі. У ДБН В.2.5 – 20 [44] наводяться формули для розрахунків газових мереж високого і середнього тиску за нормативною формулою,

у якій втрати тиску у місцевих опорах приймаються рівними 10 % від втрат по довжині трубопроводу.

Розрахунок газових мереж низького тиску за ДБН В.2.5 – 20 [44] проводиться з аналогічними припущеннями, що й для середнього і високого тисків.

У роботах Яковлева Є. І. [193, 194] гідравлічний розрахунок газопроводів середнього та високого тиску по всій області турбулентного руху газу пропонується проводити за формулою, яка дещо відрізняється від нормативної, а саме: розрахункова довжина газопроводу визначається за формулою

$$l_p = 1,1 \sum_{i=1}^k l_i, \quad (1.17)$$

де l_i – довжина i -ої ділянки газопроводу.

Еквівалентну довжину газопроводу пропонується визначати залежно від режиму руху газу газопроводом. Рекомендовані формули наведені Яковлевим Є.І. в роботах [193, 194]. Ці формули дають змогу отримати точніші результати при проведенні гідравлічних розрахунків газових мереж [155, 196].

Також перепад тиску на ділянці газопроводу середнього і низького тиску можна розрахувати за формулою

$$P_1^2 \exp(-bc) - P_2^2 = \frac{\lambda Q_n^2 \rho_n^2 z R T l}{F^2 D} \cdot \frac{1 - \exp(-bc)}{b}, \quad (1.18)$$

де b – коефіцієнт, що враховує різницю відміток початку і кінця газопроводу; c – коефіцієнт, що враховує вплив зміни лінійної швидкості газу на ділянці газопроводу; λ – коефіцієнт гідравлічного опору; Q_n – витрата газу за нормальних умов; z – коефіцієнт стисливості газу; R – газова стала; F – площа поперечного перерізу газопроводу.

Коефіцієнти b і c у вищенаведеній залежності розраховуються за наступними формулами

$$b = \frac{2g\Delta z_r}{zRT}, \quad (1.19)$$

$$c = 1 + \frac{\alpha D}{\lambda l} \ln \frac{2g\Delta z_r D + \lambda l v_2^2}{2g\Delta z_r D + \lambda l v_1^2}, \quad (1.20)$$

де α – коефіцієнт Кориоліса (для ламінарного потоку $\alpha = 2$, для турбулентного потоку $\alpha = 1,1$); z_r – зміна профілю газопроводу.

Перевага цієї формули в тому, що вона враховує профіль траси газопроводу і зміну швидкості руху газу на ділянці газопроводу.

При розрахунку газопроводів низького тиску для випадку рівномірного відбору газу по довжині горизонтального газопроводу автор пропонує наступну залежність для визначення перепаду тиску газу

$$P_1 - P_2 = \frac{0,057\nu^{0,25}}{F^{1,75} D^{1,25}} \cdot \frac{\rho l}{Q_{\text{ш}}} [(Q_{\text{т}} + Q_{\text{ш}})^{2,75} - Q_{\text{т}}^{2,75}], \quad (1.21)$$

де ν – кінематична в'язкість газу за нормальних умов, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – густина газу за нормальних умов, $\text{кг}/\text{м}^3$; $Q_{\text{ш}}$ – шляхова витрата газу, $\text{м}^3/\text{год}$; $Q_{\text{т}}$ – транзитна витрата газу, $\text{м}^3/\text{год}$.

Нормативні формули застосовуються для гідравлічного розрахунку горизонтальних газопроводів низького тиску для гідравлічно гладких труб (зона Блазіуса).

У перехідній зоні режиму руху газу, де коефіцієнт гідравлічного опору залежить не тільки від числа Рейнольдса, але й від шорсткості внутрішніх стінок газопроводу, коефіцієнт гідравлічного опору визначається за формулою Альтшуля [7-9]. З урахуванням цього в найбільш простому випадку, коли витрата газу не залежить від відстані, що відповідає газопроводу без шляхового відбору ($Q_{\text{ш}} = 0$), перепад тиску можна визначати за формулою, наведеною в [197],

$$P_1 - P_2 = 0,1 \left(1,46k_e + \frac{100vF}{Q_\tau} \right)^{0,25} \frac{Q_\tau \rho l}{2F^2 D^{1,25}} \quad (1.22)$$

Також у цій методиці враховуються високі лінійні швидкості газу в газопроводах, так як коефіцієнт гідравлічного опору не буде залежати від числа Рейнольдса, а тому і від лінійної швидкості. Коефіцієнт гідравлічного опору тут залежить тільки від шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу. З урахуванням цього перепад тиску на ділянці газопроводу визначатиметься за формулою

$$P_1 - P_2 = \frac{\lambda \rho l}{6F^2 D Q_m} [(Q_\tau + Q_m)^3 - Q_m^3]. \quad (1.23)$$

В усіх описаних методиках розрахункові формули для газових мереж ураховують тільки втрати на тертя на всій розрахунковій ділянці газопроводу. Якщо враховувати місцеві опори, розрахункові формули приймуть вигляд

$$P_1 - P_2 = \frac{\lambda Q_\tau^2 \rho l}{2F^2 D} \int_0^l \lambda [Q_\tau + q(l-x)]^2 dx + \rho \sum_{i=1}^n \zeta \frac{v_i^2}{2}, \quad (1.24)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору; i – порядковий номер місцевого опору; n – кількість місцевих опорів.

Також у цій роботі розглянута методика розрахунку газопроводів низького тиску із зосередженим відбором газу, де втрати тиску на тертя слід визначати за формулою

$$\Delta P = 6,4\lambda \frac{Q^2}{D^5} \rho l, \quad (1.25)$$

де Q – розрахункова витрата, м³/год; D – внутрішній діаметр газопроводу, см.

У формулі (1.25) для врахування втрат тиску в місцевих опорах замість довжини газопроводу підставляють розрахункову довжину газопроводу, що розраховується, за формулою (1.17).

Так як розподільні газопроводи не завжди є горизонтальними, для більш точного розрахунку пропонуються методики гідравлічного розрахунку похилих розподільних газопроводів.

Для газопроводів із транзитними і шляховими витратами розрахункова методика має вигляд наведений у працях [198, 199]. Методика має дуже громіздкі формули, але дає більш точні результати. Тому при її використанні розрахунки можна проводити за допомогою ЕОМ. Перевагою наведеної методики є те, що в ній розглянуті варіанти гідравлічного розрахунку для газопроводів із зосередженим або рівномірним відбором газу. Також наведена методика для розрахунку похилих ділянок газопроводу, так як розподільні газопроводи не є завжди вертикальними.

У роботі Іоніна А. А. [84] для розрахунку газорозподільних мереж пропонується користуватися не основними рівняннями в загальному вигляді, а частковими формулами, які отримані на основі цих рівнянь. Часткові формули отримані за рахунок підстановки в основні рівняння замість коефіцієнта гідравлічного опору λ його функціональної залежності від інших параметрів.

Недоліком наведеної методики розрахунку газопроводів є те, що вона є дуже громіздкою. Тому на практиці для розрахунку розподільних мереж користуються не формулами, а таблицями або номограмами, які складені на основі цих залежностей [40, 54, 155, 177].

У підручнику Іоніна А. А. для розрахунку газопроводів середнього і високого тиску застосовується формула

$$P_n^2 - P_k^2 = 1,62\lambda \frac{Q_0^2}{d^5} \rho P l, \quad (1.26)$$

де ρ – густина газу за нормальних умов, кг/м^3 ; l – довжина газопроводу, м.

Недоліком формули (1.26) є те, що в ній не враховується температура газу в газопроводі. Приймається, що температура газу при розрахункових навантаженнях близька до 0 °С, і тому співвідношення $\frac{T}{T_n} = 1$.

Для розрахунку газопроводів низького тиску використовується формула

$$P_n - P_k = 0,81\lambda \frac{Q_0^2}{d^5} \rho l. \quad (1.27)$$

Прирівнюючі рівняння (1.26) і (1.27) отримаємо наступне співвідношення

$$(P_n^2 - P_k^2)_{в.т} / (P_n - P_k)_{н.т} = 2P_{ср.ар}, \quad (1.28)$$

де $(P_n^2 - P_k^2)_{в.т}$ – втрати тиску в газопроводах високого тиску; $(P_n - P_k)_{н.т}$ – втрати тиску в газопроводах низького тиску; $P_{ср.ар}$ – середнє арифметичне значення початкового і кінцевого тиску.

Втрати тиску, як правило, визначають за таблицями або номограмами [155].

У [35] розглядаються і аналізуються пошукові алгоритми розв'язання екстремальних одно- і багатопараметричних, статистичних, динамічних задач. Аналізуються регулярні і статистичні алгоритми пошуку.

Для розрахунку газових мереж низького тиску використовується узагальнена формула для визначення втрат тиску від тертя

$$\Delta P = \frac{A v^m \rho \cdot L}{2(3-m) F^{2-m} D^{1+m}} Q_P^{2-m}, \quad (1.29)$$

де A , m – коефіцієнти, які залежать від режиму руху газу в газопроводі.

Для розрахунку газових мереж високого та середнього тиску також застосовуються основна та нормативна формули:

- основна

$$P_n^2 - P_k^2 = \frac{\lambda z \Delta \cdot T \cdot 1,1 \cdot l \cdot Q^2}{0,03585^2 \cdot 10^{12} \cdot D^5}; \quad (1.30)$$

- нормативна

$$P_n^2 - P_k^2 = 1,54 \cdot 10^{-5} \left(\frac{k_e}{D} + 1922 \frac{\nu D}{Q} \right)^{0,25} \frac{Q^2}{D^5} \rho \cdot l. \quad (1.31)$$

Розрахунок втрат тиску на ділянках газової мережі низького, середнього та високого тиску можна виконувати як з урахуванням температури, яка відповідає нормальним умовам згідно з [133, 142], так і з урахуванням температури, що відрізняється від нормальних умов.

Число Рейнольдса, яке визначає режим руху газу газопроводом, із урахуванням температури газу розраховується за формулою, наведеною в [146].

Для виділення факторів використовується рівняння інженерної гідравліки гідравлічної системи, яке записане у наступному вигляді

$$\Delta p = S Q^\alpha D^{-\beta}, \quad (1.32)$$

де S - значення коефіцієнта гідравлічного опору; α, β - показники степеня в формулі Дарсі-Вейсбаха; $\Delta p, Q, D$ - відповідно втрати тиску, розрахункова витрата на ділянці, внутрішній діаметр трубопроводу.

У літературі країн Європейського Союзу та США застосовуються емпіричні залежності, в яких не враховується стан трубопроводу, і стабілізація течії для гідравлічно гладких поліетиленових труб може бути оцінена за емпіричними рівняннями: рівняння Міллера для високого і низького тиску, рівняння Уеймута, рівняння розподілу, рівняння Шпитцгласа для високого і низького тиску, Панхандля А, Б та Уеймута [200-203].

Отже, для гідравлічного розрахунку газових мереж існує багато методик із різними математичними залежностями, які відрізняються між собою за складністю і мають свої переваги або недоліки. Для отримання більш точних результатів при розрахунках газових мереж доводиться користуватись методиками, які є дуже складними і великими за обсягом. У зв'язку з цим на сьогодні актуальним є застосування комп'ютерних технологій для розрахунків газопроводів, що надає можливість скоротити час і підвищити точність розрахунків.

1.3 Аналіз математичних моделей нестационарних процесів в газових мережах

За характером протікання газотермодинамічних процесів у газопроводах їх можна поділити на стаціонарні і нестационарні. Оскільки внаслідок турбулентності руху газу в потоці спостерігаються пульсації параметрів у часі, то з фізичної точки зору чисто стаціонарні процеси в газопроводах неможливі, мова може йти лише про квазістаціонарні процеси, математичний опис яких із певним ступенем вірогідності може бути здійснений на основі моделей стаціонарного руху газу.

Загальна математична модель нестационарного неізотермічного руху газу в газопроводі з урахуванням профілю траси може бути побудована на основі диференціальних рівнянь руху газу, нерозривності і енергії, які у векторній формі мають вигляд

$$g\rho - \text{grad } \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{W} - \rho \left(\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{W} \text{grad } \bar{W} \right) = 0, \quad (1.33)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \bar{W} = 0, \quad (1.34)$$

$$C_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{W} \text{grad } \bar{T} \right) = -\frac{1}{\rho} \text{div} \bar{q} + \frac{1}{\rho} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} (\Phi + \bar{q}'), \quad (1.35)$$

де ρ – густина газу як функція просторових координат і часу; \bar{P} – вектор тиску; \bar{W} – вектор швидкості; \bar{T} – вектор температурного поля; \bar{q} – тепловий потік у довкілля; Φ – дисипативна функція Релея; \bar{q}^* – питомий тепловий потік через стінки [5].

Теоретичний аналіз нестационарних турбулентних течій ускладнюється головним чином відсутністю даних про характер зміни параметрів турбулентності в нестационарних умовах. Тому більшість робіт присвячено вивченню турбулентної структури нестационарних потоків і побудові гіпотез, які дають змогу замкнути початкову систему рівнянь [11, 30, 31, 85, 86, 165, 171].

Розвиток напівемпіричних теорій турбулентності для випадку нестационарних течій є першочерговою проблемою, оскільки застосування напівемпіричних теорій Прандтля або Кармана можливе тільки при квазістационарному методі розрахунку, коли у кожен момент часу реальні характеристики потоку замінюються стаціонарними. Водночас, проведені дослідження досить переконливо показують неправомірність квазістационарного методу розрахунку гідравлічних втрат у загальному випадку.

Найсерьознішим недоліком наведених теорій є те, що у припущенні про постійність фізичних властивостей середовища [95, 134, 154] та його нестискуваність інколи допускається однозначність густини тиску. Такі обмеження суттєві для газу, який перекачується трубопроводом, оскільки властивості газу більшою мірою залежать від температури і тиску, а умова стискання викликає значні труднощі при визначенні товщини граничного шару. Крім того, для нестационарних процесів транспортування газу виникає проблема допустимості осереднення турбулентних течій. Тому для розрахунків, пов'язаних із транспортуванням газу магістральними газопроводами, найбільше значення мають рівняння, в яких нехтують змінними, що визначаються структурою течії. При цьому турбулентність вдається врахувати на етапі ідентифікації моделей на основі диспетчерських даних.

З урахуванням незначної зміни тиску поперечним перерізом трубопроводу $\left(\frac{\partial P}{\partial r} \approx 0\right)$ у рівняння руху можна ввести коефіцієнт гідравлічного опору ζ . З урахуванням кількісних оцінок, які входять у рівняння, систему із рівнянь (1.33), (1.34), (1.35) можна подати у вигляді

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = -W \frac{\partial M}{\partial x} - F \frac{\partial P}{\partial x} - W \zeta \frac{M}{2D} - \rho g F \frac{\partial z}{\partial x}, \quad (1.36)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{1}{F} \frac{\partial M}{\partial x}, \quad (1.37)$$

$$\begin{aligned} & -\rho \frac{\partial W_x}{\partial x} \left(C_p T_2 + \rho T_2 \frac{\partial C_p}{\partial \rho} \right) + \left(T_2 \rho \frac{\partial C_p}{\partial T_2} + \rho C_p \right) \cdot \left(\frac{\partial T_2}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \\ & = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial T_2} \left[\left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \end{aligned}, \quad (1.38)$$

де M – масова витрата газу; W – середня по поперечному перерізу лінійна швидкість газу; F – площа поперечного перерізу труби; P – тиск; ζ – коефіцієнт гідравлічного опору; ρ – густина газу; g – прискорення вільного падіння; D – внутрішній діаметр труби; x – лінійна координата; z – геодезична відмітка; τ – час; C_p – ізобарна теплоємність газу; λ – коефіцієнт теплопровідності газу; T_2 – температура газу в певному поперечному перерізі.

При розв'язуванні задачі тепломасообміну рівняння (1.36), (1.37), (1.38) розглядають як єдину нерозривну систему.

Зазначимо, що для того, щоб замкнути систему із рівнянь (1.36), (1.37), (1.38), необхідно визначити вирази для розрахунку проекції швидкості W_x за радіусом газопроводу при турбулентній течії газу, яка досить добре описується степеневою залежністю

$$\frac{W_x}{W_0} = \left(\frac{R-r}{r} \right)^{1/n}, \quad (1.39)$$

де R – радіус трубопроводу; W_0 – швидкість у центрі потоку при $r = 0$.

Показник степеня n залежить від числа Рейнольдса, причому під час його збільшення значення n зростає.

Розв’язання такої задачі дає точніші результати, однак є занадто громіздким, що ускладнює використання даної постановки задачі для оперативного керування. Це суттєвий недолік, тому доцільно на основі періодичного проведення розрахунків використовувати більш прості рівняння, які при високій швидкості обчислень дають змогу отримати досить точні результати.

Характер і тривалість перехідних процесів у газопроводах, зумовлених перемиканням технологічних схем перекачування, становлять певний інтерес з точки зору оцінки об’ємів поставок газу споживачеві в зони нестационарності, мінімізації зони нестационарності, своєчасного перемикання буферних споживачів на інший вид палива тощо. Загальний перебіг таких процесів у достатній мірі висвітлено у працях [41, 128, 132, 178, 189].

Просторова модель термогазодинамічного процесу в газопроводі, що представлена системою рівнянь (1.36), (1.37), (1.38), важко реалізується і малоперспективна для експериментальних досліджень внаслідок необхідності забезпечити подібність при значній кількості критеріїв.

Найчастіше використовують рівняння (1.33), (1.34), (1.35), які описують режим транспортування газу трубопроводами за умови, що течія середовища несиметрична. Тоді рівняння енергії, руху, нерозривності та теплопровідності зручно перевести у циліндричні координати. Такий підхід широко застосовується в інженерних розрахунках, оскільки задача про теплообмін зі змінним по периметру тепловим потоком практично не вивчена.

Дослідження температурних полів не на всій області впливу довкілля, а лише на межі газопровід–грунт дає змогу прийняти суттєві спрощення.

Для даного перерізу по довжині трубопроводу можна прийняти такі припущення:

- ґрунт вважається ізотропним;
- теплофізичні властивості ґрунту не залежать від його температури;
- фазові переходи води в пару в ґрунті не враховуються (оскільки температура газу, згідно з прийнятими нормами, менша, ніж 100°C);
- у будь-який момент часу для ґрунту розглядається стаціонарна задача.

Останнє пояснюється тим, що, як показує досвід, газотранспортні системи через один-півтора року з моменту пуску виходять на періодичний близький до стаціонарного тепловий режим.

Як показали розрахунки, ці припущення дають змогу отримати хороші результати при невеликих відхиленнях від поверхні.

Крім того, в проміжку часу, для якого розв'язуються задачі оперативного керування, температура оточуючого ґрунту змінюється незначно за рахунок того, що коефіцієнт теплопровідності ґрунту менший від коефіцієнта теплопровідності металу, а товщина ґрунту значно більша від товщини стінки трубопроводу.

Для реалізації системи (1.36), (1.37), (1.38) необхідно як замикаюче використати рівняння газового стану. На даний час маємо понад 200 рівнянь станів реального газу. До даної групи рівнянь належать рівняння Джоуля-Томсона, Бертло, Календара та багатьох інших. У працях [27, 91] на основі зіставлення рівнянь Бертло та Джоуля-Томсона показано їх співвідношення, що дало підстави авторам рекомендувати їх для практичного застосування при одержанні наближених аналітичних рішень різного роду теплофізичних задач, пов'язаних із трубопровідним транспортуванням природного газу. Причому рівняння Бертло рекомендується записувати у вигляді

$$\frac{P}{RT_2\rho} = 1 + \frac{9}{128} \cdot \frac{P}{P_{кр}} \cdot \frac{T_{кр}}{T} \left(1 - 6 \frac{T_{кр}}{T} \right), \quad (1.40)$$

де $T_{кр}$ і $P_{кр}$ – псевдокритичні параметри, які визначаються за методом Кея

$$T_{кр} = \sum x_i T_{кр_i}, P_{кр} = \sum x_i P_{кр_i}. \quad (1.41)$$

У працях [23, 41, 132] запропоновано метод для одержання рівняння стану газів на основі відомого складу суміші.

1.4. Проектування газових мереж із поліетиленових труб

Рівень цивілізації сучасного суспільства базується в значній мірі на великому асортименті технічних засобів, підтримання та подальший розвиток яких можливий тільки при системному підході до розв'язку виникаючих проблем та відповідності рішень, що приймаються, вимогам якості, надійності та довговічності систем, що створюються, обладнання та комунікацій.

У цьому відношенні застосування поліетиленових труб при проектуванні інженерних мереж, яке, наприклад, почалось у Швеції із середини 1950-х років, повністю відповідає поставленим задачам. Протягом більш ніж 40-річного застосування поліетиленових труб відбувалось накопичення досвіду та знань, здійснювався широкий обмін ними, результатом чого стало суттєве підвищення ступеня безпеки у функціонуванні різних за призначенням трубопроводів. Обмін знаннями та інформацією в цій області продовжується і в теперішній час так само, як і продовжується постійне оновлення матеріалів та виробів із них. Зростає обсяг виробничого досвіду, виникають нові науково-технічні проекти та експлуатаційні програми, здобуваються нові знання, і в цьому плані Україна все більше адаптується до Європейського товариства, впроваджуючи в себе стандарти, які розробляються в рамках CEN [83, 87, 166 -170, 200].

Виробничі та експлуатаційні аспекти функціонування інженерних систем мають надзвичайно важливе значення. Трубопровідні системи із поліетиленових труб виконують дуже важливі функції у різних областях комунального господарства. Їх частка буде зростати в майбутньому завдяки надійній роботі та тривалому терміну експлуатації.

Порівняно з традиційними для труб матеріалами, такими як сталь, чавун та бетон, пластмаси можна розглядати як відносно новий матеріал. Розвиток пластикових матеріалів мав місце, головним чином, у двадцятому столітті та з великої кількості відомих пластмас лише біля десяти використовуються для виробництва труб, зокрема ПВХ (полівінілхлорид) та ПЕ (поліетилен).

Поліетиленові труби менш енерговитратні та більш екологічні, ніж металеві. Монтаж поліетиленових трубопроводів не потребує застосування важкої будівельної техніки. Зварювання поліетиленових труб можна максимально автоматизувати, а застосування довгих труб підвищить надійність трубопроводів. Витрати на експлуатацію поліетиленових трубопроводів мінімальні. Вони дозволяють проводити реконструкцію зношених трубопроводів безтраншейними технологіями (метод “труба в трубі”). Саме тому в більшості країн розподільні мережі будуються та реконструюються із застосуванням поліетиленових труб.

Перевагами поліетиленових труб порівняно зі стальними є: менша вартість труб, більший гарантійний термін експлуатації (50 років), не потребують катодного захисту, а отже не потребують обслуговування, висока корозійна та хімічна стійкість, виключена можливість утворення накипу на внутрішній поверхні, низька теплопровідність, зменшена імовірність руйнування при замерзанні рідини, так як труба в цьому випадку не руйнується, а збільшується в діаметрі і потім повертається до початкового стану, невелика вага, що полегшує монтажні роботи, надійність зварних з'єднань протягом усього терміну експлуатації, можливість багаторазового ремонту при незначних витратах, більша довжина труб. Спорудження або реконструкція газових мереж із застосуванням поліетиленових труб дає економію до 40 % коштів порівняно з традиційними методами.

Виготовляють труби типів SDR 11 та SDR 17.6, де SDR — відношення номінального зовнішнього діаметра труби до номінальної товщини стінки. Номінальний робочий тиск для труб з SDR 17,6 — 0,3 МПа, для труб з SDR 11 — 0,6 МПа. Зовнішній діаметр труб — від 32 до 315 мм. Довжина труб — від 6 до 12 м. Труби діаметром не більше 110 мм доставляються в бухтах.

Кожного року частка використання поліетиленових труб при будівництві газових мереж збільшується в середньому на 50 %.

В Україні проектування газових мереж із поліетиленових труб здійснюється за ДБН В.2.5 – 20 [44]. Наведена у цьому нормативному документі методика проектування газових мереж із поліетиленових труб така ж як методика проектування газових мереж з сталевих труб. У цій методиці для поліетиленових трубопроводів (так як і для сталевих) прийнято припущення, що втрати напору у місцевих опорах рівні 10 % від втрат напору по довжині поліетиленового трубопроводу. Але об'єктивність цього припущення вимагає доведення оскільки 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.

Для вивчення місцевих опорів поліетиленових трубопроводів треба розглянути методи з'єднання поліетиленових труб в нитку та виділити з них ті які найчастіше застосовуються та чинять найбільший вплив на динаміку руху газу трубопроводом.

При монтажі поліетиленових трубопроводів застосовують наступні методи з'єднання труб в нитку:

- терморезисторне з'єднання;
- зварювання встик;
- зварювання врозтруб.

Терморезисторне з'єднання застосовують для зварювання поліетиленових труб діаметром від 25 до 160 мм. Стикове зварювання застосовується для поліетиленових труб діаметром більше 160 мм. Розтрубний метод застосовується тільки в одній країні Євросоюзу – Угорщині. В Україні цей метод є дуже поширеним при монтажі водопровідних мереж. Розтрубний метод застосовується для зварювання поліетиленових труб діаметром до 110 мм.

Місцеві опори поліетиленових трубопроводів при стиковому зварюванні є аналогічні місцевим опорам сталевих трубопроводів. Відповідно цей вид місцевих опорів є достатньо вивченим. Тільки у разі застосування терморезисторного з'єднання утворюються місцеві опори, які не мають аналогів та чинять найбільший вплив на динаміку руху газу трубопроводом. Тому терморезисторні з'єднання вимагають детальних досліджень. Саме терморезисторним з'єднанням і буде присвячено дослідження даної дисертаційної роботи.

Поліетиленові трубопроводи зварені з допомогою терморезисторних з'єднань складаються з поліетиленових труб та терморезисторних фітингів. За допомогою терморезисторних фітингів поліетиленові труби з'єднуються в нитку, виконуються розгалуження потоків, здійснюються повороти трубопроводу на необхідний кут, плавно змінюється діаметр трубопроводу тощо.

Терморезисторні фітинги поділяються на:

- муфти;
- сідлові трійники;
- коліна;
- редукційні перехідники;
- терморезисторні трійники.

Оскільки терморезисторні фітинги мають складну конфігурацію внутрішньої поверхні, здійснюють зміну напрямку потоку, розгалужують потік, звужують або розширюють потік, то вони є місцевими опорами і чинять вплив на розподіл тиску вздовж трубопроводу. Для визначення коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних фітингів потрібно провести аналіз їх конструкції та визначити, з яких найпростіших місцевих опорів вони складаються.

Терморезисторна муфта (рис. 1.1) призначена для з'єднання поліетиленових труб у нитку. У місці стикування поліетиленових труб (рис. 1.2) утворюється кільцева порожнина. Таким чином місцевий опір терморезисторна муфта складається з двох найпростіших місцевих опорів – різке розширення та різке звуження.

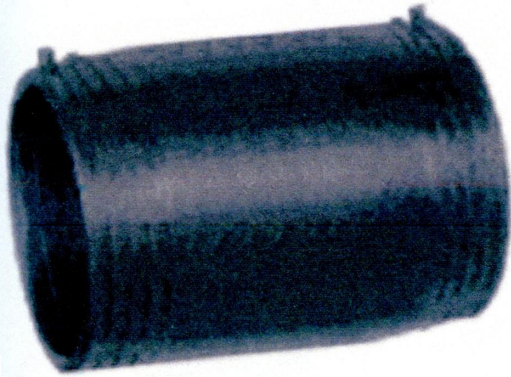


Рис. 1.1 Терморезисторна муфта

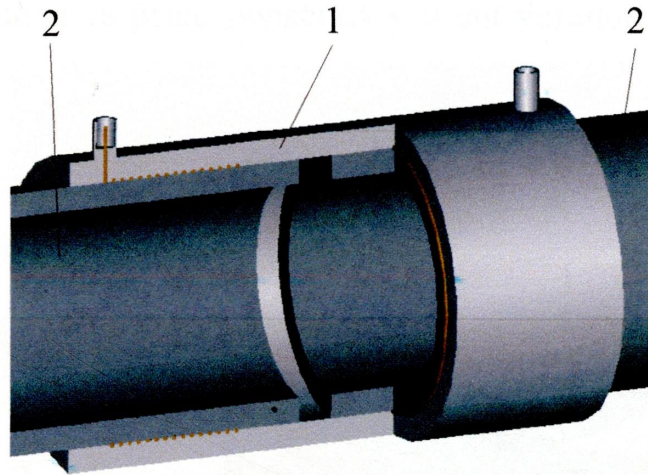


Рис. 1.2 Встановлена терморезисторна муфта:
1 – терморезисторна муфта;
2 – поліетиленова труба

Сідловий трійник (рис. 1.3) призначений для врізання відводу в діючий поліетиленовий трубопровід під тиском та застосовується, коли діаметр відводу менший діаметра основної магістралі. Урізання відводу в трубопровід здійснюється шляхом фрезування стінки діючого поліетиленового трубопроводу.

Сідловий трійник (рис.1.4) складається з сідловини 2 та відводу 4. Після вирізання отвору в магістралі та виймання фрези в сідловину трійника вкручується заглушка 3. Приєднання відводу до сідлового трійника здійснюється за допомогою терморезисторної муфти 5. Кріплення трійника до магістралі здійснюється за допомогою хомути 6.

Сідловий трійник передбачає три варіанти руху газового потоку:

- газовий потік рухається основною магістраллю і відводом;
- газовий потік рухається відводом сідлового трійника;
- газовий потік рухається основною магістраллю.

Як бачимо (див. рис. 1.4), газовий потік з основної магістралі перетікає у сідловину 2 (у разі руху газового потоку основною магістраллю і відводом або тільки відводом сідлового трійника), а з сідловини у відвід 4, де проходить терморезисторною муфтою 5. Таким чином, у разі руху газового потоку основною магістраллю і відводом або тільки відводом сідлового трійника місцевий опір сідловий трійник складається з чотирьох найпростіших місцевих опорів – вхід у

сідловину, вхід у відвід, різке розширення та різке звуження у місці установлення терморезисторної муфти.



Рис. 1.3 Сідловий трійник

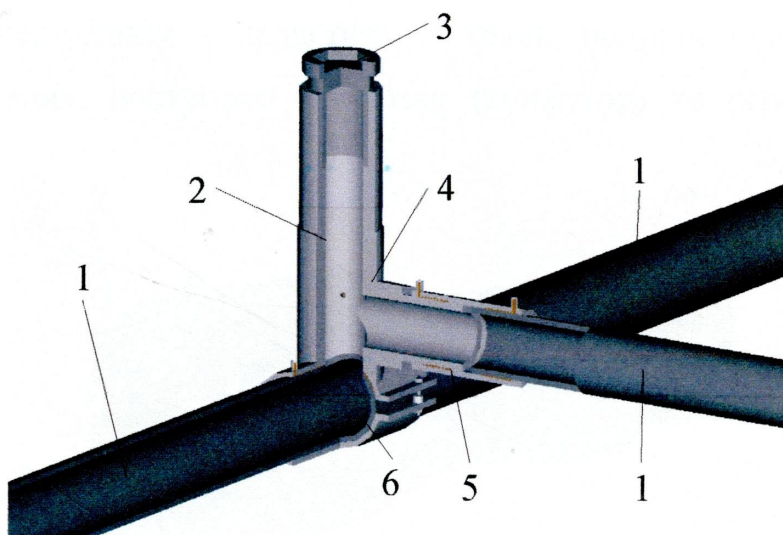


Рис. 1.4 Встановлений сідловий трійник:
1 – поліетиленова труба; 2 – сідловина;
3 – заглушка; 4 – відвід; 5 – терморезисторна муфта; 6 – хомут

Терморезисторне коліно (рис. 1.5) призначене для зміни напрямку трубопроводу. Як бачимо (рис. 1.6), місцевий опір терморезисторне коліно складається з трьох найпростіших місцевих опорів – різке розширення, поворот та різке звуження.



Рис. 1.5 Терморезисторне коліно

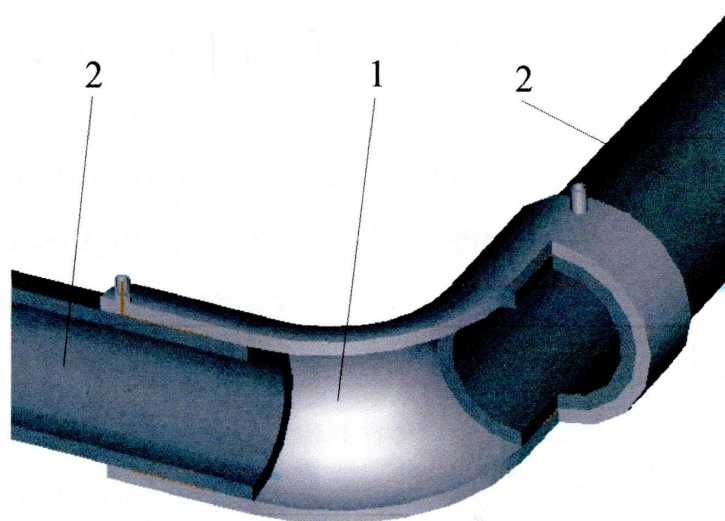


Рис. 1.6 - Встановлене терморезисторне коліно:
1 – терморезисторне коліно;
2 – поліетиленова труба

Терморезисторний редуційний перехідник (рис. 1.7) призначений для плавної зміни діаметра трубопроводу. Як бачимо (рис. 1.8), місцевий опір терморезисторний редуційний перехідник складається з трьох найпростіших місцевих опорів – різке розширення, поступове звуження (конфузор) та різке звуження.

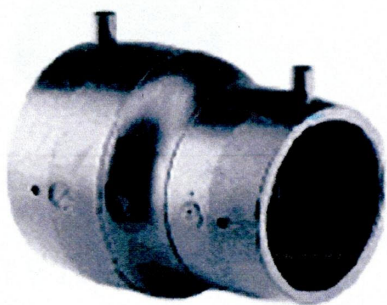


Рис. 1.7 Терморезисторний редуційний перехідник

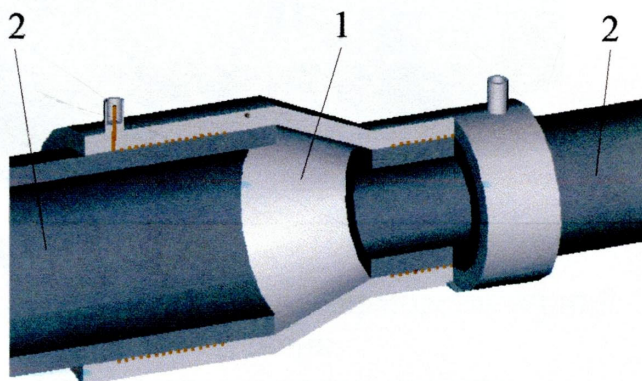


Рис. 1.8 Встановлений терморезисторний редуційний перехідник:
1 – редуційний терморезисторний перехідник; 2 – поліетиленова труба

Терморезисторний трійник (рис. 1.9) – терморезисторне з'єднання із трьома приєднувальними закінченнями. Призначений для влаштування відводів. Конструктивною особливістю усіх трійників є те, що потік, який перетікає у відвід, змінює свій напрям на кут 90° .

Терморезисторний трійник, так як сідловий трійник, передбачає три варіанти руху газового потоку:

- газовий потік рухається основною магістраллю і відводом;
- газовий потік рухається відводом терморезисторного трійника;
- газовий потік рухається основною магістраллю.

Як бачимо (рис. 1.10), у разі руху газового потоку основною магістраллю і відводом або тільки відводом терморезисторного трійника газовий потік з основної магістралі перетікає у відвід 3, де проходить терморезисторною муфтою 4.



Рис. 1.9 Терморезисторний трійник

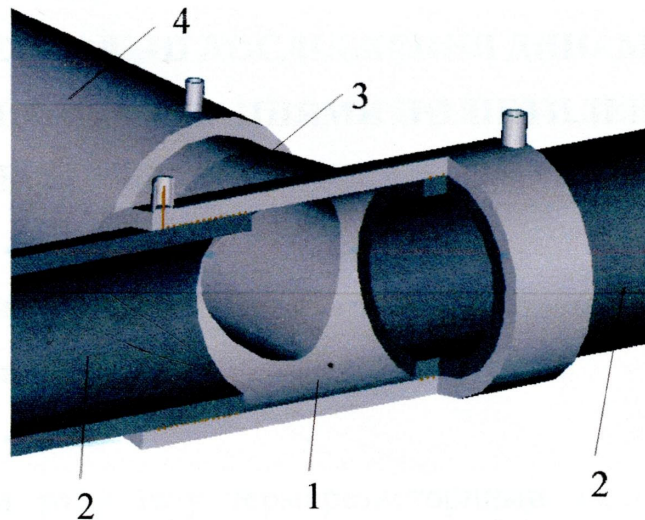


Рис. 1.10 Встановлений терморезисторний трійник:

- 1 – терморезисторний трійник;
- 2 – поліетиленова труба;
- 3 – відвід; 4 – терморезисторна муфта

Таким чином, у разі руху газового потоку основною магістраллю і відводом або тільки відводом місцевий опір терморезисторний трійник складається з чотирьох найпростіших місцевих опорів – різке розширення, вхід у відвід, різке розширення та різке звуження у місці установлення терморезисторної муфти. У разі руху газового потоку тільки основною магістраллю місцевий опір терморезисторний трійник складається з двох найпростіших місцевих опорів – різке розширення та різке звуження.

Як бачимо, терморезисторні з'єднання поліетиленових трубопроводів мають складну конфігурацію внутрішньої поверхні, складаються з декількох близько розміщених один від одного найпростіших місцевих опорів. Таке близьке розміщення найпростіших місцевих опорів призводить до того, що попередній місцевий опір впливає на динаміку руху газу місцевим опором розміщеним за ним.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ ГАЗУ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИМИ З'ЄДНАННЯМИ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ

2.1. Теоретичні дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів

Метою дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів є визначення коефіцієнта місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання, впливу кожного терморезисторного з'єднання на швидкість потоку та розподіл тиску газу вздовж поліетиленового трубопроводу, виявлення місць зменшення швидкості потоку та зон пониження тиску, що дозволить оптимізувати конструкцію терморезисторних з'єднань.

На сьогодні місцеві опори терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів вивчені недостатньо. Для них відсутні довідкові дані, а рекомендацій їх розрахунку немає (мають загальний характер). Як було встановлено в розділі 1, складність їх вивчення обумовлена складною конфігурацією внутрішньої поверхні терморезисторних з'єднань, близьким розміщенням найпростіших місцевих опорів один від іншого (попередній місцевий опір впливає на динаміку руху газу місцевим опором, розміщеним за ним), що унеможлиблює розрахунок коефіцієнтів цих місцевих опорів.

Дослідити динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів із складною конфігурацією внутрішньої поверхні, визначити значення коефіцієнтів їх гідравлічних місцевих опорів дозволяють 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 подрібненням. Flow Vision дозволяє моделювати

стаціонарні та нестаціонарні, стисливі, слабостисливі і нестисливі потоки рідин та газів. Застосування різних моделей турбулентності та адаптивної розрахункової сітки дозволяє 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 диференціальній формі ці рівняння мають наступний вигляд:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(Vf) = \nabla(D\nabla f) + Q, \quad (2.1)$$

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 (2.1). У цьому методі рівняння (2.1) інтегрується по об'єму кожної i -ої комірки розрахункової сітки та по часу (крок часу) τ

$$\int_{V_i} f dV \Big|_{t=t_{n+1}} - \int_{V_i} f dV \Big|_{t=t_n} + \int_{\tau} \int_{S_i} f V ds dt = \int_{\tau} \int_{S_i} D \nabla f ds dt + \int_{\tau} \int_{V_i} Q dV dt, \quad (2.2)$$

де V_i – об'єм комірки; S_i – площа комірки; t_n, t_{n+1} – моменти початку і кінця кроку по часу

$$t_{n+1} = t_n + \tau. \quad (2.3)$$

Комірка розрахункової сітки має форму довільного багатогранника. Назвемо “вільними гранями” комірки ті грані, якими вона межує з іншими комітками. Площу j -тої вільної грані в i -тій комітці позначимо s_i^j . “Твердими гранями” назвемо грані комітки, які не межують з іншими комітками (містяться на вході та виході, по контакту газу з стінкою). Площу j -тої твердої грані в i -тій комітці позначимо g_i^j . Запишемо рівняння (2.2) в наступній формі

$$V_i(f_{n+1}^i - f_n^i) + \sum_j F_i^j s_i^j + \sum_j G_i^j g_i^j + Q_i = 0, \quad (2.4)$$

де Q_i – об’ємний вхідний параметр змінної f ; f_n – середнє значення змінної по об’єму комітки в момент часу t_n .

$$V_i f_i^n = \int_{V_i} f dV \Big|_{t^n}. \quad (2.5)$$

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

$$F_i^j = \int_{\tau} (fV + D\nabla f) dt \Big|_{s_i^j}, \quad (2.6)$$

$$G_i^j = \int_{\tau} (f_{w_j} V_{w_j} + D(\nabla f)_{w_j}) dt \Big|_{g_i^j}, \quad (2.7)$$

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

Другий член суми підінтегрального виразу в (2.6), який відповідає дифузному потоку f , апроксимується в Flow Vision другим порядком точності по просторовій змінній.

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 у програмному комплексі MSC Nastran, після чого вони імпортувались у 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 була використана математична модель турбулентного нестисливого потоку, яка базується на застосуванні для розв'язку задач рівняння Нав'є-Стокса, що дозволяє 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 одними із

базових у гідродинаміці і застосовуються 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:

$$\frac{\partial \vec{g}}{\partial t} = -(\vec{g} \cdot \nabla) \vec{g} + \nu \Delta \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{g} = 0 \quad (2.9)$$

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

Невідомі p і \vec{g} є функціями часу t і координати $x \in \Omega$, де $\Omega \subset \mathbb{E}^n$, $n = 2, 3$ – 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 FlowVision 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 була задана стандартна 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

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.10)$$

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

Рівняння переносу турбулентної енергії k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \vartheta k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (2.11)$$

де μ – молекулярна динамічна в'язкість; σ_k – коефіцієнт (дорівнює одиниці); G – параметр, який визначається за формулою

$$G = D_{ij} \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j}. \quad (2.12)$$

Параметр D_{ij} рівний

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \vartheta + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}, \quad (2.13)$$

де S_{ij} – тензор швидкостей деформації

$$S_{ij} = \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \vartheta_j}{\partial x_i}, \quad (2.14)$$

δ_{ij} – параметр, який рівний

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}. \quad (2.15)$$

Рівняння переносу турбулентної дисипації ε

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho g\varepsilon) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right) + C_1\frac{\varepsilon}{k}\mu_t G - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.16)$$

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 подрібнена сітка для розв'язку рівнянь математичної моделі. Адаптація розрахункової сітки дозволяє розраховувати деталі незначних розмірів геометрії шляхом подрібнення сітки.

Після закінчення розрахунку здійснювався візуальний аналіз тривимірних потоків у постпроцесорі Flow Vision. Постпроцесор Flow Vision дозволяє візуалізувати результати розрахунку наступними методами комп'ютерної графіки:

- побудова ізоліній;
- тонова заливка;
- побудова різноманітних графіків (двовимірний графік, графік уздовж кривої, графік уздовж кола);
- вектори;
- побудова ізоповерхні.

Результати розрахунку можна переглянути в будь-якому перерізі тривимірної моделі терморезисторного терморезисторне з'єднання. Перегляд може здійснюватись як під час розрахунку, так і після його закінчення.

За описаною вище методикою проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу довжиною $L = 4$ м, посередині якої встановлена терморезисторна муфта. Зовнішній діаметр поліетиленових труб приймаємо рівним $D_m = 40$ мм, товщину стінки $\delta_m = 3,5$ мм. Внутрішній діаметр терморезисторної муфти $d_m = 40$ мм. Зазор між поліетиленовими трубами в місці їх стикування $h = 5$ мм. Створено наступні типи граничних умов:

- стінка (задавався коефіцієнт шорсткості стінки поліетиленових труб);
- вхід (задавався тиск на вході $P_{\text{вх}} = 218950$ Па);
- вихід (задавалась вихідна стінка потоку).

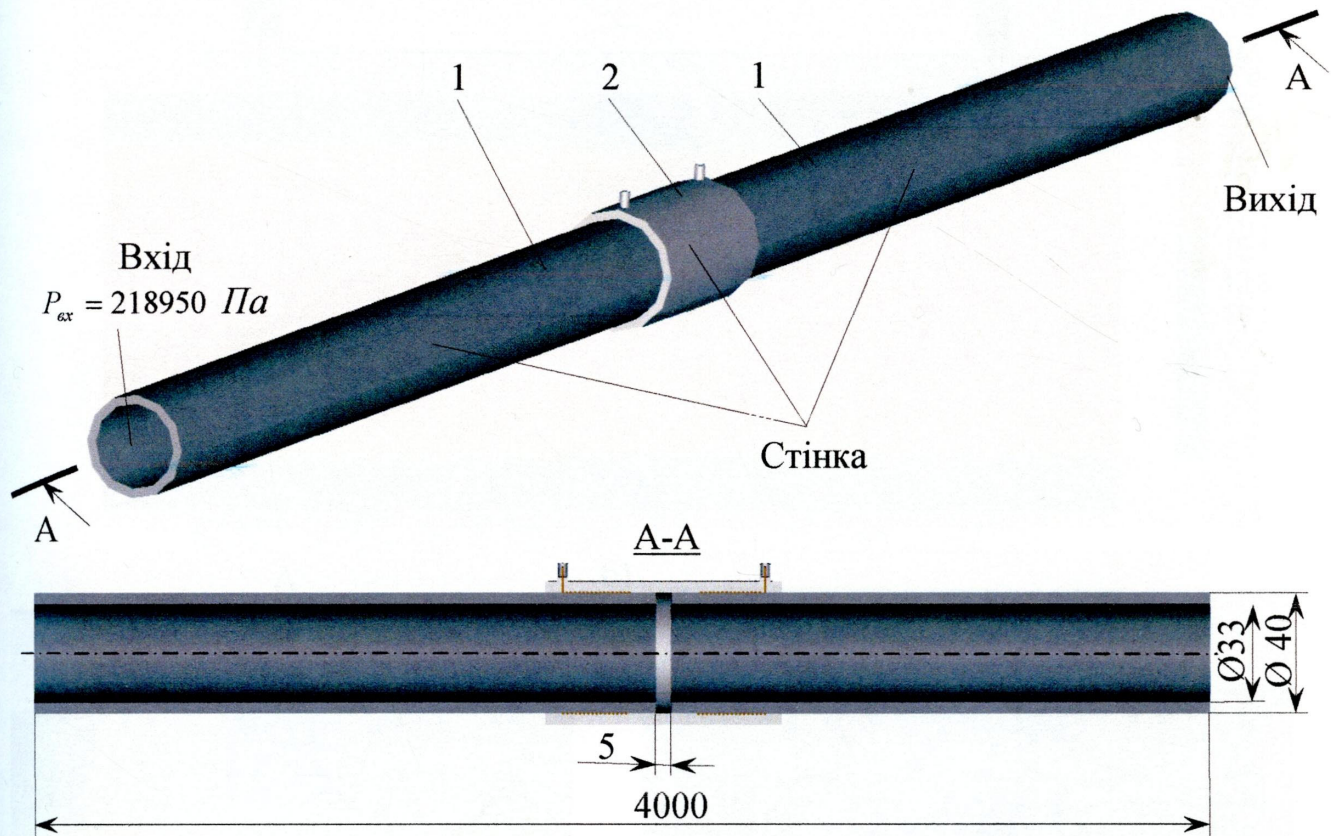


Рис. 2.1 Розрахункова схема терморезисторної муфти:

1 – поліетиленова труба; 2 – терморезисторна муфта

На рис. 2.1 наведено розрахункову схему терморезисторної муфти, де вказано геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі терморезисторної муфти та місця розкладання граничних умов.

Для аналізу зміни швидкості потоку газу вздовж трубопроводу в місці встановлення терморезисторної муфти візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості (рис. 2.2, а) та векторів швидкості потоку газу (рис. 2.2, б) в площині вертикального повздовжнього перерізу розрахункової моделі. Побудована тонова заливка дозволяє визначити числове значення швидкості газу (по модулю) в будь-якій точці площини перерізу. Вектори швидкості візуалізують векторне поле швидкостей. Напрямок вектора співпадає з напрямком швидкості в точці початку вектора.

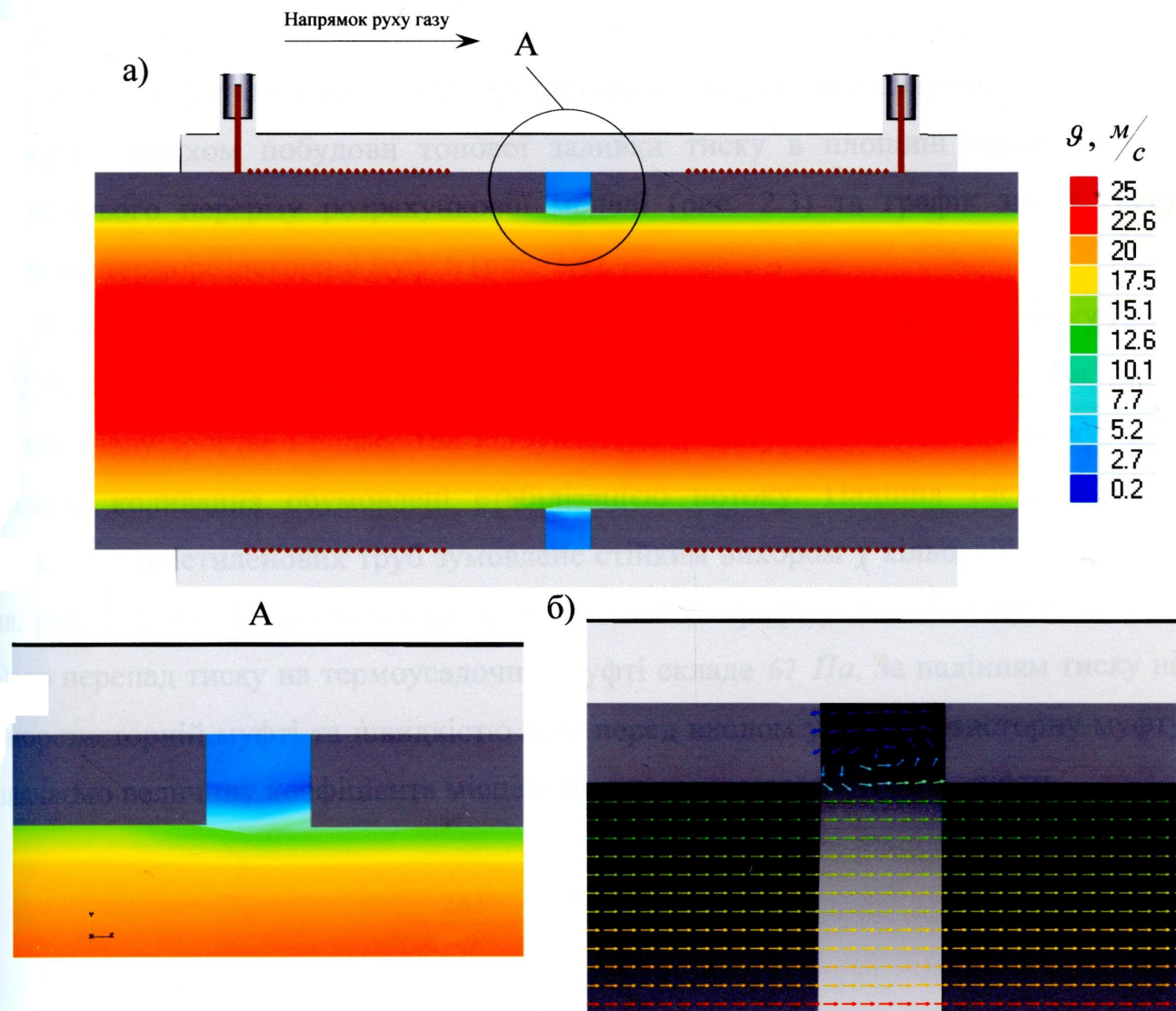


Рис. 2.2 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторної муфти:

а) розподіл модуля швидкості; б) вектори швидкості

Як видно з тонової заливки модуля швидкості (див. рис. 2.2, а), найбільша швидкість потоку газу спостерігається по осі потоку і складає 25 м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки відбувається значне падіння швидкості до 14,1 м/с. Такий розподіл швидкості характерний для турбулентних течій. У кільцевій порожнині в місці стикування поліетиленових труб газ гальмується і створює стійкий вихор із реверсним рухом газу (див. рис. 2.2, б), що призводить до зменшення швидкості газу біля стінки за кільцевою порожниною до 12,5 м/с (див. рис. 2.2, а).

Для аналізу розподілу тиску вздовж трубопроводу та визначення перепаду тиску в місці установа терморезисторної муфти візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу розрахункової моделі (рис. 2.3) та графік зміни тиску вздовж осі терморезисторної муфти (рис. 2.4).

Як видно з тонової заливки тиску (див. рис. 2.3) та графіка зміни тиску (див. рис. 3.4), в місці стикування поліетиленових труб тиск різко падає на 307 Па, після чого він знову зростає і падає. Так відбувається до затухання коливань тиску. Такі затухаючі коливання обумовлені стабілізацією потоку. Падіння тиску в місці стикування поліетиленових труб зумовлене стійким вихором у кільцевій порожнині (див. рис. 2.2, б). Якщо продовжити прямі лінії на графіку зміни тиску (див. рис. 2.4), то перепад тиску на термоусадочній муфті складе 67 Па. За падінням тиску на терморезисторній муфті та швидкістю газу перед входом у терморезисторну муфту визначаємо величину коефіцієнта місцевого опору терморезисторної муфти

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} = \frac{2 \cdot 67}{0,757 \cdot 25^2} = 0,282, \quad (2.17)$$

де ΔP – перепад тиску на терморезисторній муфті; v – швидкість потоку газу перед терморезисторною муфтою; ρ – густина газу.

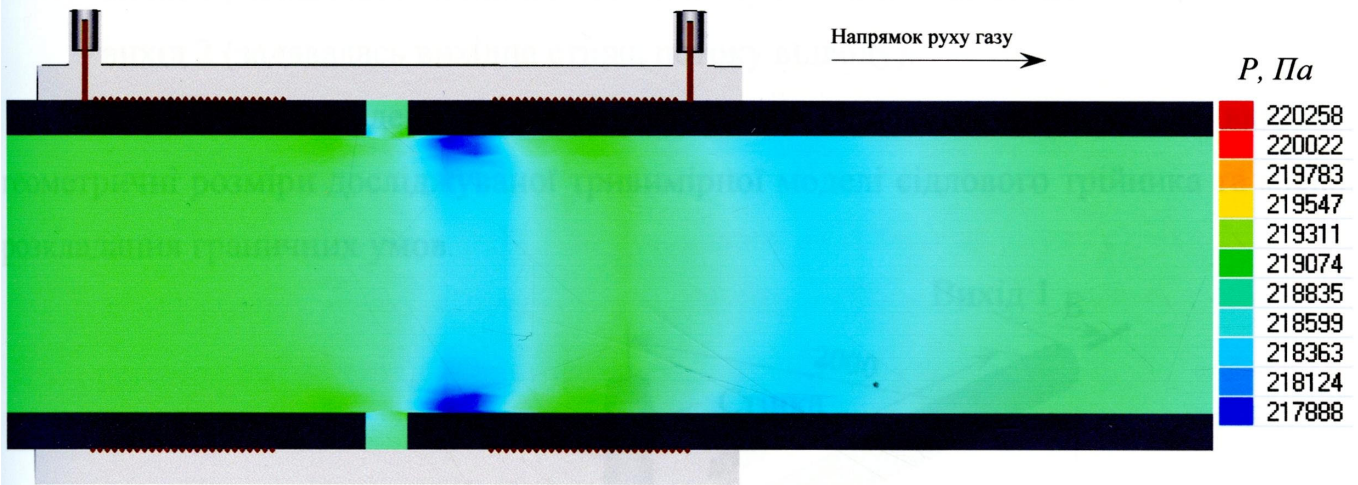


Рис. 2.3 Розподіл тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторної муфти

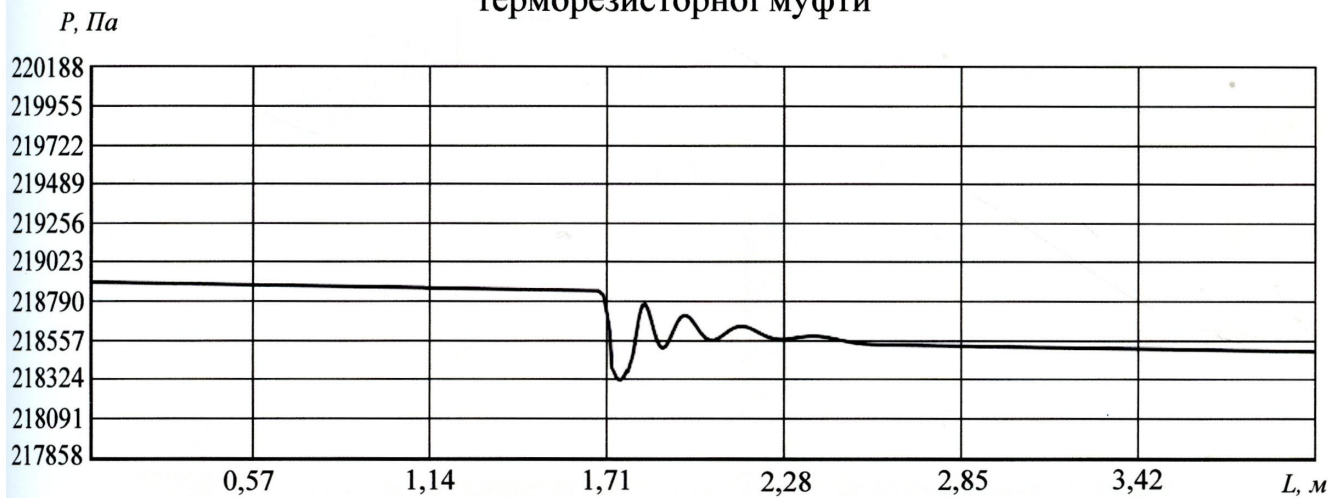


Рис. 2.4 Зміна тиску газу вздовж повздовжньої осі терморезисторної муфти

Проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу довжиною $L = 4$ м, по середині якої встановлений сідловий трійник із відводом поліетиленового трубопроводу довжиною $L_B = 2$ м. Зовнішній діаметр труб основної магістралі $D_m = 40$ мм, товщина стінки $\delta_m = 3,5$ мм. Зовнішній діаметр труб відводу $D_s = 32$ мм, товщина стінки $\delta_s = 3,5$ мм.

Створено наступні типи граничних умов:

- стінка (задавався коефіцієнт шорсткості стінки поліетиленових труб);
- вхід (задавався тиск на вході $P_{ex} = 221100$ Па);

- вихід 1 (задавалась вихідна стінка потоку основної магістралі);
- вихід 2 (задавалась вихідна стінка потоку відводу).

На рис. 2.5 наведено розрахункову схему сідлового трійника, де вказано геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі сідлового трійника та місця розкладання граничних умов.

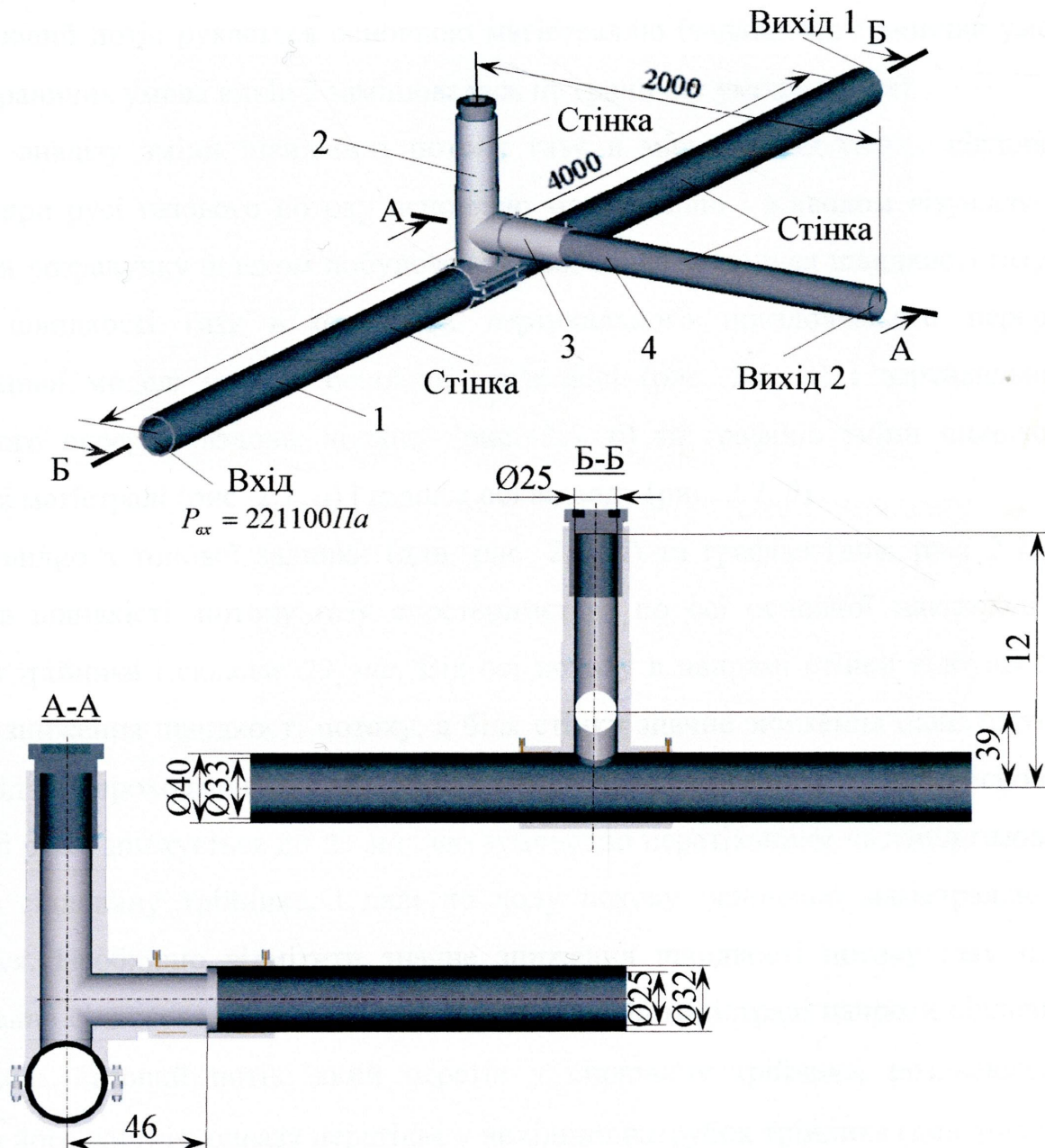


Рис. 2.5 Розрахункова схема сідлового трійника:

1– основна магістраль; 2– сідловий трійник; 3– термоусадочна муфта; 4 – відвід

Проведемо моделювання трьох варіантів руху газового потоку:

- газовий потік рухається основною магістраллю і відводом (задавались граничні умови: вихід 1 та вихід 2);
- газовий потік рухається відводом сідлового трійника (задавалась гранична умова вихід 2. Гранична умова вихід 1 замінювалась на граничну умову стінка);
- газовий потік рухається основною магістраллю (задавалась гранична умова вихід 1. Гранична умова вихід 2 замінювалась на граничну умову стінка).

Для аналізу зміни швидкості потоку газу в місці встановлення сідлового трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу та векторів швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього перерізу розрахункової моделі вздовж основної магістралі (рис. 2.6, а) і вертикального поперечного перерізу вздовж відводу (рис. 2.6, б) та графіків зміни швидкості вздовж осі магістралі (рис. 2.7, а) і вздовж осі відводу (рис. 2.7, б).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.6, а) та графіка (див. рис. 2.7, а), найбільша швидкість потоку газу спостерігається по осі основної магістралі до сідлового трійника і складає 29 м/с . Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до 19 м/с . Під час проходження сідловим трійником швидкість потоку газу в основній магістралі різко знижується до 23 м/с , що зумовлено перетіканням частини газового потоку в сідловину трійника, і далі по ходу потоку основною магістраллю не змінюється. Необхідно відмітити значне зниження швидкості потоку газу після проходження сідлового трійника біля стінки основної магістралі напроти сідловини до $17,5 \text{ м/с}$. Газовий потік, який перетікає у сідловину трійника, роздвоюється. Незначна його частина одразу перетікає у вихідний патрубок трійника (див. рис. 2.6, б), а більша частина з швидкістю біля 26 м/с рухається вздовж стінки сідловини від основної магістралі до заглушки, біля якої відбувається зниження швидкості газового потоку до 4 м/с і його закручування (див. рис. 2.6, а). Після чого потік рухається сідловиною в реверсному напрямку та перетікає у відвід трійника. Реверсний рух потоку сідловиною суттєво зменшує прохідний переріз на вході газу

в сідловину з основної магістралі, що суттєво підвищує гідравлічний опір сідлового трійника.

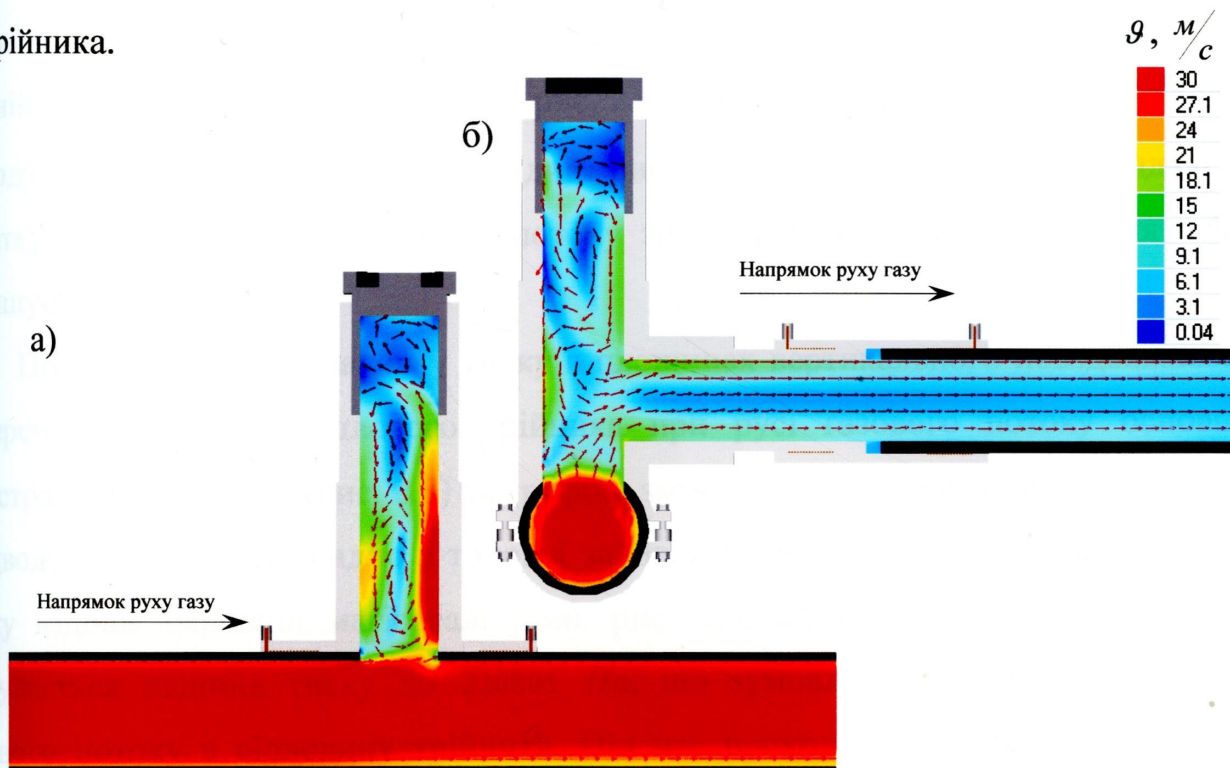


Рис. 2.6 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом:
а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

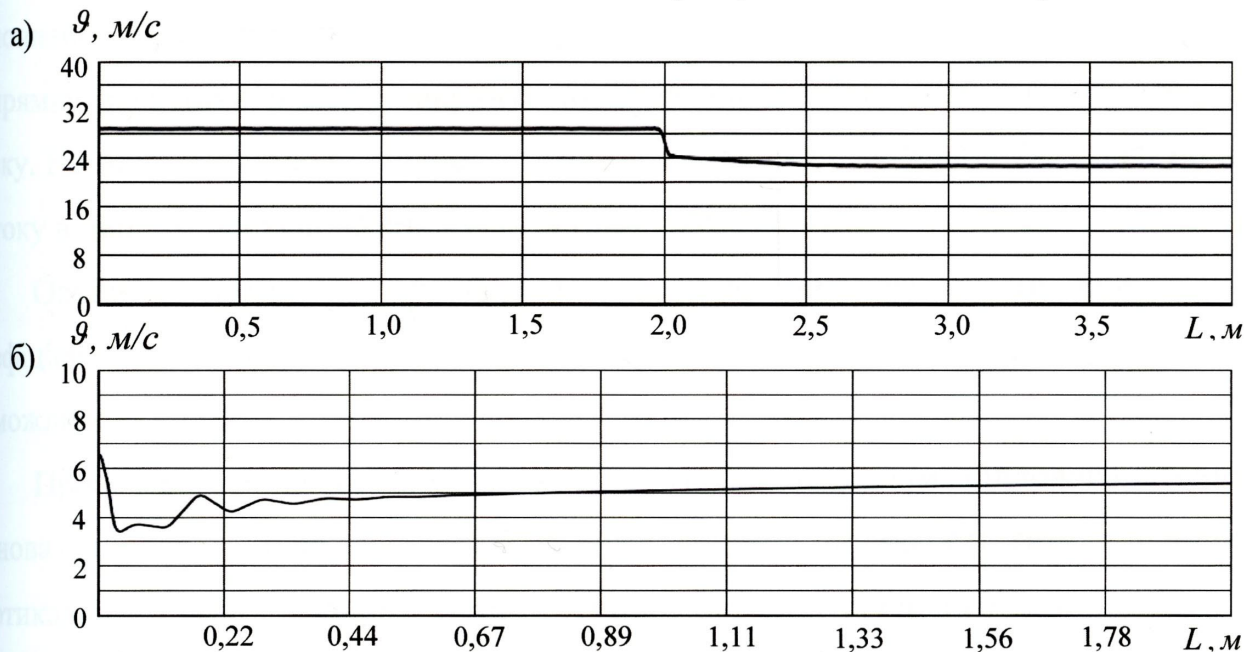


Рис. 2.7 Зміна швидкості потоку газу при його русі основною магістраллю і відводом сідлового трійника:
а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

Такий рух потоків призводить до нехарактерного для турбулентних течій збільшення швидкості потоку газу на початку відводу біля стінок у верхній та нижній його частинах до $9,6 \text{ м/с}$ (див. рис. 2.6, б) і пониження швидкості на початку відводу вздовж його осі до 3 м/с (див. рис. 2.7, б). Із збільшенням віддалі від початку відводу швидкість по осі потоку збільшується до 6 м/с , а біля стінок зменшується.

Побудуємо тонову заливку тиску в площинах вертикального повздовжнього і поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом (рис. 2.8) та графіки зміни тиску вздовж основної магістралі і відводу (рис. 2.9). Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.8, а) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 2.9, а), перед сідловим трійником відбувається падіння тиску до 220805 Па , що зумовлено перетіканням частини газового потоку в сідловину трійника. Під час проходження сідловим трійником тиск в основній магістралі різко збільшується до 220975 Па і далі по ходу потоку основною магістраллю поступово зменшується. У сідловині в напрямку заглушки до вихідного патрубка трійника відбувається падіння тиску до 220258 Па , що зумовлено реверсним рухом газу сідловиною, а після вихідного патрубка в напрямку заглушки в місці закручування газового потоку відбувається зростання тиску. На початку відводу сідлового трійника тиск складає 220371 Па і далі по ходу потоку відводом поступово знижується (див. рис. 2.9, б).

Оскільки потік газу рухається основною магістраллю та відводом, то коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника в даному випадку визначити неможливо.

Проведемо моделювання руху газу тільки відводом сідлового трійника. Тонові заливка модуля швидкості газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки відводом сідлового трійника наведена на рис. 2.10, а графіки зміни швидкості вздовж осі магістралі і відводу на рис. 2.11.

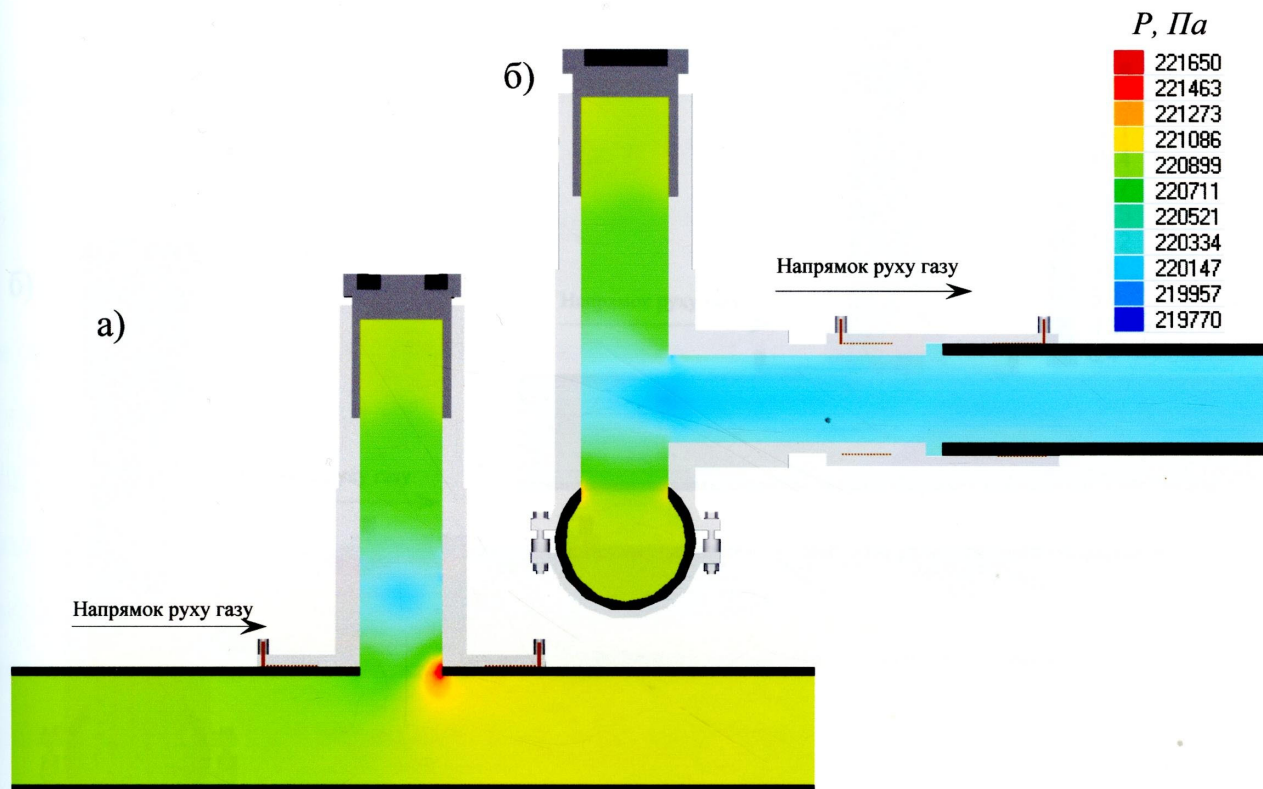


Рис. 2.8 Розподіл тиску в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

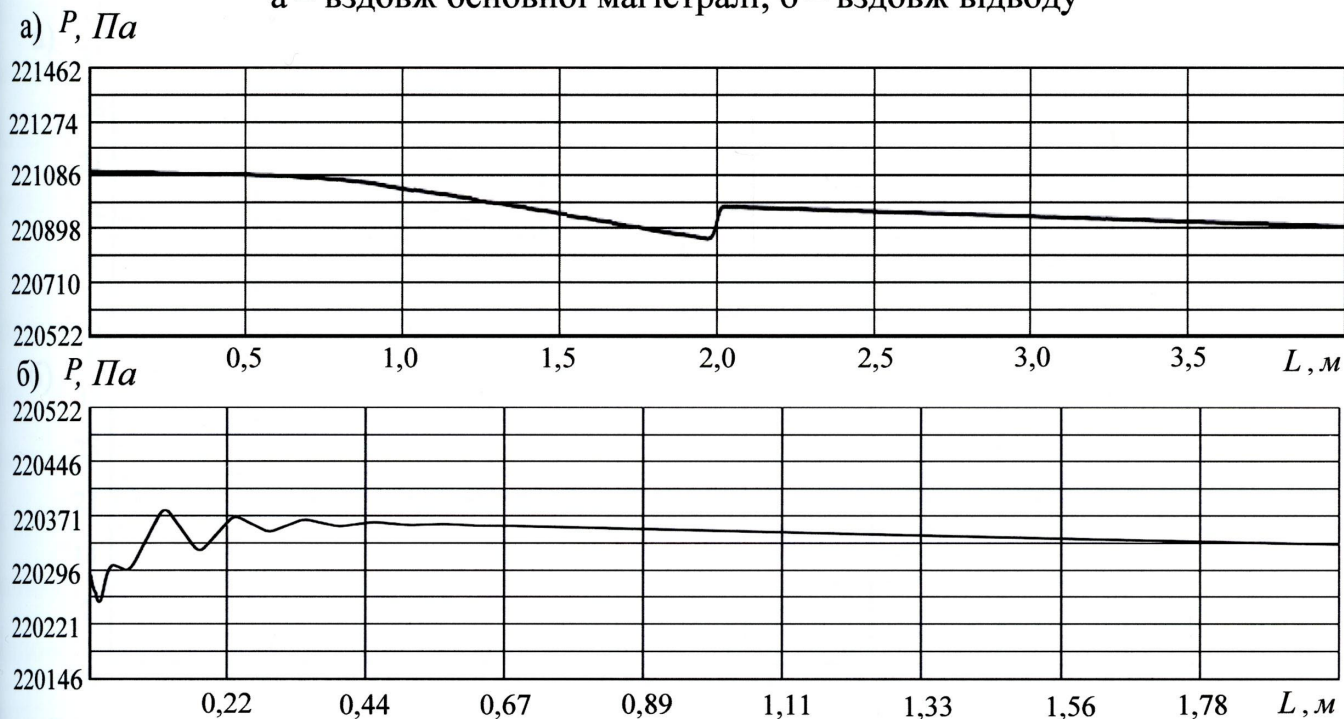


Рис. 2.9 Зміна тиску газу при русі газового потоку основною магістраллю і відводом сідлового трійника:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

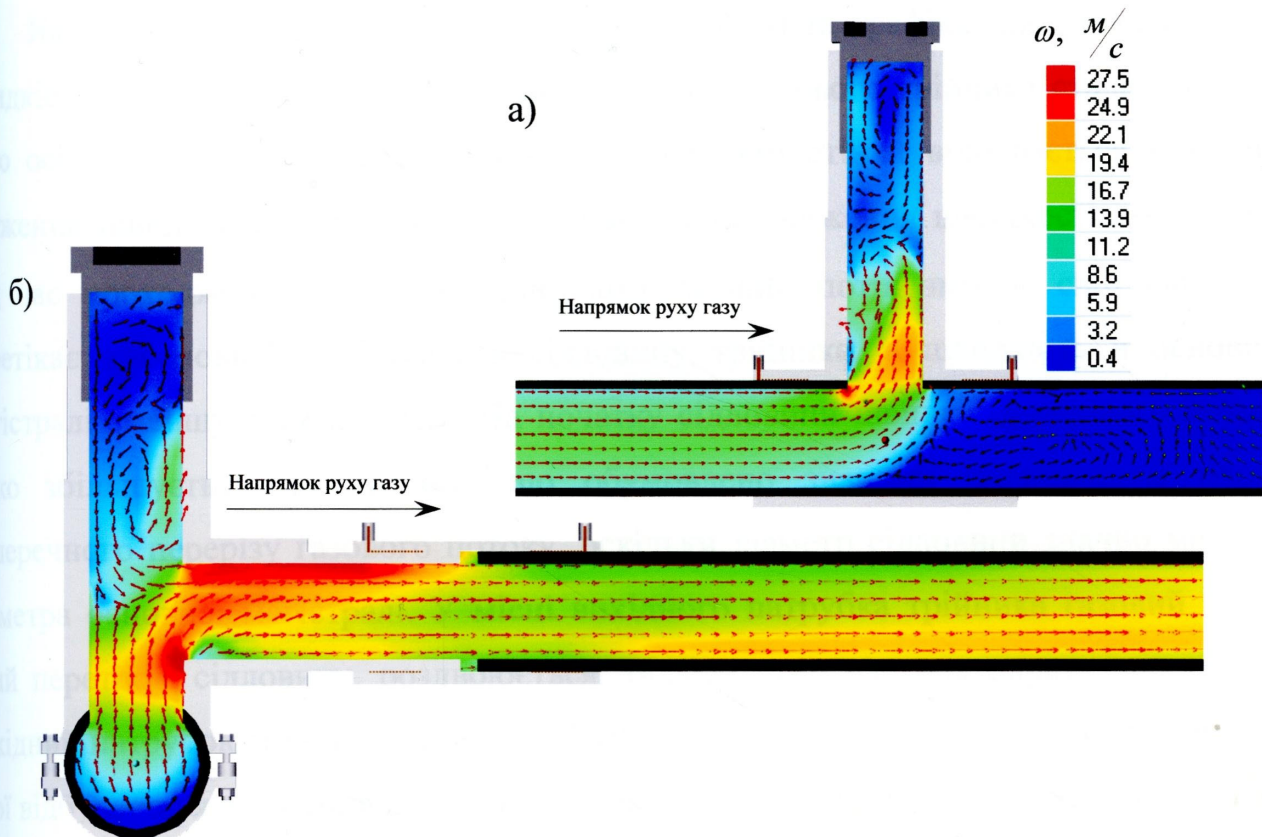


Рис. 2.10 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки відводом сідлового трійника:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

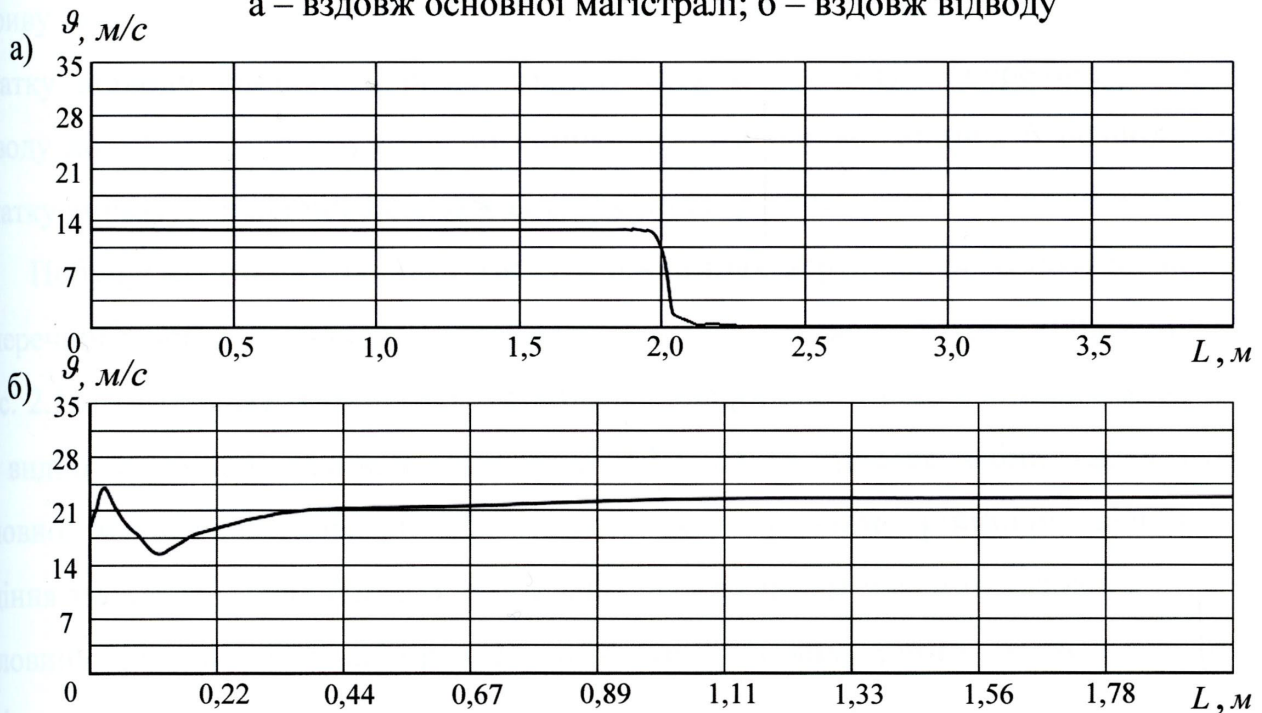


Рис. 2.11 Зміна швидкості потоку газу при його русі тільки відводом сідлового трійника:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.10, *a*) та графіка (див. рис. 2.11, *a*), швидкість потоку газу в основній магістралі до сідлового трійника стала і вздовж його осі складає 12 м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до 7,5 м/с. Під час проходження сідловим трійником газовий потік змінює свій напрям і перетікає з основної магістралі в сідловину трійника, а швидкість в основній магістралі зменшується до нуля. На початку сідловини швидкість газового потоку різко збільшується до 22 м/с, що обумовлено значним зменшенням площі поперечного перерізу газового потоку, оскільки діаметр сідловини значно менший діаметра основної магістралі. У місці вихідного патрубку трійника газовий потік, який перетік в сідловину, роздвоюється. Більша його частина одразу перетікає у вихідний патрубок трійника (див. рис. 2.10, *b*), а менша рухається до заглушки, біля якої відбувається зниження швидкості газового потоку до 2 м/с і його закручування. Після чого потік рухається сідловиною в реверсному напрямку та перетікає у вихідний відвід трійника. Такий рух потоків призводить до збільшення швидкості потоку газу на початку відводу біля верхньої стінки 26 м/с і пониження швидкості та відриву потоку біля нижньої стінки (див. рис. 2.10, *b*). Із збільшенням віддалі від початку відводу швидкість різко зменшується по усьому поперечному перерізу відводу до 14 м/с, що обумовлено вищеописаним нерівномірним її розподілом на початку відводу. Після чого вздовж відводу вона зростає до 20 м/с і стабілізується.

Побудуємо тонову заливку тиску в площинах вертикального повздовжнього і поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки відводом (рис. 2.12) та графіки зміни тиску вздовж основної магістралі і відводу (рис. 2.13). Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.12, *a*) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 2.13, *a*), перед сідловим трійником відбувається падіння тиску до 218000 Па, що зумовлено перетіканням частини газового потоку в сідловину трійника. Під час проходження газу сідловим трійником тиск в основній магістралі різко збільшується до 218346 Па і далі вздовж основної магістралі є сталим. За сідловин трійником у основній магістралі утворюється застійна зона високого тиску.

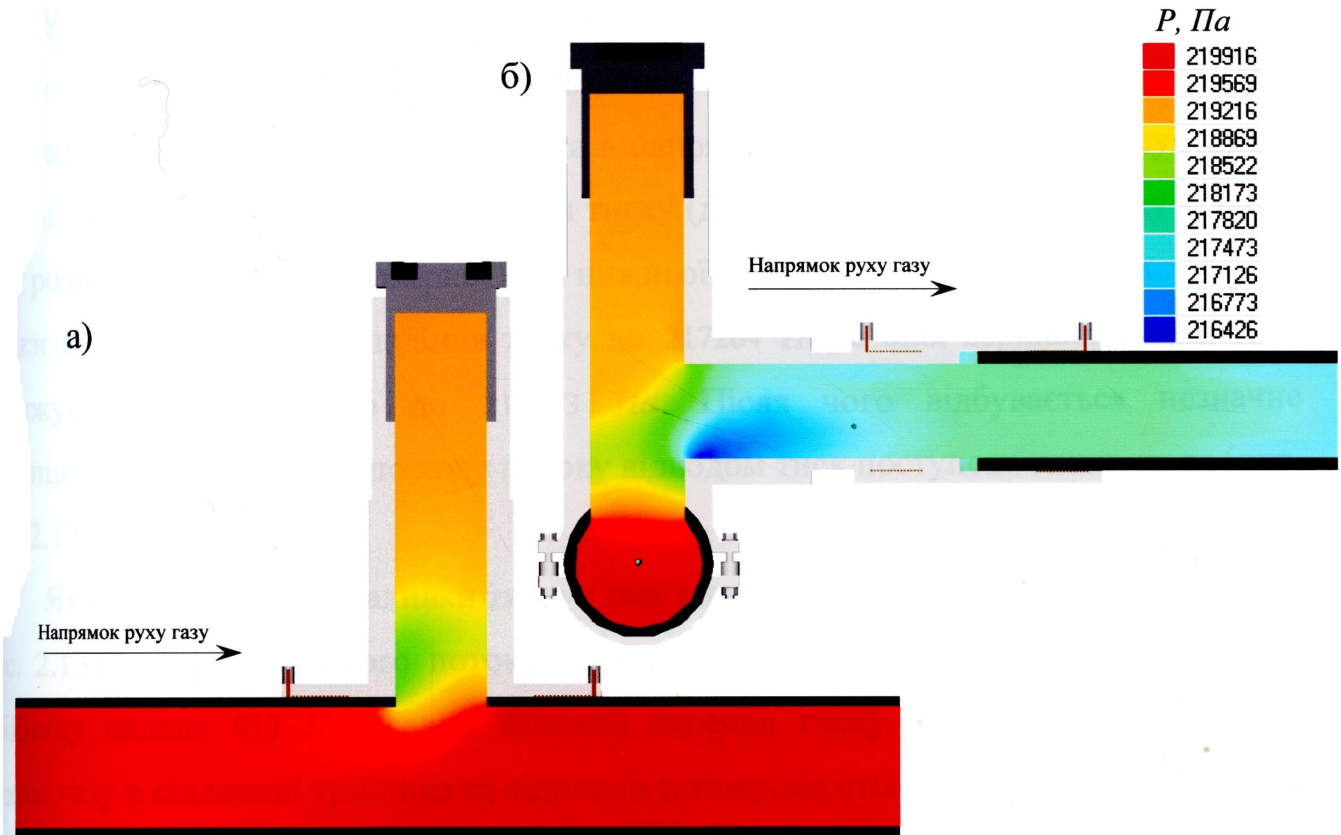


Рис. 2.12 Розподіл тиску в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки відводом:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

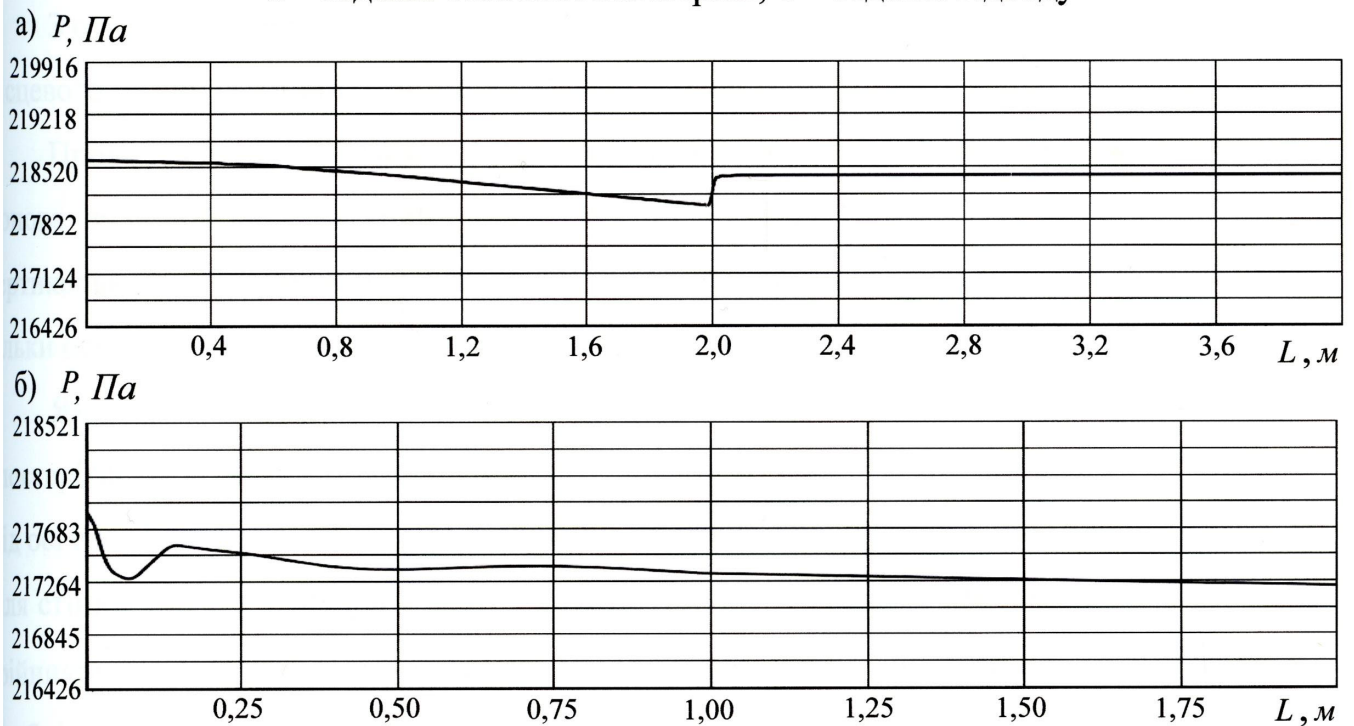


Рис. 2.13 Зміна тиску газу при русі газового потоку тільки відводом сідлового трійника:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

У сідловині в напрямку заглушки до вихідного патрубка трійника відбувається значне падіння тиску до 217822 Па , що зумовлено реверсним рухом газу сідловиною, а після вихідного патрубка в напрямку заглушки в місці закручування газового потоку відбувається зростання тиску (див. рис. 2.12, б). На початку відводу тиск розподіляється нерівномірно. Біля нижньої стінки в місці відривання потоку від стінки відбувається різке падіння тиску до 217264 Па , а біля верхньої стінки тиск понижується менш різко до 217473 Па . Після чого відбувається незначне підвищення тиску, а далі по ходу потоку відводом тиск поступово знижується (див. рис. 2.13, б).

Як видно з тонової заливки тиску (див. рис. 2.12) та графіків зміни тиску (див. рис. 2.13) при русі газового потоку тільки відводом перепад тиску на сідловому трійнику складе 910 Па . Такий великий перепад тиску обумовлений реверсним рухом газу в сідловині трійника та відривом потоку від стінки на початку відводу. За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у сідловий трійник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника, який при русі газового потоку тільки відводом трійника складає $26,1$.

З отриманих даних видно, що зі збільшення швидкості течії потоку коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника зменшується.

Проведемо моделювання руху газу тільки основною магістраллю трійника. Тонові заливки модуля швидкості газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю сідлового трійника наведено на рис. 2.14.

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.14), найбільша швидкість потоку газу спостерігається по осі основної магістралі до сідлового трійника і складає 24 м/с . Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до $16,4 \text{ м/с}$. Під час проходження сідловим трійником швидкість потоку газу в основній магістралі практично не змінюється. Необхідно відмітити значне зниження швидкості потоку газу після проходження сідлового трійника біля верхньої стінки основної магістралі зі сторони сідловини до 12 м/с .

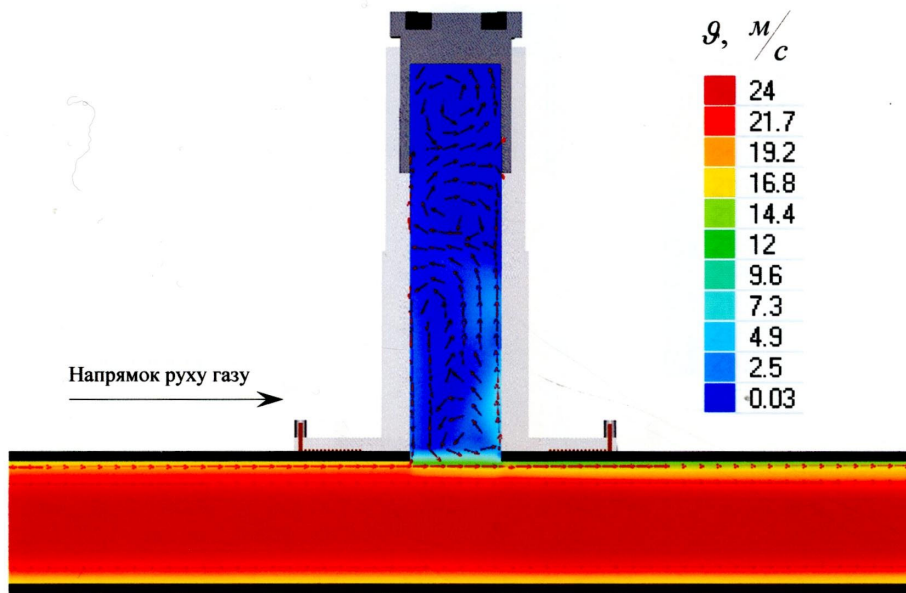


Рис. 2.14 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю

Побудуємо тонову заливку тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю (рис. 2.15) та графік зміни тиску вздовж основної магістралі (рис. 2.16).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.15) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 2.16), після проходження сідловини трійника відбувається падіння тиску від 218374 Па до 218339 Па , а отже перепад тиску на сідловому трійнику складає 208 Па . За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у сідловий трійник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника. Для наведеного випадку при русі газового потоку тільки основною магістраллю він складає $\zeta = 0,15$. У сідловині та відводі сідлового трійника утворюється застійна зона підвищеного тиску.

Проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу довжиною $L = 4 \text{ м}$, по середині якої встановлено терморезисторне коліно. Зовнішній діаметр поліетиленових труб $D_m = 40 \text{ мм}$, товщина стінки $\delta_m = 3,5 \text{ мм}$. Внутрішній діаметр коліна $d_k = 40 \text{ мм}$.

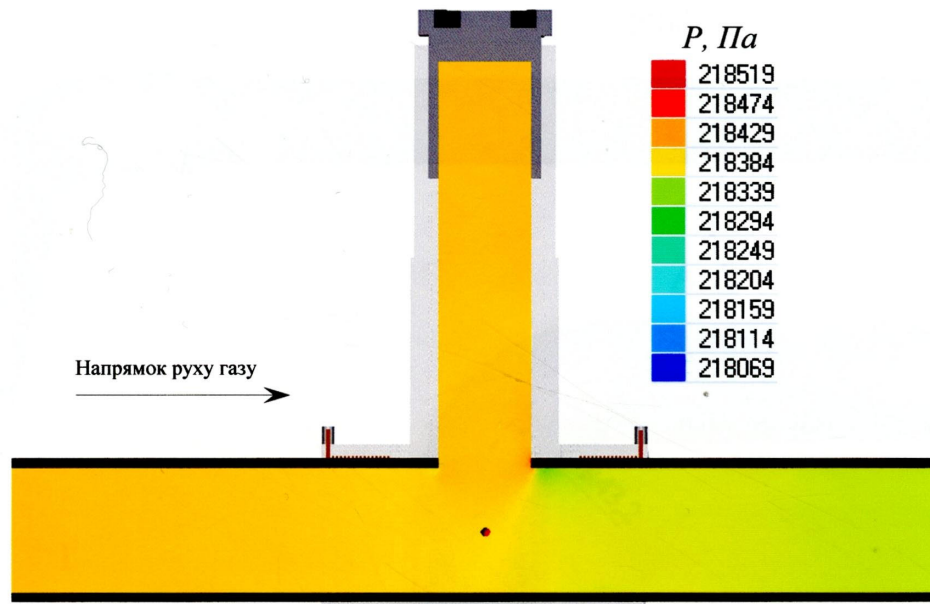


Рис. 2.15 Розподіл тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу сідлового трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю

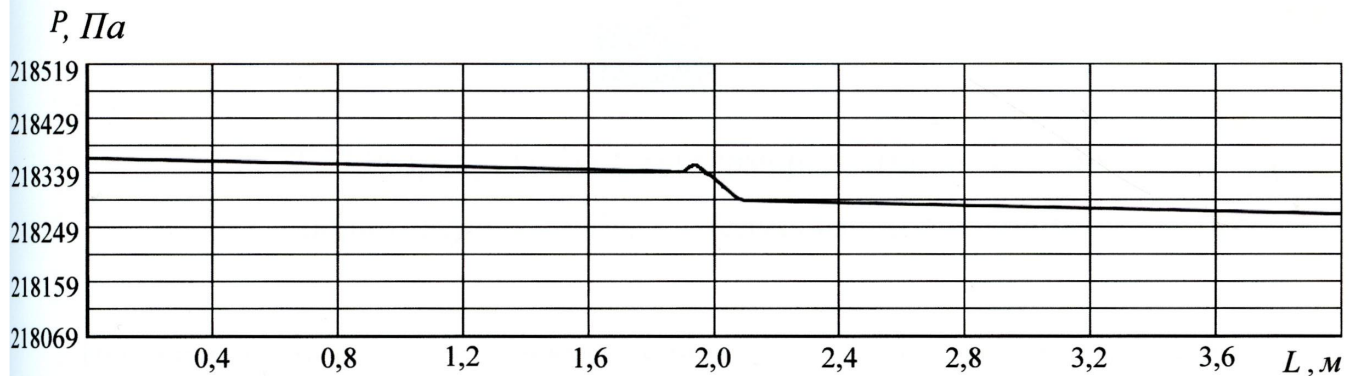


Рис. 2.16 Зміна тиску газу при русі газового потоку тільки основною магістраллю сідлового трійника

Створено наступні типи граничних умов:

- стінка (задавався коефіцієнт шорсткості стінки поліетиленових труб);
- вхід (задавався тиск на вході $P_{вх} = 222120$ Па);
- вихід (задавалась вихідна стінка потоку).

На рис. 2.17 наведено розрахункову схему терморезисторного коліна, де вказано геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі коліна та місця розкладання граничних умов.

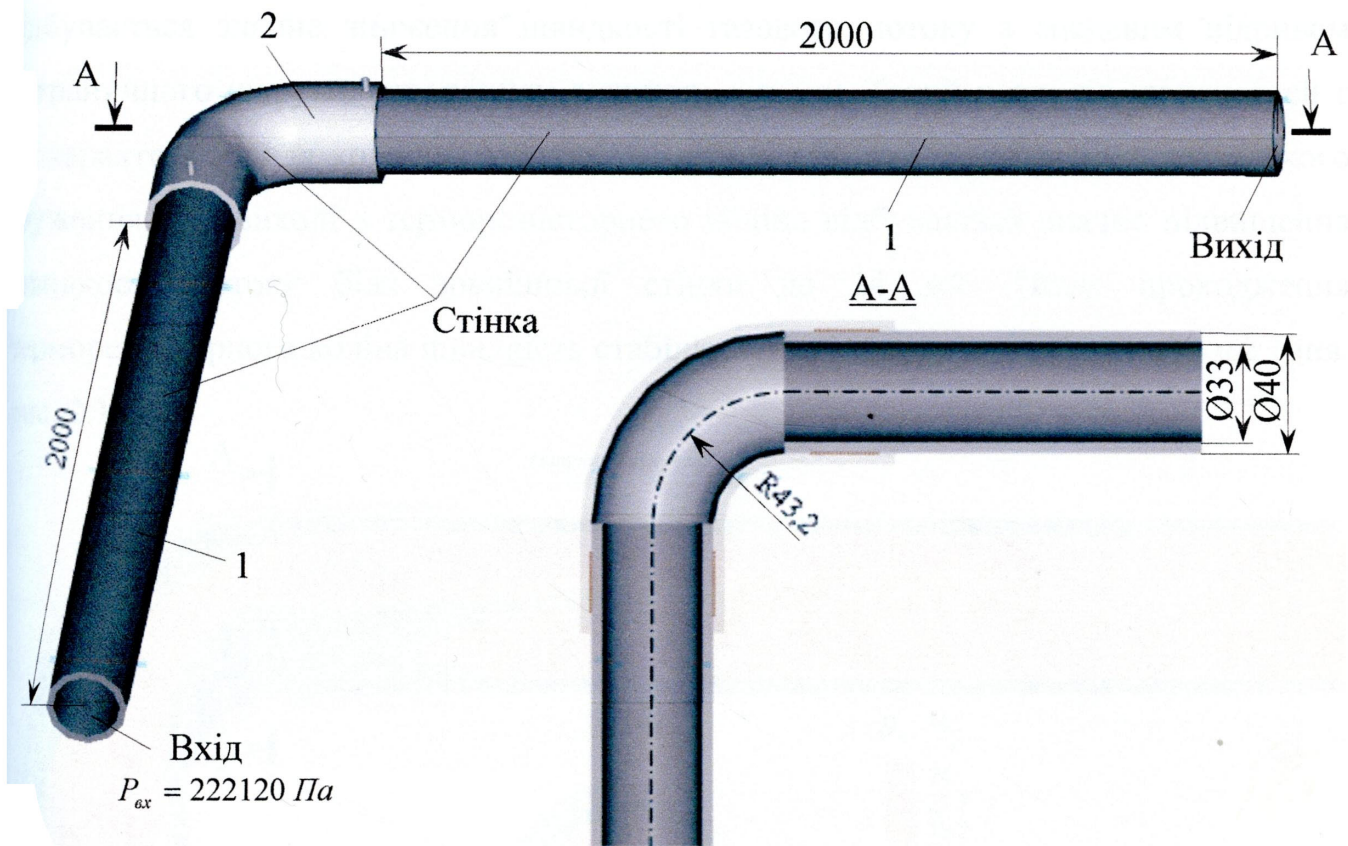


Рис. 2.17 Розрахункова схема терморезисторного коліна:

1 – поліетиленова труба; 2 – терморезисторне коліно

Візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу і векторів швидкості газу в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна (рис. 2.18) та графіка зміни швидкості вздовж його осі (рис. 2.19).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.18) та графіка (див. рис. 2.19), найбільша швидкість потоку газу спостерігається до терморезисторного коліна вздовж осі потоку і складає 22 м/с . Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до 12 м/с . Під час проходження терморезисторним коліном після різкого розширення відбувається значне зменшення швидкості потоку (біля стінок до $2,5 \text{ м/с}$). У місці різкого розширення біля зовнішньої стінки [39, 51, 122, 187] терморезисторного коліна утворюється стійкий вихор. По середині коліна від його осі до зовнішньої стінки відбувається зниження швидкості потоку газу, а біля внутрішньої стінки

відбувається значне зниження швидкості газового потоку з місцевим відривом пограничного шару та утворенням значного вихору. Такий розподіл швидкостей є не характерним для коліна і зумовлений наявністю різкого розширення та різкого звуження. На виході з терморезисторного коліна відбувається значне підвищення швидкості потоку біля зовнішньої стінки до 24 м/с. Після проходження терморезисторного коліна швидкість стабілізується і вздовж осі складає 20 м/с (див. рис. 2.19).

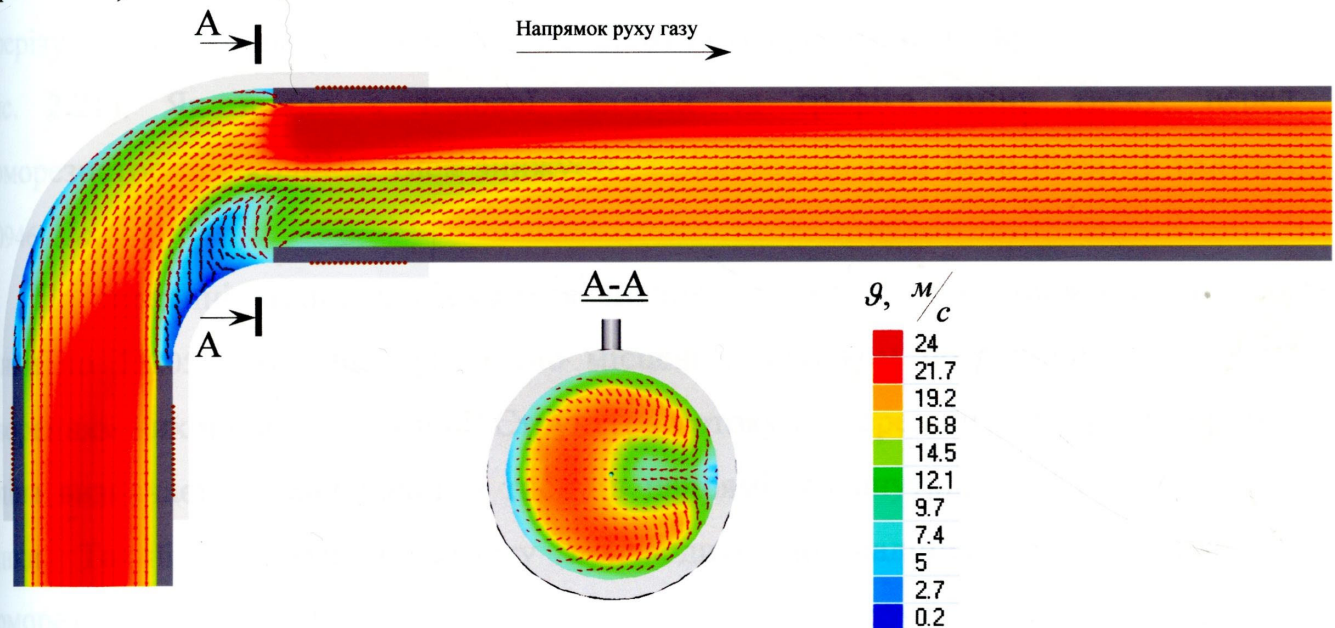


Рис. 2.18 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна

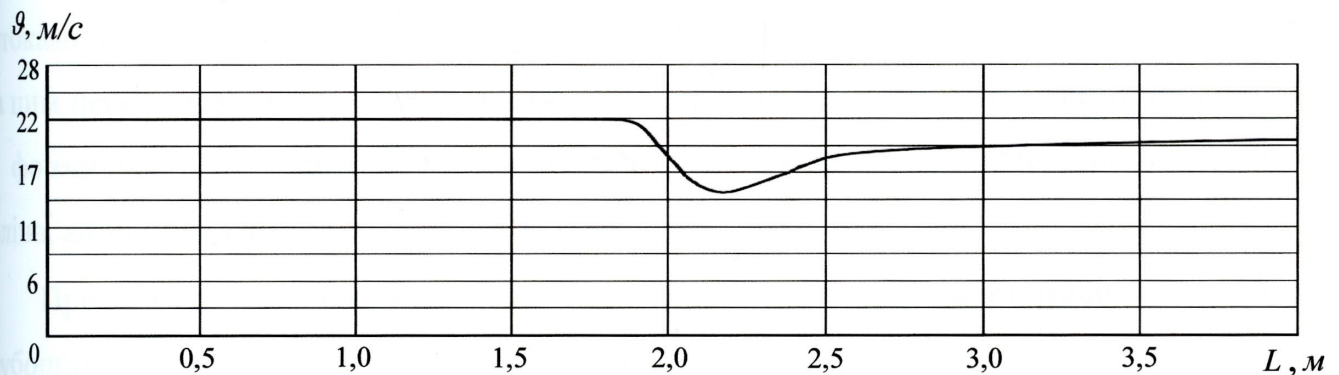


Рис. 2.19 Зміна швидкості потоку газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна

При русі потоку коліном внаслідок викривлення течії з'являються відцентрові сили, які направлені від центру кривизни до зовнішньої стінки труби. Цим

зумовлюється підвищення тиску біля зовнішньої стінки та зниження його біля внутрішньої при переході потоку з прямолінійної ділянки до вигнутої. Тому швидкість потоку відповідно буде менше біля зовнішньої стінки і більше біля внутрішньої. Таким чином, біля зовнішньої стінки виникає дифузорний ефект, а поблизу внутрішньої – конфузорний. Після повороту спостерігається зворотне явище.

Побудуємо тонову заливку тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна (рис. 2.20) та графік зміни тиску вздовж його осі (рис. 2.21). Як видно з тонової заливки та графіка зміни тиску, перед терморезисторним коліном тиск знижується рівномірно і на його початку складає 220946 *Па*.

По середині коліна відбувається значне зниження тиску біля внутрішньої стінки до 2220516 *Па*, що зумовлено місцевим відривом пограничного шару та утворенням вихору в цьому місці. Структура потоку по середині терморезисторного коліна визначається збільшенням тиску в напрямі від внутрішньої до зовнішньої стінки. Такий перерозподіл тиску призводить до падіння тиску на виході терморезисторного коліна до 220086 *Па*. Перепад тиску на терморезисторному коліні складає 385 *Па*. Основна частина втрат тиску у терморезисторному коліні викликається вихороутворенням біля внутрішньої стінки, яке разом із вторинними потоками визначає в основному і характер розподілу швидкостей за коліном.

За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у терморезисторне коліно за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору терморезисторного коліна, який складає $\zeta = 2,1$.

Проведемо моделювання руху природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу довжиною $L = 4$ м, по середині якої встановлено терморезисторний редуційний перехідник. Терморезисторний редуційний перехідник забезпечує перехід із поліетиленових труб зовнішнім діаметром $D_{m1} = 40$ мм та товщиною стінки $\delta_{m1} = 3,5$ мм на поліетиленові труби зовнішнім діаметром $D_{m2} = 25$ мм та товщиною стінки $\delta_{m2} = 3,5$ мм. Довжина конфузора терморезисторного редуційного перехідника складає $l = 22$ мм.

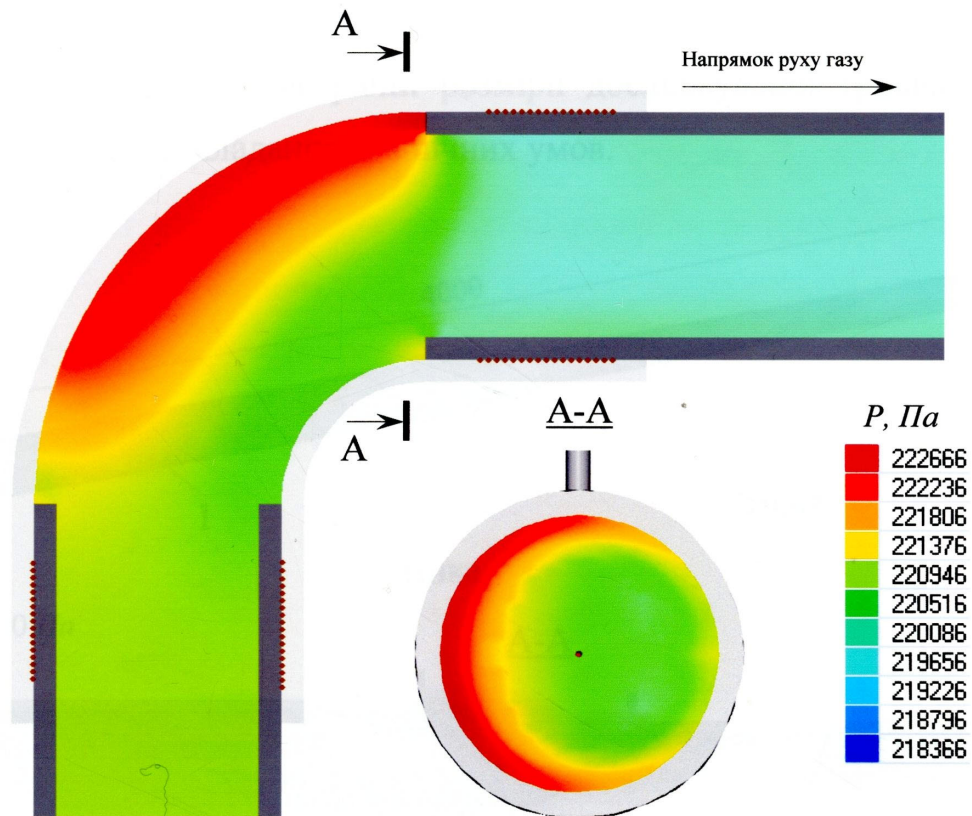


Рис. 2.20 Розподіл тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна

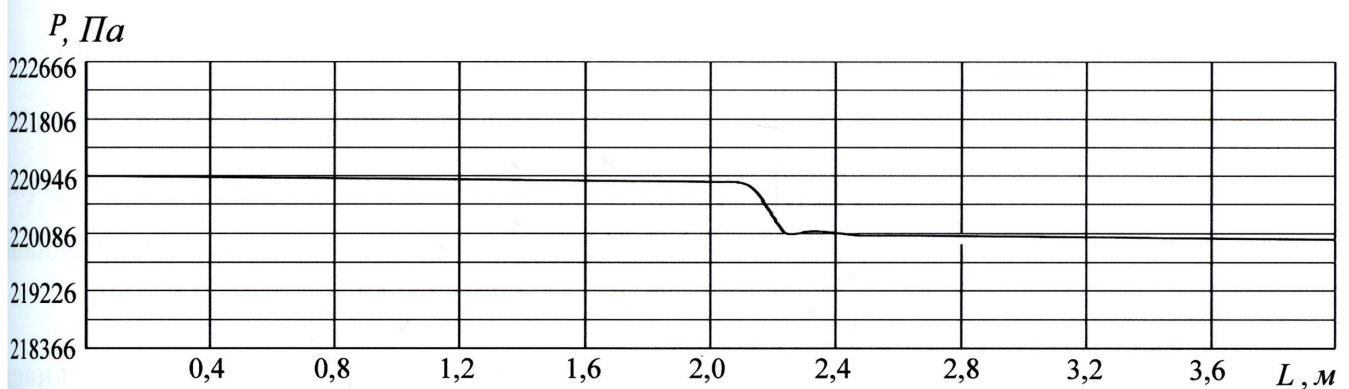


Рис. 2.21 Зміна тиску газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна

Створено наступні типи граничних умов:

- стінка (задавався коефіцієнт шорсткості стінки поліетиленових труб);
- вхід (задавався тиск на вході $P_{\text{вх}} = 210100 \text{ Па}$);
- вихід (задавалась вихідна стінка потоку).

На рис. 2.22 наведено розрахункову схему терморезисторного редуційного перехідника, де вказано геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі перехідника та місця розкладання граничних умов.

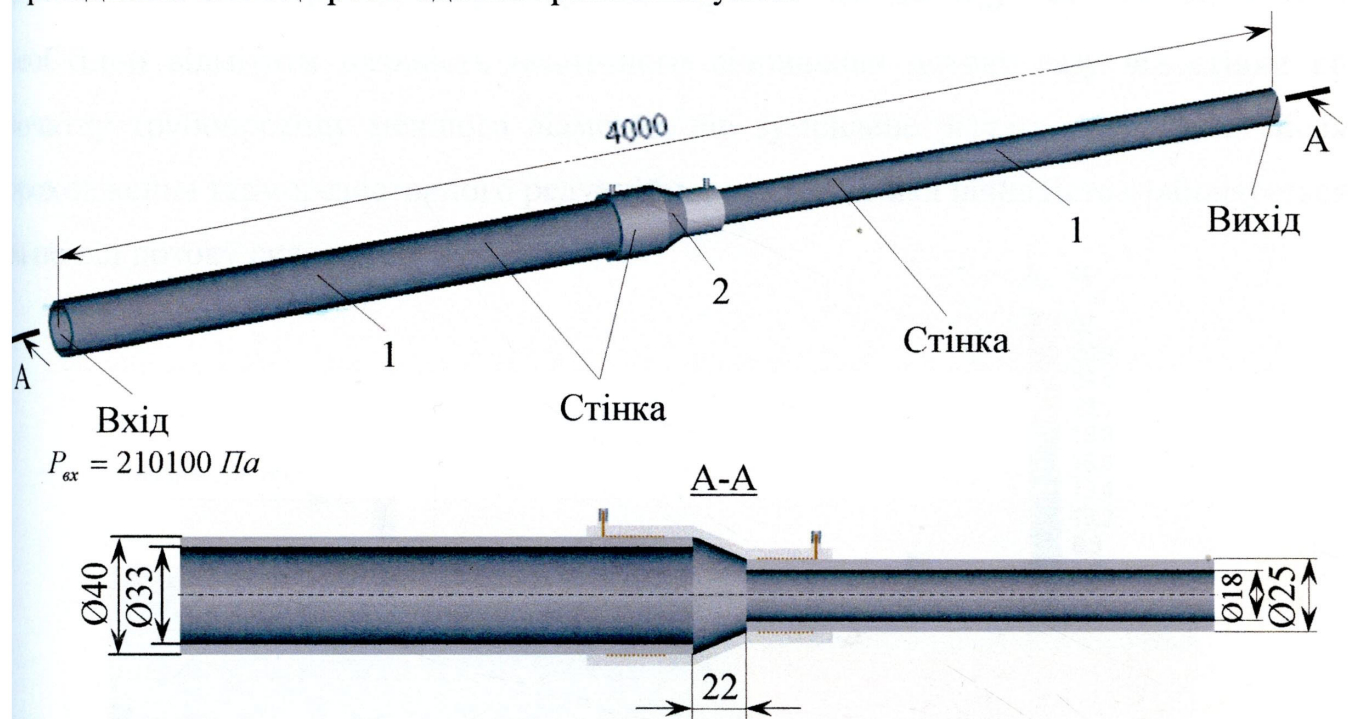


Рис. 2.22 Розрахункова схема терморезисторного редуційного перехідника:

1 – поліетиленова труба; 2 – терморезисторний редуційний перехідник

Візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу і векторів швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного перехідника (рис. 2.23) та графіка зміни швидкості вздовж його осі (рис. 2.24).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.23) та графіка (див. рис. 2.24), швидкість потоку газу до терморезисторного редуційного перехідника вздовж осі поліетиленової труби більшого діаметра складає 9 м/с.

Від осі в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до 4 м/с. Під час проходження терморезисторного редуційного перехідника в місці різкого розширення утворюється стійкий вихор, який зумовлює зниження швидкості потоку газу біля стінок конфузора терморезисторного редуційного перехідника. Від середини конфузурної частини терморезисторного редуційного перехідника починається

різке збільшення швидкості потоку газу до 79 м/с на виході терморезисторного редуційного перехідника. Таке різке збільшення швидкості обумовлене зменшенням діаметра трубопроводу від $D_{m1} = 40 \text{ мм}$ до $D_{m2} = 25 \text{ мм}$. Крім того необхідно відмітити наявність незначного відривання потоку газу від стінки на початку трубопроводу меншого діаметра, що зумовлене різким звуженням. Після проходження терморезисторного редуційного перехідника швидкість стабілізується та по осі потоку складає 30 м/с .

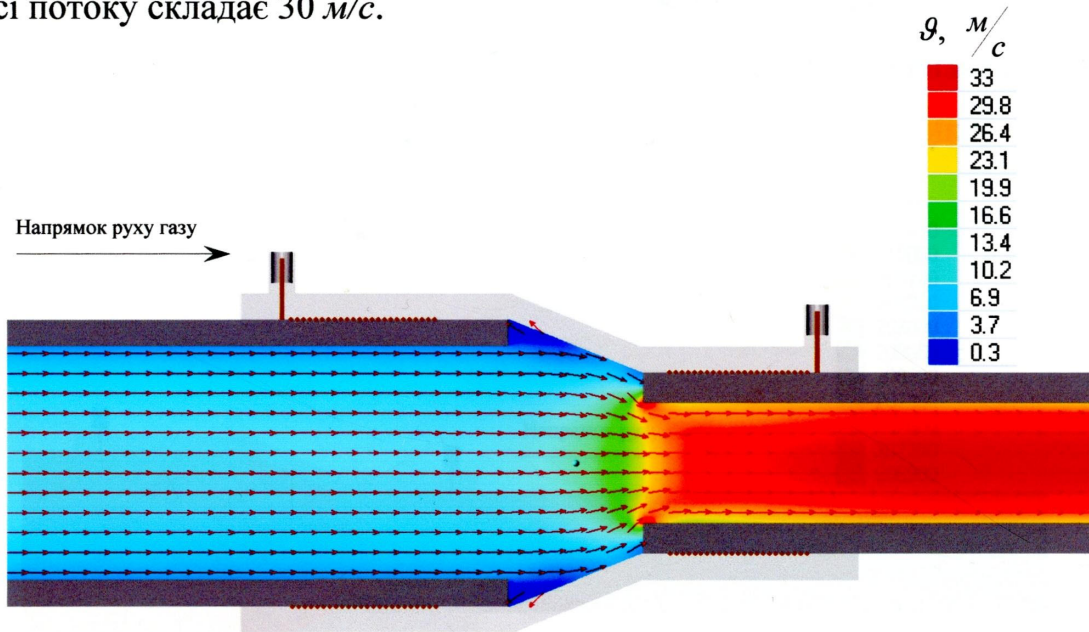


Рис. 2.23 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного перехідника

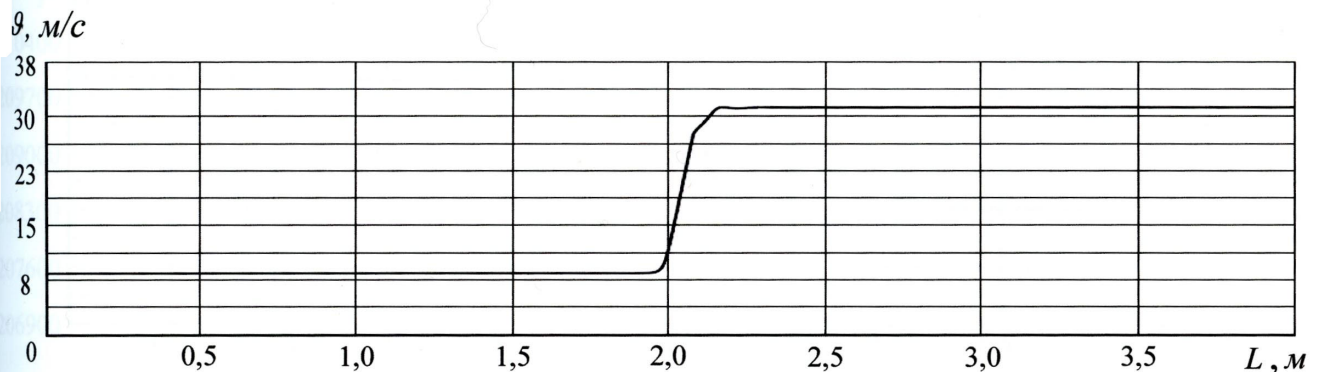


Рис. 2.24 Зміна швидкості потоку газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного редуційного перехідника

Побудуємо тонову заливку тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного перехідника (рис. 2.25) та графік зміни

тиску вздовж його осі (рис. 2.26). Як видно з тонової заливки та графіка зміни тиску, перед терморезисторним редуційним перехідником тиск знижується рівномірно і на його початку складає 209920 Па . У місці різкого звуження відбувається різке падіння тиску до 209350 Па , після чого тиск дещо підвищується та знижується, що зумовлено стабілізацією потоку. Перепад тиску на терморезисторному редуційному перехіднику складає 509 Па . Такий великий перепад зумовлений зменшенням діаметра трубопроводу. За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у терморезисторний редуційний перехідник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору терморезисторного редуційного перехідника, який складає $\xi = 16,6$.

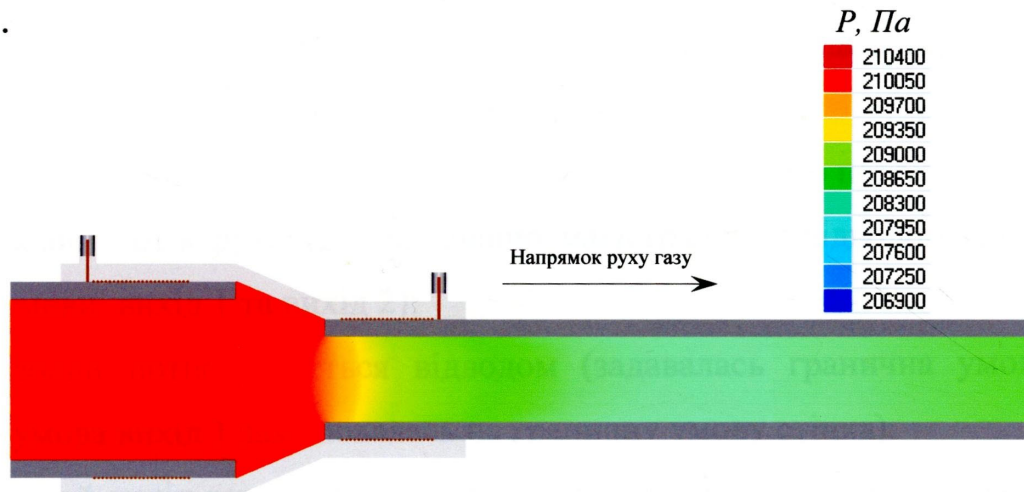


Рис. 2.25 Розподіл тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного перехідника

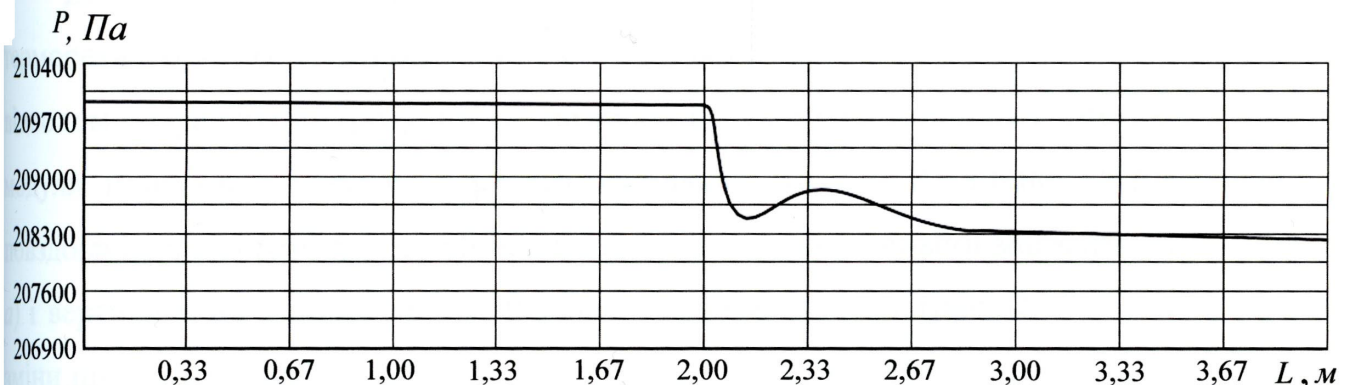


Рис. 2.26 Зміна тиску газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного редуційного перехідника

Проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу довжиною $L = 4 \text{ м}$, по середині якої встановлений терморезисторний

Трійник із відводом поліетиленового трубопроводу довжиною $L_B = 2$ м. Зовнішній діаметр труб основної магістралі $D_m = 40$ мм, товщина стінки $\delta_m = 3,5$ мм. Зовнішній діаметр труб відводу складає $D_e = 40$ мм, товщина стінки $\delta_e = 3,5$ мм.

Створено наступні типи граничних умов:

- стінка (задавався коефіцієнт шорсткості стінки поліетиленових труб);
- вхід (задавався тиск на вході $P_{ex} = 219845$ Па);
- вихід 1 (задавалась вихідна стінка потоку основної магістралі);
- вихід 2 (задавалась вихідна стінка потоку відводу).

На рис. 2.27 наведено розрахункову схему терморезисторного трійника, де вказано геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі терморезисторного трійника та місця розкладання граничних умов.

Проведемо моделювання трьох варіантів руху газового потоку:

- газовий потік рухається основною магістраллю і відводом (задавались дві граничні умови: вихід 1 та вихід 2);
- газовий потік рухається відводом (задавалась гранична умова вихід 2. Гранична умова вихід 1 замінювалась на граничну умову стінка);
- газовий потік рухається основною магістраллю (задавалась гранична умова вихід 1. Гранична умова вихід 2 замінювалась на граничну умову стінка).

Для аналізу зміни швидкості потоку газу в місці встановлення терморезисторного трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу та векторів швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього перерізу розрахункової моделі вздовж основної магістралі (рис. 2.28, а) і вертикального поперечного перерізу вздовж відводу (рис. 2.28, б) та графіків зміни швидкості вздовж осі магістралі (рис. 2.29, а) і вздовж осі відводу (рис. 2.29, б).

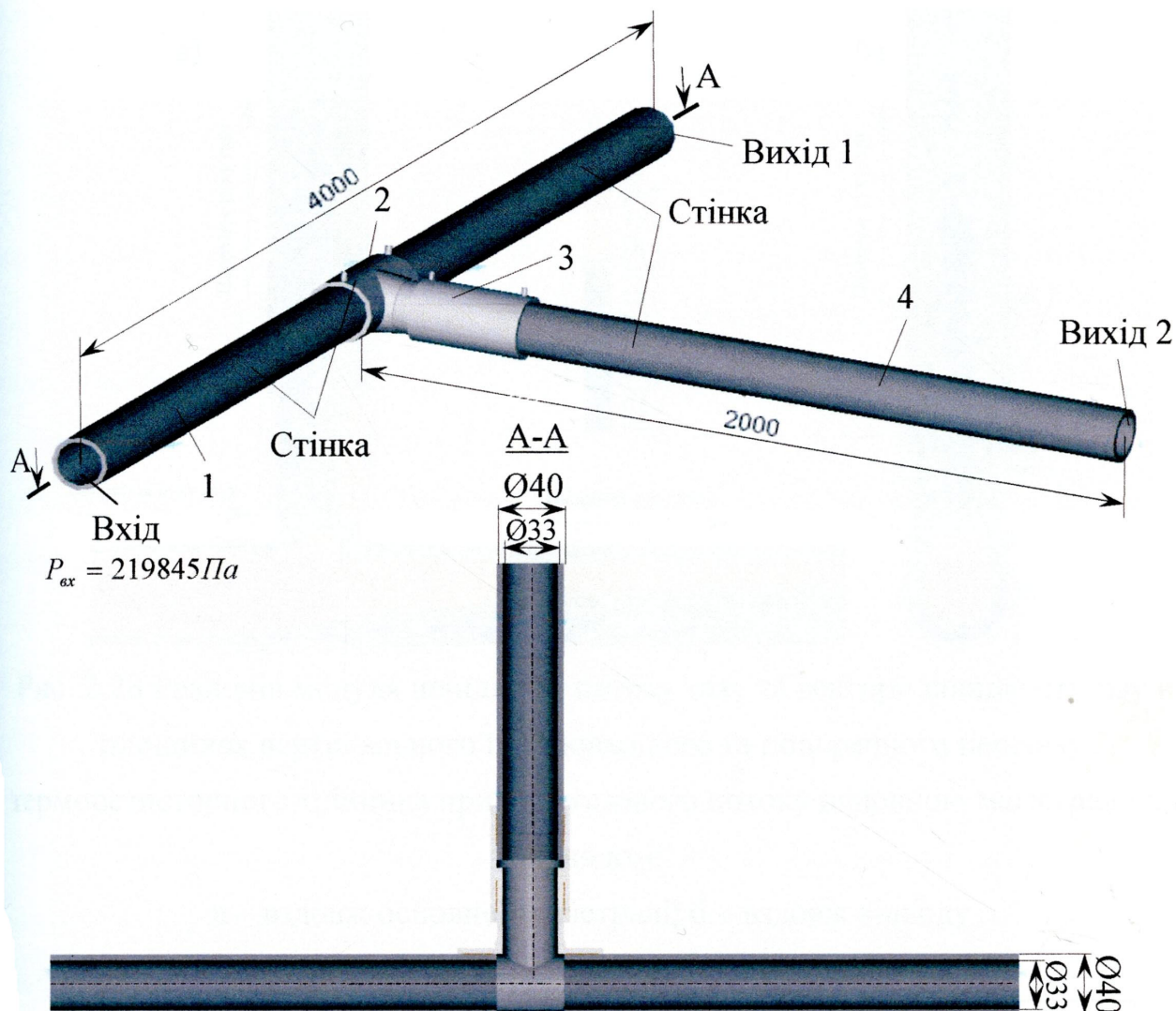


Рис. 2.27 Розрахункова схема терморезисторного трійника:

1– основна магістраль; 2– терморезисторний трійник;

3 – терморезисторна муфта; 4 – відвід

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.28, а) та графіка (див. рис. 2.29, а) найбільша швидкість потоку газу спостерігається по осі основної магістралі до терморезисторного трійника і складає 24,5 м/с. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до 17 м/с. Під час проходження терморезисторним трійником швидкість потоку газу в основній магістралі різко знижується, що зумовлено перетіканням

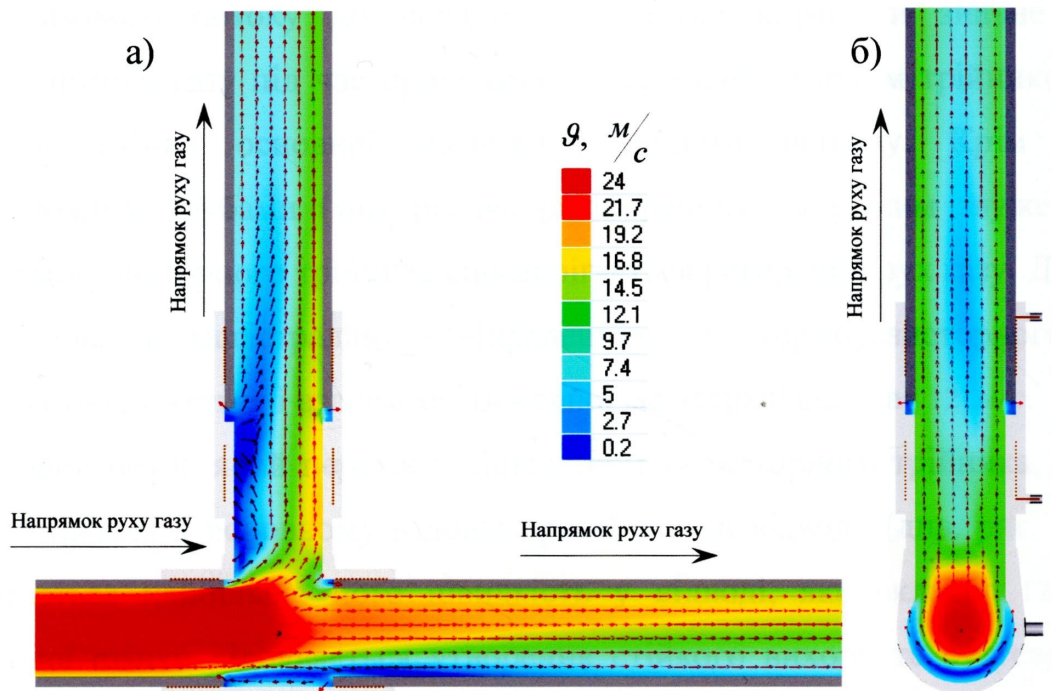


Рис. 2.28 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

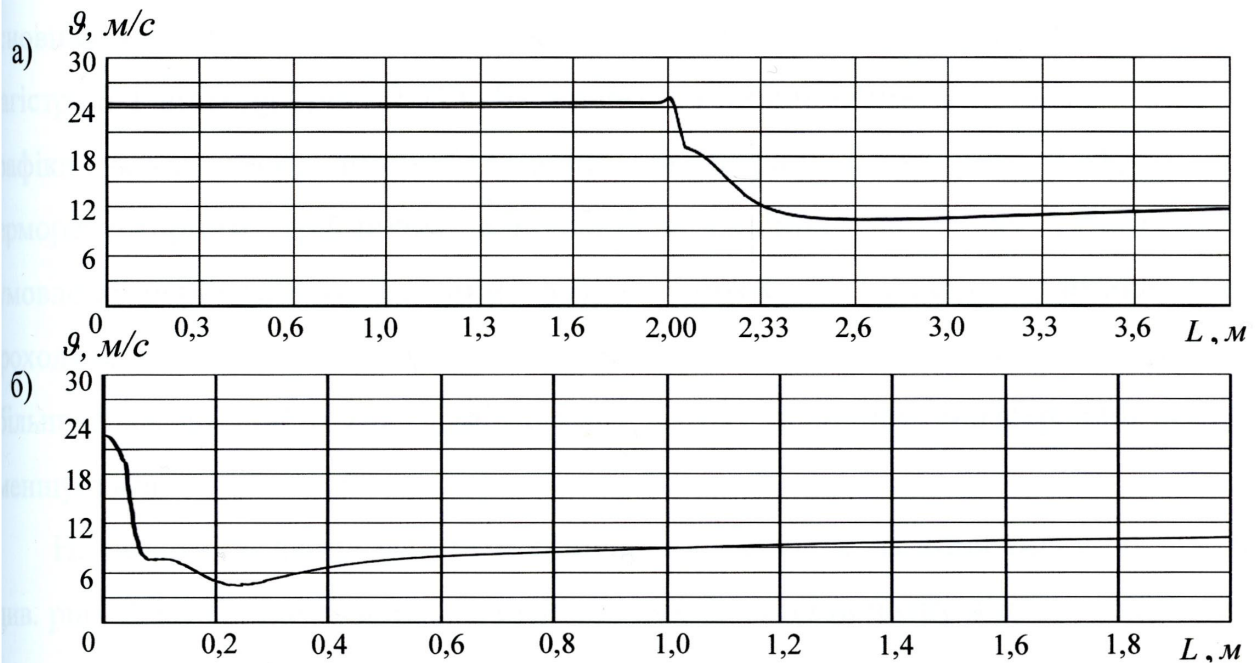


Рис. 2.29 Зміна швидкості потоку газу при його русі основною магістраллю і відводом терморезисторного трійника:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

частини газового потоку до відводу. Необхідно відмітити значне зниження швидкості потоку газу під час проходження терморезисторним трійником та після нього біля стінки основної магістралі напроти відводу. Крім того між поліетиленовими трубами (між різким розширенням та різким звуженням) біля стінки терморезисторного трійника спостерігається реверсний рух газу. Далі по ходу потоку основною магістраллю з віддаленням від терморезисторного трійника швидкість стабілізується і вздовж осі основної магістралі складає 12 м/с .

Газовий потік, який перетік у відвід терморезисторного трійника, на початку відводу рухається в основному вздовж правої стінки відводу (див. рис. 2.28, *а*), де спостерігається найбільша його швидкість у відводі, яка складає 17 м/с . Біля протилежної стінки відбувається утворення стійкого вихору та суттєве зниження швидкості газового потоку до 2 м/с . Далі по ходу потоку відводом із віддаленням від терморезисторного трійника швидкість стабілізується і складає 10 м/с (див. рис. 2.29, *б*).

Побудуємо тонову заливку тиску в площинах вертикального повздовжнього і поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом (рис. 2.30) та графіки зміни тиску вздовж основної магістралі і відводу (рис. 2.31). Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.30, *а*) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 2.31, *а*), перед терморезисторним трійником відбувається падіння тиску до 218620 Па , що зумовлено перетіканням частини газового потоку до відводу трійника. Під час проходження терморезисторним трійником тиск в основній магістралі різко збільшується до 219220 Па і далі по ходу потоку основною магістраллю поступово зменшується.

На початку відводу трійника відбувається суттєве падіння тиску до 218197 Па (див. рис. 2.31, *б*), що зумовлено стійким вихором на початку відводу, який суттєво зменшує прохідний переріз відводу. Після різкого падіння тиску відбувається певне його підвищення та зниження до попереднього значення, що зумовлено стабілізацією потоку. Далі по ходу потоку відводом тиск поступово знижується.

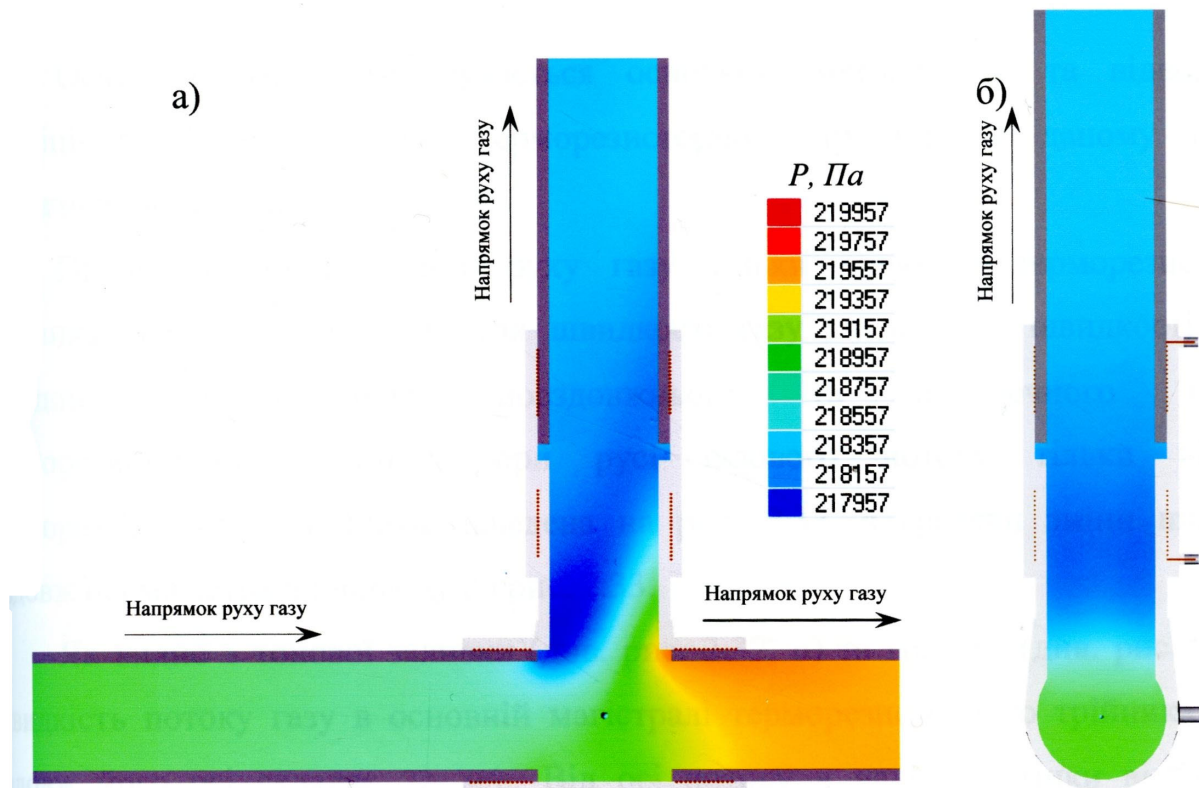


Рис. 2.30 Розподіл тиску в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку основною магістраллю і відводом:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

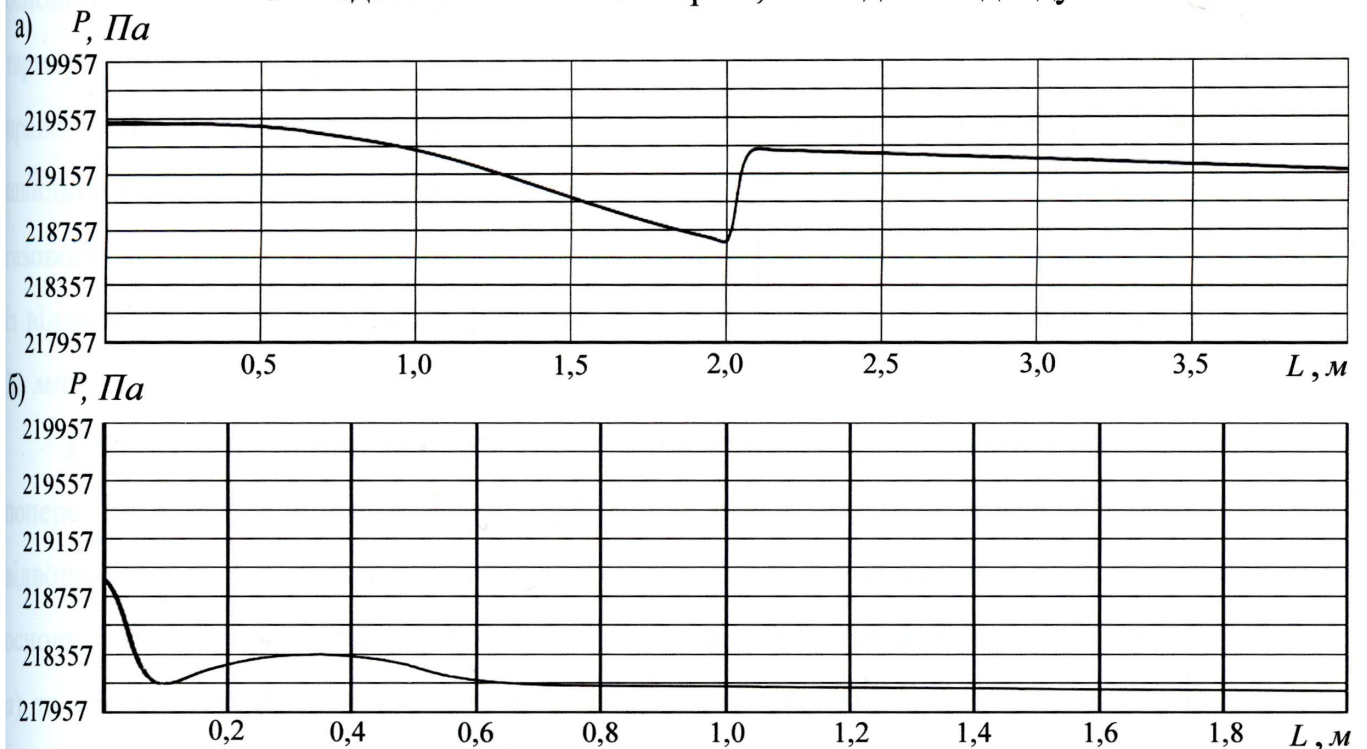


Рис. 2.31 Зміна тиску газу при русі газового потоку основною магістраллю і відводом терморезисторного трійника:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

Оскільки потік газу рухається основною магістраллю та відводом то коефіцієнт місцевого опору терморезисторного трійника в даному випадку визначити неможливо.

Проведемо моделювання руху газу тільки відводом терморезисторного трійника. Тонові заливки модуля швидкості газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки відводом терморезисторного трійника наведена на рис. 2.32, а графіки зміни швидкості вздовж осі магістралі і відводу на рис. 2.33.

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.32, *a*) та графіка (див. рис. 2.33, *a*), швидкість потоку газу в основній магістралі терморезисторного трійника стала і вздовж його осі складає 22 м/с . Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до $14,5 \text{ м/с}$. Під час проходження терморезисторним трійником газовий потік змінює свій напрям і перетікає з основної магістралі у відвід трійника, а швидкість в основній магістралі зменшується до нуля. Газовий потік, який перетік у відвід терморезисторного трійника, на початку відводу рухається в основному вздовж правої стінки відводу (див. рис. 2.32, *a*), де спостерігається найбільша його швидкість у відводі, яка складає $16,5 \text{ м/с}$. Біля протилежної стінки швидкість газового потоку суттєво менша і складає біля 12 м/с . Далі по ходу потоку відводом із віддаленням від терморезисторного трійника швидкість стабілізується і складає 22 м/с .

Побудуємо тонову заливку тиску в площинах вертикального повздовжнього і поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки відводом терморезисторного трійника (рис. 2.34) та графіки зміни тиску вздовж основної магістралі і відводу (рис. 2.35). Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.34, *a*) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 2.35, *a*), перед терморезисторним трійником відбувається падіння тиску до 219901 Па , що зумовлено перетіканням газового потоку в відвід трійника. Під час проходження

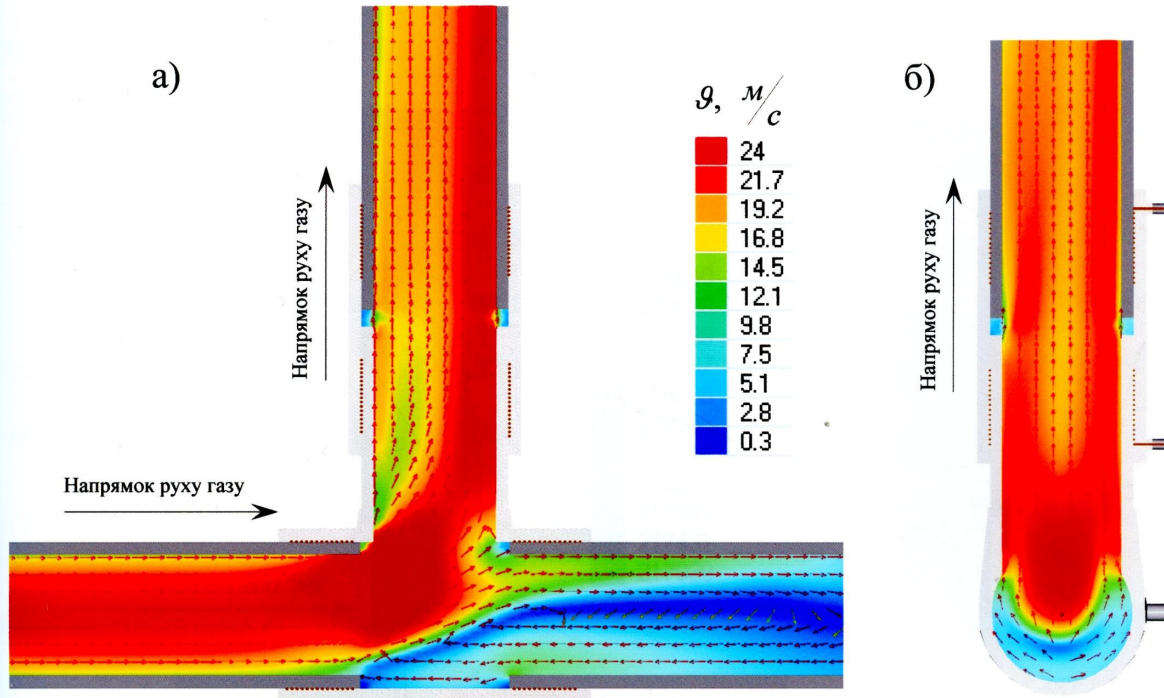


Рис. 2.32 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки відводом:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

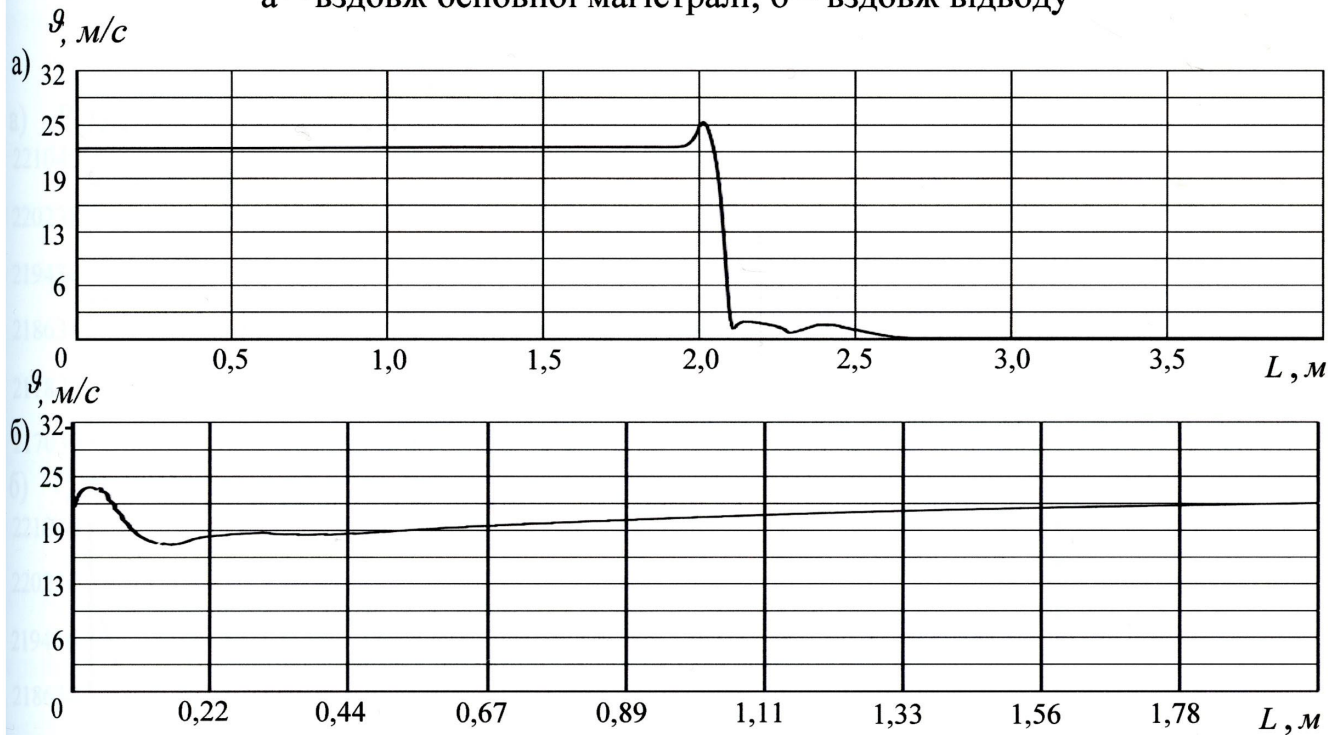


Рис. 2.33 Зміна швидкості потоку газу при його русі тільки відводом

терморезисторного трійника:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

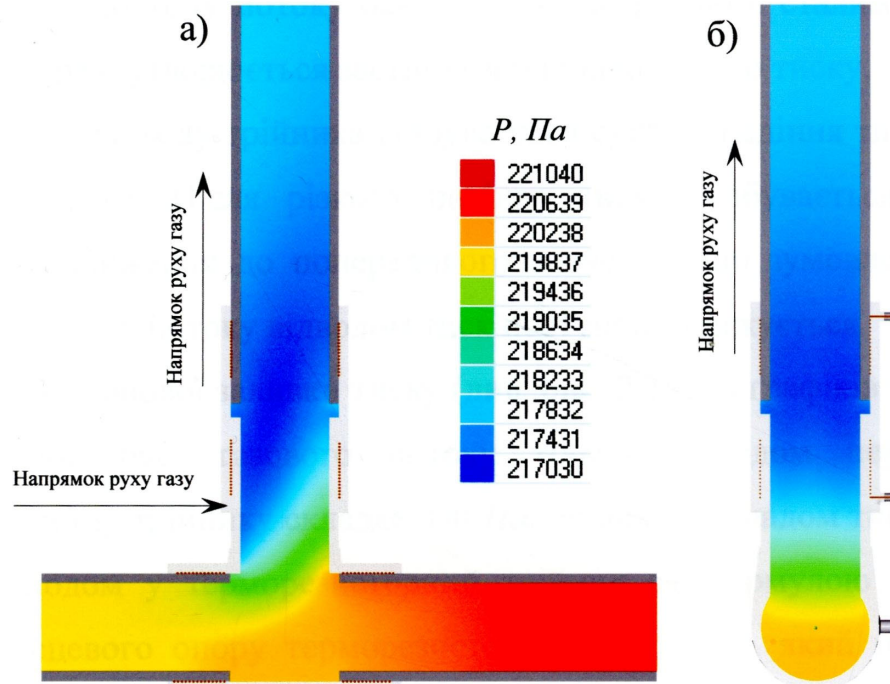


Рис. 2.34 Розподіл тиску в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки відводом:
а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

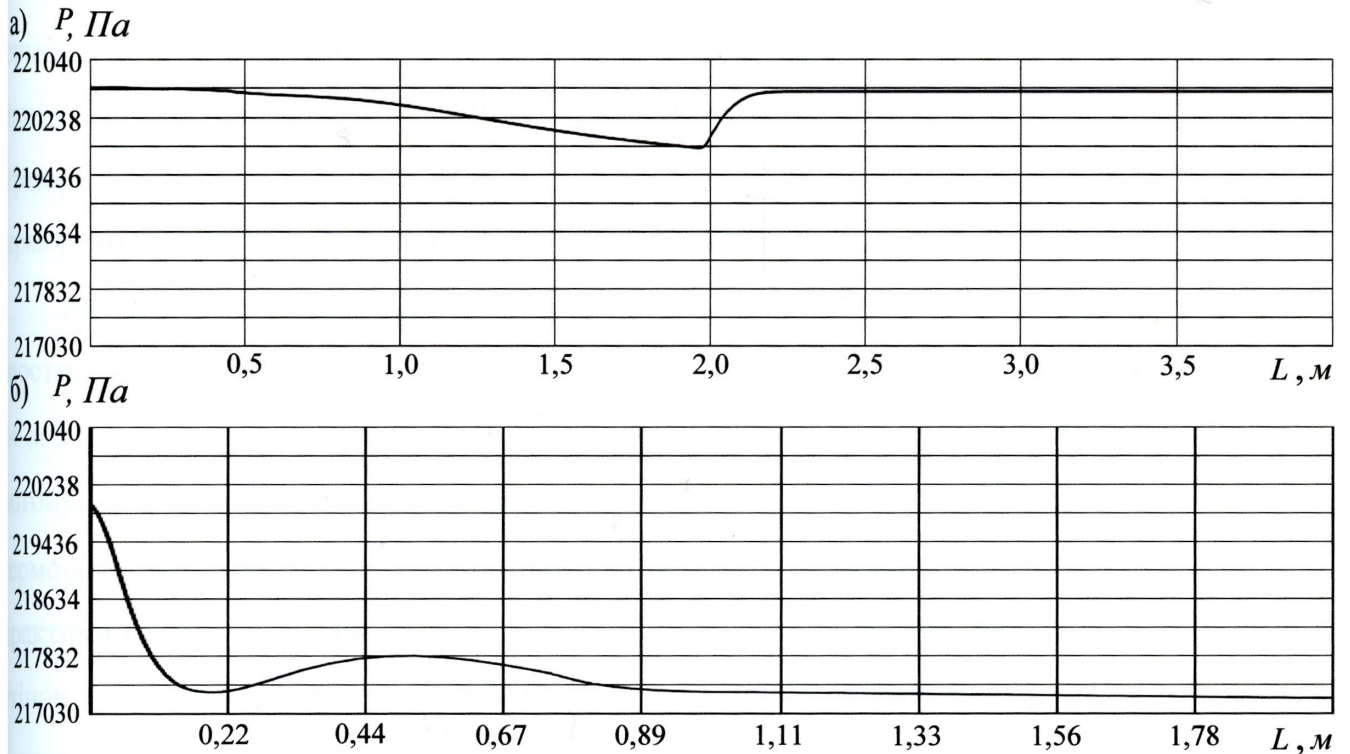


Рис. 2.35 Зміна тиску газу при русі газового потоку тільки відводом терморезисторного трійника:
а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

терморезисторним трійником тиск в основній магістралі різко збільшується до 220420 *Па* і далі по ходу потоку основною магістраллю є сталим. За трійником в основній магістралі утворюється застійна зона підвищеного тиску.

На початку відводу трійника відбувається суттєве падіння тиску до 216881 *Па* (див. рис. 2.35, б). Після різкого падіння тиску відбувається незначне його підвищення та зниження до попереднього значення, що зумовлено стабілізацією потоку. Далі по ходу потоку відводом тиск поступово знижується.

Як видно з тонової заливки тиску (див. рис. 2.34) та графіків зміни тиску (див. рис. 2.35), при русі газового потоку тільки відводом перепад тиску на терморезисторному трійнику складає 990 *Па*. За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у терморезисторний трійник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору терморезисторного трійника, який при русі газового потоку тільки відводом трійника рівний 5,4.

З отриманих даних видно, що зі збільшення швидкості течії потоку коефіцієнт місцевого опору терморезисторного трійника зменшується.

Проведемо моделювання руху газу тільки основною магістраллю терморезисторного трійника. Тонову заливку модуля швидкості газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю терморезисторного трійника наведено на рис. 2.36.

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.36), найбільша швидкість потоку газу спостерігається по осі основної магістралі до терморезисторного трійника і складає 24 *м/с*. Від осі потоку в напрямі стінки відбувається незначне зниження швидкості потоку, а біля стінки значне зниження швидкості до 16,5 *м/с*. Під час проходження терморезисторним трійником швидкість потоку газу вздовж осі основної магістралі практично не змінюється. Значне зниження швидкості потоку газу відбувається біля стінок терморезисторного трійника між поліетиленовими трубами. У місці лаптового розширення відбувається утворення стійкого вихору. Після проходження терморезисторного трійника відбувається незначне зниження швидкості потоку біля стінок основної магістралі, особливо це помітно зі сторони відводу.

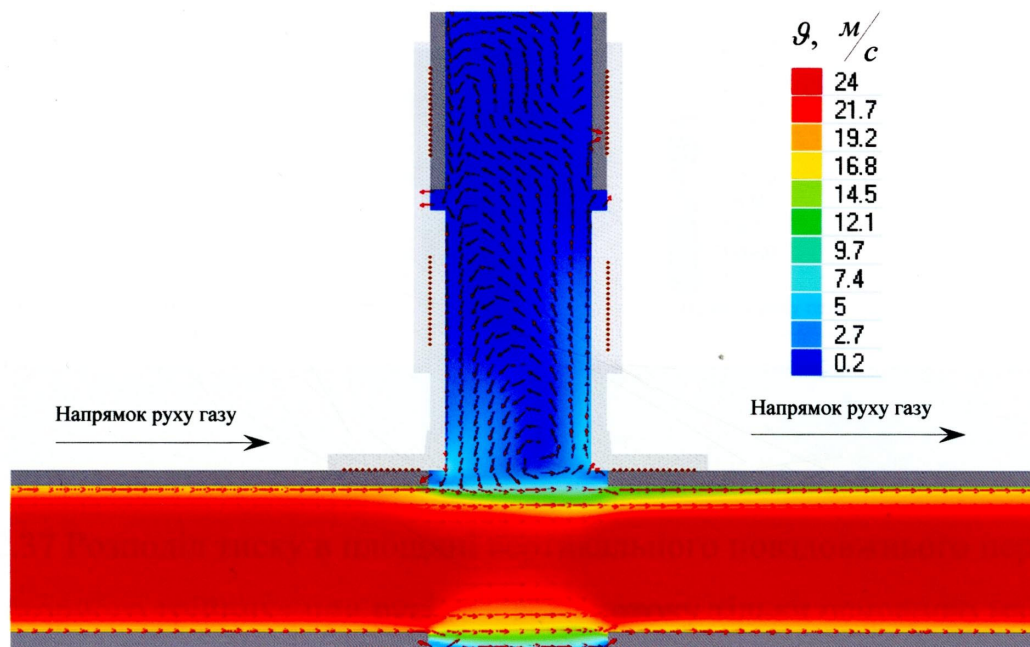


Рис. 2.36 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю

Побудуємо тонову заливку тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю (рис. 2.37) та графік зміни тиску вздовж основної магістралі (рис. 2.38).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 2.37) та графіка (див. рис. 2.38), перед різким розширенням відбувається незначне підвищення тиску, після чого падіння тиску до 220728 Па . Незначне підвищення тиску зумовлене утворенням застійної зони підвищеного тиску у відводі трійника. Перепад тиску на терморезисторному трійнику складає 41 Па . За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у терморезисторний трійник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору терморезисторного трійника. Для наведеного випадку при русі газового потоку тільки основною магістраллю він складає $\zeta = 0,19$.

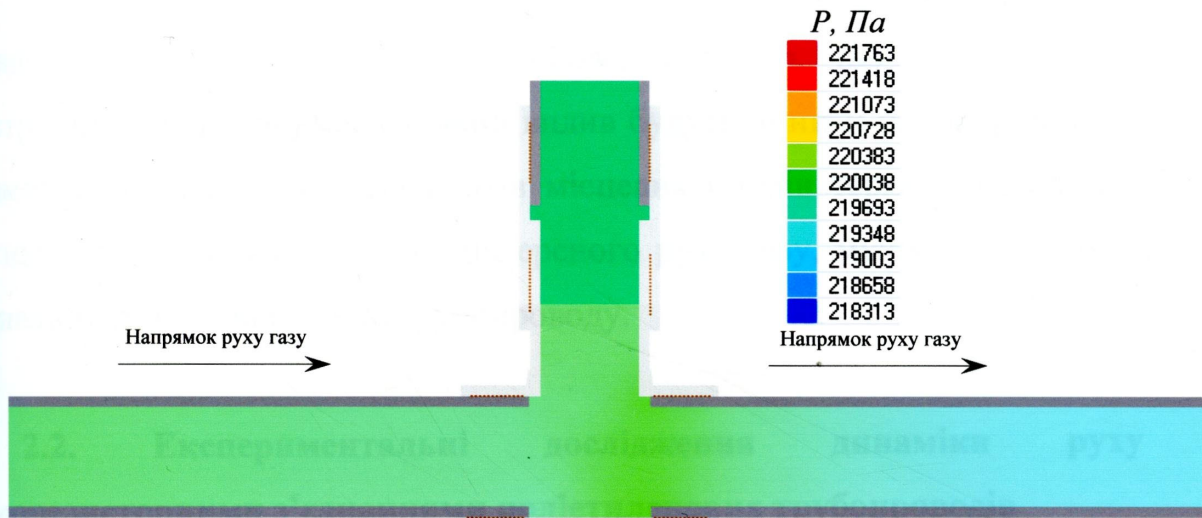


Рис. 2.37 Розподіл тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного трійника при русі газового потоку тільки основною магістраллю

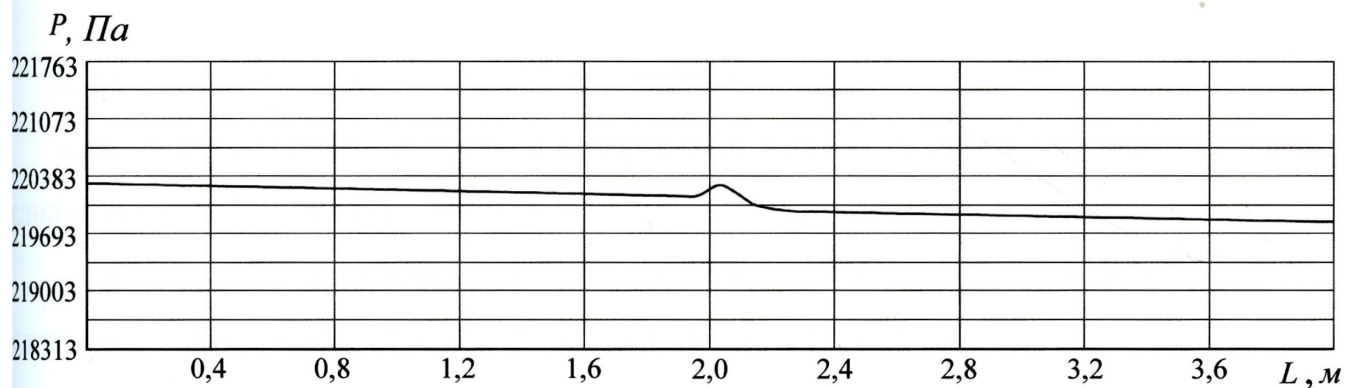


Рис. 2.38 Зміна тиску газу при русі газового потоку тільки основною магістраллю терморезисторного трійника

Як видно з проведених досліджень динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів втрати тиску виникають при місцевому порушенні нормальної течії, відриванні потоку від стінок, вихроутворенні, реверсному русі газу та інтенсивному турбулентному перемішуванню потоку в місцях зміни конфігурації трубопроводу (розширення, звуження, поворот, розгалуження потоку тощо). Ці явища посилюють обмін кількістю руху між частинками середовища, що рухається (тобто тертя), підвищуючи дисипацію енергії. Явище відривання та вихроутворення пов'язано з наявністю різниці швидкостей у поперечному перерізі потоку і позитивного градієнта тиску вздовж потоку. Останнє виникає при сповільненні руху (наприклад, при розширенні, повороті тощо).

Із результатів проведених досліджень динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів видно, що під час розробки їх конструкцій не враховувалося, який вплив будуть чинити їх внутрішні геометричні параметри на значення коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань, про що свідчать виявлені місця реверсного руху газу, місця утворення вихорів та відривання потоку від стінки трубопроводу.

2.2. Експериментальні дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів

2.2.1. Задачі експериментальних досліджень

Задачами експериментальних досліджень є:

- експериментально визначити коефіцієнти місцевого опору терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів;
- дослідити залежність коефіцієнта місцевого опору терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів від швидкості руху газу;
- дослідити вплив геометричних параметрів терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів на коефіцієнт їх місцевого опору при різних швидкостях руху газу;
- дослідити вплив збільшення кількості відводів від поліетиленового газопроводу низького тиску на режим роботи (руху газу) газової мережі.

2.2.2. Методика експериментальних досліджень

Проблема удосконалення газових мереж зумовлює необхідність розгляду окремих чинників для комплексного розгляду досліджуваної задачі. Тільки системний підхід як головний принцип дослідження складних технічних об'єктів дозволяє здійснити пошук раціональних варіантів удосконалення як уже існуючих газових мереж, так і проєктованих.

Тому важливо дослідити динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів. Треба провести серію експериментальних досліджень з визначення коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів і порівняти одержані результати із теоретичними одержаними з допомогою програмного комплексу Flow Vision.

На динаміку руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів здійснюють вплив наступні чинники:

- витрата газу в газопроводі;
- початковий тиск у газопроводі.

Для вивчення одночасного впливу ряду чинників (багаточинниковий експеримент) на досліджуваний об'єкт застосовують методи математичного планування експерименту (додаток А). Математичні методи планування експерименту дозволяють дослідити і оптимізувати складні системи та процеси, забезпечуючи високу ефективність експерименту та точність визначення досліджуваних параметрів [6, 12, 38, 63, 64, 78, 88, 93, 139].

Експериментальні дослідження проведено на базі ВАТ „Івано-Франківськгаз” в лабораторії перевірки промислових лічильників газу на природному газі.

Для експериментальних досліджень динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів було розроблено і побудовано експериментальний стенд (рис. 2.39), який складається з трубопроводу із поліетиленових труб 1, досліджуваного об'єкту 2 (терморезисторне з'єднання), двоканального обчислювача об'єму газу ОЕ-22ЛІА/2, багатопараметричного перетворювача тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095.

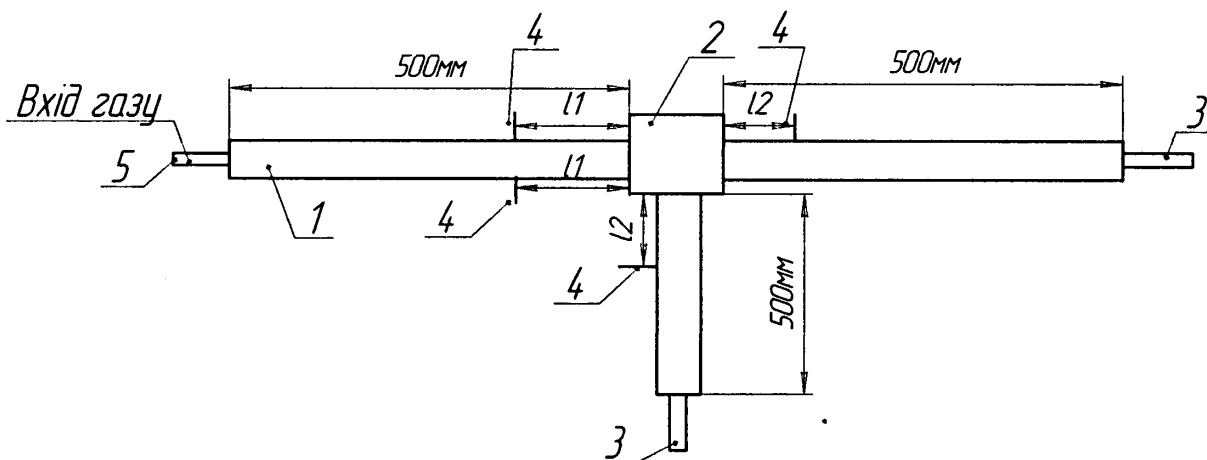


Рис. 2.39 Схема експериментального стенду для дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів:

- 1 – поліетиленовий трубопровід; 2 – досліджуваний об'єкт (терморезисторне з'єднання); 3– місце підключення двоканального обчислювача об'єму газу ОЕ-22ЛА/2; 4 – місце підключення багатопараметричного перетворювача тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095; 5 – місце підключення діючого газопроводу

Контроль правильності показів двоканального обчислювача об'єму газу ОЕ-22ЛА/2 здійснювався робочим еталоном об'єму газу роторного типу Delta 665, який має похибку вимірювань 0,15 %.

Для вимірювань об'ємної витрати газу використовувався двоканальний обчислювач об'єму газу ОЕ-22ЛА/2. Відносна точність вимірювань об'ємної витрати газу за стандартних умов $\pm 0,025\%$. Границі допустимої відносної похибки обчислювачів $\pm 0,025\%$.

Вимірювання перепаду тиску проводилось радіальним методом відбору тиску від досліджуваного об'єкта.

Засоби вимірювань, що застосовувались при експериментальних дослідженнях були перевірені та пройшли метрологічну атестацію. Усі прилади атестовані головною організацією Держспоживстандарту України в галузі вимірювань об'єму та об'ємної витрати природного газу – ДП „Івано-Франківськстандартметрологія”.

Умови і методика експериментальних досліджень відповідали вимогам “Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением”. Роботи проводились згідно з вимогами технічної та пожежної безпеки.

Експериментальний стенд підключався до діючого газопроводу середнього тиску (від ГРС Верхній Угринів). Перед початком досліджень було визначено склад природного газу (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Склад природного газу на момент проведення досліджень

Густина газу за стандартних умов, $кг/м^3$	Молярна доля діоксиду вуглецю CO_2	Молярна доля азоту N_2
0,705	0,321	0,605
0,701	0,252	0,677
0,7059	0,414	0,706

Для експериментальних досліджень було підібрано об'єкти досліджень – терморезисторні з'єднання поліетиленових трубопроводів (муфти, сідлові трійники, коліна, редуційні перехідники, трійники).

Для експериментальних досліджень динаміки руху газу терморезисторною муфтою було розроблено і побудовано експериментальний стенд (рис. 2.40).

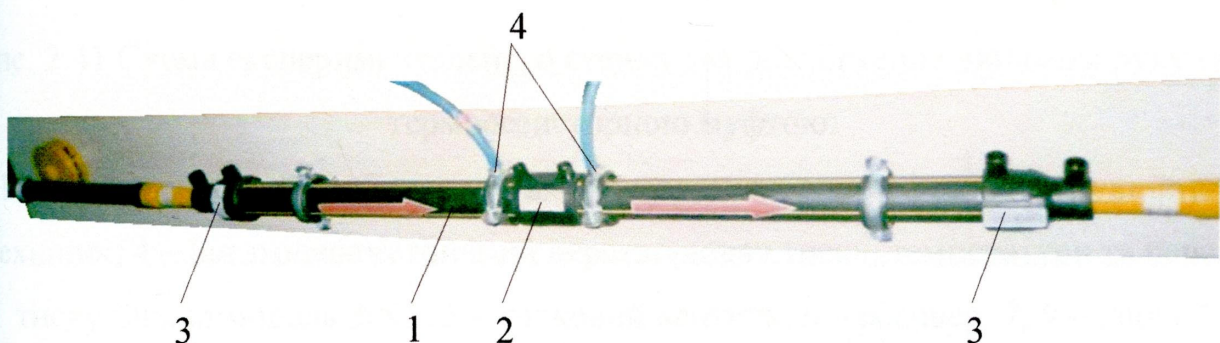


Рис. 2.40 Експериментальний стенд для дослідження динаміки руху газу терморезисторною муфтою:

- 1– поліетиленовий трубопровід; 2– терморезисторна муфта;
3– редуційний перехідник; 4 – місце підключення багатопараметричного перетворювача тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095

Газ від діючого газопроводу 7 (рис. 2.41) подається через ресивер 6, голковий вентиль 5 в поліетиленовий трубопровід 1. За допомогою голкового вентиля 5 встановлюється відповідний режим течії (за критерій подібності прийнято число Рейнольдса). З метою стабілізації течії проводиться витримування протягом 15 хвилин (так як трубопровід є коротким). Перепад тиску на терморезисторній муфті 2 вимірювався багатопараметричним перетворювачем тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095 4. Витрата газу вимірювалась за допомогою двоканального обчислювача об'єму газу ОЕ-22ЛА/2 8, після проходження якого газ перетікав ув діючий газопровід 9.

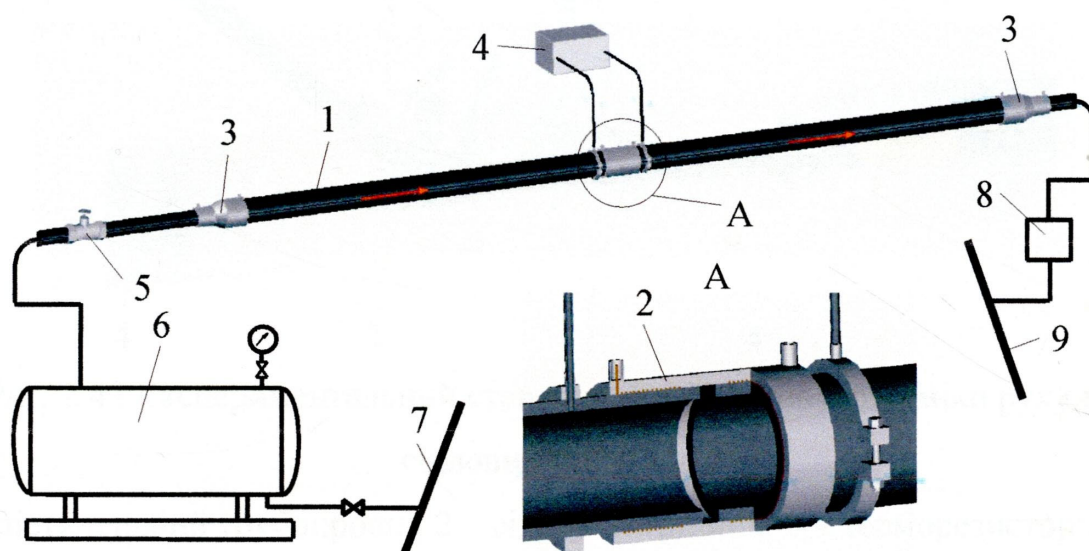


Рис. 2.41 Схема експериментального стенда для дослідження динаміки руху газу терморезисторною муфтою:

1 – поліетиленовий трубопровід; 2 – терморезисторна муфта; 3 – редуційний перехідник; 4 – багатопараметричний перетворювач тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095; 5 – голковий вентиль; 6 – ресивер; 7, 9 – діючий газопровід; 8 – двоканальний обчислювач об'єму газу ОЕ-22ЛА/2

Експериментальні дослідження проводились для різних діаметрів поліетиленового трубопроводу і відповідно різних типорозмірів терморезисторної муфти.

Після проведення серії експериментальних досліджень з досліджуваним об'єктом – терморезисторна муфта аналогічно було проведено експериментальні дослідження з досліджуваними об'єктами – терморезисторне коліно, терморезисторний редукційний перехідник.

Для експериментальних досліджень динаміки руху газу сідловим трійником було розроблено і побудовано експериментальний стенд (рис. 2.42).

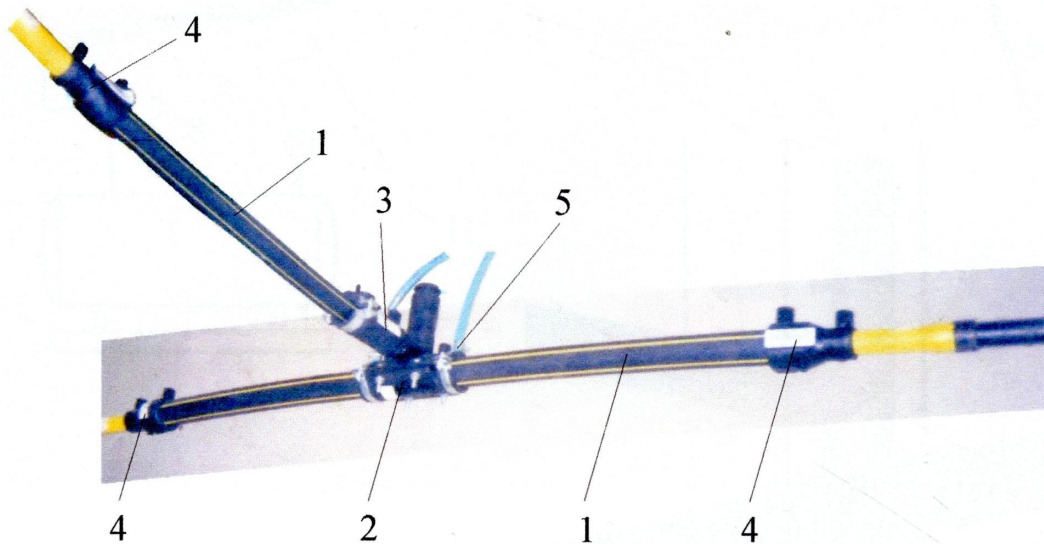


Рис. 2.42 Експериментальний стенд для дослідження динаміки руху газу сідловим трійником:

1 – поліетиленовий трубопровід; 2 – сідловий трійник; 3 – терморезисторна муфта; 4 – редукційний перехідник; 5 – місце підключення багатопараметричного перетворювача тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095

Схема експериментального стенда для дослідження динаміки руху газу сідловим трійником (рис. 2.43) аналогічна схемі експериментального стенда для дослідження динаміки руху газу терморезисторною муфтою (див. рис. 2.41). Відмінністю між цими схемами є те, що сідловий трійник 3 (див. рис. 2.43) містить відвід поліетиленового трубопроводу 2, який приєднаний до нього за допомогою терморезисторної муфти 4. Витрата газу через відвід 2 вимірювалась за допомогою двоканального обчислювача об'єму газу ОЕ-22ЛА/2 13, після проходження якого газ перетікає у діючий газопровід 10.

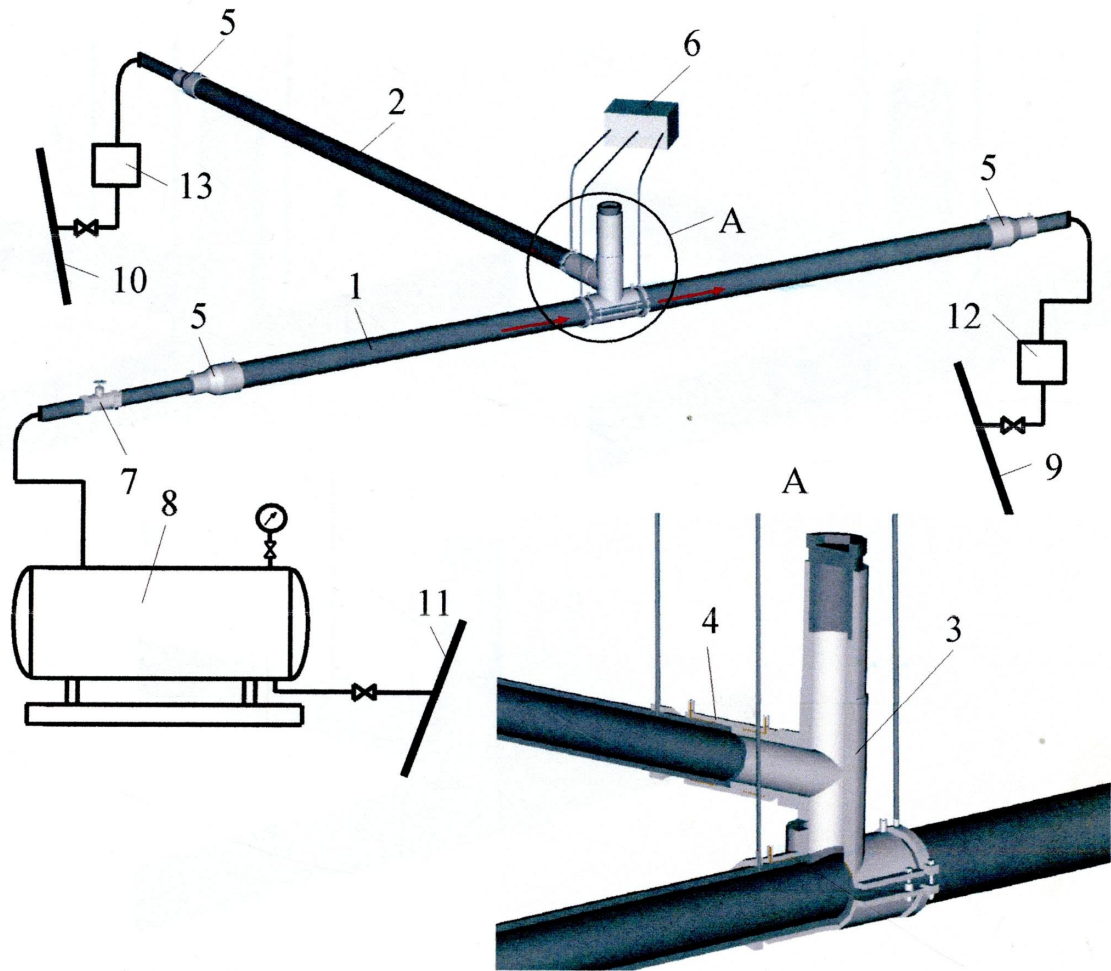


Рис. 2.43 Схема експериментального стенда для дослідження динаміки руху газу сідловим трійником:

1 – поліетиленовий трубопровід (основна магістраль); 2 – поліетиленовий трубопровід (відвід); 3 – сідловий трійник; 4 – терморезисторна муфта; 5 – редукційний перехідник; 6 – багатопараметричний перетворювач тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095; 7 – голковий вентиль; 8 – ресивер; 9, 10, 11 – діючий газопровід; 12, 13 – двоканальний обчислювач об'єму газу ОЕ-22ЛА/2

Було проведено експериментальні дослідження для трьох схем руху газового потоку сідловим трійником (рис. 2.44):

- газовий потік рухається основною магістраллю і відводом (див. рис. 2.44, а);
- газовий потік рухається основною магістраллю (див. рис. 2.44, б);
- газовий потік рухається відводом сідлового трійника (див. рис. 2.44, в).

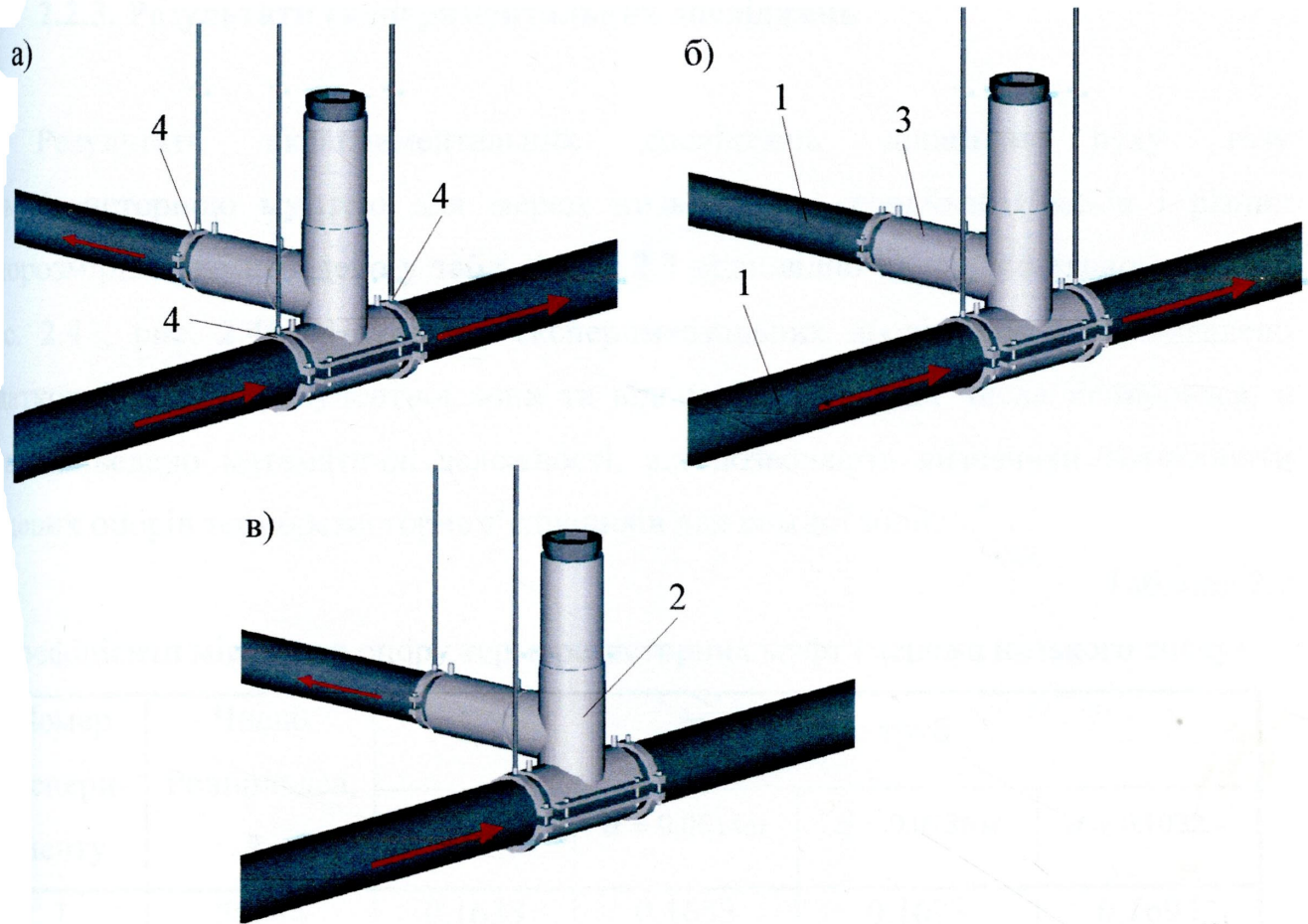


Рис. 2.44 Схеми руху газового потоку сідловим трійником:

а – газовий потік рухається основною магістраллю і відводом; б – газовий потік рухається основною магістраллю; в – газовий потік рухається відводом сідлового трійника; 1 – поліетиленовий трубопровід (відвід); 2 – сідловий трійник; 3 – терморезисторна муфта; 4 – місце підключення багатопараметричного перетворювача тиску, температури та перепаду тиску Фішер модель 3095.

Експериментальні дослідження проводились для різних діаметрів поліетиленових трубопроводів (основної магістралі та відводу) і відповідно різних типорозмірів сідлового трійника.

Після проведення серії експериментальних досліджень з досліджуванним об'єктом – сідловий трійник аналогічно було проведено експериментальні дослідження з терморезисторним трійником.

2.2.3. Результати експериментальних досліджень

Результати експериментальних досліджень динаміки руху газу терморезисторною муфтою для мереж низького та середнього тисків і різних типорозмірів труб наведено у табл. 2.2 та 2.3 відповідно та представлено графічно (рис. 2.45, рис. 2.46). На основі експериментальних досліджень було виявлено додатковий поділ турбулентної зони та відповідні перехідні числа Рейнольдса, а також виведено математичні залежності, які дозволяють визначити коефіцієнти місцевих опорів терморезисторне з'єднання для кожної зони.

Таблиця 2.2

Коефіцієнти місцевого опору терморезисторних муфт (мережа низького тиску)

Номер експерименту	Число Рейнольдса, Re	Типорозмір труб			
		$d = 0,033м$	$d = 0,0514м$	$d = 0,0736м$	$d = 0,1022м$
1	58644	0,1633	0,1653	0,1673	0,1694
2	53618	0,1650	0,1670	0,1690	0,1712
3	47020	0,1628	0,1648	0,1668	0,1689
4	41195	0,1560	0,1579	0,1598	0,1619
5	39358	0,1532	0,1551	0,1569	0,1590
6	34298	0,1544	0,1563	0,1573	0,1583
7	33578	0,1543	0,1566	0,1583	0,1591
8	31143	0,1507	0,1530	0,1546	0,1554

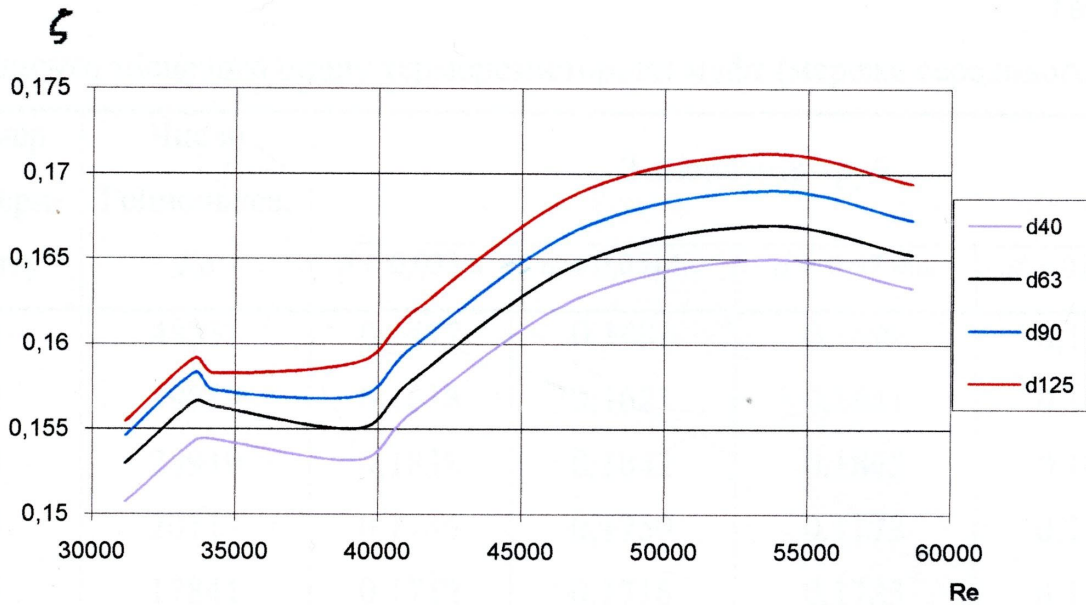


Рис. 2.45 Залежність коефіцієнта місцевого опору терморезисторної муфти від числа Рейнольдса для різних типорозмірів труб (мережа низького тиск)

Математичні залежності для терморезисторної муфти (мережа низького тиску):

- при $31000 < Re < 35000$

$$\xi = -4,26 \cdot 10^{-10} \cdot Re^2 + 2,903 \cdot 10^{-5} \cdot Re - 0,3404; \quad (2.17)$$

- при $35000 < Re < 40000$

$$\xi = -2,372 \cdot 10^{-7} \cdot Re + 0,1625; \quad (2.18)$$

- при $40000 < Re$

$$\xi = 1,023 \cdot 10^{-19} \cdot Re^4 - 1,998 \cdot 10^{-14} \cdot Re^3 + 1,39 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 - 3,998 \cdot 10^{-5} \cdot Re + 0,5456. \quad (2.19)$$

Таблиця 2.3

Коефіцієнти місцевого опору терморезисторних муфт (мережа середнього тиску)

Номер експерименту	Число Рейнольдса, Re	Типорозмір труб			
		$d = 0,033м$	$d = 0,0514м$	$d = 0,0736м$	$d = 0,1022м$
1	48233	0,1477	0,1481	0,1499	0,1503
2	39989	0,1618	0,1621	0,1641	0,1646
3	29919	0,1838	0,1842	0,1865	0,1870
4	20117	0,1746	0,1750	0,1772	0,1777
5	17841	0,1712	0,1716	0,1723	0,1735
6	15749	0,2004	0,2011	0,2019	0,2033

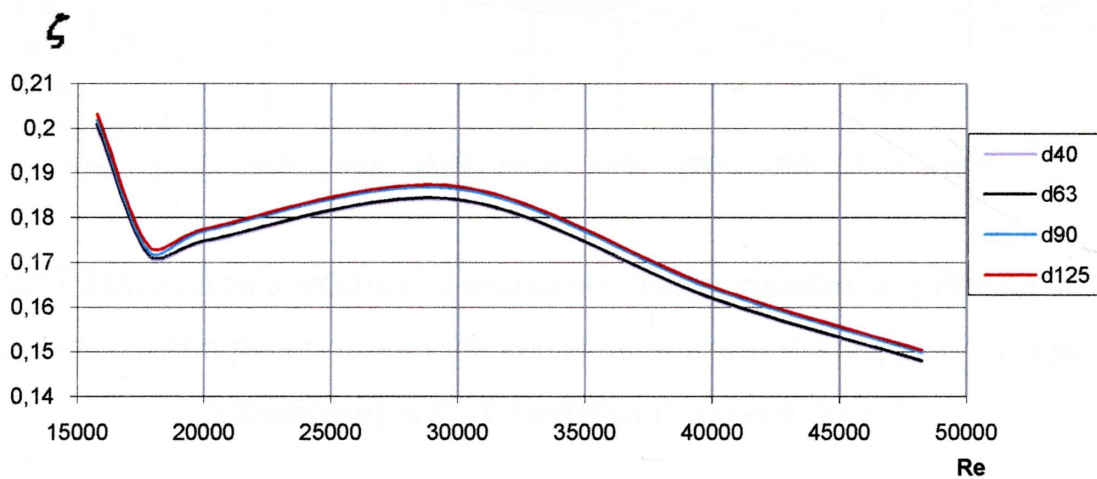


Рис. 2.46 Залежність коефіцієнта місцевого опору терморезисторної муфти від числа Рейнольдса для різних типорозмірів труб (мережа середнього тиску)

Математичні залежності для терморезисторної муфти (мережа середнього тиску):

- при $4000 < Re < 18000$

$$\xi = -0,000014 \cdot Re + 0,41992; \quad (2.20)$$

- при $18000 < Re$

$$\xi = 3,787 \cdot 10^{-19} \cdot Re^4 - 4,582 \cdot 10^{-14} \cdot Re^3 + 1,884 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 - 3,08407 \cdot 10^{-5} \cdot Re + 0,3435. \quad (2.21)$$

Результати експериментальних досліджень динаміки руху газу сідловим трійником при русі потоку газу тільки основною магістраллю та тільки відводом для різних типорозмірів труб (мережа низького тиску) представлено графічно (рис. 2.47, рис. 2.48).

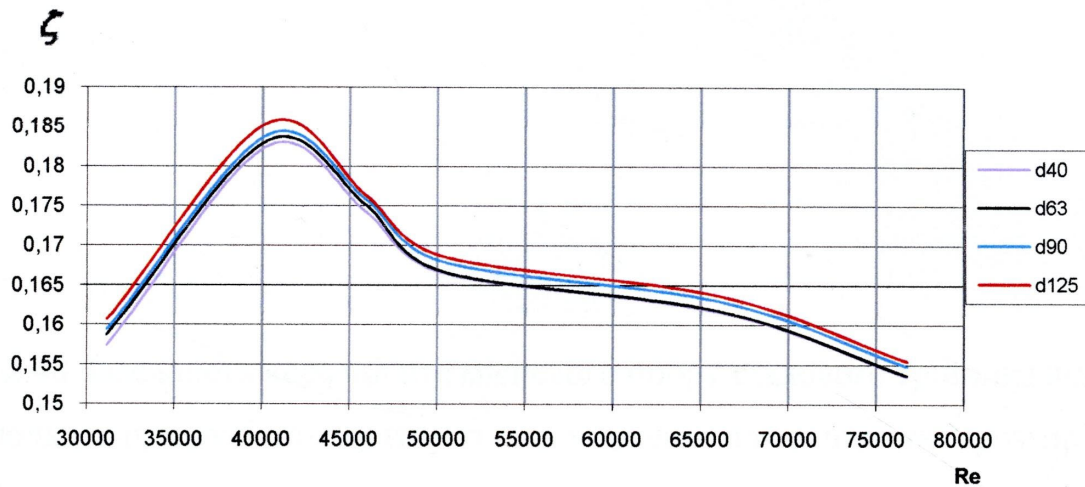


Рис. 2.47 Залежність коефіцієнта місцевого опору сідлового трійника від числа Рейнольдса при русі потоку газу тільки основною магістраллю для різних типорозмірів труб (мережа низького тиску)

Математичні залежності для сідлового трійника при русі потоку газу тільки основною магістраллю (мережа низького тиску):

- при $31000 < Re < 40000$

$$\xi = 2,754 \cdot 10^{-6} \cdot Re + 0,07167; \quad (2.22)$$

- при $40000 < Re < 50000$

$$\xi = -1,579 \cdot 10^{-6} \cdot Re + 0,2462; \quad (2.23)$$

- при $50000 < Re$

$$\xi = -1,708 \cdot 10^{-11} \cdot Re^2 + 1,673 \cdot 10^{-6} \cdot Re + 0,1257. \quad (2.24)$$

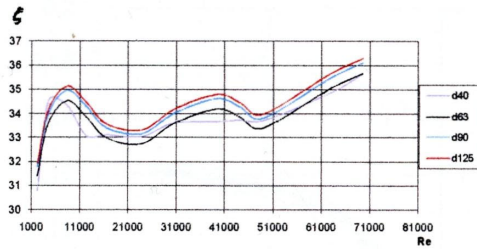


Рис. 2.48 Залежність коефіцієнта місцевого опору сідлового трійника від числа Рейнольдса при русі потоку газу тільки відводом для різних типорозмірів труб (мережа низького тиску)

Математичні залежності для сідлового трійника при русі потоку газу тільки відводом (мережа низького тиску):

- при $4000 < Re < 10000$

$$\xi = -3 \cdot 10^{-8} \cdot Re^2 + 0,0004 \cdot Re + 33,459; \quad (2.25)$$

- при $10000 < Re$

$$\xi = -6 \cdot 10^{-27} \cdot Re^6 + 10^{-21} \cdot Re^5 - 10^{-16} \cdot Re^4 + 5 \cdot 10^{-12} \cdot Re^3 - 10^{-7} \cdot Re^2 + 0,001 \cdot Re + 29,249. \quad (2.26)$$

Результати експериментальних досліджень динаміки руху газу сідловин трійником при русі потоку газу тільки основною магістраллю та тільки відводом для

різних типорозмірів труб (мережа середнього тиску) представлено графічно (рис. 2.49, рис. 2.50).

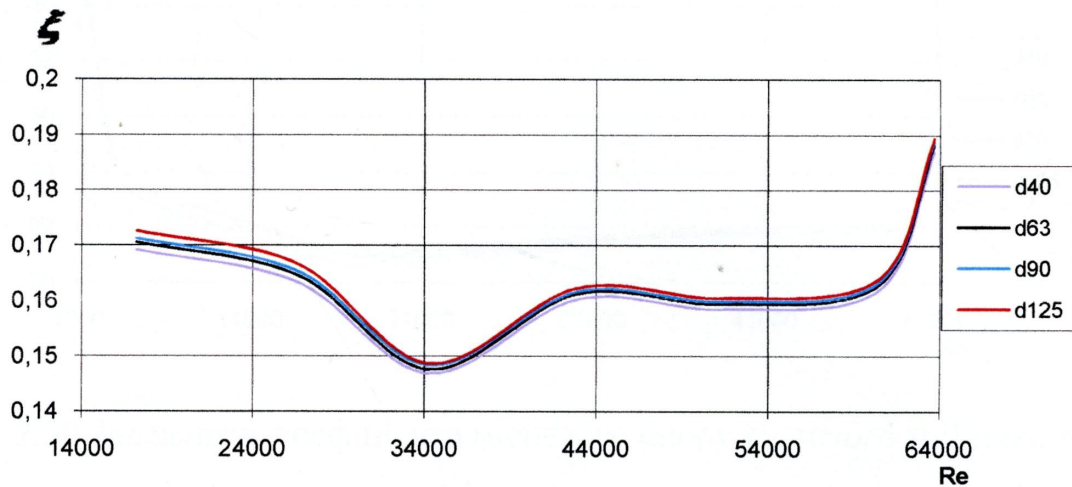


Рис. 2.49 Залежність коефіцієнта місцевого опору сідлового трійника від числа Рейнольдса при русі потоку газу тільки основною магістраллю для різних типорозмірів труб (мережа середнього тиску)

Математичні залежності для сідлового трійника при русі потоку газу тільки основною магістраллю (мережа середнього тиску):

- при $15000 < Re < 35000$

$$\xi = -8,806 \cdot 10^{-11} \cdot Re^2 + 3,232 \cdot 10^{-6} \cdot Re + 0,1397; \quad (2.27)$$

- при $35000 < Re < 43000$

$$\xi = 1,556 \cdot 10^{-6} \cdot Re + 0,0936; \quad (2.28)$$

- при $43000 < Re$

$$\xi = 2,775 \cdot 10^{-14} \cdot Re^3 - 4,26 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 + 2,159 \cdot 10^{-4} \cdot Re - 3,454. \quad (2.29)$$

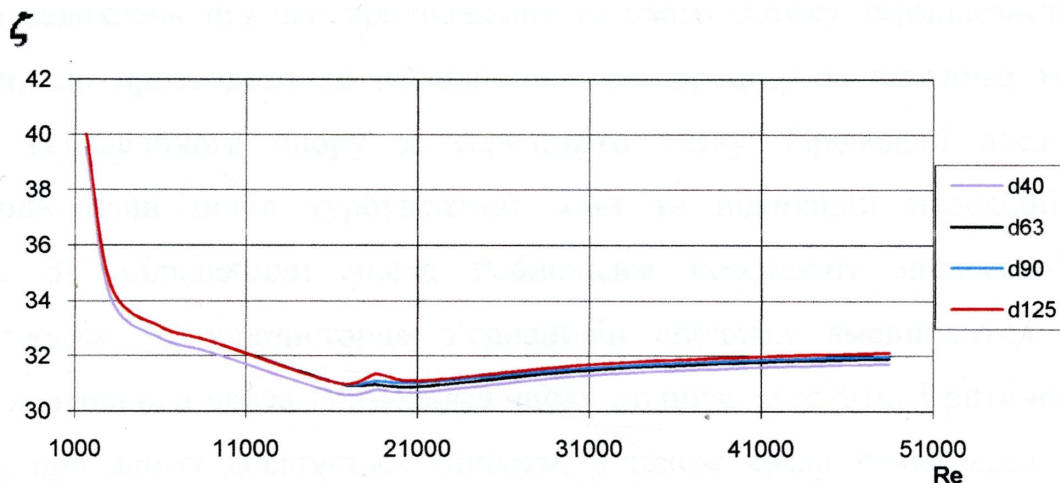


Рис. 2.50 Залежність коефіцієнта місцевого опору сідлового трійника від числа Рейнольдса при русі потоку газу тільки відводом для різних типорозмірів труб (мережа середнього тиску)

Математичні залежності для сідлового трійника при русі потоку газу тільки відводом (мережа середнього тиску):

- при $4000 < Re < 17000$

$$\xi = 20,677 \cdot Re^{0,0398}; \quad (2.30)$$

- при $17000 < Re < 20000$

$$\xi = -7 \cdot 10^{-5} \cdot Re + 29,419; \quad (2.31)$$

- при $20000 < Re$

$$\xi = 3,831 \cdot 10^{-14} \cdot Re^3 - 5,264 \cdot 10^{-9} \cdot Re^2 + 2,572 \cdot 10^{-4} \cdot Re + 27,25. \quad (2.32)$$

Проаналізувавши отримані графічні залежності коефіцієнта місцевого опору терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів від числа Рейнольдса для різного типорозміру труб бачимо наявність різких стрибків, що свідчить про

зникнення завихрень під час проходження газового потоку терморезисторними з'єднаннями, що призводить до нестационарності процесу за низького тиску та збільшення гідравлічного опору за середнього тиску. Проведені дослідження виявили додатковий поділ турбулентної зони та відповідні перехідні числа Рейнольдса. Зі збільшенням числа Рейнольдса коефіцієнт місцевого опору терморезисторних з'єднань спочатку зменшується, а при досягненні критичного числа Рейнольдса знову починає зростати. Критичне число Рейнольдса, при якому досягається мінімум, а також числа Рейнольдса загалом залежать від відносної (гідравлічної) шорсткості, яка в свою чергу залежить від товщини пристінового шару. Характер потоку в сідловому трійнику міняється зі зміною відношення швидкостей чи витрат (при русі газу тільки основною магістраллю та тільки відводом).

Експериментальні дослідження сідлових та терморезисторних трійників виявили застійні зони із високим тиском, які утворюються у разі перекривання основної магістралі або відводу, що викликає звуження потоку газу та створює ударні хвилі, за рахунок чого зменшується подача газу.

Значення коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань, які визначені теоретичним та експериментальним шляхом наведено в табл. 2.4. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність теоретично визначених коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань.

Акт та протокол експериментальних досліджень наведено в додатку Б.

Таблиця 2.4

Коефіцієнти місцевих опорів терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів визначені експериментально та теоретично

Коефіцієнт місцевого опору терморезисторного з'єднання	Терморезисторне з'єднання						пере- хід редук- ційний
	муф -та	колі -но	сідловий трійник		трійник		
			Газ рухається тільки основною магістра- ллю	Газ рухається тільки відво- дом	Газ рухається тільки основною магістра- ллю	Газ рухається тільки відво- дом	
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

Висновки по розділу 2

1. Терморезисторні з'єднання поліетиленових трубопроводів складаються із декількох простих місцевих опорів, які близько розміщені один від одного, що неможливі для розрахунку коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань за допомогою існуючих теоретичних залежностей. Визначити коефіцієнти місцевих опорів терморезисторних з'єднань та дослідити динаміку руху газу кожним терморезисторним з'єднанням дозволяють сучасні програмні комплекси математичного моделювання тривимірних потоків рідин та газів ANSYS CFX, Flow Vision, Flow 3D.

2. З допомогою програмного комплексу Flow Vision теоретично визначено коефіцієнти місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання адекватність якого підтверджено експериментально. Теоретичні дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями виявили, що у терморезисторних з'єднаннях відбувається утворення вихорів, реверсного руху газу та відривання потоку газу від

тінки. Встановлено, що під час розробки існуючих конструкцій терморезисторних з'єднань не враховувалось, який вплив вони будуть на втрати тиску у газовій мережі.

3. Значення коефіцієнтів місцевих опорів не є постійними, а залежать від швидкості потоку газу. Характерною особливістю є те, що для всіх типів досліджуваних місцевих опорів поліетиленових трубопроводів при середньому тиску величина місцевого опору зменшується з ростом швидкості газу, а при низькому тиску навпаки збільшується, в той же час діаметр місцевого опору не має значного впливу на величину коефіцієнта, так різниця між величиною коефіцієнта місцевого опору для терморезисторних з'єднань діаметром 125 мм та 40 мм становить $0,3 \div 0,5$ %.

4. У проміжній області чисел Рейнольдса залежність коефіцієнта місцевого опору від числа Рейнольдса має складний характер. За рахунок особливостей конструкції під час руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів виникають завихрення, що призводить до нестационарності процесу при низькому тиску та збільшення гідравлічного опору при середньому тиску. Проведені дослідження виявили додатковий поділ турбулентної зони та відповідні перехідні числа Рейнольдса залежно від значення гідравлічної шорсткості труб. Зі збільшенням числа Рейнольдса коефіцієнт місцевого опору спочатку зменшується, а при досягненні критичного числа знову починає зростати. Критичне число Рейнольдса, при якому досягається мінімум, а також числа Рейнольдса загалом залежать від відносної (гідравлічної) шорсткості, яка у свою чергу залежить від товщини пристінового шару.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ ТА КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ТИСКУ У ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ

3.1. Удосконалення методики проектування газових мереж із поліетиленових труб

Під час експлуатації газових мереж дуже часто виникають випадки, коли споживачі недоотримують газ. Як правило, причиною цього є підключення додаткових незапроектованих споживачів газу. Внаслідок таких дій сумарна потреба в газі значно перевищує пропускну здатність мережі в цілому. Невідповідність пропускну здатності газової мережі в цілому чи окремих її ділянок призводить до порушення нормального постачання газу споживачам. Невідповідність тиску спостерігається, як правило, у газових мережах низького тиску, де невиробничі втрати газу складають 0,7 % загальної втрати газу. Для усунення цього недоліку необхідна реконструкція газової мережі. При цьому спочатку необхідно провести детальний аналіз стану системи з метою виявлення причин перевантаження системи і розробити рекомендації для проведення реконструкції або врахування можливих перевантажень у майбутньому.

Реконструкція газової мережі здійснюється шляхом часткової заміни ділянок газопроводів мережі на газопроводи більшого діаметра, паралельного прокладання нових ділянок газопроводів або спорудження додаткових джерел газопостачання. При проведенні реконструкції існуючих газових мереж населених пунктів необхідно, щоб довжини ділянок газопроводів, які будуть замінюватись, були мінімальними.

З результатів теоретичних та експериментальних досліджень динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів описаних у розділі 2 видно, що у терморезисторних з'єднаннях поліетиленових трубопроводів відбуваються значні втрати тиску, які є значно більші, ніж втрати тиску в

аналогічних місцевих опорах сталевих трубопроводів. Також втрати напору по довжині залежать від шорсткості внутрішньої поверхні труб, яка для поліетиленових трубопроводів є в декілька разів меншою, ніж для сталевих, а тому втрати тиску по довжині для поліетиленових трубопроводів будуть менші, ніж для сталевих. Тому прийняте у ДБН В.2.5 - 20 [44] положення про те, що втрати напору у місцевих опорах дорівнюють 10 % від втрат напору по довжині, для поліетиленових трубопроводів є сумнівним і вимагає проведення відповідних досліджень. З цією метою була розроблена схема газової мережі реального населеного пункту і проведено її розрахунок за методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44] та розрахунок із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання. Результати розрахунків наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результати розрахунків газової мережі із поліетиленових труб за методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44] та із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання

За методикою наведеною у ДБН В.2.5 – 20 [44]				Із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання					
Назва ділянки	Втрати тиску, Па			Діаметр та товщина стінки, мм	Втрати тиску, Па			Діаметр та товщина стінки, мм	Відсоток
	по довжині	у місцевих опорах	загальні		по довжині	у місцевих опорах	загальні		
Перший основний напрямок									
45-64	33	3	36	40x3,5	8	30	38	50x2,9	375
44-45	71	7	78	50x2,9	76	6	82	50x2,9	8
44-63	12	1	13	40x3,5	4	18	22	50x2,9	450
43-44	40	4	44	75x4,3	42	17	58	75x4,3	40
42-43	26	3	29	90x5,2	28	20	47	90x5,2	71
36-42	68	7	75	90x5,2	71	26	97	90x5,2	37
35-36	8	1	9	110x6,3	8	10	19	110x6,3	125
30-35	21	2	23	110x6,3	22	20	41	110x6,3	91
29-30	43	4	47	110x6,3	48	30	78	110x6,3	63
26-29	15	2	17	125x7,1	17	8	25	125x7,1	47

Продовження табл. 3.1

Назва лінійки	Втрати тиску, Па			Діаметр та товщина стінки, мм	Втрати тиску, Па			Діаметр та товщина стінки, мм	Відсоток
	по довжині	у місцевих опорах	загальні		по довжині	у місцевих опорах	загальні		
26-58	202	20	222	40x3,5	40	45	85	50x2,9	113
25-26	30	3	33	140x8	34	9	43	140x8	26
24-25	31	3	34	140x8	35	22	57	140x8	63
21-24	46	5	51	140x8	28	28	55	140x8	100
46-45	44	4	48	40x3,5	34	14	48	40x3,5	41
47-46	64	6	70	50x2,9	62	27	89	50x2,9	44
47-49	54	5	59	40x3,5	16	28	44	40x3,5	175
48-47	62	6	68	75x4,3	53	27	79	75x4,3	51
39-48	50	5	55	90x5,2	45	28	72	90x5,2	62
40-41	16	2	18	40x3,5	2	26	28	40x3,5	1300
39-40	12	1	13	50x2,9	23	6	29	40x3,5	26
38-39	45	5	50	110x6,3	40	28	67	110x6,3	70
37-38	16	2	18	110x6,3	14	35	49	110x6,3	250
37-36	75	8	83	40x3,5	68	14	82	40x3,5	21
32-37	7	1	8	125x7,1	7	4	11	125x7,1	57
32-33	48	5	53	40x3,5	61	10	71	40x3,5	16
31-32	10	1	11	160x9,1	9	8	17	140x8	89
31-30	64	6	70	40x3,5	20	22	42	40x3,5	110
27-31	42	4	46	140x8	38	39	77	140x8	103
27-26	46	5	51	40x3,5	9	33	42	40x3,5	367
27-28	55	5	60	50x2,9	64	33	97	50x2,9	52
22-27	32	3	35	180x10,3	29	45	74	180x10,3	155
22-23	46	5	51	40x3,5	65	14	80	40x3,5	22
21-22	29	3	32	180x10,3	27	31	59	180x10,3	115
20-21	12	1	13	250x14,2	12	23	35	250x14,2	192
7-20	13	1	14	250x14,2	13	16	29	250x14,2	123
9-10	27	3	30	40x3,5	74	24	98	40x3,5	32
56-54	60	6	66	40x3,5	12	49	62	50x2,9	408
56-55	34	3	37	40x3,5	9	54	62	50x2,9	600
9-56	87	9	96	50x2,9	89	13	102	50x2,9	15
8-9	35	3	38	75x4,3	42	16	58	75x4,3	38
7-8	15	1	16	90x5,2	17	11	27	90x5,2	65
6-7	22	2	24	280x15,9	14	24	38	280x15,9	171
6-53	419	42	461	50x2,9	429	162	591	50x2,9	38
1-6	47	5	52	280x15,9	40	2	43	280x15,9	5

Назва ділянки	Втрати тиску, Па			Діаметр та товщина стінки, мм	Втрати тиску, Па			Діаметр та товщина стінки, мм	Відсоток
	по довжині	у місцевих опорах	загальні		по довжині	у місцевих опорах	загальні		
Другий основний напрямок									
67-68	54	5	59	50x2,9	55	28	82	50x2,9	51
66-67	25	3	28	63x3,6	26	8	35	63x3,6	31
65-66	19	2	21	75x4,3	44	16	60	63x3,6	36
49-65	53	5	58	75x4,3	54	32	89	75x4,3	59
50-49	39	4	43	90x5,2	45	16	61	90x5,2	36
51-50	80	8	88	90x5,2	35	38	72	110x6,3	109
41-51	19	2	21	110x6,3	21	5	26	110x6,3	24
62-61	59	6	65	40x3,5	12	45	58	50x2,9	375
62-60	37	4	41	40x3,5	10	20	30	50x2,9	200
62-59	7	1	8	40x3,5	2	19	21	50x2,9	950
41-62	140	14	154	63x3,6	143	46	190	63x3,6	32
33-41	48	5	53	140x8	54	4	58	140x8	7
34-33	28	3	31	140x8	31	11	42	140x8	35
28-34	16	2	18	160x9,1	18	16	34	160x9,1	89
23-28	39	4	43	160x9,1	42	30	72	160x9,1	71
17-23	20	2	22	160x9,1	22	1	23	160x9,1	5
17-18	144	14	158	40x3,5	129	11	140	40x3,5	9
10-17	5	1	6	180x10,3	6	4	9	180x10,3	67
11-10	29	3	32	180x10,3	30	19	49	180x10,3	63
11-15	75	8	83	40x3,5	49	22	71	40x3,5	45
12-11	25	3	28	180x10,3	26	19	45	180x10,3	73
13-12	10	1	11	200x11,4	11	12	23	200x11,4	109
19-18	55	6	61	40x3,5	57	9	66	40x3,5	16
15-19	47	5	52	63x3,6	49	12	62	63x3,6	24
16-15	63	6	69	75x4,3	68	12	80	75x4,3	18
13-16	48	5	53	90x5,2	52	6	58	90x5,2	12
14-13	5	1	6	225x12,8	6	9	14	225x12,8	150
14-57	56	6	62	40x3,5	12	75	87	50x2,9	625
3-14	20	2	22	225x12,8	21	34	55	225x12,8	162
3-4	277	28	305	50x2,9	279	8	287	50x2,9	3
2-3	33	3	36	225x12,8	20	15	35	225x12,8	75
1-2	22	2	24	250x14,2	22	2	24	250x14,2	9
Третій основний напрямок									
5-4	113	11	124	40x3,5	112	1	114	40x3,5	1
5-52	12	1	13	40x3,5	4	2	6	50x2,9	50
1-5	219	22	241	75x4,3	226	8	233	75x4,3	4

Втрати тиску у газовій мережі із поліетиленових труб розраховані за методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44] та розраховані із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання по основних напрямках наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Втрати тиску у газовій мережі із поліетиленових труб розраховані за методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44] та розраховані із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання по основних напрямках

Основний напрямок	Кількість місцевих опорів (загальна)	Кількість місцевих опорів (на 1 км)	Довжина, м	Загальні втрати, Па		Кінцевий тиск, Па		% від допустимого перепаду тиску (1200), Па	
				За методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44]	Із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання	За методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44]	Із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання	За методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44]	Із урахуванням місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання
1	1123	598	1878	567	785	2433	2215	47	65
2	602	277	2174	650	905	2350	2094	54	75
3	18	37	486	365	347	2635	2653	30	29

Як бачимо при розрахунку газової мережі із поліетиленових труб за методикою наведеною у ДБН В.2.5 - 20 [44] втрати тиску набагато менші, ніж із урахуванням кожного місцевого опору. Втрати тиску у місцевих опорах на деяких ділянках досягають набагато більшої величини, ніж закладені в нормативну методикою 10 % від втрат тиску по довжині, а в окремих випадках набагато перевищують втрати тиску по довжині. Геометричні параметри системи, зокрема діаметр трубопроводів, на деяких ділянках змінюється на порядок. Якщо ж

врахувати ще підключення додаткових споживачів газу (декілька будинків) за допомогою сідлового трійника, то необхідно збільшувати типорозміри трубопроводів ще на порядок. Тому урахування кожного місцевого опору поліетиленових трубопроводів дозволить на стадії проектування врахувати збільшення навантаження в системі і тим самим запобігти необхідності в подальшому здійснювати реконструкцію системи, що призводить до додаткових економічних втрат, а відповідно продовжить термін експлуатації газової мережі без залучення додаткових коштів.

На основі проведених досліджень було визначено коефіцієнти еквівалентної довжини L_p у залежності від кількості місцевих опорів на 1 км довжини газової мережі та типу місцевих опорів. Коефіцієнти еквівалентної довжини наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Коефіцієнти еквівалентної довжини із урахуванням типу місцевих опорів та їх кількості на 1 км довжини

Кількість місцевих опорів на 1 км	0	1	2	3	4	5	10	15	20	25	50	60	70	80	90	100
L_p	1	1,02	1,04	1,06	1,07	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,93	2,12	2,3	2,5	2,7	2,9

Наведені вище коефіцієнти знайшли відображення у розробленому галузевому керівному документі ВАТ “Укргазпроект” “Комплексна галузева методика розрахунку газових мереж із поліетиленових і сталевих труб” (додаток В).

3.2. Удосконалення конструкцій терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів та дослідження ефективності їх застосування

Як було встановлено в попередніх розділах терморезисторні з'єднання поліетиленових трубопроводів мають складну конфігурацію внутрішньої поверхні, складаються з багатьох близько розміщених простих місцевих опорів, що призводить до значних завихрень газового потоку, відриву газового потоку від стінок, реверсних рухів газу тощо. Все це в свою чергу призводить до значних втрат тиску у газових мережах. Тому існуючі конструкції терморезисторних з'єднань вимагають детального розгляду з точки зору динаміки руху ними газу та удосконалення з метою зменшення коефіцієнта місцевого опору.

Величина коефіцієнта місцевого опору залежить від типу місцевого опору, його геометричних параметрів та режиму течії. При дуже малих числах Рейнольдса потік газу рухається місцевим опором безвідривно, втрати напору обумовлюються безпосередньою дією сил в'язкісного тертя і пропорційні швидкості в першій степені. Зі збільшенням числа Рейнольдса виникають ще втрати, обумовлені відривом потоку і утворенням вихорів. При достатньо великих числах Рейнольдса втрати на вихороутворення набувають основного значення, втрати тиску стають пропорційними квадрату швидкості, так як коефіцієнт місцевого опору перестає залежати від числа Рейнольдса і визначається тільки геометрією потоку. Втрати на вихороутворення мають найбільшу відносну величину, втрати, обумовлені відривом потоку, – меншу і, нарешті, втрати на тертя складають найменшу долю загальних втрат.

Таким чином, для зменшення коефіцієнта місцевого опору терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів необхідно розробити такі конструкції

терморезисторних з'єднань, які б дозволили виключити або суттєво зменшити втрати напору, зумовлені вихороутворенням та відривом потоку.

Результати проведених досліджень динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів дають можливість виявити місця вихороутворення, реверсного руху газу та відриву потоку, що є базою для розробки оптимальних конструкцій терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів та вказує конструктивні шляхи зменшення коефіцієнта гідравлічного опору таких місцевих опорів.

Розглянемо терморезисторну муфту (див. рис. 1.2). Як було встановлено в розділі 2, падіння тиску в місці стикування поліетиленових труб зумовлене стійким вихором у кільцевій порожнині (див. рис. 2.2, рис. 2.3). Тому для виключення падіння тиску потрібно усунути стійких вихор у кільцевій порожнині між поліетиленовими трубами. Це можна здійснити виконанням кільцевого виступу всередині муфти (рис. 3.1). Після встановлення запропонованої муфти з внутрішнім кільцевим виступом кільцевої порожнини між поліетиленовими трубами не буде падіння тиску (рис. 3.2), а отже і не буде падіння тиску. Крім того, така конструкція терморезисторної муфти дозволяє чітко зафіксувати труби в муфті під час монтажу.

Розглянемо сідловий трійник (див. рис. 1.4). Як було встановлено в розділі 2, найбільше падіння тиску спостерігається при русі газового потоку тільки відводом сідлового трійника (див. рис. 2.12, рис. 2.13), що обумовлено реверсним рухом газу в сідловині трійника та відриванням потоку від стінки на початку відводу (див. рис. 2.10). Тому для зменшення падіння тиску потрібно усунути реверсний рух газу в сідловині трійника та відривання потоку від стінки на початку відводу. Це можна здійснити подовженням заглушки та заокругленням її нижньої частини (рис. 3.3). Сідловий трійник із встановленою в ньому подовженою заглушкою наведений на рис. 3.4.

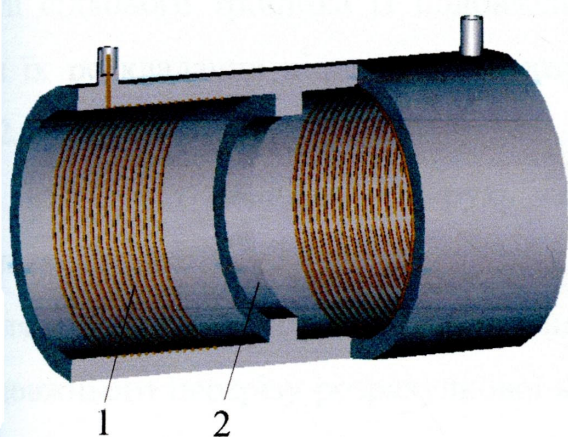


Рис. 3.1 Терморезисторна муфта з кільцевим виступом:
1 – спіраль; 2 – кільцевий виступ

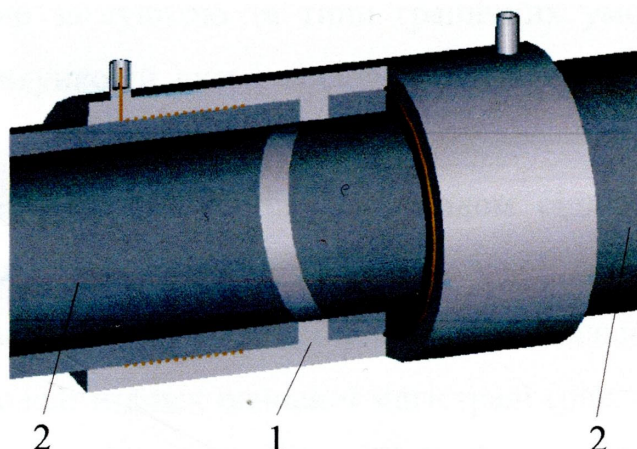


Рис. 3.2 Встановлена терморезисторна муфта з кільцевим виступом:
1 – терморезисторна муфта з кільцевим виступом; 2 – поліетиленова труба

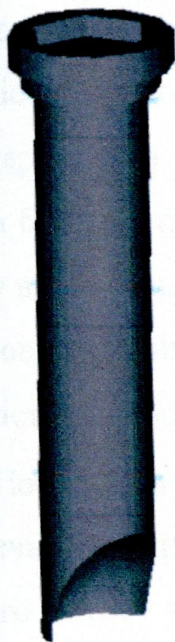


Рис. 3.3 Подовжена заглушка

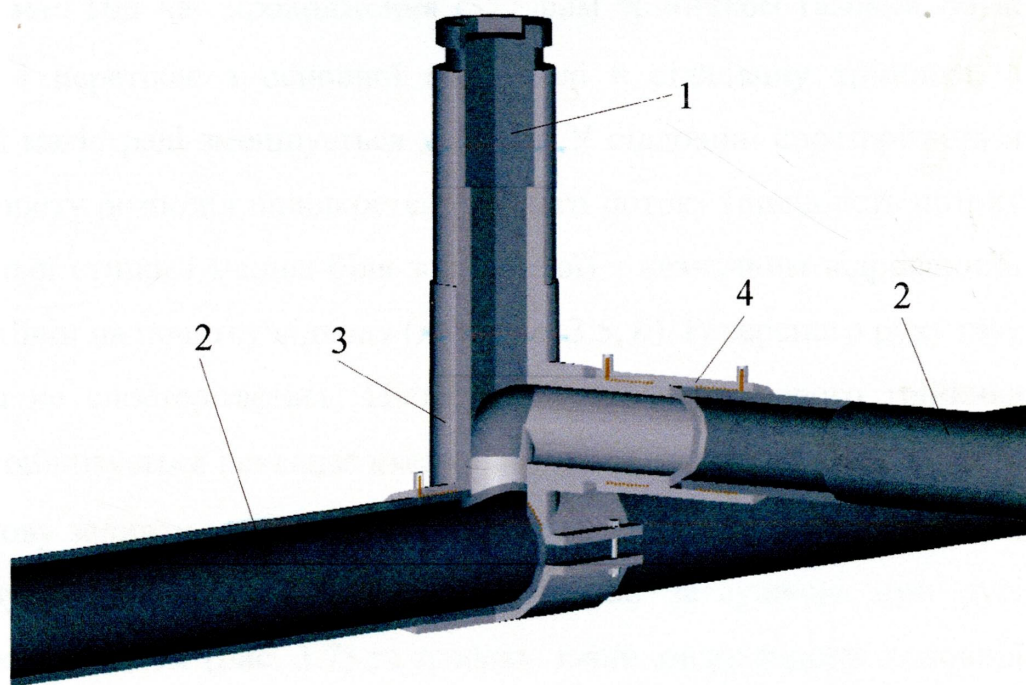


Рис. 3.4 Сідловий трійник з подовженою заглушкою:
1 – подовжена заглушка; 2 – поліетиленова труба;
3 – сідловий трійник; 4 – терморезисторна муфта

Для дослідження ефективності застосування подовженої заглушки та визначення коефіцієнта місцевого опору сідлового трійника із подовженою заглушкою проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу, посередині якої встановлено сідловий трійник із подовженою заглушкою. Основні геометричні розміри досліджуваної тривимірної

Моделі сідлового трійника із подовженою заглушкою та типи граничних умов і місця їх розкладання відповідають розрахунковій схемі сідлового трійника (див. рис. 2.5).

Проведемо моделювання руху газового потоку тільки відводом сідлового трійника. Візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу та векторів швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього перерізу розрахункової моделі вздовж основної магістралі (рис. 3.5, *а*) і вертикального поперечного перерізу вздовж відводу (рис. 3.5, *б*) та графіків зміни швидкості вздовж осі магістралі (рис. 3.6, *а*) і вздовж осі відводу (рис. 3.6, *б*).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 3.5, *а*) та графіка (див. рис. 3.6, *а*), швидкість потоку газу в основній магістралі до сідлового трійника стала, і вздовж цієї осі складає $9,6 \text{ м/с}$. Під час проходження сідловим трійником газовий потік змінює свій напрям і перетікає з основної магістралі в сідловину трійника, а швидкість в основній магістралі зменшується до нуля. У сідловині спостерігається характерний для повороту розподіл швидкостей газового потоку (швидкість потоку більша біля внутрішньої стінки і менша біля зовнішньої) з незначним відриванням потоку від нижньої стінки на початку відводу (див. рис. 3.5, *б*). Реверсного руху газу в сідловині трійника не спостерігається. Після проходження сідлового трійника швидкість у відводі стабілізується і складає вздовж осі $16,6 \text{ м/с}$ (див. рис. 3.6, *б*).

Побудуємо тонову заливку тиску в площинах вертикального повздовжнього і поперечного перерізу сідлового трійника з подовженою заглушкою при русі газового потоку тільки відводом (рис. 3.7) та графіки зміни тиску вздовж основної магістралі і відводу (рис. 3.8). Як видно з тонової заливки (див. рис. 3.7, *а*) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 3.8, *а*), перед сідловим трійником відбувається падіння тиску до 219380 Па , що зумовлено перетіканням газового потоку в сідловину трійника. У сідловині спостерігається характерний для повороту розподіл тиску з пониженням тиску на вході у відвід до 215586 Па .

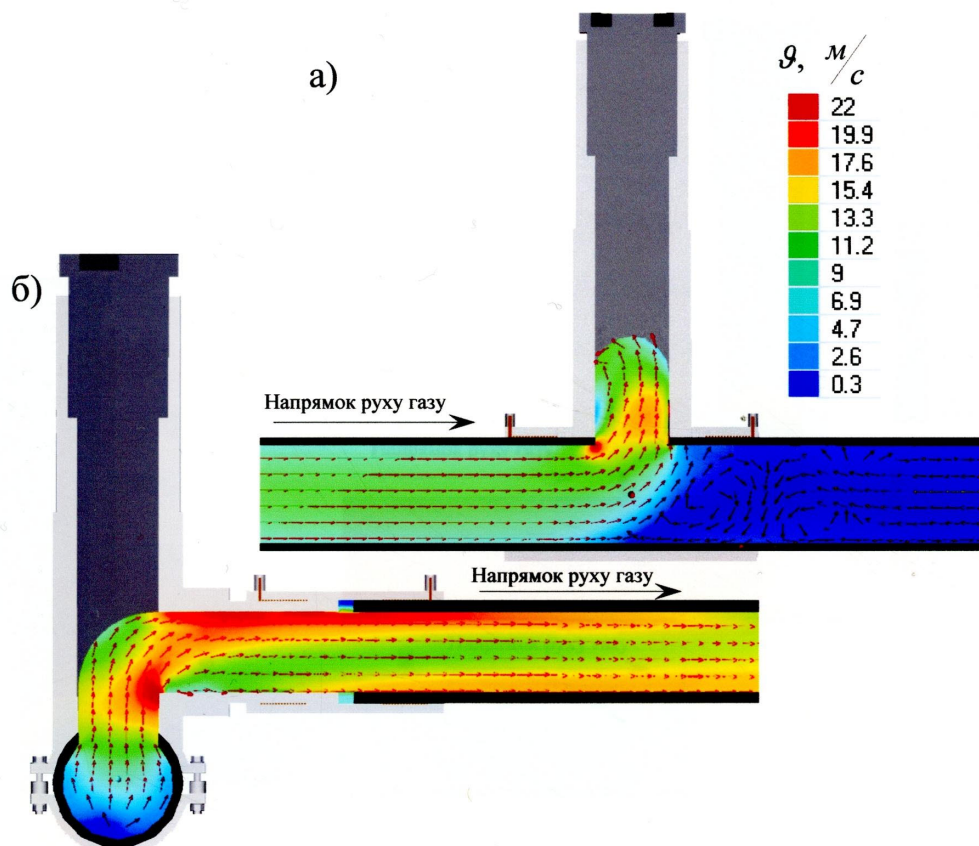


Рис. 3.5 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника з подовженою заглушкою при русі газового потоку тільки відводом:
а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

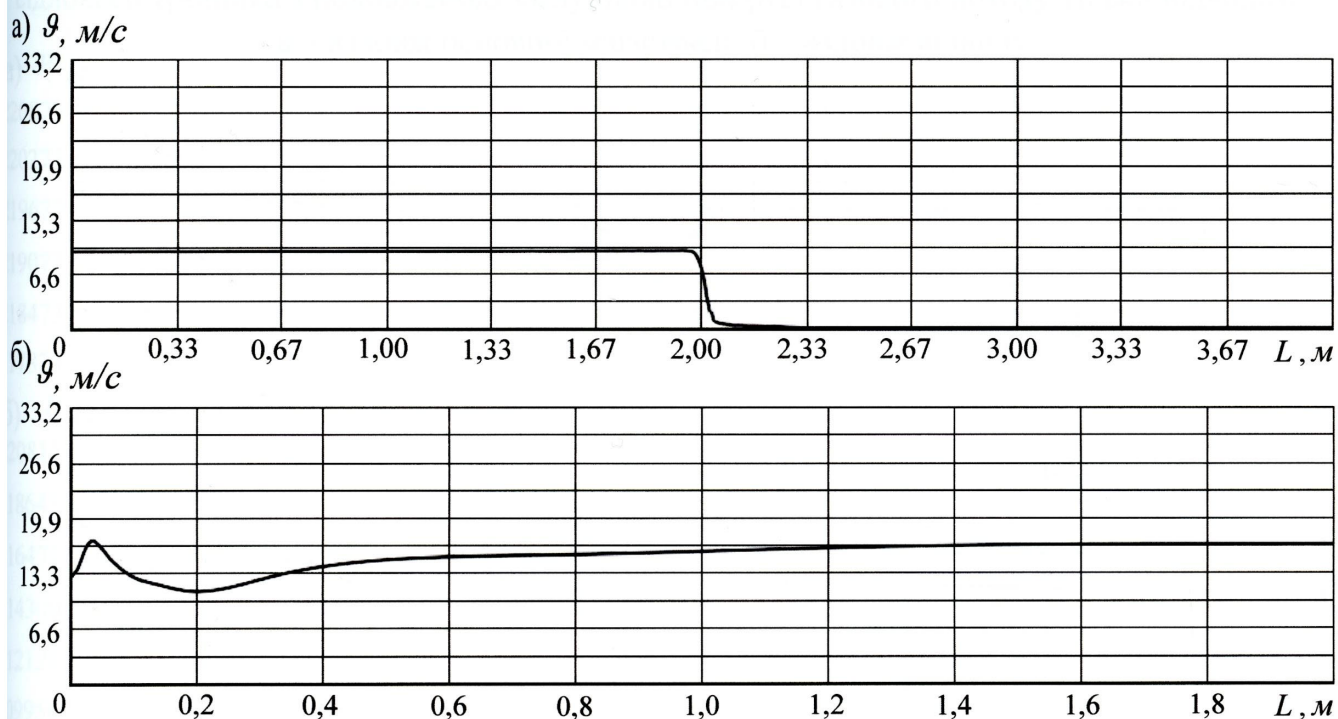


Рис. 3.6 Зміна швидкості потоку газу при його русі тільки відводом сідлового трійника з подовженою заглушкою:
а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

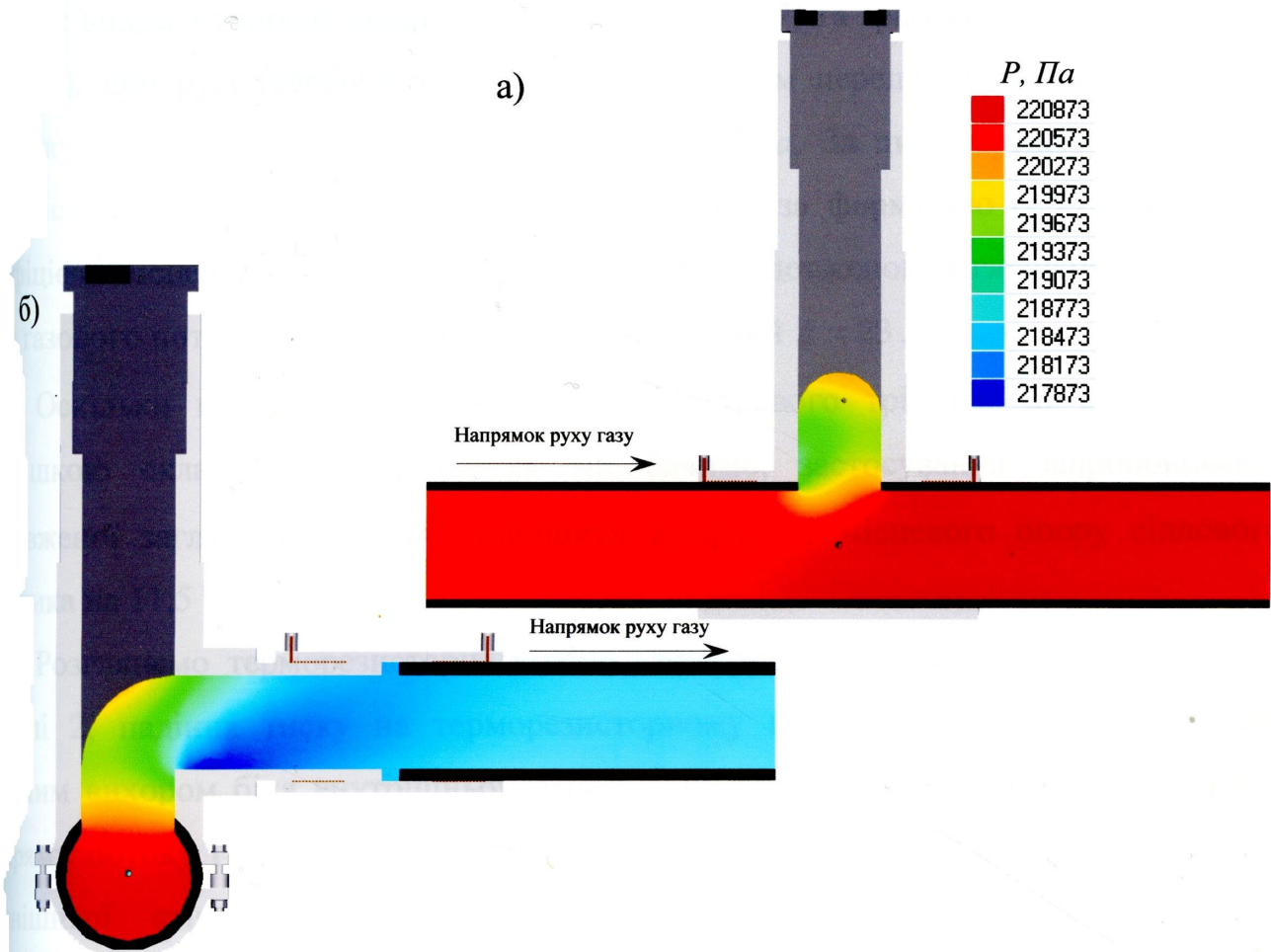
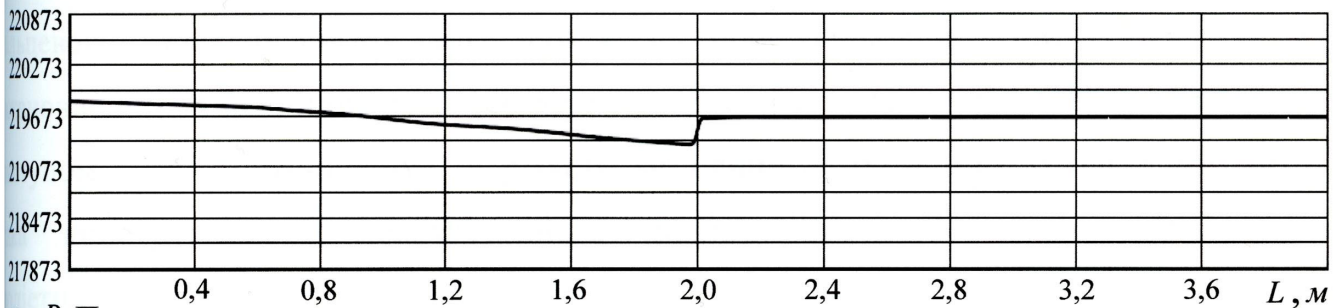


Рис. 3.7 Розподіл тиску в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу сідлового трійника з подовженою заглушкою при русі газового потоку тільки відводом:

а – вздовж основної магістралі; б – вздовж відводу

а) $P, \text{Па}$



б) $P, \text{Па}$

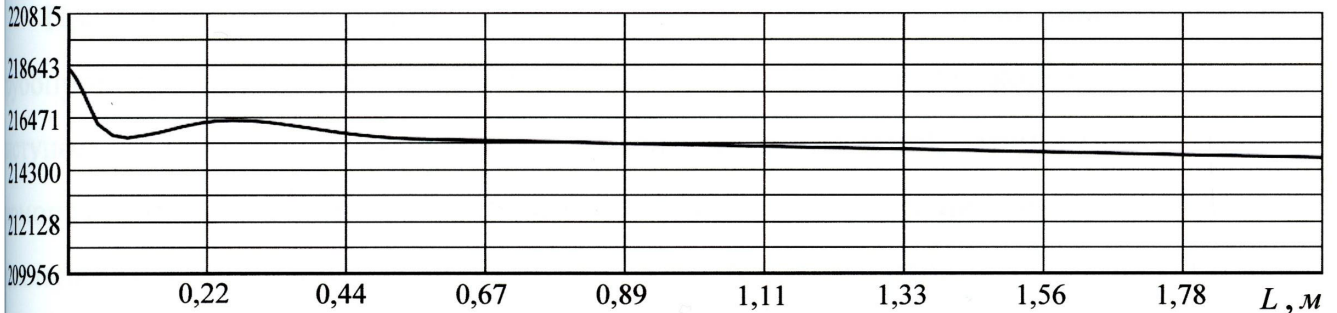


Рис. 3.8 Зміна тиску газу при русі газового потоку тільки відводом сідлового трійника з подовженою заглушкою:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

Як видно з тонової заливки тиску (див. рис. 3.7) та графіків зміни тиску (див. рис. 3.8), при русі газового потоку тільки відводом перепад тиску на сідловому трійнику з подовженою заглушкою складає 805 Па . За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у сідловий трійник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника з подовженою заглушкою, який при русі газового потоку тільки відводом трійника рівний $\xi = 23$.

Оскільки коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника зі стандартною заглушкою складає $\xi = 26$, то, як ми бачимо, застосування запропонованої подовженої заглушки дозволяє зменшити коефіцієнт місцевого опору сідлового трійника на $11,5 \%$.

Розглянемо терморезисторне коліно (див. рис. 1.6). Як було встановлено у розділі 2, падіння тиску на терморезисторному коліні в основному зумовлене значним вихором біля внутрішньої стінки, який у свою чергу зумовлений зміною напрямку потоку і різким звуженням, та вихором у місці різкого розширення біля зовнішньої стінки (див. рис. 2.18). Для зменшення падіння тиску на терморезисторному коліні можна усунути вихор у місці різкого розширення біля зовнішньої стінки та дещо зменшити значний вихор біля внутрішньої стінки. Це можна здійснити усуненням різкого розширення та різкого звуження виконанням кільцевого виступу всередині терморезисторного коліна (рис. 3.9). Після встановлення запропонованого терморезисторного коліна з внутрішнім кільцевим виступом різкого розширення та різкого звуження не буде (рис. 3.10). Крім того, така конструкція терморезисторного коліна дозволяє чітко зафіксувати поліетиленові труби в коліні під час монтажу.

Проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу, посередині якої встановлене терморезисторне коліно з кільцевим виступом. Основні геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі терморезисторного коліна з кільцевим виступом та типи граничних умов і місця їх накладання відповідають розрахунковій схемі терморезисторного коліна (див. рис. 3.17).

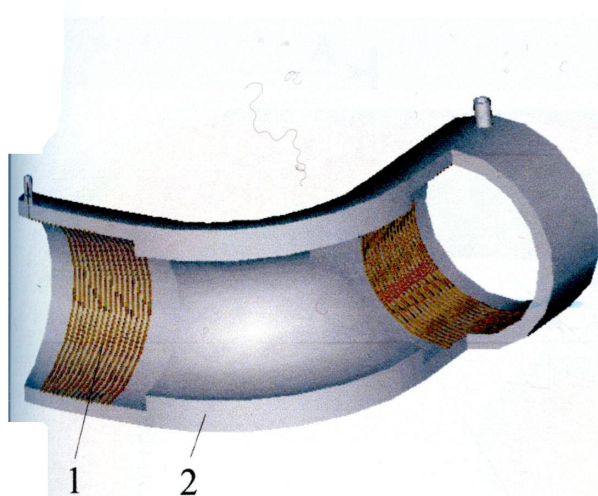


Рис. 3.9 Терморезисторне коліно з кільцевим виступом:
1 – спіраль; 2 – кільцевий виступ

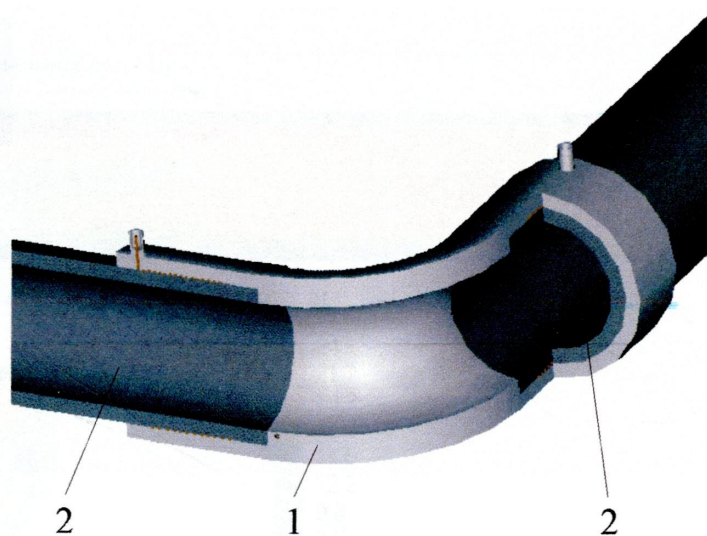


Рис. 3.10 Встановлене терморезисторне коліно з кільцевим виступом:
1 – терморезисторне коліно з кільцевим виступом; 2 – поліетиленова труба

Візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу і векторів швидкості газу в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна з кільцевим виступом (рис. 3.11) та графіка зміни швидкості вздовж його осі (рис. 3.12).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 3.11) та графіка (див. рис. 3.12), швидкість потоку газу в основній магістралі до терморезисторного коліна стала і вздовж його осі складає $22,4 \text{ м/с}$. Під час проходження терморезисторним коліном газовий потік змінює свій напрям. При цьому спостерігається незначне підвищення швидкості біля внутрішньої стінки коліна до 24 м/с та незначне зниження швидкості біля зовнішньої стінки коліна до $14,4 \text{ м/с}$, що є характерним для поворотів. На відміну від терморезисторного коліна без кільцевого виступу (див. рис. 2.18) в даному випадку не спостерігається утворення вихорів та значного зниження швидкості потоку біля стінок посередині коліна. Але ми бачимо відривання потоку від стінки і утворення вихору біля внутрішньої стінки на виході з терморезисторного коліна (див. рис. 3.11). Біля зовнішньої стінки на виході з коліна відбувається значне підвищення швидкості до 24 м/с . Після проходження терморезисторного коліна швидкість стабілізується і вздовж осі складає $21,2 \text{ м/с}$ (див. рис. 3.12).

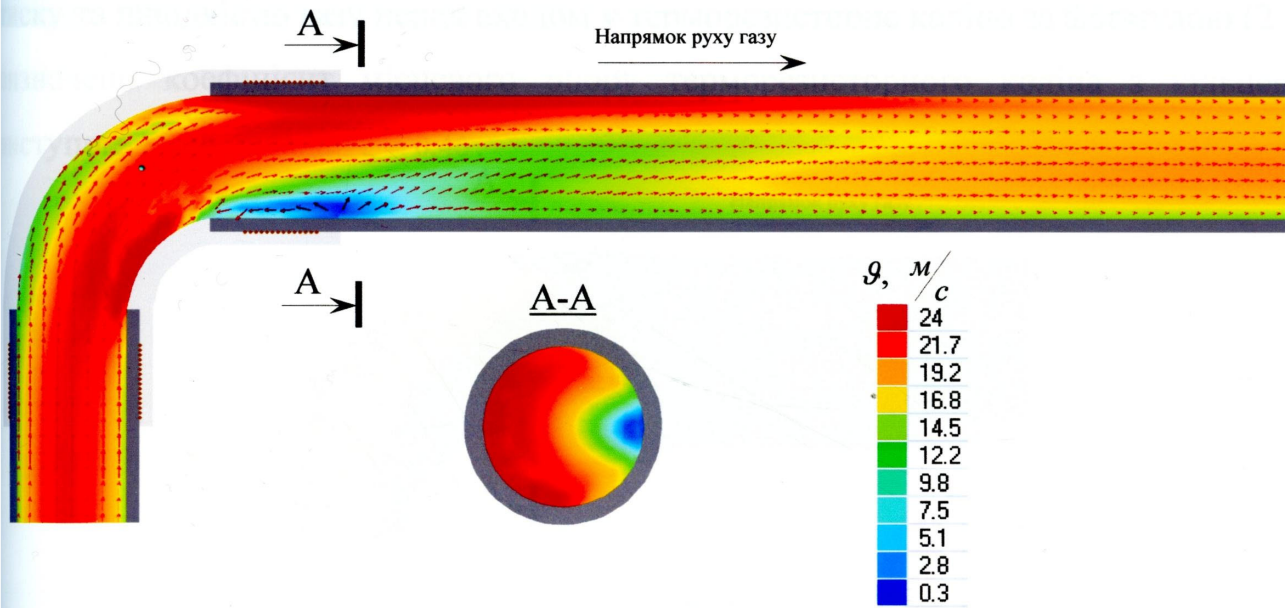


Рис. 3.11 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна з кільцевим виступом

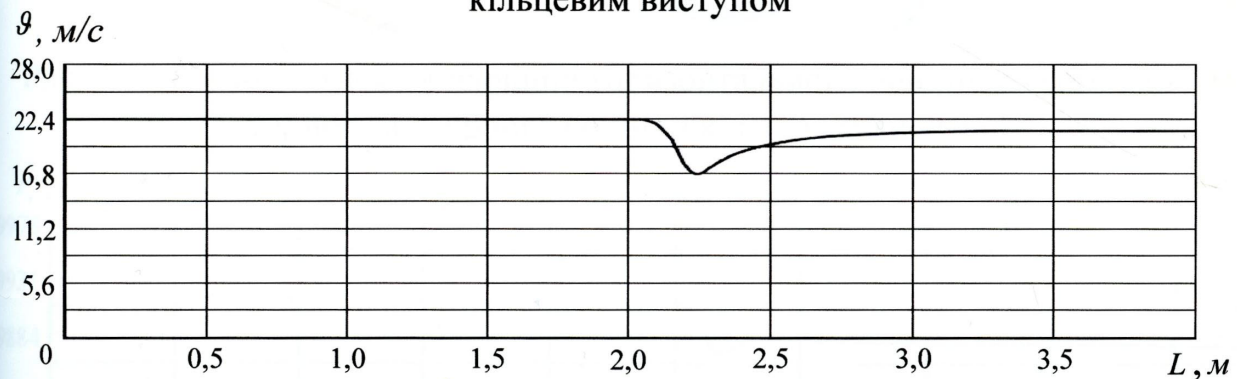


Рис. 3.12 Зміна швидкості потоку газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна з кільцевим виступом

Побудуємо тонову заливку тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна з кільцевим виступом (рис. 3.13) та графік зміни тиску вздовж його осі (рис. 3.14). Як видно з тонової заливки та графіка зміни тиску, перед терморезисторним коліном тиск знижується рівномірно і на його початку складає 219947 Па . Структура потоку посередині терморезисторного коліна визначається збільшенням тиску в напрямі від внутрішньої до зовнішньої стінки. На виході терморезисторного коліна тиск падає до 219860 Па . Перепад тиску на терморезисторному коліні з кільцевим виступом складає 87 Па . За цим перепадом

тиску та швидкістю газу перед входом у терморезисторне коліно за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору терморезисторного коліна з кільцевим виступом, який складає $\xi = 0,46$.

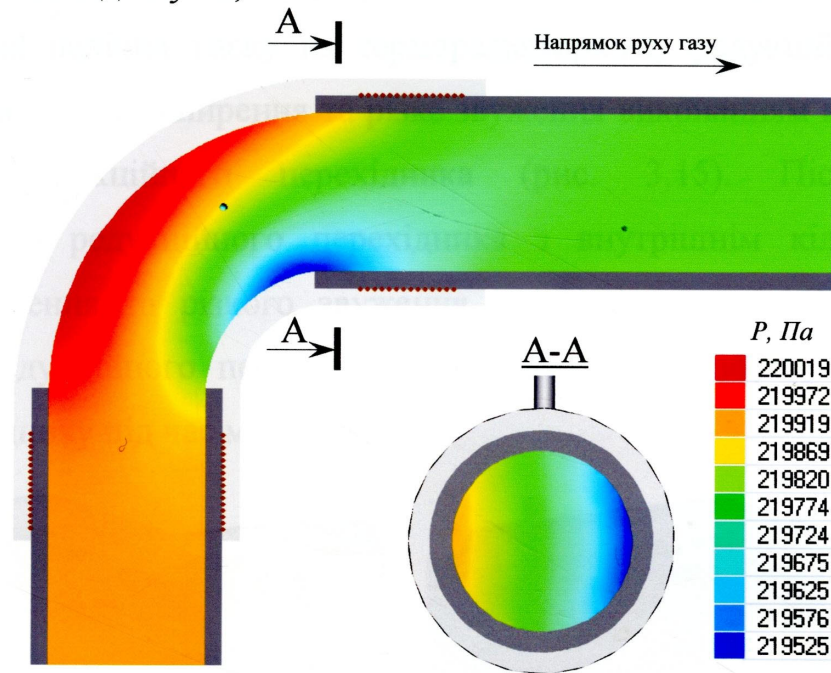


Рис. 3.13 Розподіл тиску в площині горизонтального повздовжнього перерізу терморезисторного коліна з кільцевим виступом

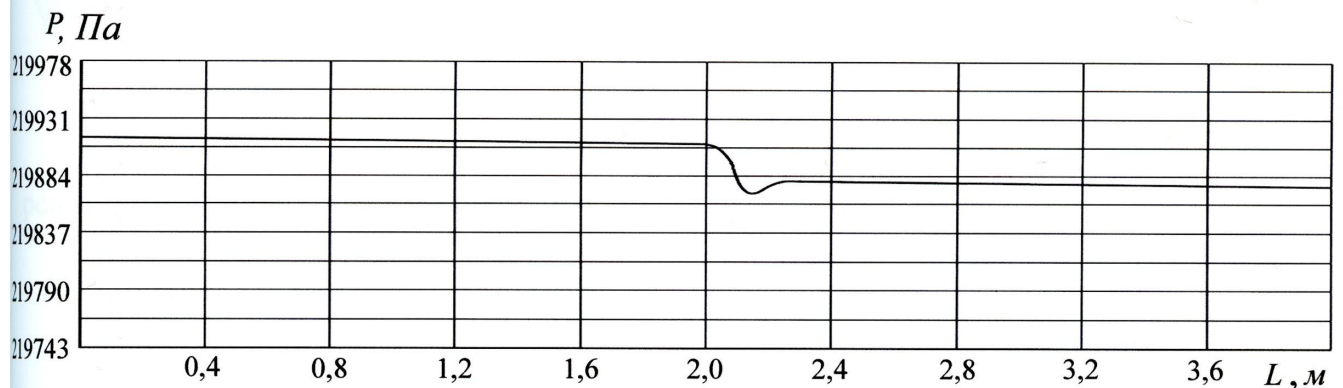


Рис. 3.14 Зміна тиску газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного коліна з кільцевим виступом

Оскільки значення коефіцієнта місцевого опору терморезисторного коліна без кільцевого виступу складає $\xi = 2,1$, то застосування запропонованого терморезисторного коліна з кільцевим виступом дозволяє зменшити коефіцієнт місцевого опору терморезисторного коліна практично на 80%, що підтверджує ефективність застосування запропонованої конструкції терморезисторного коліна.

Розглянемо терморезисторний редуційний перехідник (див. рис. 1.8). Як було встановлено в розділі 2, різке падіння тиску на терморезисторному редуційному

перехіднику зумовлене зменшенням діаметра трубопроводу та відриванням потоку від стінки на початку трубопроводу меншого діаметра (див. рис. 2.23, рис. 2.25). Крім того незначне падіння тиску зумовлює вихор у місці раптового розширення. Для зменшення падіння тиску на терморезисторному редукційному перехіднику можна усунути різке розширення та різке звуження виконанням кільцевого виступу в середині редукційного перехідника (рис. 3.15). Після встановлення запропонованого редукційного перехідника з внутрішнім кільцевим виступом різкого розширення та різкого звуження не буде (рис. 3.16). Крім того, така конструкція редукційного перехідника дозволяє чітко зафіксувати поліетиленові труби в перехіднику під час монтажу.

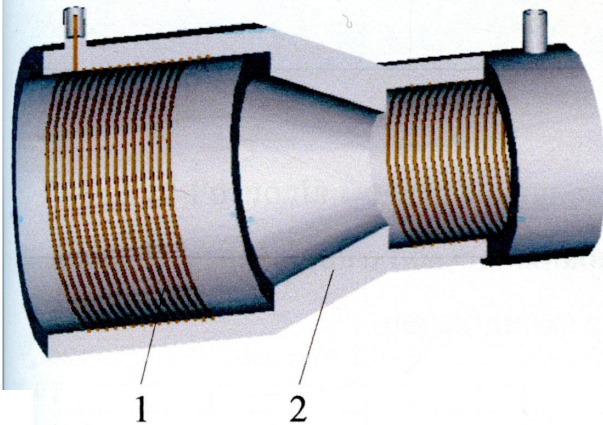


Рис. 3.15 Терморезисторний редукційний перехідник з кільцевим виступом:
1 – спіраль; 2 – кільцевий виступ

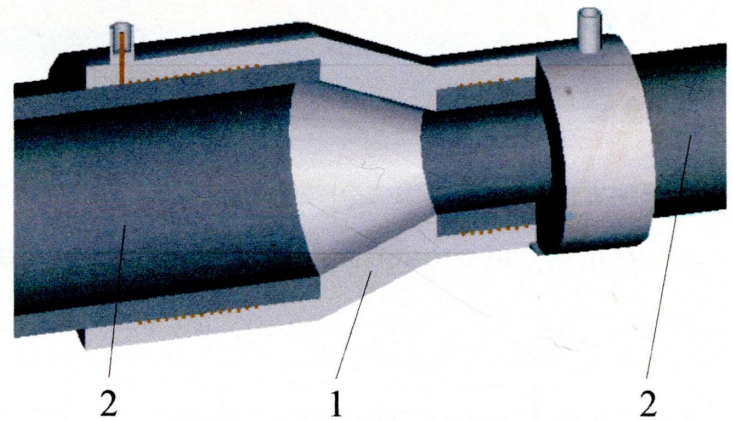


Рис. 3.16 Встановлений терморезисторний редукційний перехідник з кільцевим виступом:
1 – терморезисторний редукційний перехідник з кільцевим виступом;
2 – поліетиленова труба

Проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу, посередині якої встановлено терморезисторний редукційний перехідник із кільцевим виступом. Основні геометричні розміри досліджуваної тривимірної моделі терморезисторного редукційного перехідника з кільцевим виступом та типи граничних умов і місця їх розкладання відповідають розрахунковій схемі терморезисторного редукційного перехідника (див. рис. 2.22).

Як видно з рис. 3.16 перехід від більшого діаметра до меншого відбувається поступово під кутом. За результатами моделювання встановлено, що оптимальним кутом звуження є кут від 15° до 20° , при якому не відбувається відривання потоку

газу від стінки на початку трубопроводу меншого діаметра і падіння тиску на редуційному переходнику є мінімальний.

Візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу і векторів швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу редуційного переходника з кільцевим виступом (рис. 3.17) та графіка зміни швидкості вздовж його осі (рис. 3.18).

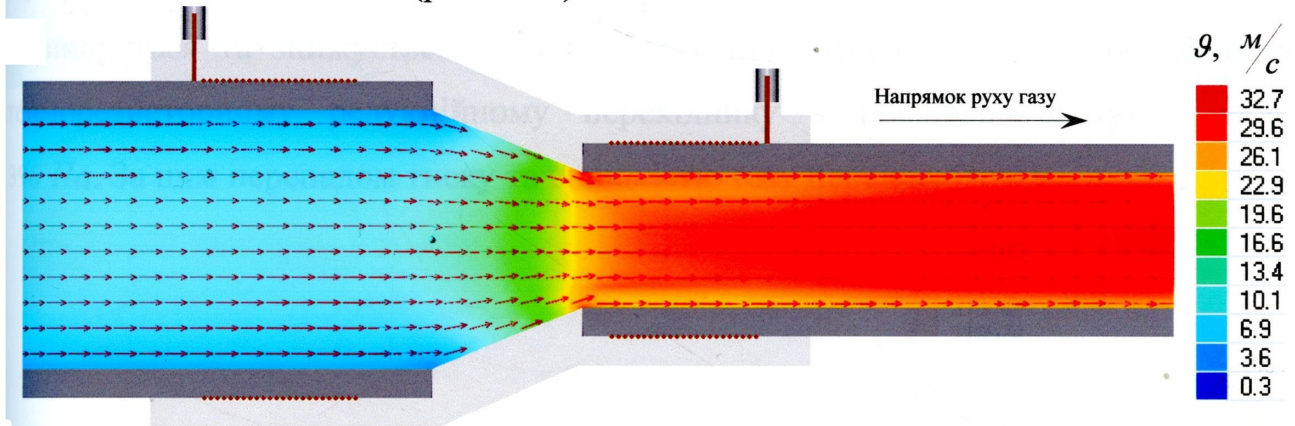


Рис. 3.17 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редуційного переходника з кільцевим виступом

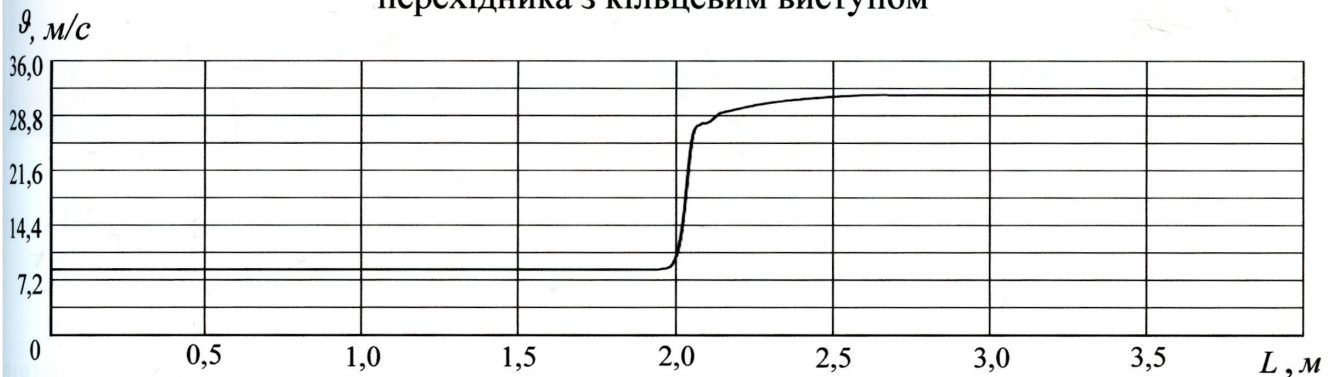


Рис. 3.18 Зміна швидкості потоку газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного редуційного переходника з кільцевим виступом

Як видно з тонової заливки (див. рис. 3.17) та графіка (див. рис. 3.18), швидкість потоку газу до терморезисторного редуційного переходника по осі поліетиленової труби більшого діаметра складає $9,5 \text{ м/с}$. На початку конфузорної частини терморезисторного редуційного переходника починається різке збільшення швидкості потоку газу до $31,6 \text{ м/с}$ вздовж осі на виході терморезисторного редуційного переходника з кільцевим виступом.

Побудуємо тонову заливку тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редукційного перехідника з кільцевим виступом (рис. 3.19) та графік зміни тиску вздовж його осі (рис. 3.20). Як видно з тонової заливки та графіка зміни тиску, перед терморезисторним редукційним перехідником тиск знижується рівномірно і на його початку складає 219202 Па . У місці різкого звуження відбувається різке падіння тиску до 218806 Па , після чого тиск дещо підвищується та знижується, що зумовлено стабілізацією потоку. Перепад тиску на терморезисторному редукційному перехіднику з кільцевим виступом складає 396 Па . За цим перепадом тиску та швидкістю газу перед входом у

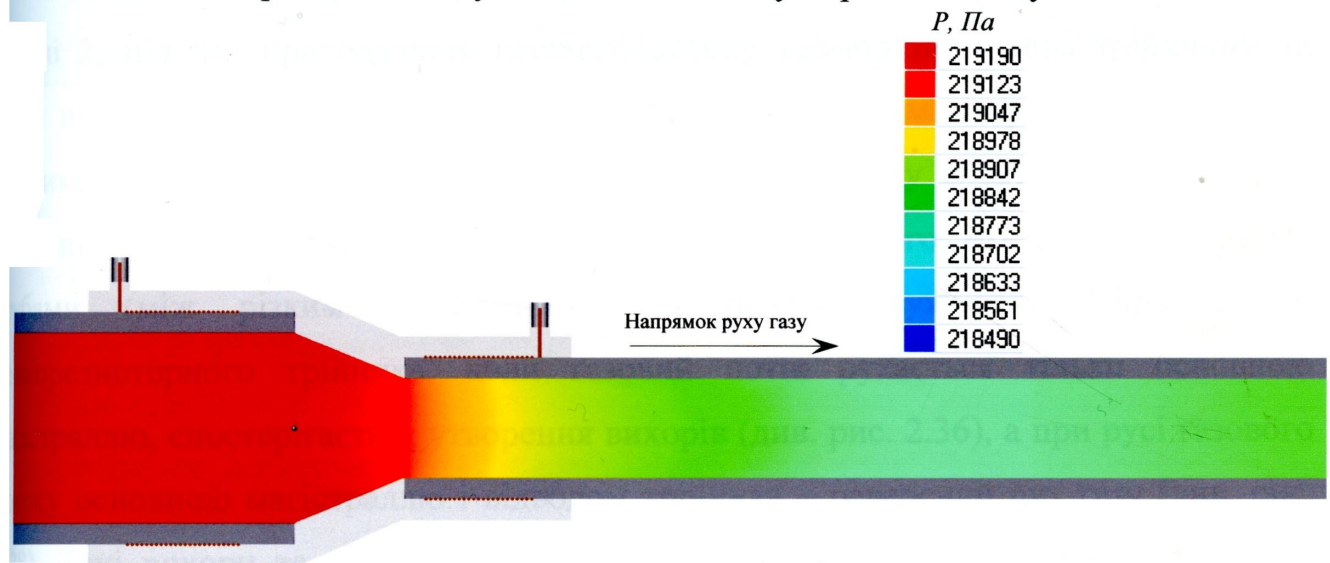


Рис. 3.19 Розподіл тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного редукційного перехідника з кільцевим виступом

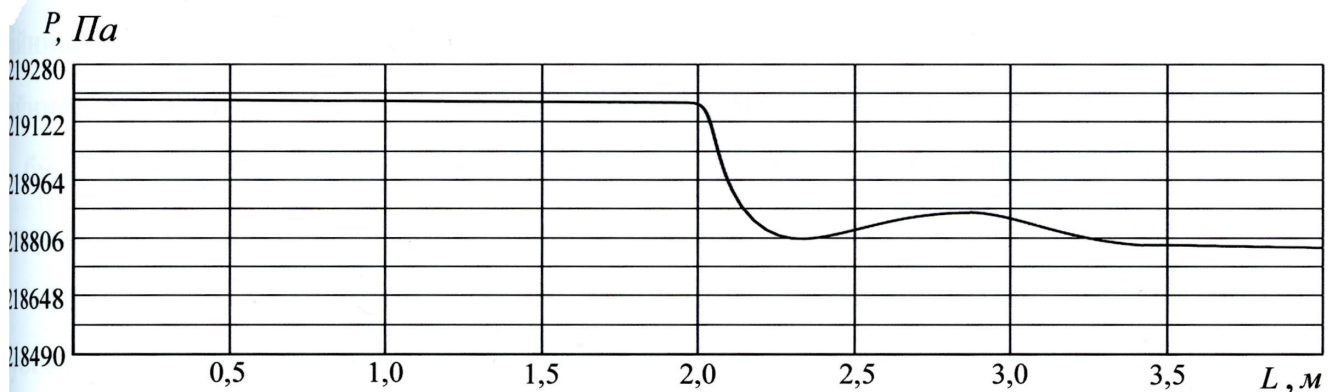


Рис. 3.20 Зміна тиску газу вздовж повздовжньої осі терморезисторного редукційного перехідника з кільцевим виступом

терморезисторний редуційний перехідник за формулою (2.17) визначено коефіцієнт місцевого опору терморезисторного редуційного перехідника з кільцевим виступом, який складає $\xi = 11,6$.

Оскільки значення коефіцієнта місцевого опору терморезисторного редуційного перехідника без кільцевого виступа складає $\xi = 16,6$, то застосування запропонованого терморезисторного редуційного перехідника з кільцевим виступом дозволяє зменшити коефіцієнт місцевого опору терморезисторного редуційного перехідника на 30 %.

Розглянемо терморезисторний трійник (див. рис. 1.10). Як було встановлено у розділі 2, під час проходження газового потоку терморезисторним трійником та після нього (коли газовий потік рухається основною магістраллю і відводом трійника) біля стінки основної магістралі напроти відводу спостерігається значне зменшення швидкості потоку газу (див. рис. 2.28). Крім того, між поліетиленовими трубами (між різким розширенням та різким звуженням) біля стінки терморезисторного трійника, коли газовий потік рухається тільки основною магістраллю, спостерігається утворення вихорів (див. рис. 2.36), а при русі газового потоку основною магістраллю і відводом трійника – реверсний рух газу (див. рис. 2.38). Такі вихори та реверсний рух газу зумовлюють частину втрат напору на терморезисторному трійнику. Для їх виключення можна усунути різке розширення та різке звуження виконанням кільцевого виступу в середині терморезисторного трійника (рис. 3.21). Після встановлення запропонованого терморезисторного трійника з внутрішнім кільцевим виступом різкого розширення та різкого звуження не буде (рис. 3.22). Крім того, така конструкція терморезисторного трійника дозволяє чітко зафіксувати поліетиленові труби в трійнику під час монтажу.

Проведемо моделювання течії природного газу ділянкою поліетиленового трубопроводу, посередині якої встановлений терморезисторний трійник із внутрішнім кільцевим виступом. Основні геометричні розміри досліджуваної натуральної моделі терморезисторного трійника з кільцевим виступом та типові граничні умови і місця їх розкладання відповідають розрахунковій схемі терморезисторного трійника (див. рис. 2.27).

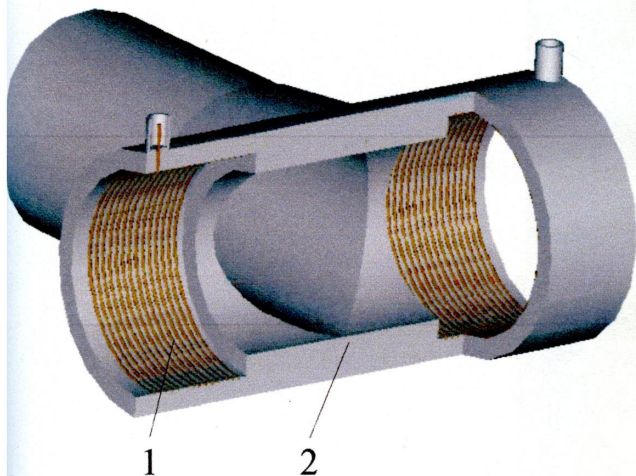


Рис. 3.21 Терморезисторний трійник з кільцевим виступом
1 – спіраль; 2 – кільцевий виступ

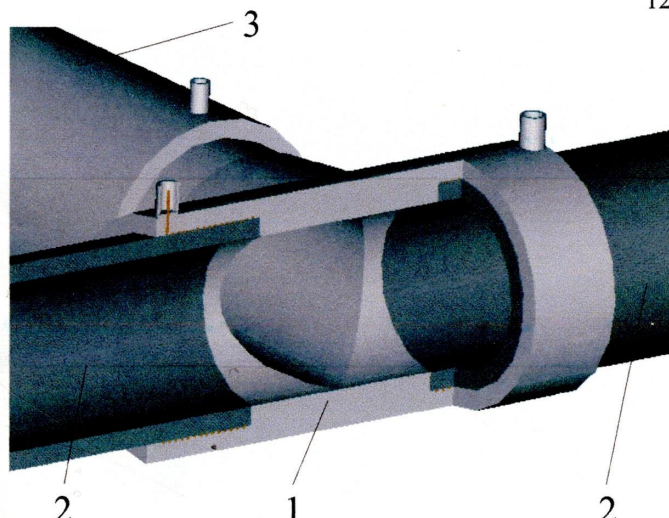


Рис. 3.22 Встановлений терморезисторний трійник з кільцевим виступом
1 – терморезисторний трійник з кільцевим виступом; 2 – поліетиленова труба;
3 – терморезисторна муфта

Проведемо моделювання руху газового потоку основною магістраллю та відводом терморезисторного трійника з кільцевим виступом. Візуалізуємо результати розрахунку шляхом побудови тонової заливки модуля швидкості газу та векторів швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу розрахункової моделі вздовж основної магістралі (рис. 3.23) та графіків зміни швидкості вздовж осі магістралі (рис. 3.24, *a*) і вздовж осі відводу (рис. 3.24, *б*).

Як видно з тонової заливки (див. рис. 3.23) та графіка (див. рис. 3.24, *a*), найбільша швидкість потоку газу спостерігається по осі основної магістралі до терморезисторного трійника з кільцевим виступом і складає $24,8 \text{ м/с}$. Необхідно відмітити, що зниження швидкості потоку газу під час проходження терморезисторним трійником та після нього біля стінки основної магістралі напроти відводу не спостерігається. Крім того не спостерігається реверсного руху газу, що мало місце в розрахунковій моделі терморезисторного трійника без внутрішнього кільцевого виступу (див. рис. 2.28). Далі по ходу потоку основною магістраллю з віддаленням від терморезисторного трійника з внутрішнім кільцевим виступом швидкість стабілізується і вздовж осі основної магістралі складає $13,6 \text{ м/с}$ (див. рис. 3.24, *б*), що є більше, ніж на виході терморезисторного трійника без внутрішнього кільцевого виступу (див. рис. 2.29, *б*).

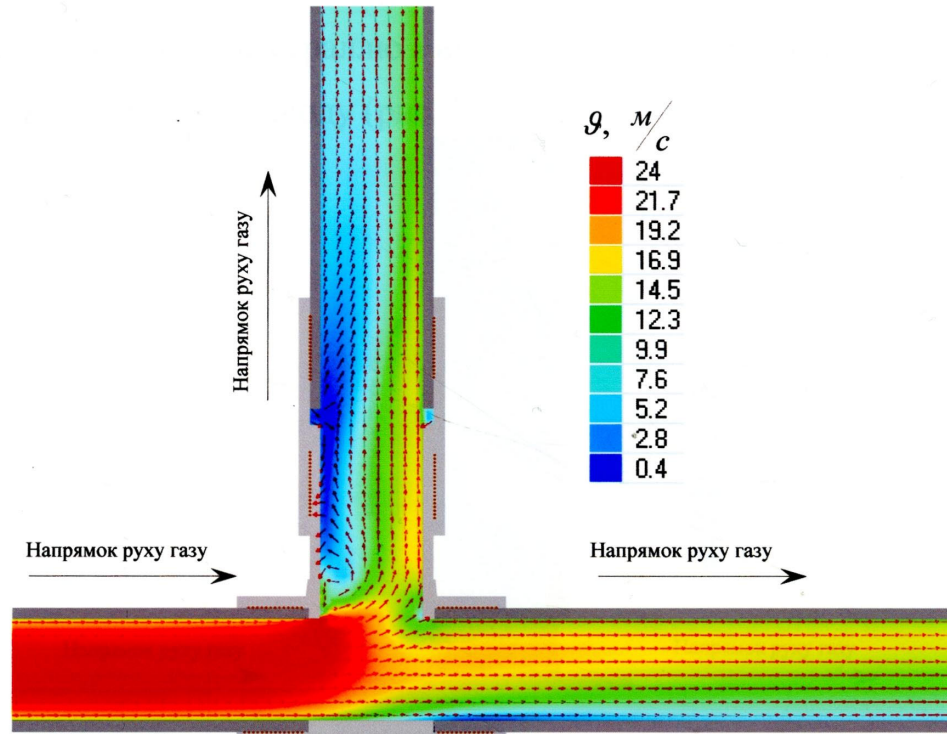


Рис. 3.23 Розподіл модуля швидкості потоку газу та вектори швидкості газу в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного трійника з кільцевим виступом при русі газового потоку основною магістраллю і відводом

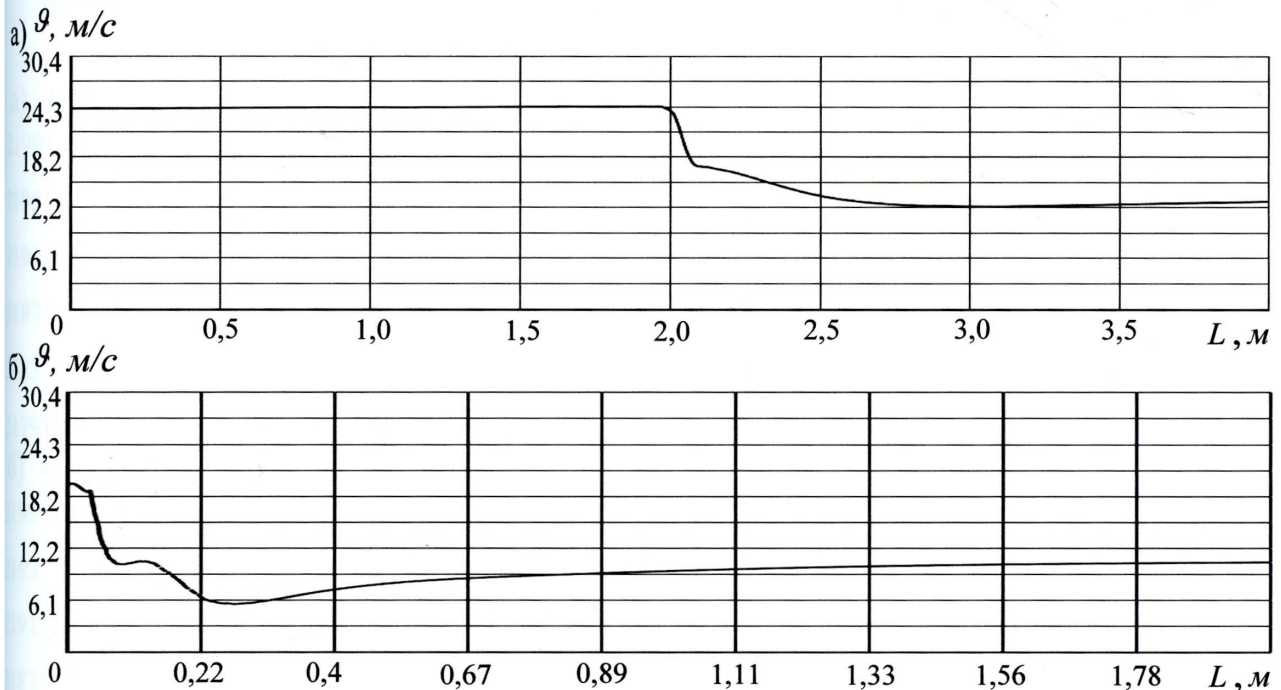


Рис. 3.24 Зміна швидкості потоку газу при його русі основною магістраллю і відводом терморезисторного трійника з кільцевим виступом:

а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

Побудуємо тонову заливку тиску в площині вертикального повздовжнього перерізу терморезисторного трійника з внутрішнім кільцевим виступом при русі

газового потоку основною магістраллю і відводом (рис. 3.25) та графіки зміни тиску вздовж основної магістралі і відводу (рис. 3.26).

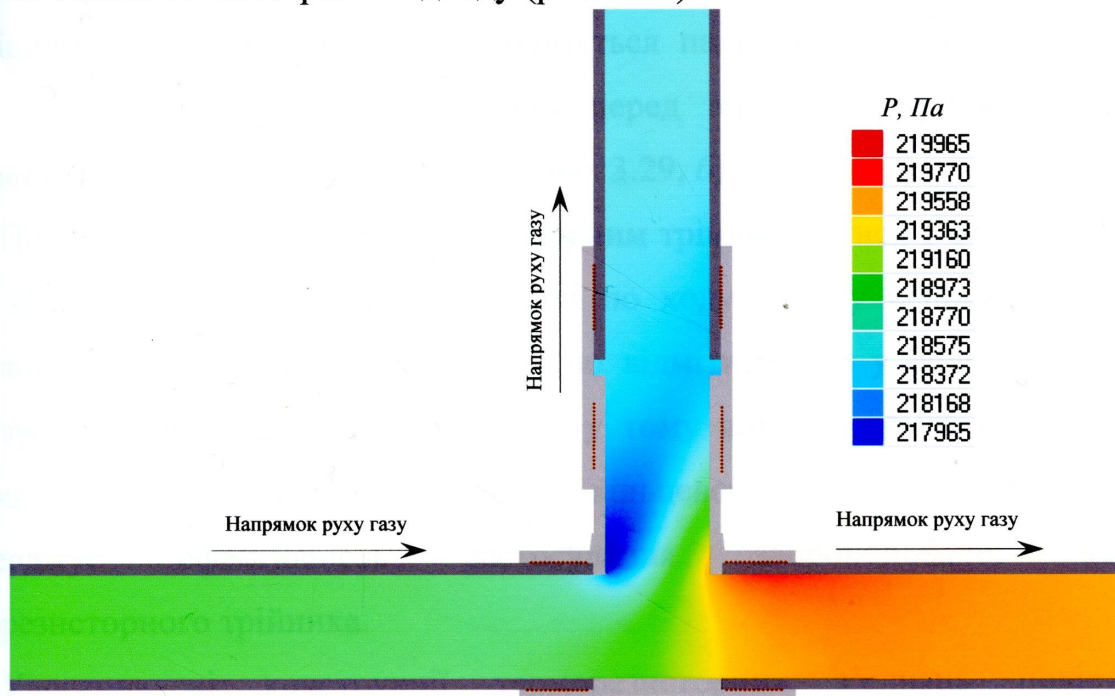


Рис. 3.25 Розподіл тиску в площинах вертикального повздовжнього та поперечного перерізу терморезисторного трійника з кільцевим виступом при русі газового потоку основною магістраллю і відводом

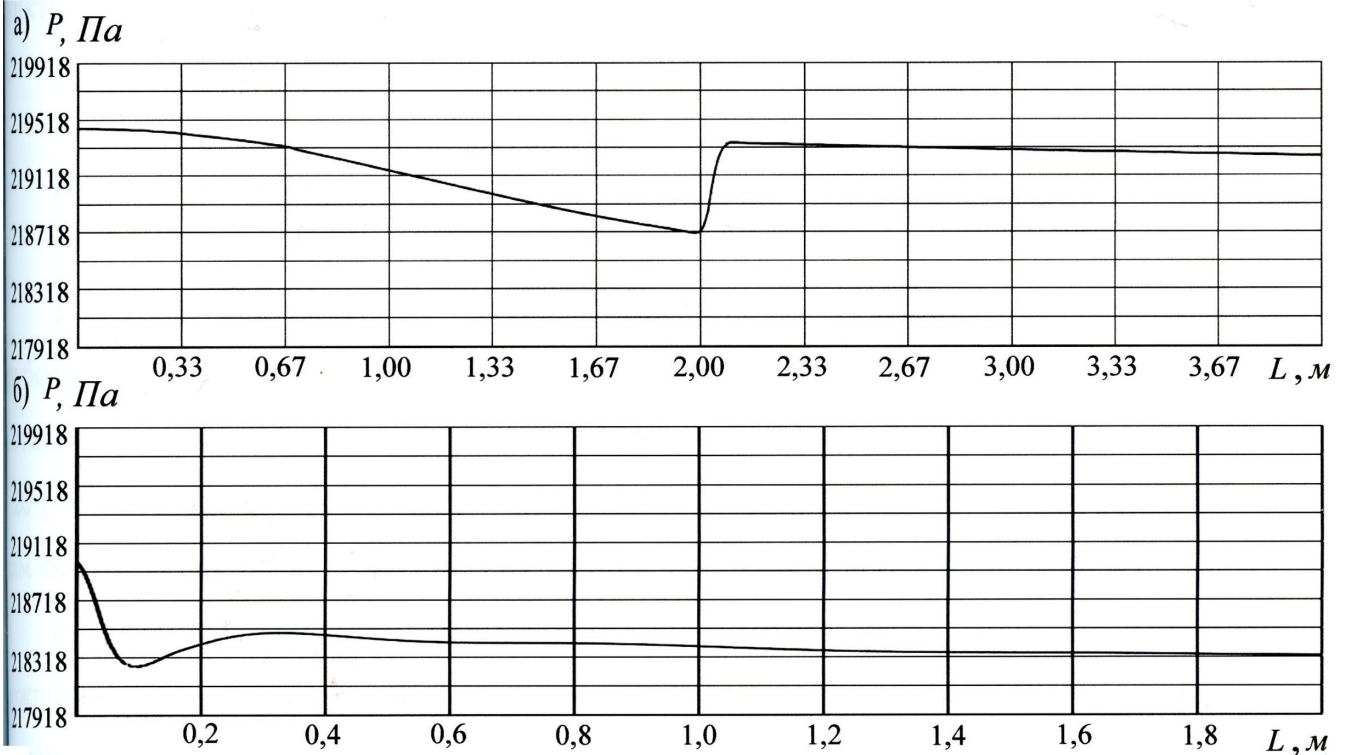


Рис. 3.26 Зміна тиску газу при русі газового потоку основною магістраллю і відводом терморезисторного трійника з кільцевим виступом:
а – вздовж осі основної магістралі; б – вздовж осі відводу

Як видно з тонової заливки (див. рис. 3.25) та графіка зміни тиску вздовж основної магістралі (див. рис. 3.26, а), перед терморезисторним трійником із внутрішнім кільцевим виступом відбувається падіння тиску до 218718 Па. Таке падіння є меншим, ніж падіння тиску перед терморезисторним трійником без внутрішнього кільцевого виступу (див. рис. 3.29, б).

Під час проходження терморезисторним трійником тиск в основній магістралі трохи збільшується до 219320 Па і далі по ходу потоку основною магістраллю поступово зменшується. Також необхідно відмітити, що у даному випадку тиск збільшується до більшої величини, ніж у тому випадку, коли терморезисторний трійник розраховувався без внутрішнього кільцевого виступу (див. рис. 3.29, б), що підтверджує ефективність застосування запропонованої конструкції терморезисторного трійника.

Удосконалені конструкції терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів впроваджені у ТЗОВ "Прикарпатська полімерна компанія". Економічний ефект складає 20 тис.грн. у рік при газифікації одного населеного пункту. Акт впровадження та розрахунок економічного ефекту наведені у додатку

Висновки по розділу 3

1. Втрати тиску у терморезисторних з'єднаннях поліетиленового трубопроводу значно перевищують 10 % від втрат тиску по довжині трубопроводу, отже газові мережі із поліетиленових труб розраховані за наведеною у ДБН В. 2.5 20 [44] методикою нездатні забезпечити необхідний мінімально-допустимий тиск для споживачам та не можуть розвиватись без проведення реконструкції.

2. Для забезпечення мінімально-допустимого тиску усім споживачам та можливості розвитку мережі із поліетиленових труб потрібно здійснювати проектні розрахунки із урахуванням коефіцієнта місцевого опору кожного терморезисторного з'єднання. Із цією метою на основі проведених досліджень було визначено коефіцієнти еквівалентної довжини у залежності від кількості місцевих опорів на 1

довжини газової мережі. Таким чином, при кількості місцевих опорів менше 3 необхідно враховувати коефіцієнт наявних місцевих опорів зокрема, при кількості від 4 до 9 – 1,1, від 10 до 14 – 1,2, від 15 до 19 – 1,3, від 20 до 24 – 1,4, від 25 до 49 – 1,5, від 50 до 59 – 1,93, від 60 до 69 – 2,12, від 70 до 79 – 2,3, від 80 до 89 – 2,5, від 90 до 100 – 2,7, а вище 100 – 2,9. Для спрощення здійснення таких розрахунків розроблене відповідне програмне забезпечення.

3. Зменшити коефіцієнт місцевого опору терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів, а отже втрати тиску у газовій мережі, можна шляхом усунення вихорів, реверсного руху газу та відриву потоку від стінки у місці розміщення терморезисторних фітінгів.

4. Удосконалені конструкції терморезисторних з'єднань мають менші коефіцієнти місцевих опорів, тому падіння тиску у газовій мережі з такими терморезисторними з'єднаннями буде меншим. Теоретичні дослідження динаміки руху газу удосконаленими терморезисторними з'єднаннями підтвердили ефективність їх застосування. Про це свідчить таке:

- 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 при русі 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

Основній магістралі удосконаленого терморезисторного трійника є меншим, ніж у основній магістралі стандартного терморезисторного трійника.

5. За результатами моделювання течії газу удосконаленим терморезисторним редуційним перехідником із кільцевим виступом встановлено, що оптимальним кутом звуження терморезисторного редуційного 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.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБ ІЗ УРАХУВАННЯМ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Газові мережі, як правило, працюють у нестационарних режимах. Крім змінних рафіків газоспоживання на величину нестационарності впливає ряд причин: вихід із ладу обладнання, розриви трубопроводів, гідратуутворення, зміни режимів зопостачання.

Причини нестационарності можуть бути зовнішні (коливання відборів та споживань) та внутрішні (параметричні коливання, які зумовлені зміною окремих параметрів системи, наприклад, зміною гідравлічного опору газопроводів унаслідок забруднення і старіння). Зовнішні причини в свою чергу можуть бути поділені на три групи: періодичні внаслідок змін газоспоживання, ступеневі, які заплановані заздалегідь (планові ремонти) та випадкові (при аварійних ситуаціях).

4.1. Вплив аварійних витоків на експлуатаційні параметри газових мереж поліетиленових труб

Аварії у газових мережах із поліетиленових труб зумовлені механічними пошкодженнями, розривами зварних швів, пошкодженнями запірної арматури.

Механічні пошкодження виникають при проведенні поблизу газопроводів будівельних робіт, а також велика ймовірність випадкових пошкоджень.

Аварії, як правило, виникають у місцях грубих порушень вимог нормативних документів до виконання зварювально-монтажних робіт при спорудженні та ремонті газових мереж.

Шкоду від аварій можна поділити на збитки системи газопостачання, в які входять затрати на ліквідацію відмов і вартість втраченого газу та на збитки споживачів газу.

Більшість аварій це є витіки газу з газопроводів. У момент появи витіку вздовж газопроводу та у часі змінюються тиск та витрата. Через певний час після появи витіку відбувається стабілізація потоку і відповідних параметрів та встановлюється новий стаціонарний або близький до стаціонарного режим. Таким чином, для аналізу аварійних станів газопроводів та їх впливу на параметри газопостачання необхідно розглядати не тільки стаціонарні режими газопостачання, але й нестаціонарні.

Розподільні газові мережі систем газопостачання населених пунктів по всій довжині мають шляхові відбори газу. При цьому шляхові відбори є зосередженими в певних точках. Величина шляхового відбору впливає на зміну витрати і тиску при появі аварійного витіку з газопроводу. Для спрощення розрахунків у газових мережах зосереджені відбори представляються як неперервні відбори вздовж газопроводу. При цьому забезпечується достатня точність розрахунків.

Різниця квадратів тисків у газопроводі високого тиску за наявності рівномірного шляхового відбору визначається за формулою

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{\lambda M_0^2 z R T l}{F^2 D} \left(1 - \alpha + \frac{\alpha^2}{3} \right), \quad (4.1)$$

де $\alpha = \frac{ml}{M_0}$; M_0 - масова витрата газу на початку газопроводу.

Розглянемо, як змінюються тиск та витрата у газовій мережі у разі наявності аварійних витіків, якщо газ поступає від газорозподільної станції

$$\frac{P_{1a}^2 - P_{2a}^2}{P_1^2 - P_2^2} = \frac{r^2 - \left(\frac{P_{2a}}{P_2} \right)^2}{r^2 - 1}, \quad (4.2)$$

де P_{1a}, P_{2a} - тиск на початку та в кінці газопроводу після аварії відповідно; P_1, P_2 - тиск на початку та в кінці газопроводу до аварії відповідно; $r = \frac{P_1}{P_2}$ - відношення тисків.

Витрата після аварії буде визначатись із співвідношення

$$M_2 = M_1 - ml_1 - \dot{m}_y, \quad (4.3)$$

де M_1 - витрата до аварії; m_y - витрата витоку; l_1 - відстань від початку трубопроводу до місця аварії.

Відносна зміна тиску в кінці газопроводу складає

$$\delta p = (P_2 - P_{2a})(P_1 - P_2). \quad (4.4)$$

Об'ємна витрата на ділянці:

- до місця аварії

$$Q = Q_T + Q_{II} - qx_1; \quad (4.5)$$

- після аварії

$$Q = Q_T + q(l - x) - q_y, \quad (4.6)$$

де q_y - секундна витрата витоку.

Проаналізувавши отримані формули, можна зробити висновок, що величина зміни тиску при аварійному витоку газу тим більша, чим менша величина лінійного відбору газу. Величина витоку ніяким чином не впливає на експлуатаційні параметри. Найбільші зміни тиску в кінці газопроводу під впливом аварійного витоку будуть тільки у випадку транзитної витрати.

Із зростанням аварійного витoku збільшується зміна тиску в кінці газопроводу. При зміні гідравлічного режиму руху газу від ламінарного до квадратичного однаковий аварійний виток призводить до все більшої зміни тиску в кінці газопроводу. Віддалення місця аварійного витoku від початку газопроводу, де тиск підтримується сталим, призводить до зростання зміни тиску в кінці газопроводу.

Проведений аналіз дає можливість прогнозувати характер зміни тиску в кінці газопроводу при аварії і робити вибір та розрахунок пристроїв аварійної сигналізації.

Неусталений рух газу в газопроводах зумовлений нерівномірним по часу відбором газу, нерівномірною подачею газу тощо. Під час роботи газопроводу поява аварійних витоків здійснює додатковий вплив на неусталені процеси. Відбувається накладання впливу різних факторів на неусталений процес. Тому виявлення аварійних витоків серед великої кількості факторів неусталеного процесу є дуже важким.

Так як шляховий відбір газу може бути як неперервний, так і зосереджений, то розглянемо обидва випадки опису нестационарних процесів в газопроводах.

Диференційні рівняння, які описують зміни тиску в газопроводі з неперервним та зосередженими відборами газу, наведені і детально описані в [113, 131, 138, 189, 193]. Ці рівняння дозволяють описати неусталений рух газу в міських розподільних мережах, які мають по довжині підкачки чи відбори (аварійні витoki) газу.

Для розв'язку цих рівнянь необхідно задавати початкові та граничні умови, які відповідають певним технологічним режимам експлуатації та обладнанню газопроводів.

Як початкові умови задаються закономірності розподілу витрат газу чи тиску вздовж газопроводу в момент часу, який приймається за початок процесу.

У міських газопроводах після газорегуляторних пунктів чи газорозподільних станцій тиск підтримується сталим. Відбір газу в кінці газопроводу відомий. Він визначається кількістю та характером споживачів. Для таких газопроводів граничні умови будуть: при сталій витраті газу в кінці газопроводу $P(t,0) = P_1 = const$,

$w(t, l) = M_2 = const$; при сталому відборі в кінці газопроводу $P(t, 0) = P_1 = const$,
 $w(t, l) = M_2(t)$.

4.2. Моделювання нестационарних процесів у газових мережах

Неусталений рух газу в газопроводах, як правило, зумовлений нерівномірним часі відбором газу споживачами, характером відбору газу, нерівномірною подачею газу в газопровід із газових промислів тощо.

У цих випадках необхідно складати і розв'язувати систему диференціальних рівнянь, кількість яких дорівнює числу ділянок газопроводів, що розглядаються. Необхідно також узгодження сусідніх ділянок між собою.

Вплив шляхових відборів газу та аварійних витоків може бути враховано в такому диференціальному рівнянні. Тоді неусталений процес складного газопроводу можна описувати одним рівнянням із відповідними початковими та граничними умовами. Якщо кількість зосереджених відборів достатньо велике, то в ряді випадків можна замінити неперервно-розподіленим відбором газу по довжині, що суттєво спрощує задачу досліджень.

Математичне моделювання будемо проводити для варіанту: газопровід із неперервним по довжині відбором (підкачуванням) газу [189].

Для опису нестационарного процесу в трубопроводі з неперервним по довжині підкачуванням чи відбиранням газу використаємо систему рівнянь руху та балансу (нерозривності)

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} + \rho \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\omega^2}{2} \right) + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda \omega}{2D} \omega \rho + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \pm \frac{m(x, t)}{F} = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Знак “плюс” перед $m(x, t)$ відповідає випадку підкачування, а “мінус” - випадку відбору газу вздовж трубопроводу. Якщо $m(x, t) = 0$, то система

перетворюється в систему рівнянь, які описують нестационарні процеси в простих трубопроводах.

Зміна масової витрати в газопроводах із шляховими відборами чи підкачуваннями газу описується рівнянням

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \pm \chi \frac{\partial m(x,t)}{\partial x}, \quad (4.8)$$

$$\chi = \frac{c^2}{2a_1} = \frac{2Dc^2}{\lambda\omega}.$$

Верхній знак перед третім членом рівняння характеризує вплив підкачування, нижній – відбір.

Проаналізувавши рівняння, можна зробити висновок, що при нестационарних процесах у газопроводах шляховий відбір чи підкачування впливають на зміни масової витрати тільки в тому випадку, коли відбір (підкачування) газу є змінними по довжині. Якщо відбір міняється в часі, але не залежить від відстані до точки, що розглядається, то зміни масової витрати в газопроводі не залежать від відбору газу. В такому випадку зміни масової витрати при нестационарних процесах відбуваються у простих трубопроводах.

Якщо відбір чи підкачка не залежать від відстані, то рівняння зведеться до звичайного рівняння теплопровідності для простого трубопроводу

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}. \quad (4.9)$$

Із рівняння руху можна отримати диференціальне рівняння для опису зміни тиску в газопроводі при нестационарних режимах руху газу

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \chi g \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \pm \frac{c^2}{F} m(x,t) \quad (4.10)$$

У випадку лінійного профілю та горизонтального трубопроводу отримаємо наступне рівняння

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \pm \frac{c^2}{F} m(x, t). \quad (4.11)$$

Із отриманого рівняння видно, що при нестационарних процесах у газопроводах на зміни тиску у часі та його розподіл по довжині впливають відбори та підкачування газу незалежно від того, постійні чи змінні вони по довжині і по часу.

Проаналізувавши можливі в газовій мережі аварійні ситуації та існуючі алгоритми розрахунків нестационарних процесів систем газопостачання населених пунктів, можна зробити висновок про необхідність розробки математичної моделі поведінки газової мережі при нестационарних процесах, які виникають внаслідок аварійних режимів, а також у випадку відключення споживачів у разі несплати або виникнення аварій.

При експлуатації системи умови газоспоживання не є постійними і рідко відповідають проектним (змінюються тиски, на виході джерела живлення та в кінці проводів). Є випадки, коли частина споживачів з тих чи інших причин відключається від системи газопостачання. Все це впливає на гідравлічний режим роботи складної трубопровідної системи. Тому теоретичне та практичне значення має задача визначення найбільшого впливу на кінцеві тиски відключення шляхових споживачів.

Гідравлічний розрахунок газових мереж як при проектуванні, так і при їх експлуатації ускладнений наявністю великої кількості газопроводів, складною конфігурацією системи та зміною параметрів роботи у часі. Через складність і трудомісткість гідравлічні розрахунки газових мереж доцільно виконувати з використанням обчислювальної техніки, що вимагає розробки алгоритмів і відповідного програмного забезпечення.

Для розрахунку газової мережі застосовувався метод агрегативного підходу та розроблено агрегативну модель, яка наведена на рис. 4.1.

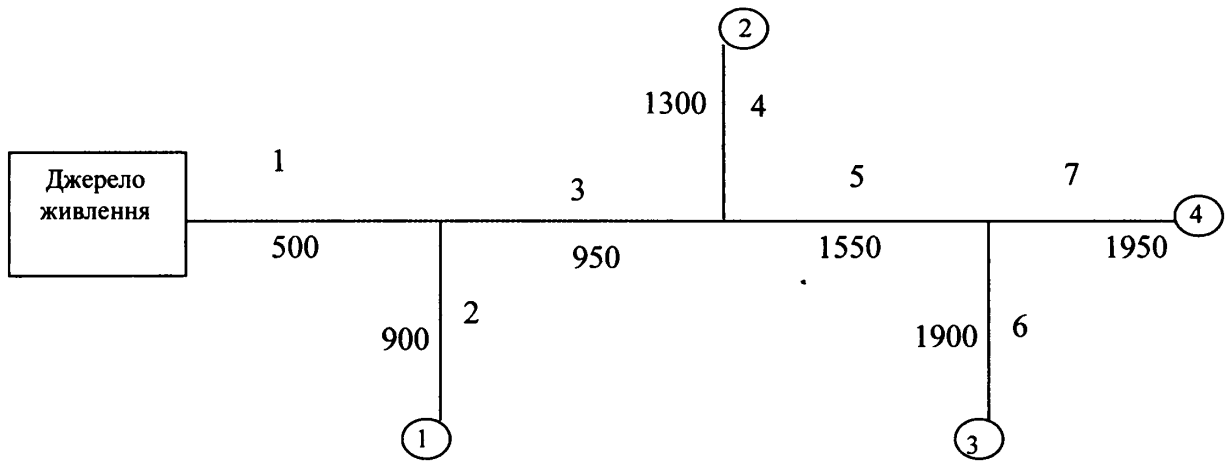


Рис. 4.1. Агрегативна модель досліджуваної газової мережі

Результати розрахунків зміни тиску в часі при послідовному відключенні ділянок газової мережі наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати розрахунків змін тиску при послідовному відключенні
ділянок газової мережі

№ части ни ділян ки	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4	Ділянка 5	Ділянка 6	Ділянка 7
При стаціонарному режимі для всієї газової мережі							
1	300000	288262	288262	282469	282469	271479	271479
2	298869	287495	287630	280410	281583	269987	270857
3	297690	286707	286985	278193	280667	268413	270223
4	296543	285932	286348	276072	279771	266890	269597
5	295361	285143	285702	273850	278854	265313	268961
6	294199	284361	285061	271670	277948	263758	268330
7	293014	283571	284413	269438	277028	262176	267694
8	291838	282782	283768	267199	276114	260591	267058
9	290648	281990	283119		275191		266421
10	289458		282469		274269		
11	288262				273341		
12					272412		
13					271479		
При відключенні ділянки 2							
1	300000	293596	293596	287824	287824	276933	276933
2	299591	293925	292821	285657	286788	275324	276179
3	298765	293584	292338	283621	286051	273920	275695
4	298374	293960	291571	281411	285017	272299	274956
5	297503	293528	291063	279343	284258	270861	274438
6	297172	294033	290324	277112	283243	269251	273738
7	296218	293441	289776	274992	282448	267760	273166
8	295981	294131	289078	272753	281462	266175	272522
9	294914	293339	288479		280624		271884
10	294796		287829		279672		
11	293599				278787		
12					277872		
13					276939		

Продовження табл. 4.1

№ части ни ділян ки	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4	Ділянка 5	Ділянка 6	Ділянка 7
При відключенні ділянки 4							
1	300000	292158	292158	288745	288745	277875	277875
2	299392	291306	291567	286999	287687	276251	277103
3	298474	290620	291465	288761	286977	274872	276641
4	297875	289772	290869	286950	285921	273236	275884
5	296924	289063	290774	288839	285189	271821	275386
6	296366	288238	290166	286848	284155	270202	274675
7	295352	287492	290085	288959	283382	268727	274113
8	294862	286701	289458	286719	282383	267141	273468
9	293763	285909	289397		281560		272830
10	293357		288747		280602		
11	292161				279725		
12					278811		
13					277878		
При відключенні ділянки 6							
1	300000	290369	290369	285896	285896	278441	278441
2	299149	289554	289761	283767	285258	277148	277661
3	298113	288822	289415	281667	284695	278451	277210
4	297260	288007	288802	279488	284070	277119	276446
5	296205	287263	288460	277366	283475	278497	275956
6	295368	286456	287838	275153	282890	277059	275240
7	294277	285691	287504	272993	282236	278568	274684
8	293471	284901	286869	270754	281717	276982	274038
9	292331	284109	286546		280983		273401
10	291566		285897		280548		
11	290370				279718		
12					279378		
13					278445		
При відключенні ділянки 7							
1	300000	295918	295918	294459	294459	293470	293470
2	299897	294981	295347	292169	294245	291565	293325
3	299240	294395	295709	290343	294380	290609	293448
4	299167	293474	295135	288029	294214	288736	293386
5	298446	292845	295505	286143	294256	287672	293354
6	298465	291976	294915	283853	294224	285919	293510
7	297623	291273	29537	281865	294094	284677	293207
8	297786	290480	294690	279625	294268	283091	293673

Закінчення табл. 4.1

№ частини ділянки	Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 4	Ділянка 5	Ділянка 6	Ділянка 7
9	296778	289687	295113		293904		293035
10	297119		294463		294334		
11	295923				293696		
12					294413		
13					293480		

Зміни тиску в кінці ділянок та витрат наведено на рис. 4.2 – 4.10.

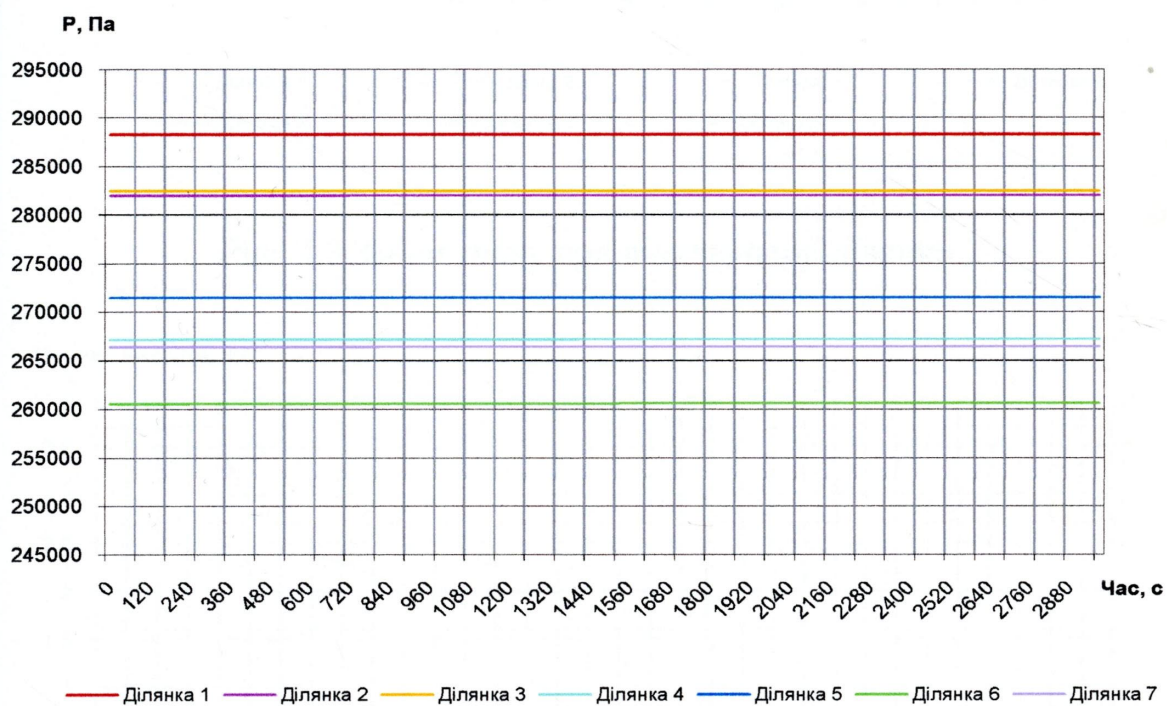


Рис. 4.2 Зміни тиску при стаціонарному процесі

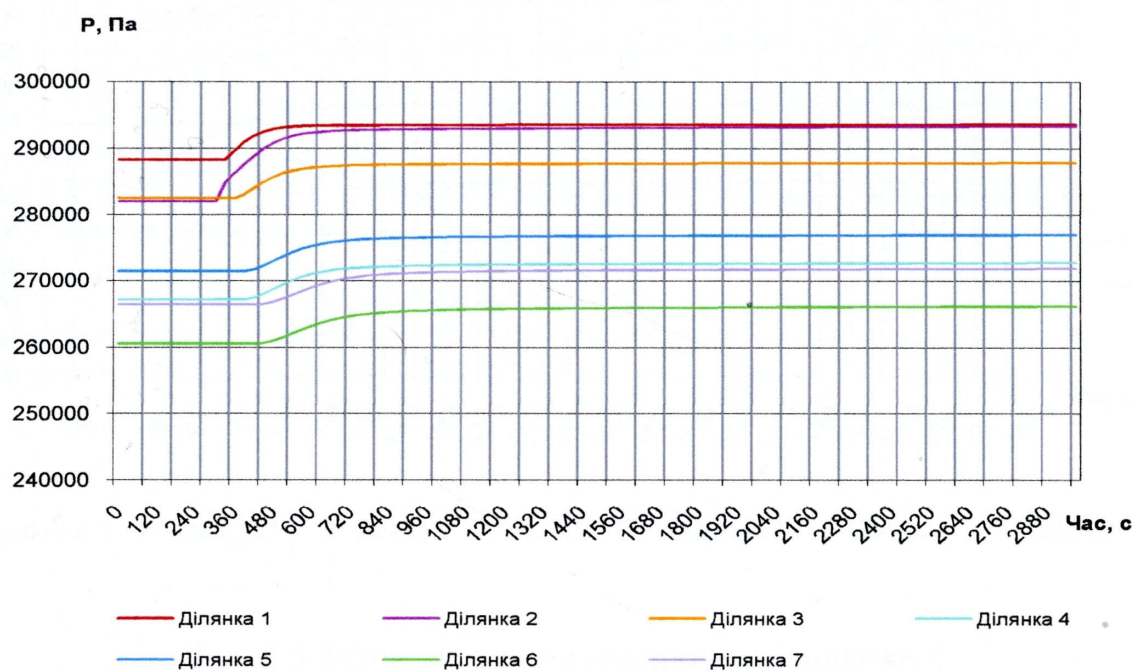


Рис. 4.3 Зміни тиску при відключенні ділянки 2

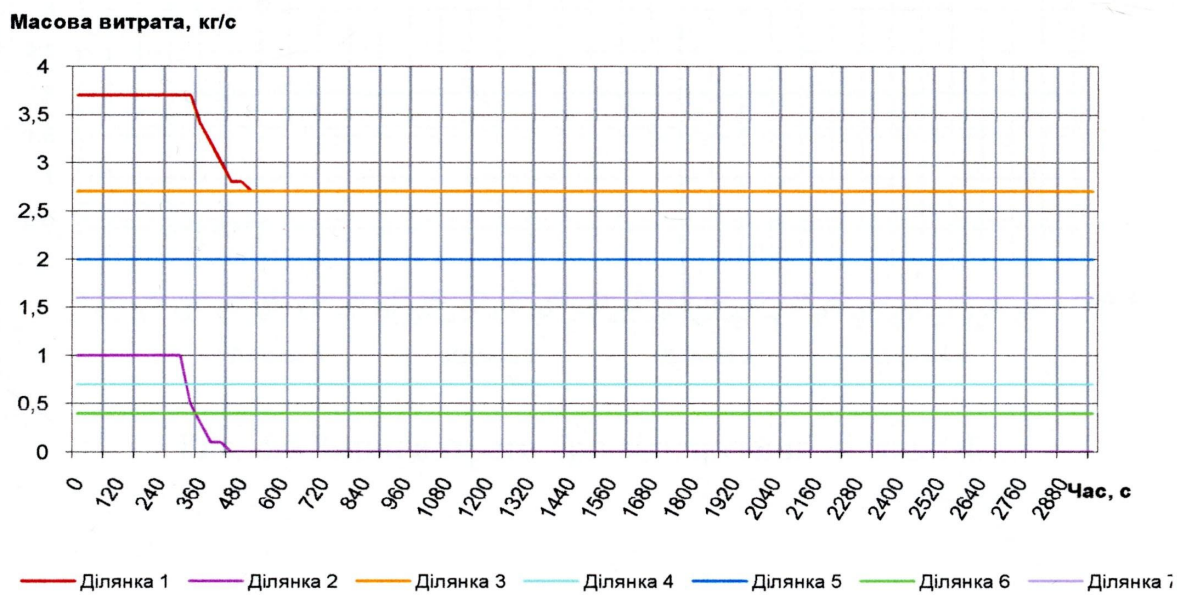


Рис. 4.4 Зміни витрати при відключенні ділянки 2

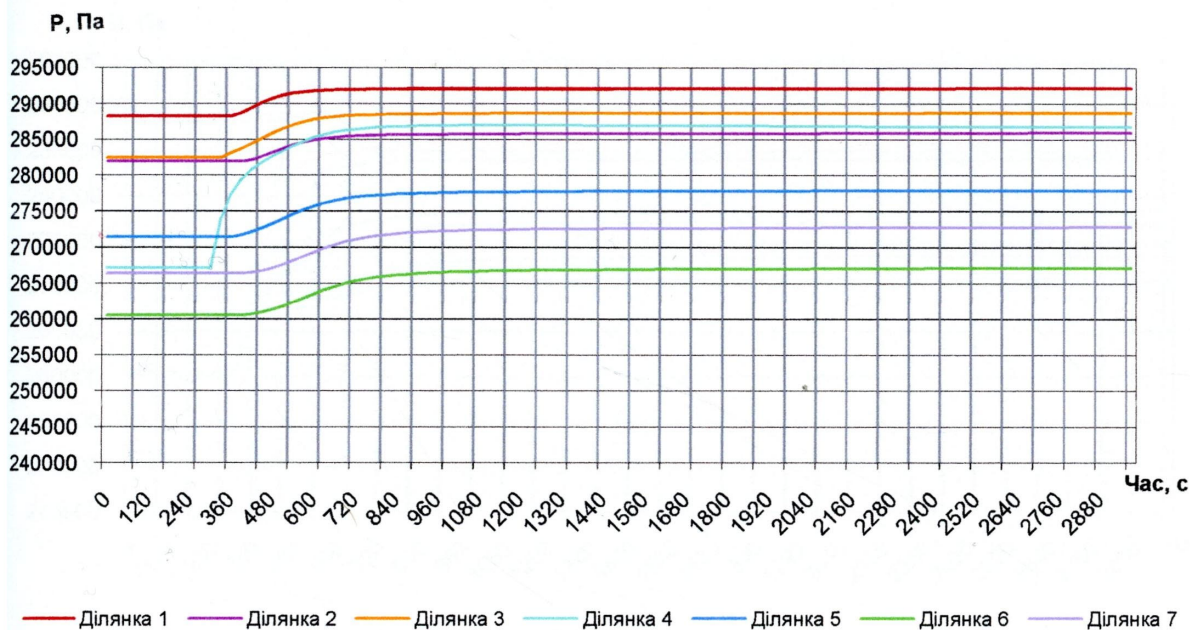


Рис. 4.5 Зміни тиску при відключенні ділянки 4

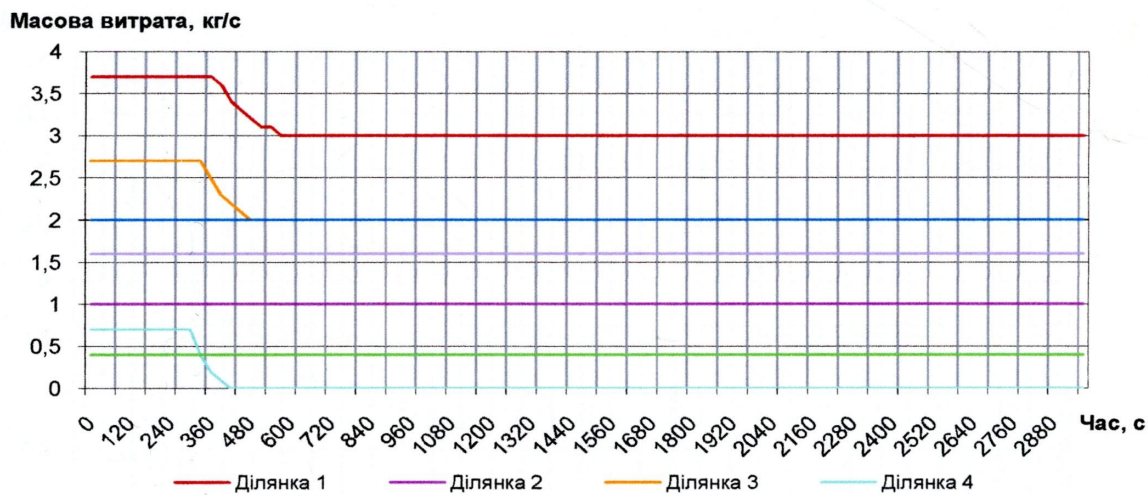


Рис. 4.6 Зміни витрати при відключенні ділянки 4

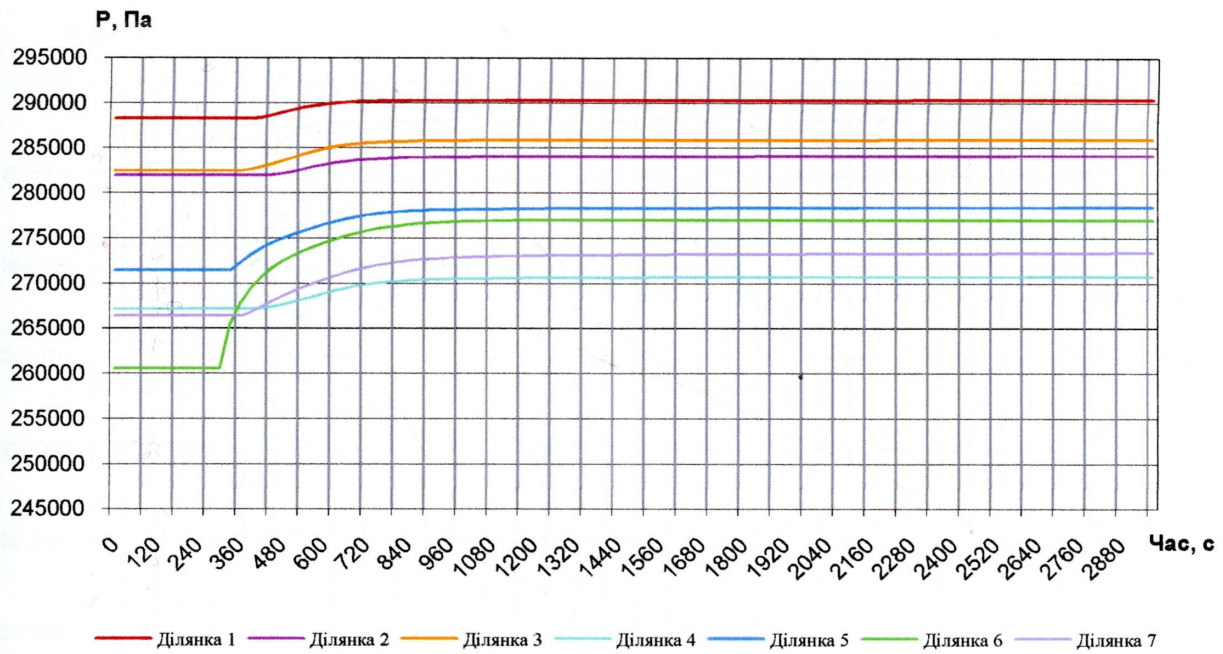


Рис. 4.7 Зміни тиску при відключенні ділянки 6

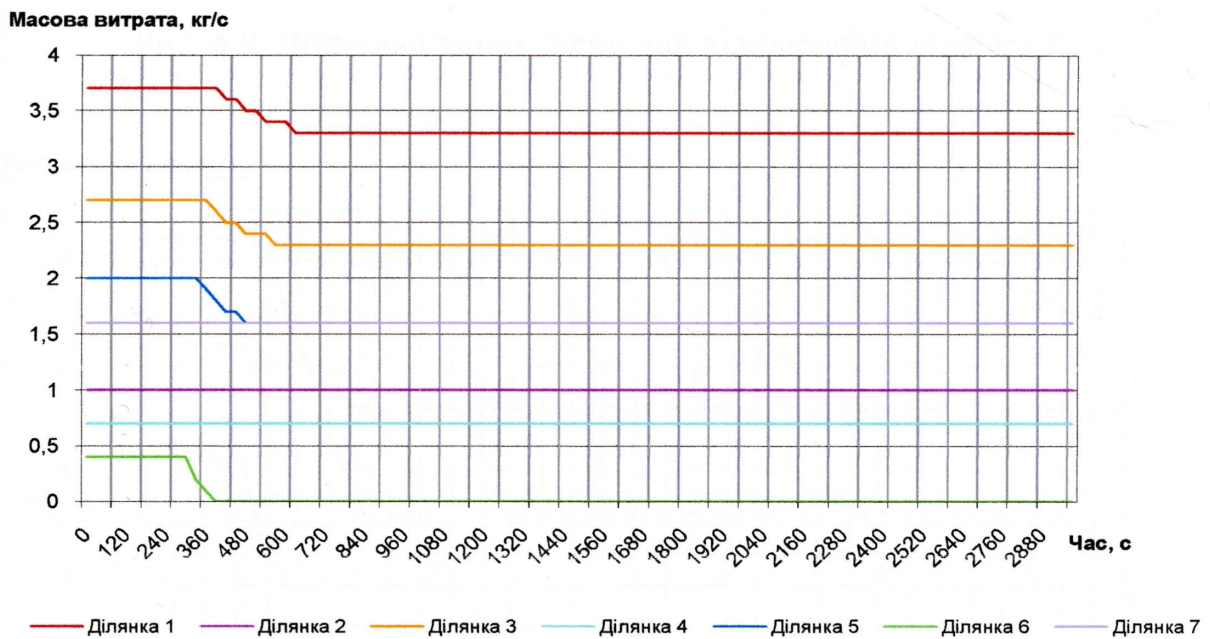


Рис. 4.8 Зміни витрати при відключенні ділянки 6

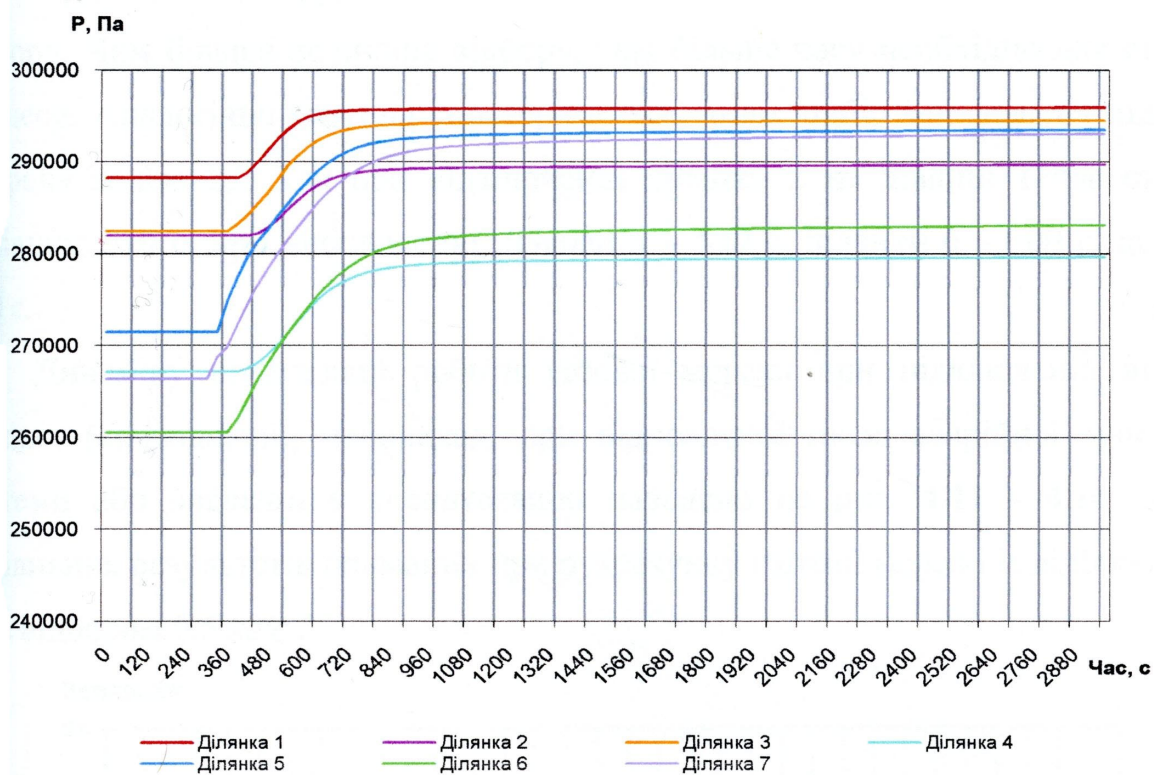


Рис. 4.9 Динаміка зміни тиску при відключенні ділянки 7

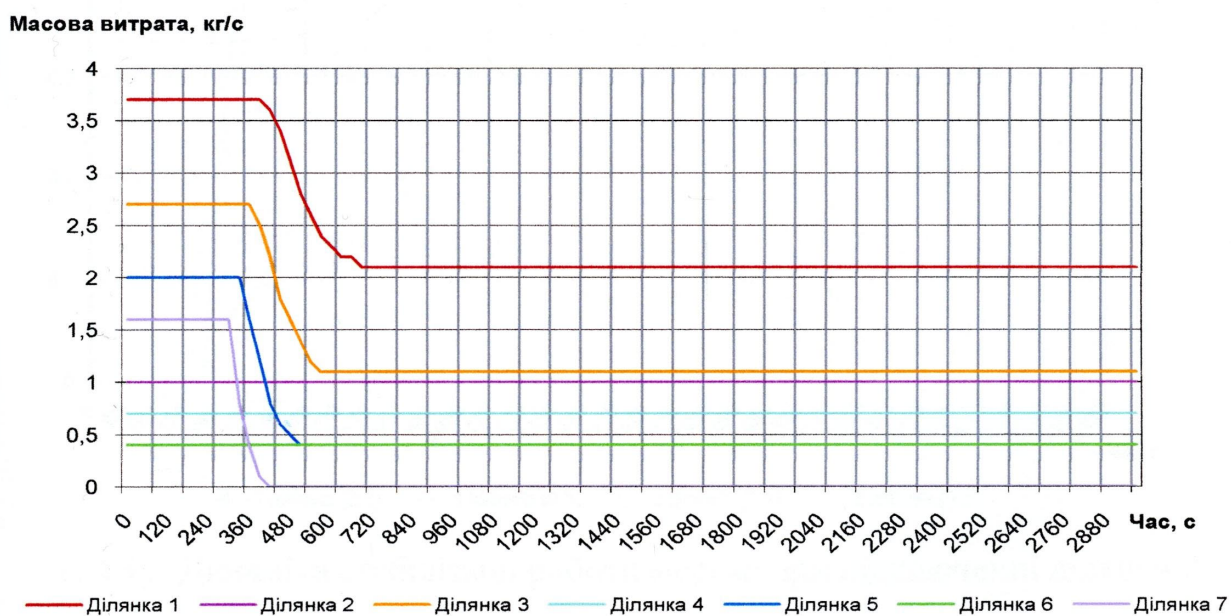


Рис. 4.10 Зміни витрати при відключенні ділянки 7

Проаналізувавши отримані графічні залежності, можна зробити висновок, що час стабілізації процесу при аварійному відключенні відповідних ділянок залежить

від координати відбору, який відключився, а також від величини відключеного відбору. Чим більша величина відбору, тим більше часу необхідно для стабілізації процесу. Аналогічна картина спостерігається, коли відбір має дальшу відстань від джерела живлення. Так при відключенні ділянки 2 на ділянці 1 час стабілізації дорівнює 510 с, при відключенні ділянки 4 – 570 с, ділянки 6 – 600 с, ділянки 7 – 690 с.

Динаміку стабілізації роботи газової мережі при підключенні відповідної ділянки (споживачів), наприклад, при відновленні після аварійної зупинки всієї системи або введенні в експлуатацію наведено на рис. 4.11 - 4.14. Здійснено порівняння результатів отриманих при розрахунку газової мережі із відбором 0,1 кг/с та із відбором 0,5 кг/с .

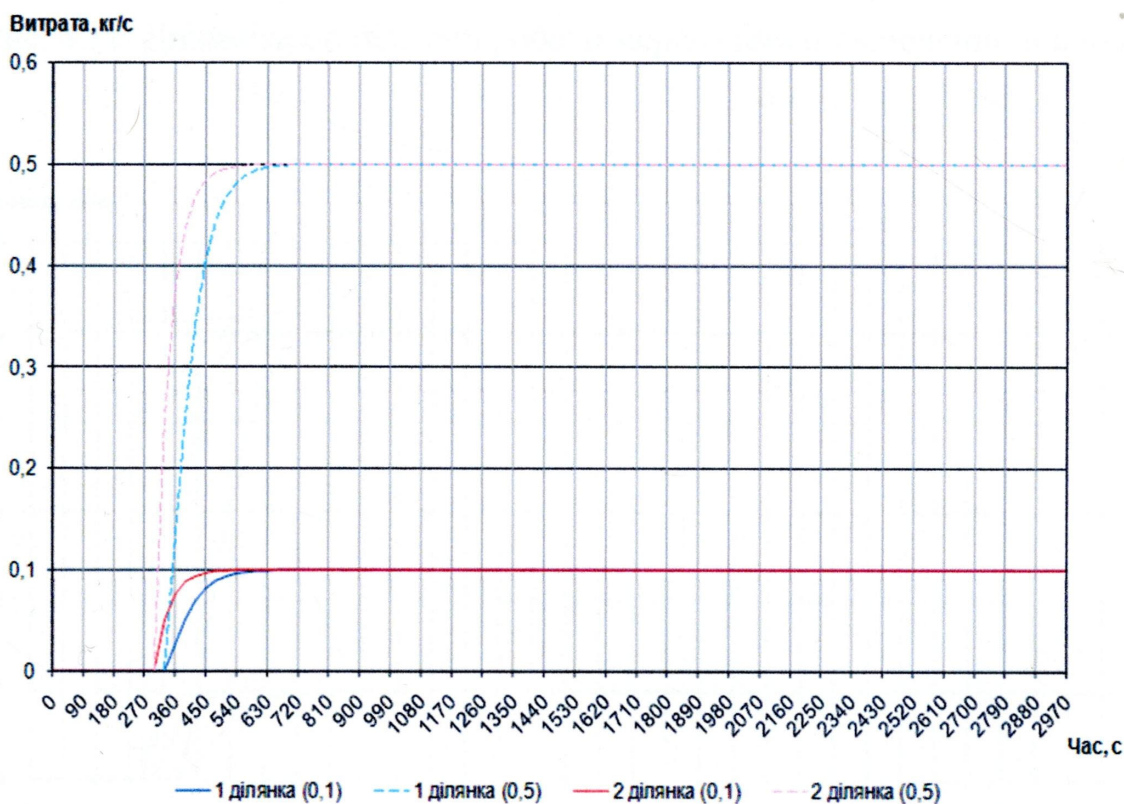


Рис. 4.11. Динаміка стабілізації роботи мережі при підключенні ділянки 2

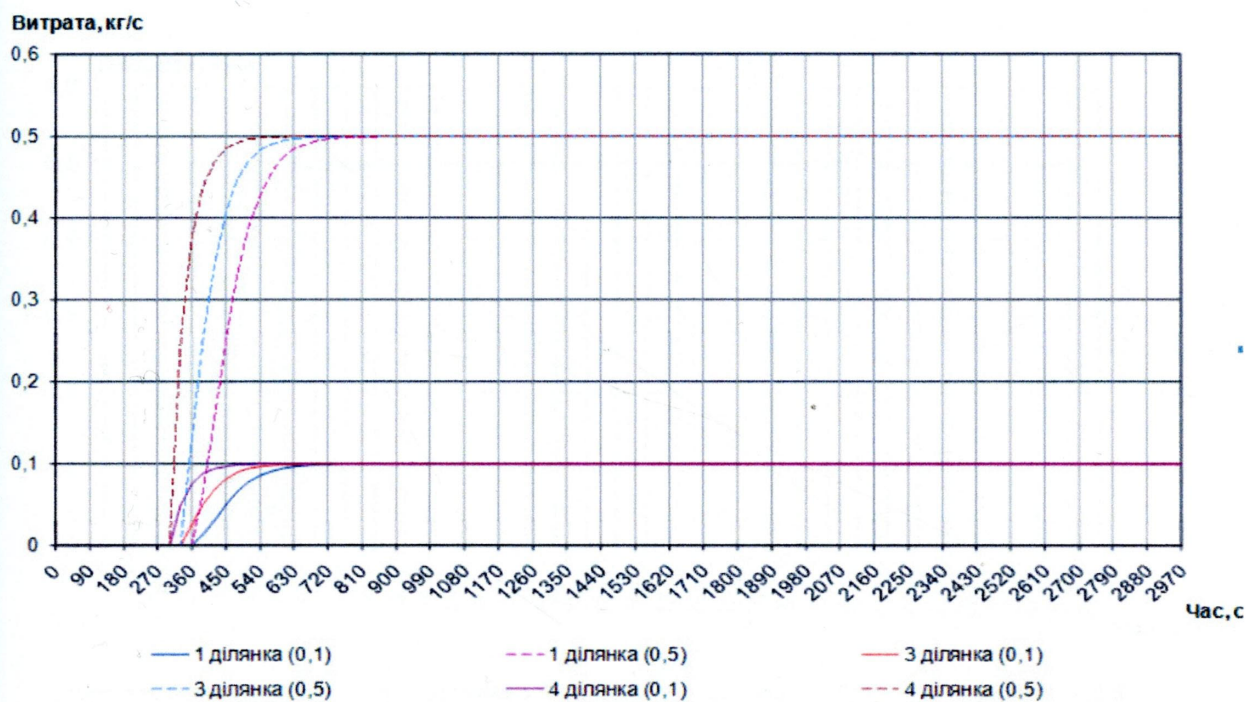


Рис. 4.12. Динаміка стабілізації роботи мережі при підключенні ділянки 4

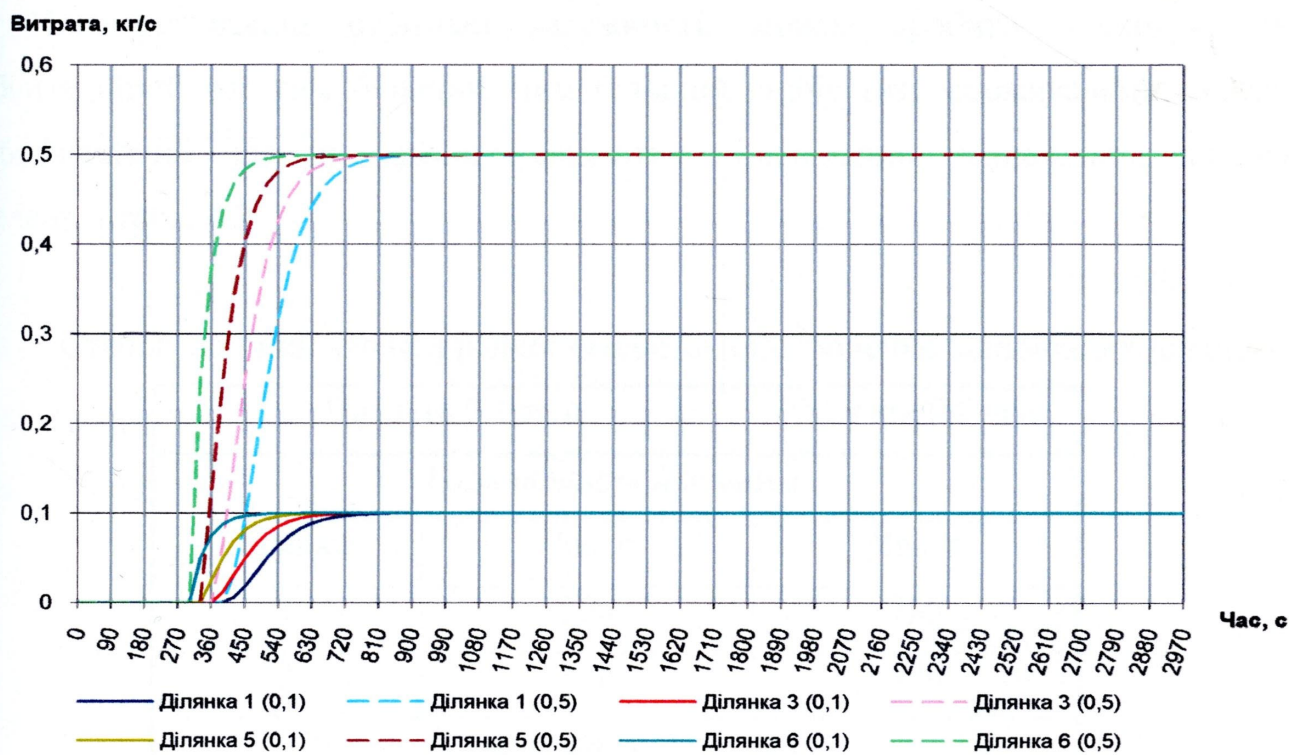


Рис. 4.13. Динаміка стабілізації роботи мережі при підключенні ділянки 6

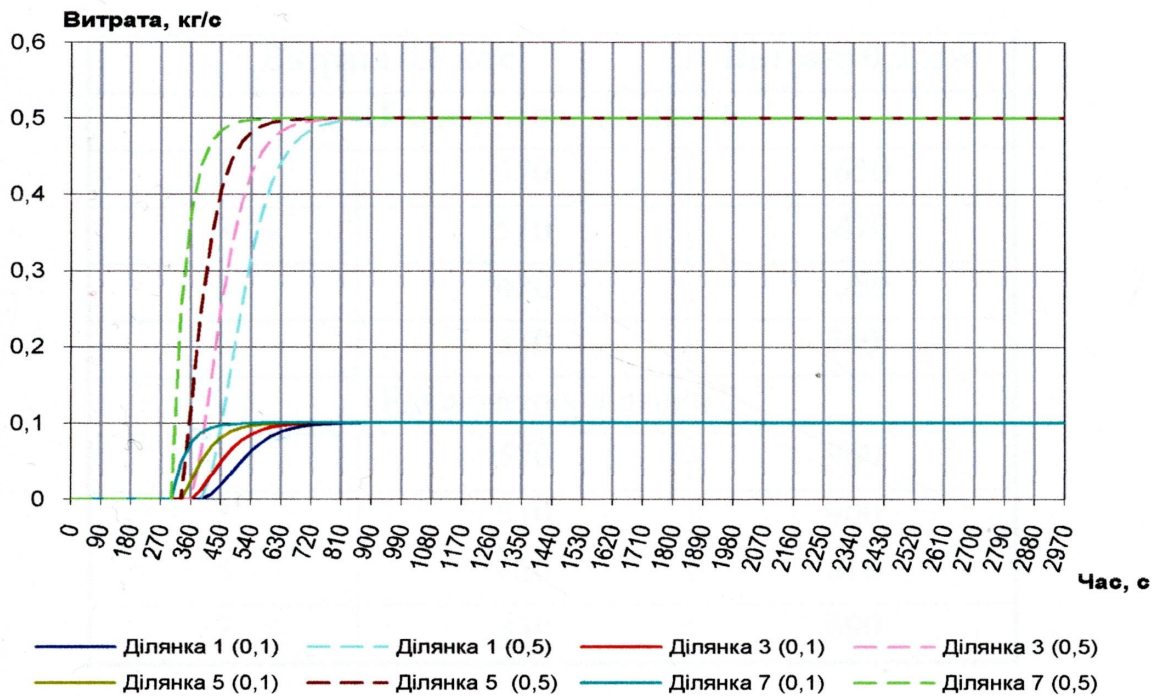


Рис. 4.14 Динаміка стабілізації роботи мережі при підключенні ділянки 7

Проаналізувавши отримані залежності, можна зробити висновок, що стабілізаційний час тим більший, чим більший відбір газу споживачами мережі. Стабілізаційний час при різних варіантах підключення відповідних ділянок наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Стабілізаційний час при різних варіантах підключення відповідних ділянок

Витрата 0,1 кг/с		Витрата 0,5 кг/с
Підключення ділянки 2		
Ділянка	Час, с	Час, с
1	390	780
2	330	420
Підключення ділянки 4		
1	510	960
3	420	870
4	330	540

Закінчення таблиці 4.2

Витрата 0,1 кг/с		Витрата 0,5 кг/с
Підключення ділянки 6		
1	570	1650
3	510	1470
5	420	1380
6	330	840
Підключення ділянки 7		
1	570	960
3	510	900
5	420	810
7	330	690

Час початку стабілізації не залежить від витрати, а залежить тільки від координати відбору. Так, при введенні в експлуатацію ділянки 2 час початку стабілізаційного процесу становить 360 с, ділянки 4 – 390 с, ділянок 6 та 7 – 420 с.

Крім збільшення часу стабілізації можна побачити зміщення початку стабілізаційного процесу, якщо координата відбору віддалена від джерела живлення.

Визначимо гідравлічний опір окремих ділянок газової мережі із поліетиленових труб з врахуванням місцевих опорів терморезисторних з'єднань. За результатами проведених розрахунків побудовано графіки зміни тиску під час введення в експлуатацію ділянки 2 та послідовному збільшенні гідравлічного опору кожної ділянки (рис. 4.15-4.19).

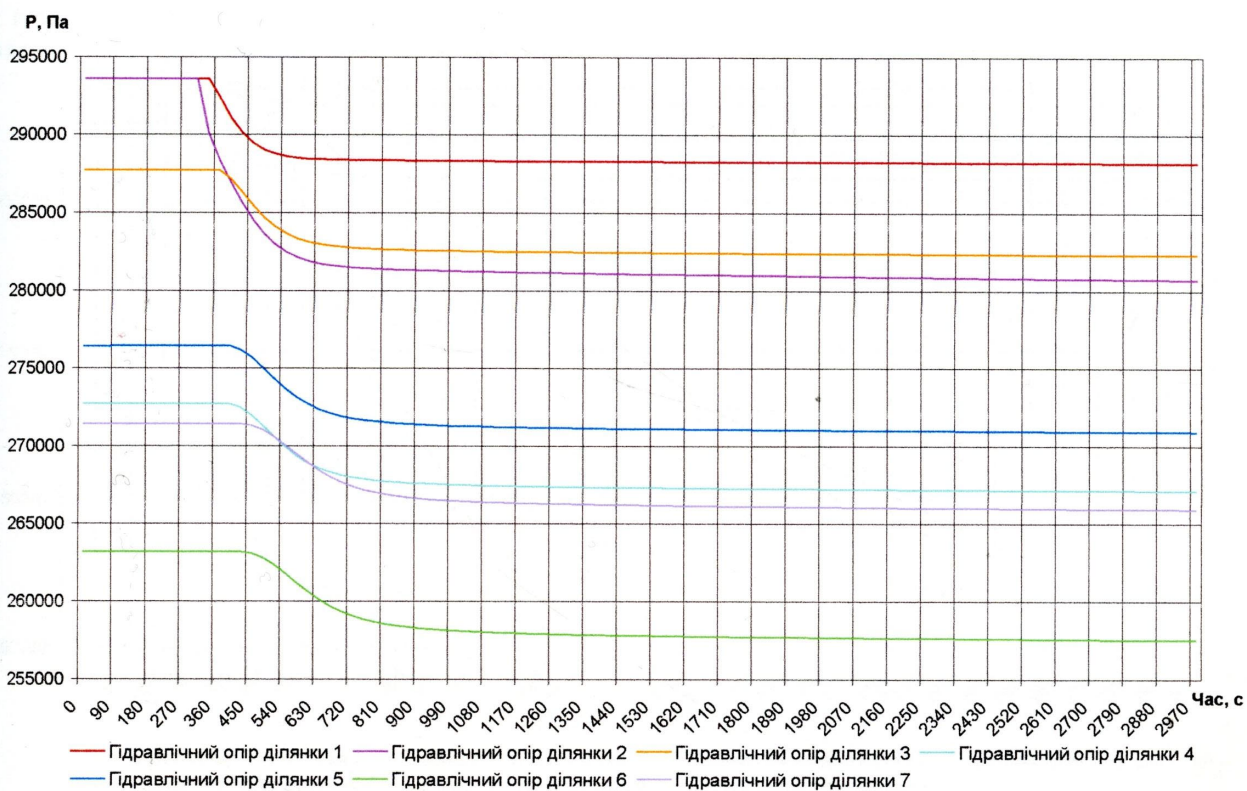


Рис. 4.15 Зміна тиску при введенні в експлуатацію ділянки 2

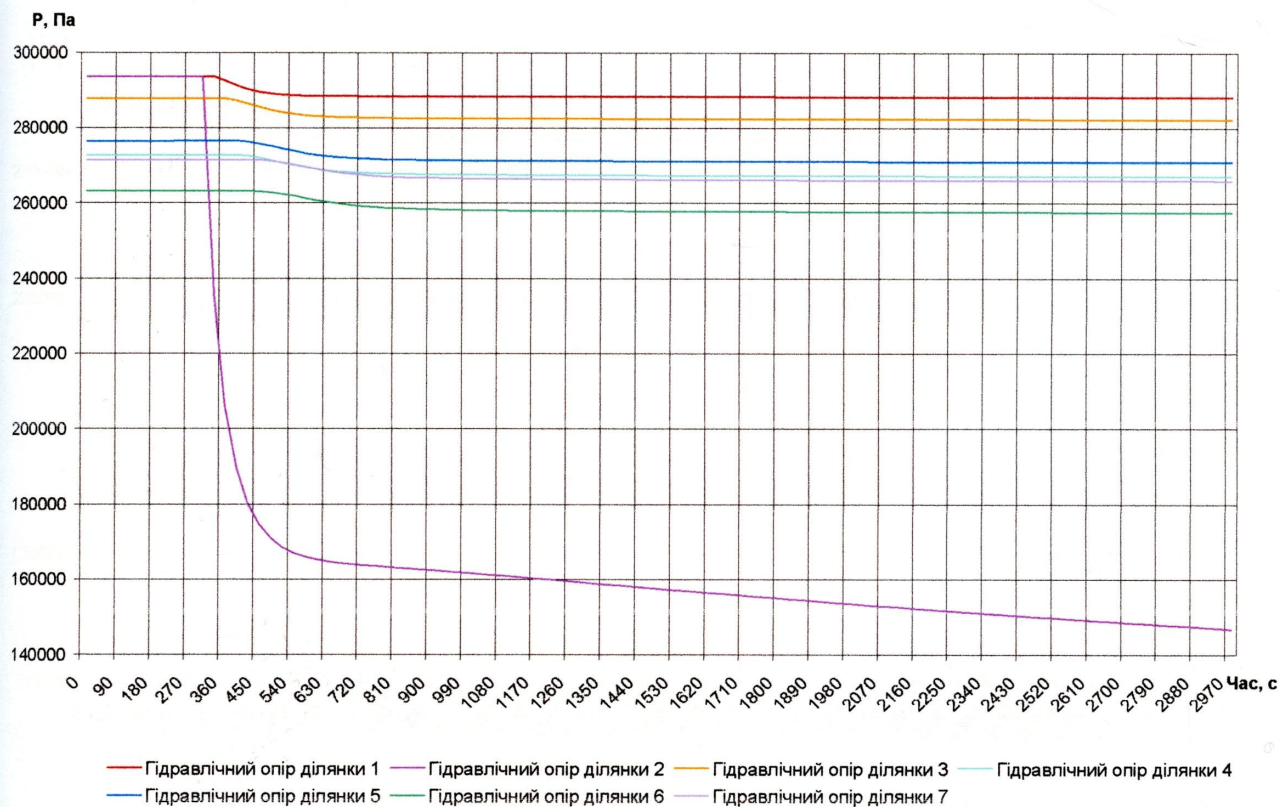


Рис. 4.16 Зміна тиску при введенні в експлуатацію ділянки 2 та збільшенні гідрравлічного опору ділянки 2

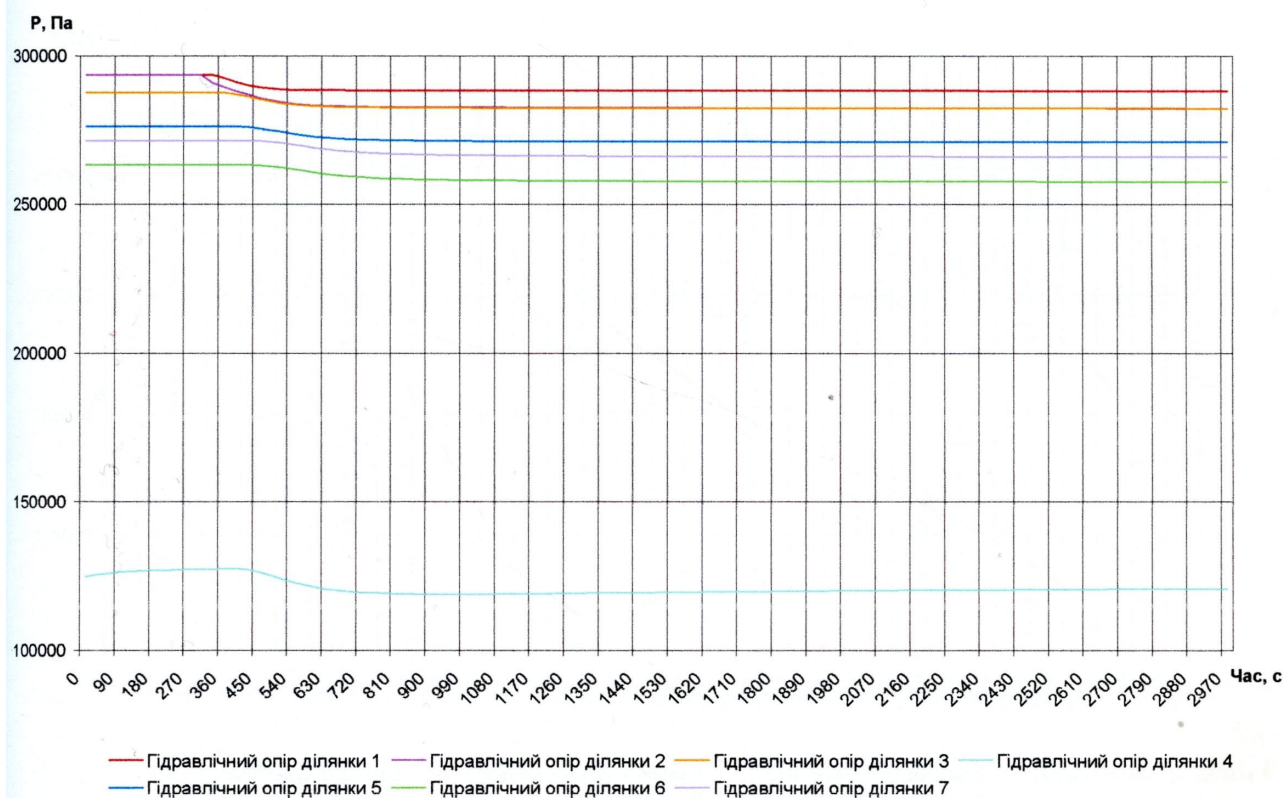


Рис. 4.17 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 2 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 4

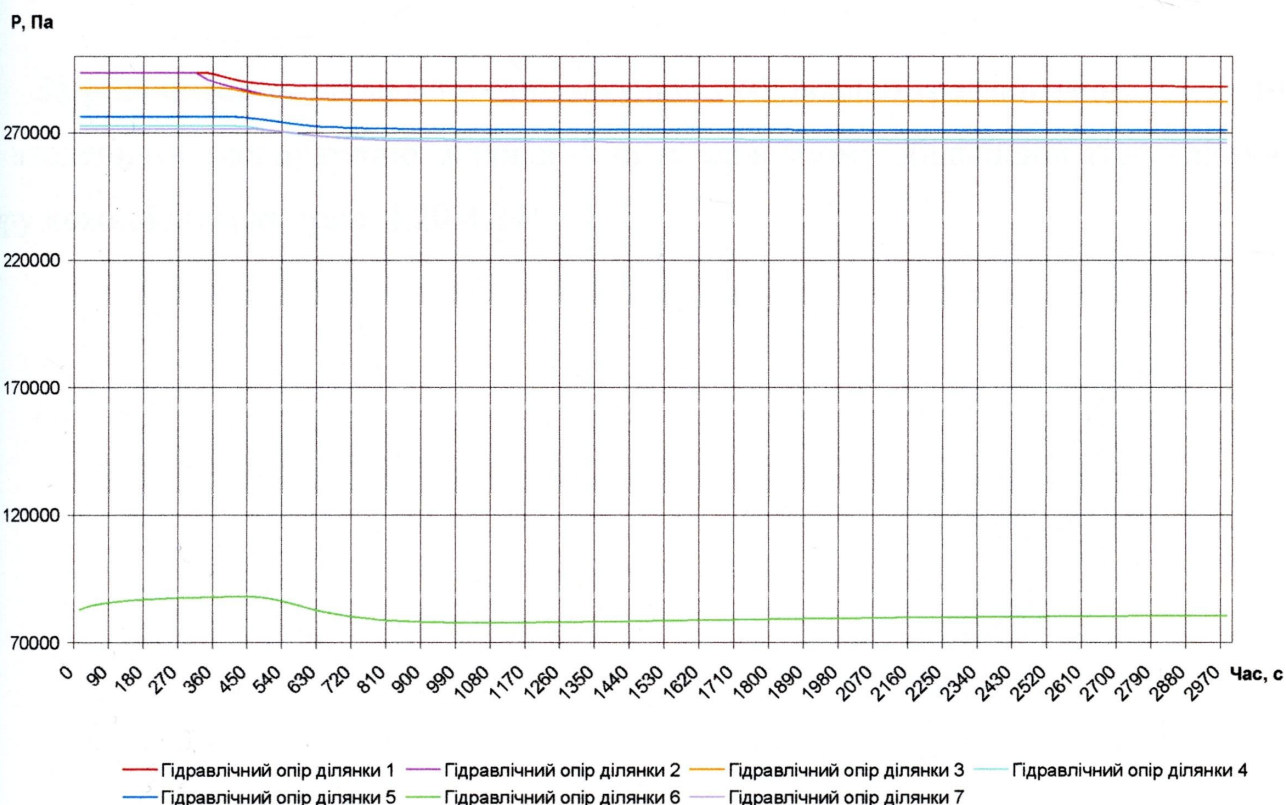


Рис. 4.18 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 2 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 6

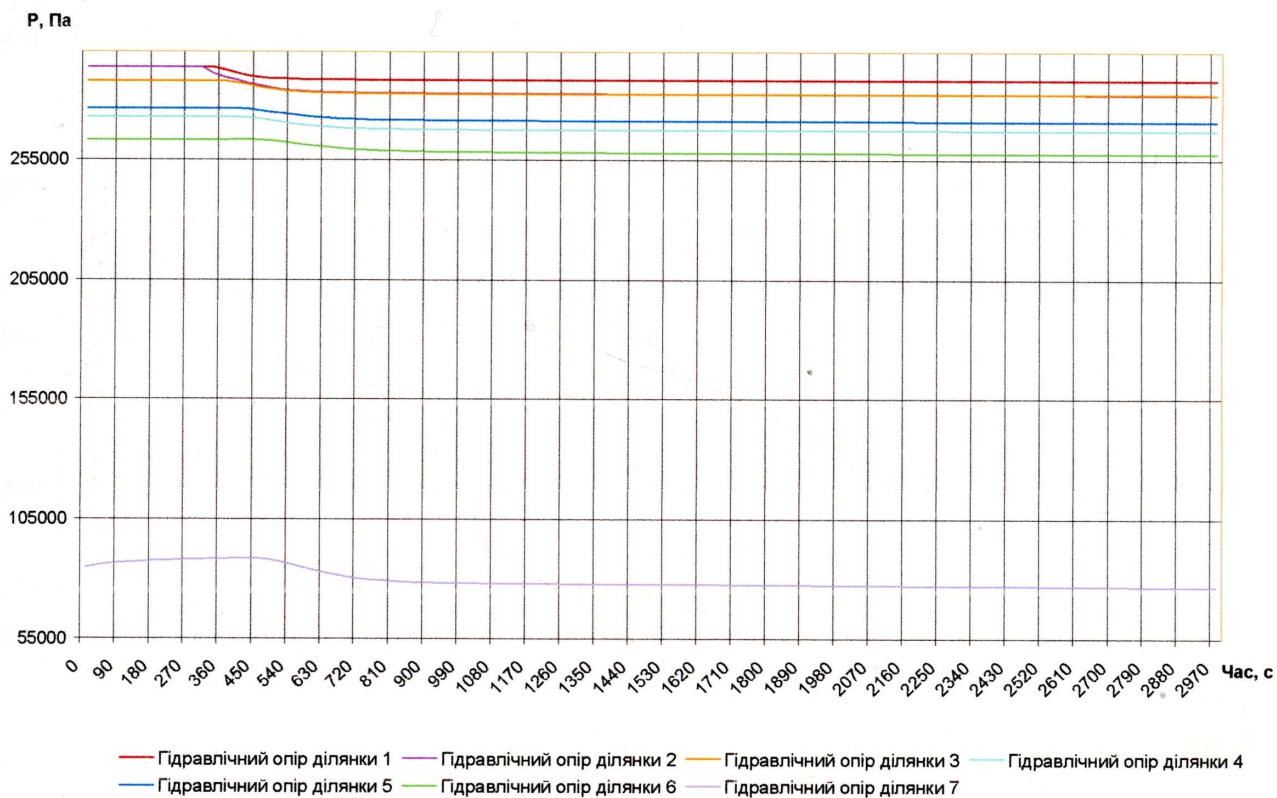


Рис. 4.19 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 4 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 7

За результатами проведених розрахунків побудовано графіки зміни тиску під час введення в експлуатацію ділянки 4 та послідовному збільшенні гідравлічного опору кожної ділянки (рис. 4.20-4.24).

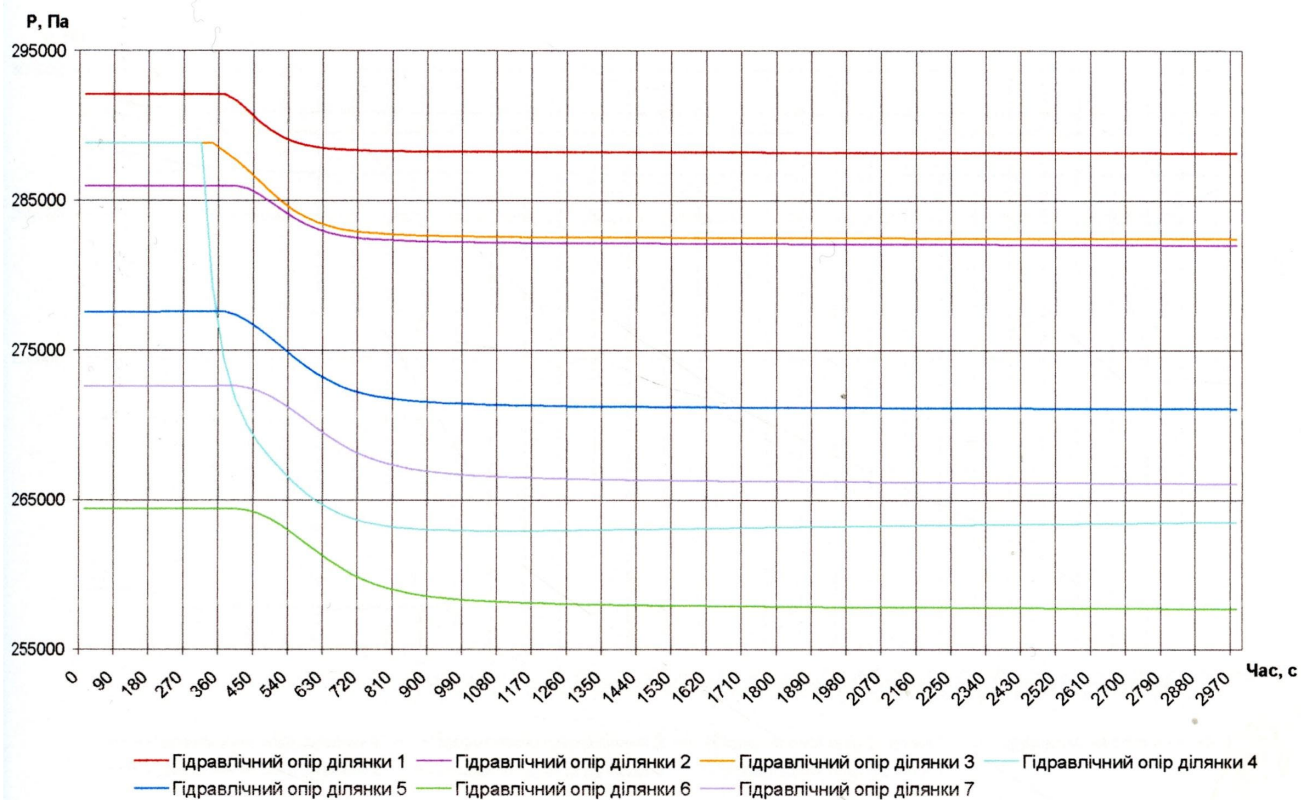


Рис. 4.20 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 4

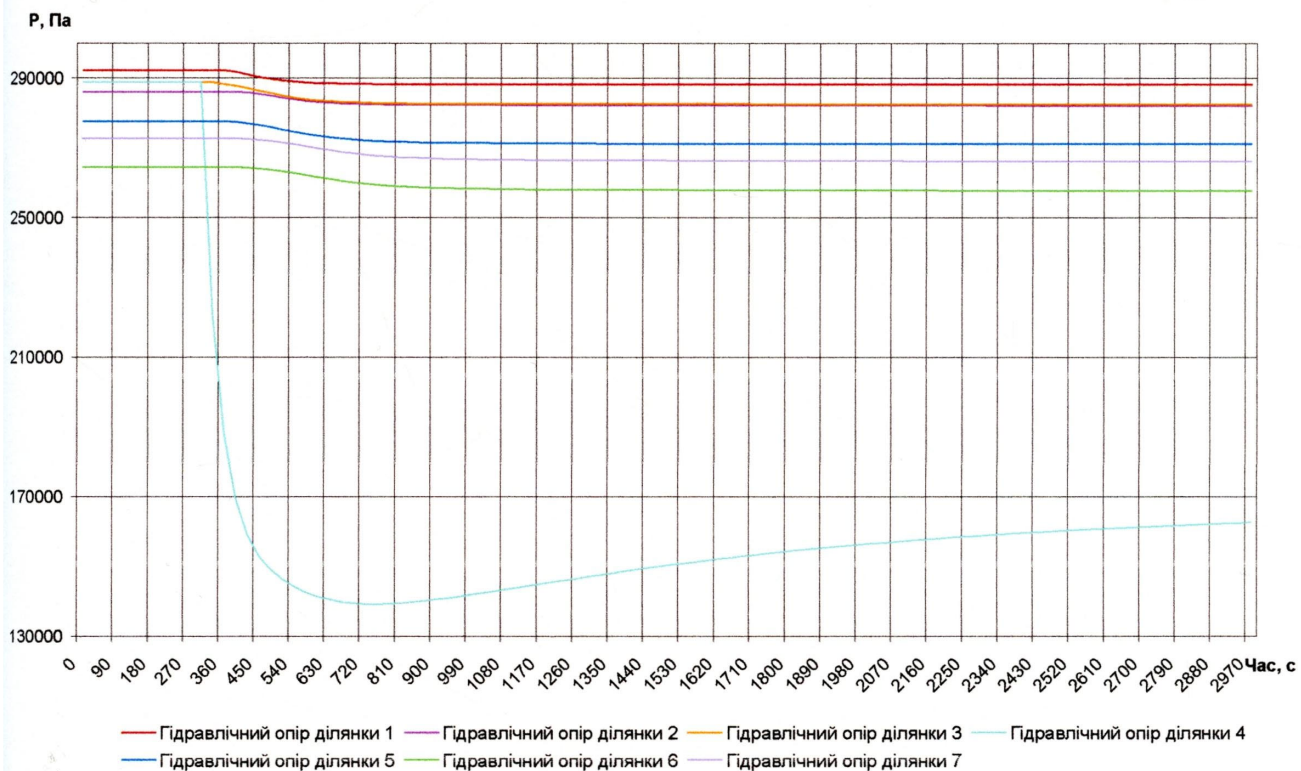


Рис. 4.21 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 4 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 4

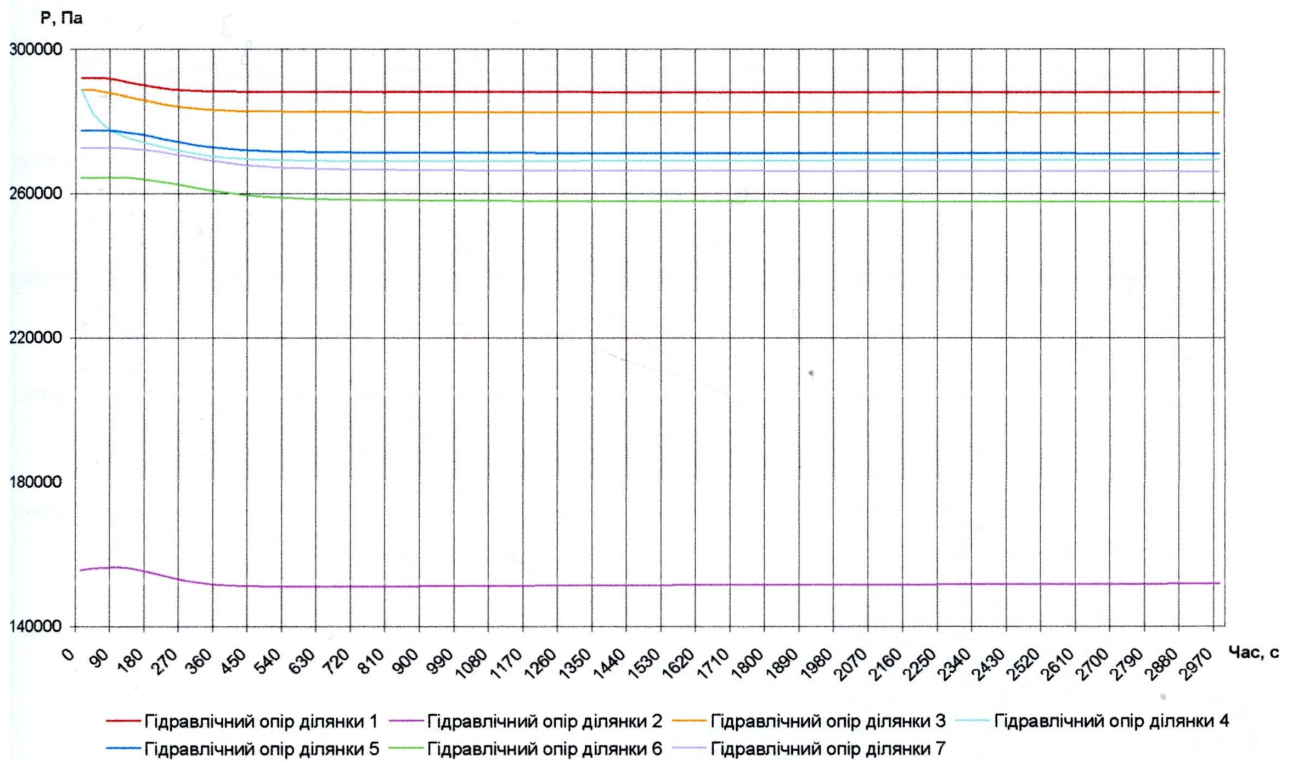


Рис. 4.22 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 4 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 2

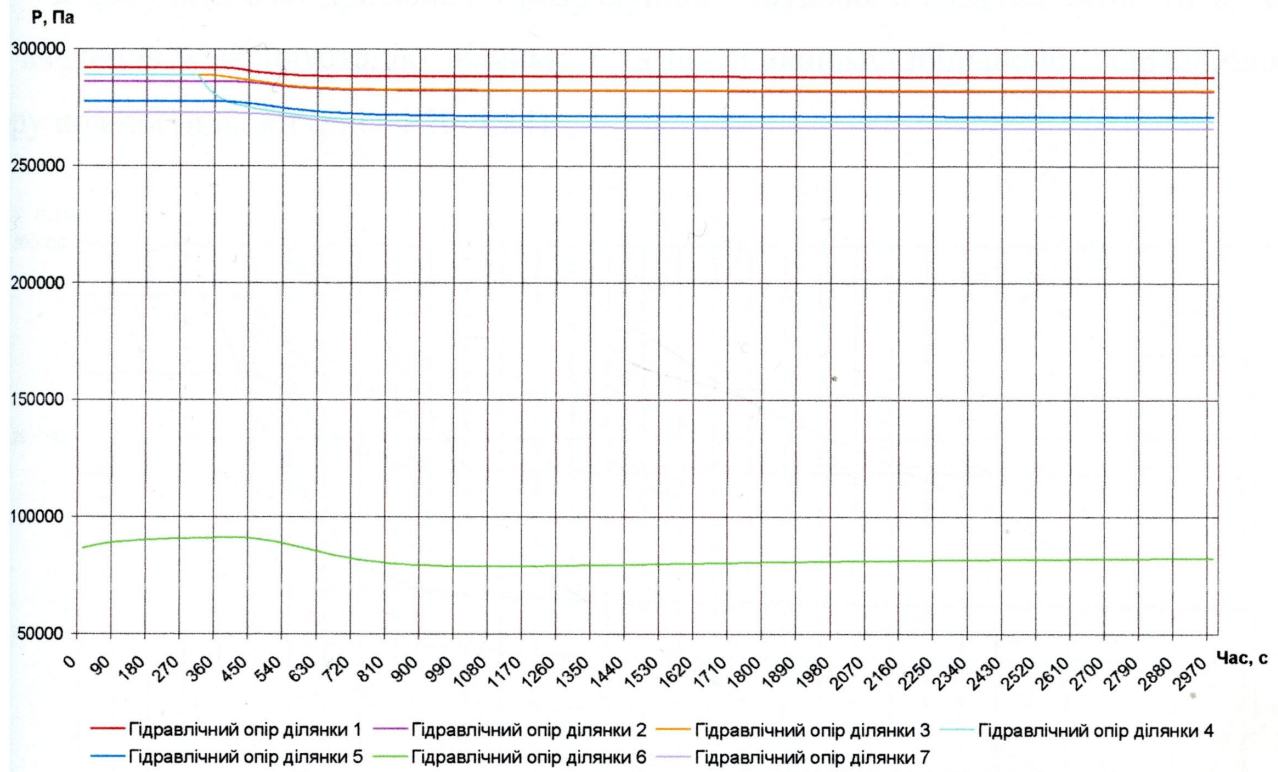


Рис. 4.23 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 4 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 6

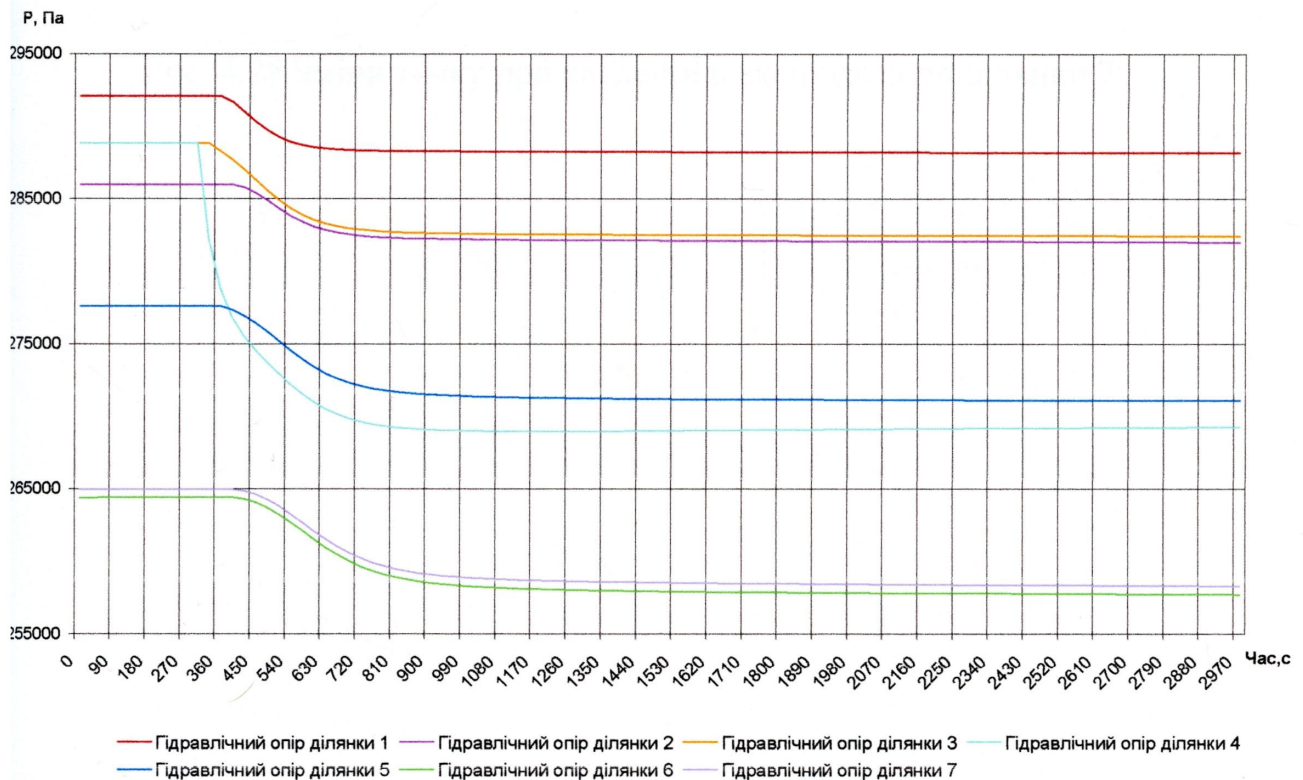


Рис. 4.24 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 4 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 7

За результатами проведених розрахунків побудовано графіки зміни тиску під час введення в експлуатацію ділянки 7 та послідовному збільшенні гідравлічного опору кожної ділянки (рис. 4.20-4.24).

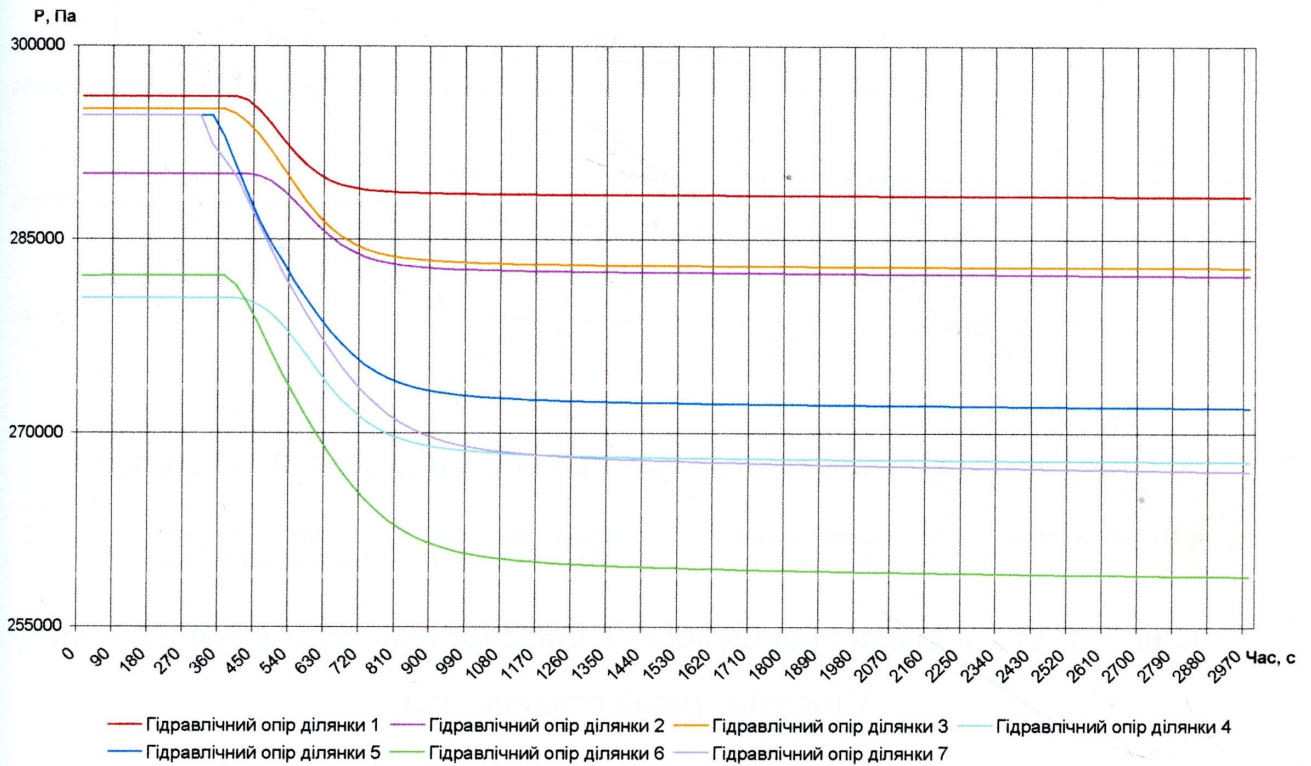


Рис. 4.25 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 7

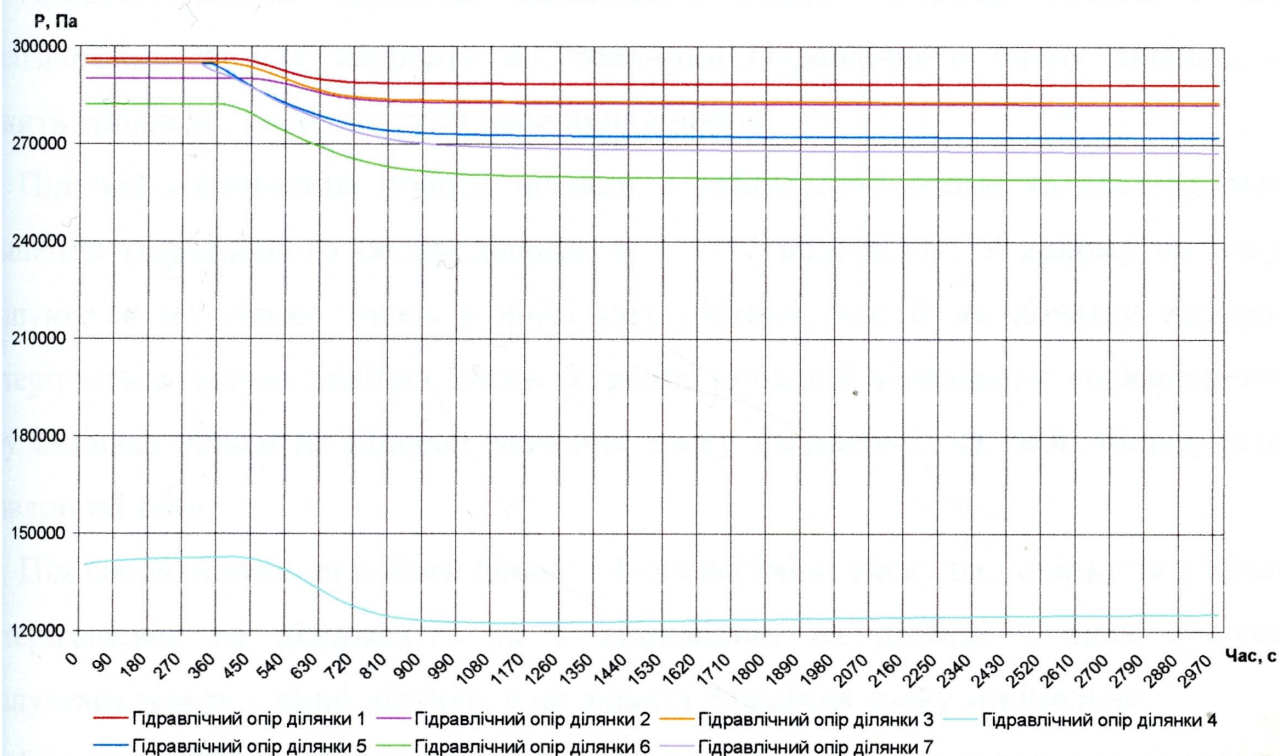


Рис. 4.28 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 7 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 4

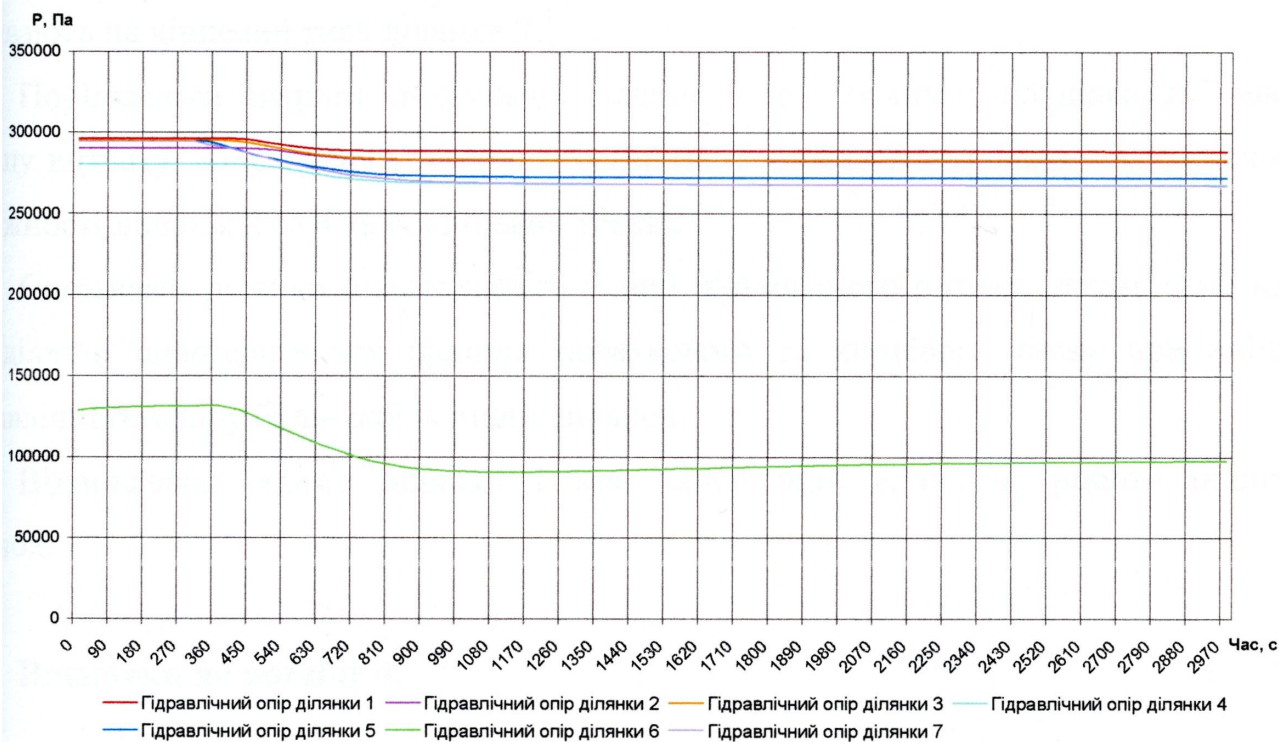


Рис. 4.29 Зміни тиску при введенні в експлуатацію ділянки 7 та збільшенні гідравлічного опору ділянки 6

Проаналізувавши отримані залежності, можна зробити висновок, що стабілізаційний час не залежить від величини гідравлічного опору ділянки, а залежить тільки від координати та величини відбору.

Під час відновлення роботи ділянки 2 найбільший вплив на систему має збільшення гідравлічного опору ділянок 4, 6 та 7 відповідно. У даному випадку зменшуються не тільки тиски у кінці цих ділянок, але й на початку ділянки спостерігається значне падіння тиску. У решті випадків збільшення гідравлічного опору впливає тільки на кінцеве значення тиску на ділянці, на якій збільшували гідравлічний опір.

Під час відновлення роботи ділянки 4 значні зміни тиску на початку та у кінці спостерігаються на ділянках 2 та 6 відповідно, на ділянці 4 тиск суттєво зменшується тільки у кінці ділянки, а на ділянці 7 падіння тиску мінімальне.

Під час відновлення роботи ділянки 7 значні падіння початкового та кінцевого значень тиску спостерігається на ділянках 4 та 6 відповідно. На ділянках 2 та 7 падіння тиску мінімальне.

В усіх випадках зміни гідравлічного опору на ділянках 2, 4, 6 практично не впливають на кінцевий тиск ділянки 7.

Порівнюючи витрати споживачів ділянок 6 та 7 бачимо, що ділянка 7 має більшу витрату. Аналогічна ситуація спостерігається під час порівняння споживчої потужності ділянок 2 та 4 та їх кінцевих тисків.

Споживачі ділянки 6 знаходяться у зоні підвищеного ризику, так як саме на цій ділянці спостерігається падіння початкового та кінцевого тиску при зміні гідравлічного опору будь-якої із інших ділянок.

Відновлення роботи ділянки 2 має найбільший вплив на роботи інших ділянок.

Висновки по розділу 4.

Найбільший вплив на зміну тиску має відключення останньої ділянки. У цьому випадку відбувається ефект гідравлічного удару і тиск у мережі значно

Збільшується, що може призвести до аварійно-небезпечних ситуацій, тому при підключенні усіх ділянок, а останньої ділянки насамперед, треба проводити закриття арматури плавно без різкого перебивання потоку. Аналогічно після монтажних робіт загальний час стабілізації роботи мережі буде менший при послідовному підключенні найдовших ділянок.

Отримані результати вказують на те, що час стабілізації тим більший, чим більший відбір газу споживачами мережі. Величина гідравлічного опору ділянок на час стабілізації при відновленні роботи газової мережі не впливає. Найбільший вплив має збільшення гідравлічного опору максимально наближених до джерела постачання ділянок. При збільшенні гідравлічного опору ділянок тиски суттєво зростають. Тому врахування місцевих опорів терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів дозволить забезпечити усіх споживачів необхідним мінімально-допустимим тиском та забезпечити можливість розвитку мережі у майбутньому.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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, а саме:

1. На основі досліджень та сучасної практики проектування газових мереж становлено, що для газопроводів із поліетиленових труб втрати тиску в місцевих порах 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.

2. 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.

3. Проведені дослідження впливу характеру та кількості місцевих опорів на втрати тиску в газопроводах із поліетиленових труб.

Визначено коефіцієнти еквівалентної довжини залежно від типу та кількості місцевих опорів на 1 км довжини газових мереж (коефіцієнт може бути рівний від 1 до 2,9).

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

вищий на 11,5 – 80 %). Результати проведених досліджень та розроблені вдосконалені конструкції терморезисторних з'єднань поліетиленових трубопроводів впроваджені у ТЗОВ “Прикарпатська полімерна компанія”, що дозволяє отримати економічний ефект в розмірі 20 тис. грн. в рік при газифікації одного населеного пункту на 2000 жителів.

4. Здійснено моделювання нестационарних процесів у газових мережах із поліетиленових труб із урахуванням визначених коефіцієнтів місцевих опорів терморезисторних з'єднань. Визначено вплив місцевих опорів на проходження аварійних процесів у поліетиленових газових мережах, розраховано необхідний час відновлення газової мережі при відключенні ділянок. Запропоновано оптимальні умови відновлення стабільної роботи газової мережі після аварійного або планового ремонту.

Запропоновано новий підхід до моделювання нестационарних процесів у газових мережах із поліетиленових труб із урахуванням місцевого опору ділянок мережі, який знайшов відображення у розробленому галузевому керівному документі ВАТ “Укргазпроект” “Комплексна галузева методика розрахунку газових мереж із поліетиленових і сталевих труб”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Н. Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н. Н. Абрамов. - М.: Стройиздат, 1972. – 287 с.
2. Абрамов Н.Н. Водоснабжение: [ученик для вузов по специальности «Водоснабжение и канализация»] / Н. Н. Абрамов. - М.: Стройиздат, 1982 – 440 с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1976. – 600 с. - ISBN 5-02-014015-5
4. Агроскин И.И. Гидравлика / И.И. Агроскин, Т.Т.Дмитриев, Ф.И.Пикалов. – М.: Госэнергоиздат, 1964. – 352 с.
5. Александров А.В. Математическое описание и методы анализа нестационарных процессов в газопроводах / А.В. Александров, Е.И. Яковлев. – М.: ВНИИОЭНГ, 1970. – 40 с.
6. Алексеев В.П. Основы научных исследований / В.П. Алексеев, Д.В. Озеркин. – Томск: ТУСУР, 2001. – 171 с.
7. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, Л.С. Кивотовский, Л.П. Иванов. - М.: Стройиздат, 1987. - 413 с.
8. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. - М.: 1975. – 327 с.
9. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
10. Альтшуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике : [учебное пособие] / А.Д. Альтшуль, В.И. Калицун, Ф.Г. Майрановский. - М.: Стройиздат, 1976. – 256 с.
11. Асатурян А.М. О неустановившихся движениях газа в трубопроводах / А.М. Асатурян, З.Т. Галиуллин, В.И. Черников // Изв. вузов. Нефть и газ. - 1961. - №10. С. 73-79.
12. Асатурян А.М. Теория планирования эксперимента : [учеб. пособие для вузов] / А.М. Асатурян. – М.: Радио и связь, 1983. – 243 с.
13. Афанасьев В.А. Сооружение газохранилищ и нефтебаз / В.А. Афанасьев, Л. Березин. - М.: Недра, 1997. - 333 с.

14. Бабенко Ф.И. Трещиностойкость сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб / Ф.И. Бабенко, А.А. Герасимов, А.К. Родионов // *Материалы технологии, инструменты.* – 2003. – Т. 8, №3. – С. 19-20.
15. Бахвалов И.С. Численные методы / И.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 631 с.
16. Баясанов Д.Б. Распределительные системы газоснабжения / Д.Б. Баясанов, А.А. Ионин. – М.: , 1977. – 408 с.
17. Беллман Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел. – М.: Мир, 1974. – 207 с.
18. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 457 с.
19. Березин И.С. Методы вычислений. Т.2 / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – М.: Физматгиз, 1962. – 639 с.
20. Беренс В. Руководство по оценке эффективности инвестиций / В. Беренс, П.М. Хавранек. – М.: АОЗТ “Интерэксперт”, ИНФРА-М, 1995. – 528 с.
21. Берж К. Теория графов и ее применения / К. Берж. – М.: ИЛ, 1962. – 320 с.
22. Берман Р. Я. Математическая модель стационарного режима газопередачи по закольцованной системе магистральных газопроводов / Р. Я. Берман, В. И. Черников, С. А. Бобровский // *Труды МИНХиГП.* – 1969. – вып. 73. – С. 73—81.
23. Берман Р. Я. Экспресс-расчет режимов работы КС при оптимальном планировании процессов транспорта газа / Р. Я. Берман, Н. В. Журавлева, Д.А. Ионин // *Транспорт и хранение газа.* – 1979. – № 4. – С. 8—14.
24. Берман Р.Я. Оптимизация режимов работы закольцованных магистральных газопроводов / Р.Я. Берман, С.А. Бобровский, З.Т. Галиуллин // *Газовая промышленность.* – 1967. – №3. – С. 22-26.
25. Биндер К. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике: введение / К. Биндер, Д.В. Хеерман. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 144 с. – ISBN 5-02-014735-4
26. Бобровский С.А. Газовые сети и газохранилища / С.А. Бобровский, Е.И. Ковлев. – М.: Недра, 1980. – 413 с.

27. 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.
28. Богомолов А.И. Гидравлика: [ученик]/ А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. - М.: Стройиздат, 1972. - 648 с.
29. Борисов С.Н. Гидравлические расчеты газопроводов / С.Н. Борисов, В.В. Даточный. – М.: Недра, 1972. – 112 с.
30. Бразилович Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е.Ю. Бразилович, И.А. Каштанов. - М.: Сов.радио, 1971. - 519 с.
31. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
32. Бусленко Н.П. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
33. Бусленко Н.П. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) и его реализация в цифровых машинах / Н.П. Бусленко. – М.: Физматгиз, 1961. – 226 с.
34. Бусленко Н.П. Метод статистического моделирования / Н.П. Бусленко. – М.: Статистика, 1970. – 112 с.
35. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
36. Вазов В. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных / В. Вазов, Д. Форсайд. – М.: Иностран. Лит., 1963. – 487 с.
37. Варфоломеев В.А. Справочник по проектированию, строительству и эксплуатации систем газоснабжения / В.А. Варфоломеев, Я.М. Торчинский, Р.Н. Шевченко. - К.: Будівельник, 1988. – 238 с.
38. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
39. Вилля Г. Теория вихрей / Г. Вилля. – Л.: ОВТИ-главная редакция общетехнической литературы, 1936. - 266 с.
40. Вольский Э. Л. Определение коэффициентов гидравлического сопротивления при нестационарном течении газа / Э. Л. Вольский, М. Г. Сухарев // Изв. высшей школы. Нефть и газ. – 1972. - № 6. - С. 79-84.

41. Вольский Э. Л. Режим работы магистрального газопровода / Э.Л. Вольский, И.М. Константинова. - Л.: Недра, 1970. - 168 с.
42. Газовые сети и газохранилища / [Земенков Ю.Д., Прохоров А.Д., Васильев Г., Халлыев Н.Х. и др.]. - М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2004. - 359 с.
43. Газовые сети и газохранилища : учеб. пособие/ [Л. Я. Федорова и др.]. - Люмень: Вектор Бук, 2004. - 197 с. - ISBN 5-88131-381
44. 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.
45. 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
46. Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, проектированию и эксплуатации / [А.Л. Шурайц, В.Ю. Каргин, Ю.Н. Вольнов]. – Саратов: Издательство "Журнал "Волга – XXI век"", 2007. – 612 с.
47. 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.
48. Галиуллин З.Т. Новые методы проектирования газонефтепроводов / З.Т. Галиуллин, В.И. Черников. - М.: Недра, 1964. – С. 69-88.
49. Галицкий Ю.В. Геоинформационные технологии для газотранспортных предприятий / Ю.В. Галицкий, В.В. Салюков // Газовая промышленность. - 1999. - №8. - С. 40.
50. Гарляускас А. И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа / А.И. Гарляускас. - М.: Недра, 1975. - 160 с.
51. Гельмгольц Г. Основы вихревой теории / Г. Гельмгольц. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. - 82 с.
52. Гольянов А.И. Газовые сети и газохранилища : [учеб.]/ А.И.Гольянов. - Уфа: Монография, 2004. - 302 с. - ISBN 5-94920-022-5

53. Голянов А.И. Газовые сети и газохранилища : [учебник для студентов вузов] / А. И. Голянов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Уфа: Монография, 2008. - 375 с. - ISBN 978-5-94920-085-8
54. Гончарук М.І. Довідник з газопостачання населених пунктів України / Гончарук М.І., Середюк М.Д., Шелудченко В.І. – Івано-Франківськ: Сімик, 2006. -1314 с.
55. Гордюхин А.И. Газовые сети и установки. Устройство и проектирование / А.И. Гордюхин. - М.: Стройиздат, 1978. – 383 с.
56. Горилловский М.И. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена / [М.И. Горилловский, Е.В. Калугина, А.Н. Иванов, Ф.К. Сатдинова] // Пластические массы. Структура и свойства. – 2005. - № 4. - С. 9-12
57. Гофман-Захаров П.М. О технико-экономических предпосылках построения городских газоразводящих систем низкого давления / П.М. Гофман-Захаров // Газовая промышленность. -1956. - №11. - С. 22-24
58. 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
59. Грудницкая Т. Я. Определение коэффициентов гидравлического сопротивления на основе численного решения уравнений Навье — Стокса / Т.Я. Грудницкая, В.А. Люлька, А.В. Шипилин // Пневматика и гидравлика. - М.: Машиностроение. - 1986. - Вып. 12. - С. 111–115
60. Данилов Ю. В. Применение ЭВМ при проектировании ГТС / Ю. В. Данилов, А. Б. Мурдасов, Г. В. Фуртиков. – М.: Связь, 1979. - 113 с.
61. Даффин Р. Геометрическое программирование / Р. Даффин. - М.: Мир, 1972. - 311 с.
62. Дедиков Е.В. Использование ГИС-технологий для решения экологических задач / Е.В. Дедиков, В.Б. Лещинский, В.Н. Мовсесов // Газовая промышленность. 2002. - №8. - С. 79 - 80

63. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 16 с.
64. Дорошенко В.М. Основи наукових досліджень: [Навч.посіб.] / В.М. Дорошенко. – К.: ІСДО, 1993. – 128 с.
65. Дубинский А. В. Об оптимизации развития газотранспортных систем с использованием ЭВМ / А. В. Дубинский, И. М. Константинова, Л. Е. Тункель // Проектирование и стр-во трубопроводов и. газонефтепромысловое оборудование. - 1978. - № 3. - С. 26 - 31
66. Дубинский Н.М. Автоматические газорегулирующие системы / Н.М. Дубинский. – К.: Техніка, 1976. – 192 с.
67. Дубровский В. В. Опыт разработки информационного обеспечения АСУ газотранспортными предприятиями / В.В. Дубинский // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой пром-сти. – 1977. - № 3. - С. 3-8
68. Евдокимов А.В. Информационно-аналитические системы управления инженерными сетями жизнеобеспечения населения: [учебное пособие] / А.В. Евдокимов, В.А. Петросов. – Х.: ХТУРЭ, 1998. – 412 с.
69. 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
70. Евдокимов А.Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевяшев. – Х.: Высшая школа, 1980.- 144 с.
71. Ефремов В. А. Сетевая модель оптимизации перспективных планов развития систем газоснабжения с учетом сезонной неравномерности / В.А. Ефремов, Ю.Г. Лапшин // Экономика, организация и управление в газовой пром-сти. – 1976. - № 1. - С. 23-30
72. Зайцев К.И. Сварка полимерных материалов: [справочник] / [К.И. Зайцев, И.Н. Мацюк, А.Г. Богдасhevский и др.] – М.: Машиностроение, 1988. -312 с.

73. Зарубіна Ю.І. Вибір оптимальних параметрів системи газопостачання за показниками надійності / Ю.І. Зарубіна, В.Б. Михалків // Науковий вісник. – 2009. № 3 ,(21). - С. 11-19
74. 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
75. Зарубіна Ю.І. Експериментальне дослідження місцевих опорів / Ю.І. Зарубіна // Нафтогазова енергетика. – 2008. - №2(7). - С. 24-27
76. Зарубіна Ю.І. Оптимізація геометричних параметрів систем розподілу газу променевої структури / Ю.І. Зарубіна, М.Д.Середюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. -№2 (11). – С. 38-43
77. 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
78. Зойтендейк Г. Методы возможных направлений / Г. Зойтендейк. - М.: ИЛ, 1963. – 176 с.
79. Зуховицкий С.И. Линейное и выпуклое программирование / С.И. Зуховицкий, Л.И. Авдеева. - М.: Наука, 1964. - 348 с
80. Зыков А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. – М.: Наука, 1987. – 380с.
81. Иванов В.В. Методы вычислений на ЭВМ: [справочное пособие] / В.В. Иванов. - К.: Наук. думка, 1986. – 564 с.
82. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. - М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
83. Ильин А.И. Технология и организация монтажа тепловых и газовых сетей : [учеб. пособие] / А.Н. Ильин, Л.А. Харин. - Магнитогорск: МГТУ, 2004. - 63 с. - ISBN 5-89514-624-4
84. Ионин А.А. Газоснабжение / А.А. Ионин. - М.: Стройиздат, 1989.-439 с
85. Калицун В.И. Основы гидравлики и аэродинамики / В.И. Калицун, Е.В. Дроздов. – М.: Стройиздат, 1980.- 247 с.

86. Каминер А.А. Гидромеханика в инженерной практике / А.А. Каминер, О.М. Яхно. - К.: Техника, 1987. - 175 с.
87. Каргин В. Ю. Полиэтиленовые газовые сети. Материалы для проектирования и строительства / В.Ю. Каргин, В.Е. Бухин, Ю.И. Вольнов. - Приволжск книгоиздательство, 2001.- 400 с.
88. Кирпичев М.В. Теория подобия / М.В. Кирпичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 236 с.
89. Корн Г. Справочник по математике / Г.Корн, Т.Корн. - М.: Наука, 1975. - 831 с.
90. Кофман А. Методы и модели исследований операций / А.Кофман. – М.: Наука, 1977. – 432 с.
91. Крайко А.Н. Механика жидкости и газа. Избранное / А.Н. Крайко, А.Б. Ватажин, Г.А. Любимов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 752 с. - ISBN 5-9221-0444-6.
92. Красовский Б.М. Расчет кольцевых распределительных газопроводов с предварительным назначением узловых давлений / Б.М. Красовский // Газовая промышленность. – 1962. - №10. – С. 24-28
93. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – М.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
94. Кросс Х. Методы расчета потоков в трубопроводах или электрических сетях. Бюллетень № 1296 опытно-технической станции Иллинойского университета от 13/XI 1936 г.
95. Ландау Л. Д. Механика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М.: Гостехтеоретиздат, 1954. – 796 с.
96. Ланс Дж. Н. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин / Пер.с англ.И.А.Брина; под ред. В. М. Курочкина. - М.: Иностран.лит., 1962. - 208 с.
97. Левин А.М. Расчет газовых сетей на минимум металла / А.М. Левин, В.А. Смирнов, А.Я. Черкасова // Газовая промышленность. – 1966. - №9. – С. 28-32
98. Левин В.И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ / В.И. Левин. - М.: Наука, 1987. - 304 с.

99. Левин И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И. Левин. – Л.: Энергия, 1967. – 202 с.
100. Левин С.Р. Определение гидравлических сопротивлений действующих городских газопроводов / С.Р. Левин, Ю.А. Лукин, Г.Г. Бибииков, Л.К. Шерстенникова // Газовая промышленность. – 1965. - №4. – С. 20-22
101. Ледли Р. Программирование использование вычислительных машин / Р. Ледли. - М.: Мир, 1966. – 643 с.
102. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. - М.: ГИФМЛ, 1958. - 333 с.
103. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: [учеб.пособие] / М.В. Лурье. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.
104. Лэдсон Л. Оптимизация больших систем / Л. Лэдсон. – М.: Наука, 1975. -431 с.
105. Ляуконис А.Ю. Оптимизация городского газоснабжения / А.Ю. Ляуконис. – Л.: Недра, 1989. – 302 с. – ISBN 5-247-00767-0
106. Майник Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майник. – М.: Мир, 1981. – 323 с.
107. Макаренко А.И. Рациональное управление газовым хозяйством области / А.И. Макаренко, В.С. Седак. - Киев: ИСМО, 1998. – 252 с.
108. Максимов Ю.И. Метод решения нелинейной системы уравнений, описывающей работу системы пласт – скважина – газосборная сеть на электронной вычислительной машине / Ю.И. Максимов Тр. ВНИИГаз, вып.V. М.: Недра, 1965.
109. Марков С.А. Определение экономических параметров городских газовых сетей / С.А. Макаров. – Киев: Госстатиздат, 1960. – 60 с.
110. Марков С.А. Расчет городских газопроводов высокого и среднего давления / С.А. Марков, Б.Н. Пшеничный // Газовая промышленность. – 1962. - №3. – С. 26-34.

111. Математические методы в исследовании операций / Сборник статей. под ред. Н. Н. Моисеева, П. С. Краснощекова. — М.: Изд-во МГУ, 1981. - 192 с.
112. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения : монография / А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В.Сумароков и др.; отв. ред. А. П. Меренков. - Новосибирск: Наука, 1992. - 406 с. - ISBN 5-02-029946-4
113. Методика оптимизации режимов сложных газотранспортных систем (на основе регрессионной идентификации) / [В.Б. Михалкив, Е.И. Яковлев, Б.И. Ксенз]. – М.: МИНХ, 1983. – 94 с.
114. Методы расчета турбулентных течений / [Под. ред. В.Кольмана]. - М.: Мир, 1984. – 464 с.
115. Метрологія. Повірка засобів вимірювань. Організація і порядок вимірювань : ДСТУ 2708-2006. - [Чинні від 2006-02-3]. – К.: Держстандарт України, 2006. – 13 с.
116. Минский М. Основы расчета сложных газосборных сетей на электронных вычислительных машинах / М. Минский, Ю.И. Максимов // Газовая промышленность. – 1962. - №10. – С. 9-12.
117. Михалевич В.С. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов / В.С. Михалевич, А.И. Кукса. - М.: Наука, 1983. – 208 с.
118. Монин А.С. Статистическая гидромеханика. Ч.1 / А.С. Монин, А.М.Яглом. - М.: Наука, 1965. – 639 с.
119. Монин А.С. Статистическая гидромеханика. Ч.2 / А.С. Монин, А.М.Яглом. - М.: Наука, 1967. – 720 с.
120. Мороз П.П. Гибридная вычислительная система для моделирования динамики режимов магистральных газопроводов и газораспределительных сетей / [П. П. Мороз, К. Э. Кениг, В. Д. Полковников и др.] // Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой пром-сти. - 1979. - № 6. - С. 12-19

121. Мяченкова В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: [справ. пособие]/ В.И. Мяченкова, В.П. Мальцев, В.П. Майборода. – М.: Мир, 1979. – 420 с.
122. Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения жидкостей в гладких трубах / И. Никурадзе. - Москва-Ленинград: ОНТИ, 1936. - 332 с.
123. Новітні методи прикладної фізики і математики в інженерних дослідженнях : навч.посібник / [О.М. Карпаш, А.О. Снарський, П.М. Райтер, М.О. Карпаш]. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – 320 с.
124. Оре О. Теория графов / О. Оре. – М.: Наука, 1980. – 336 с.
125. Панов М.Я. Многофакторный анализ городских систем газоснабжения / М.Я. Панов, Г.Н. Мартиненко // Газовая промышленность. 2003. - №4. – С. 38-39.
126. Панов М.Я. Техничко-економические расчеты и оптимизация газовых сетей : учеб. пособие / М.Я.Панов,В.Н.Мелькумов. - Воронеж: ВИСИ, 1989. - 83 с.
127. Повх И. Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повз. – М.: изд-во «Машиностроение», 1969. - 524 с.
128. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы / Д.Н. Попов. -М.: Машиностроение, 1982. - 240 с.
129. Прандтль Л. Результаты работ последнего времени по изучению турбулентности / Л. Прандтль. - Москва-Ленинград: ОНТИ, 1936. - 332 с.
130. 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.
131. Растрингин Л.А. Системы экстремального управления / Л.А. Растрингин. - М.: Наука, 1974. – 632 с.
132. Режимы газотранспортных систем / [Е.І. Яковлев, О.С. Козак, В.Б. Михалків]. – Львів: Світ, 1993. – 170 с.
133. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях / А.Дж. Рейнольдс. - М.: Энергия, 1979. – 408 с.
134. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Т. Шервуд. – Л.: Изд. «Химия», 1971. - 704 с.

135. Рихтмайер Р.Д. Разностные методы решения краевых задач / Р.Д. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Недра, 1972. – 413 с.
136. Робертс С. Динамическое программирование в процессах химической технологии и методы управления / С. Робертс. - М.: изд-во „Мир”, 1965. – 488 с.
137. Розен В.В. Цель-оптимальность: математические модели принятия оптимальных решений / В.В. Розен. - М.: Радио и связь, 1982. - 169 с.
138. Рустамов Е.Э. гидравлический расчет магистральных газопроводов при нестационарном газопотреблении / Е. Э. Рустамов // Изв. Вузов. Нефть и газ, 1974. - №3. – С. 49-51
139. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Керж. - М.: Радио и связь, 1991. - 224 с.
140. Салимжанов Э.С. Метод динамического программирования в управлении транспортом газа / Э.С. Салимжанов, А.И. Гарляускас // Газовая промышленность. – 1966. - №12. – С. 11-16
141. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. - М.: Недра, 1971. – 550 с.
142. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов : СП 42-103-2003. – [Чинний від 2003 – 11 - 27]. - М.: Полимергаз, 2003. - 201 с.
143. Сегерлинд Л.С. Применение метода конечных элементов / Л.С. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 290 с.
144. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1972. – 440 с.
145. 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
146. Середюк М.Д. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів / М.Д. Середюк, В.Я. Малик, В.Т. Болонний. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003. – 436с.

147. 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.
148. Силаш А.П. Добыча и транспорт нефти и газа. Часть 2. / А.П Силаш. – М.: Недра, 1980. - 264 с.
149. Скафтымов Н.А. Основы газоснабжения /Н.А. Скафтымов. - Л.: Недра, 1975. - 343 с.
150. Смирнов В.А. Расчет распределительных сетей низкого давления /В.А. Смирнов // Газовая промышленность. - 1962. - №6. – С. 30-33.
151. Смирнов В.А. Техничко-экономическое обоснование схем газоснабжения /В.А. Смирнов. - М.: Стройиздат, 1967. - 165 с.
152. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов и др.; под. ред. Б.Б. Некрасова. - 2-е изд., перераб. и дополн. - Минск: Высшая школа, 1985. - 382 с.
153. Ставровский Е.Р. Универсальная программа расчета газосборных сетей / Е.Р. Ставровский, М.Г. Сухарев // Газовая промышленность. – 1965. - №7. – С. 10-11.
154. Станюкович К.П. Неустановившееся движение сплошной среды / К.П. Станюкович. – М.: Наука, 1971. – 854 с.
155. Стаскевич Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. - 762 с.
156. Сухарев М.Г. Алгоритм оптимального проектирования магистральных газопроводов с учетом динамики развития / М.Г. Сухарев // Газовая промышленность. 1969. - №3. – С. 73-76.
157. Сухарев М.Г. Об одном методе расчета газосборных сетей на вычислительных машинах / М.Г. Сухарев // Газовая промышленность. – 1965. - №6. – С. 48-52.
158. Сухарев М.Г. Оптимальное развитие систем газоснабжения / М.Г. Сухарев, Е.Р. Ставровский, В.Е. Брянских. - М.: Недра, 1981. – 294 с.

159. Сухарев М.Г. Оптимизация систем транспорта газа / М.Г. Сухарев, Е.Р. Ставровский. – М.: Недра, 1976. – 318 с.
160. Сухарев М.Г. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов / М.Г. Сухарев, А.М. Карасевич. - М.: Недра, 2000. - 209 с.
161. Темпель Ф.Г. Моделирование газоснабжающих систем / Ф.Г. Темпель. – Л.: Недра, 1986. – 184 с.
162. Темпель Ф.Г. Технико-экономическая оптимизация газоснабжающих систем (прикладные аспекты) / Ф.Г. Темпель. - Л.: Недра, 1979 – 96 с.
163. Торчинский Я.М. Определение среднего диаметра закольцованной сети газопроводов низкого давления / Я.М. Торчинский // Газовая промышленность. – 1966. - №7. – С. 32-34.
164. Торчинский Я.М. Расчет закольцованной распределительной сети низкого давления / Я.М. Торчинский // Газовая промышленность. – 1962. - №1. – С. 28-32.
165. Трубопровідний транспорт газу / [М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Милалків та ін.]: за ред. М.П.Ковалка. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
166. Турбулентность. Принципы и применения / [Под. ред. У.Фроста, [Моулдена]. - М.:Мир, 1980. – 536 с.
167. Удовенко В.Е. Полимеры в газоснабжении / В.Е. Удовенко, И.В. Воздев, Н.Н. Карнаул. – М.: Машиностроение, 1998. – 856 с.
168. Удовенко В.Е., Софронова И.П. Газораспределительные сети России / В.Е. Удовенко, И.П. Софронова // Полимергаз.-1998.- №1.- С. 39-40.
169. Уолтерс М. Полимеры используемые в Европе при производстве труб для газораспределительных сетей / М. Уолтерс, Б. Виккеринк // Инженерные сети из полимерных материалов. – 2007. - №3. – С. 43-45
170. Фаттахов М.М. Применение труб из термопластов при строительстве и реконструкции распределительных трубопроводов / М.М. Фаттахов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2006.-<http://www.ogbus.ru>
171. Филатов Ю.П. Системы газоснабжения: [учебное пособие] / Ю.П. Филатов, А.А. Клоков, А.И. Марухин. - Н. Новгород: 1993. - 97 с.

172. Форд Л. Потоки в сетях / Л. Форд, Д. Фалькерсон. - М.: Мир, 1966. – 276 с.
173. Френкель Н.З. Гидравлика / Н.З. Френкель. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
174. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование / Дж. Хедли. - М.: Мир, 1967. - 352 с.
175. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. - М.: Мир, 1975. - 534 с.
176. Ходанович И.Е. Аналитические основы проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов / И.Е. Ходанович. - М.: Гостоптехиздат, 1961. – 128 с.
177. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Пер. с англ. Под ред. А.А. Фридмана. - М.: Мир, 1974. - 419 с.
178. Чарный И.А. Основы газовой динамики / И.А. Чарный. - М.: Гостоптехиздат, 1961. – 200 с.
179. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный. – М.: Недра, 1975. – 288 с.
180. Черников А.В. Формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления газопроводов / А.В. Черников, З.Т. Галиуллин // Газовая промышленность. - 1998. - №1. - С. 32-33.
181. Чернов Д.Л. Гидравлический расчет кольцевых сетей на электрической модели постоянного тока / Д.Л. Чернов // Газовая промышленность. – 1962. - №3. - 1962. – С. 30-34.
182. Черногуб И.П. Динамика трубопроводных систем / И.П. Черногуб, А.Е. Юпов, П.Д. Доценко. - Харьков: Основа, 1998. – 222 с.
183. Черногуб И.П. Рациональная эксплуатация и развитие региональных газовых сетей / И.П. Черногуб // Газовая промышленность. – 1999. - №8. – С. 60-62.
184. Численные методы условной оптимизации / [Пер. с англ. под ред. А.А. Петрова]. - М.: Мир, 1975. - 534 с.

185. Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. - Л.: Энергия, 1970. - 552 с.
186. Шелепин Е.Н. Изменение шероховатости газопровода в процес эксплуатации / Е.Н. Шелепин, Е.А. Паперный // Львовск. Политехн. Ин-т, науч. Записи. – 1953. – Вып. 17, №4. – С. 50-52
187. Шехтер Р.С. Вариационный метод в инженерных расчетах / [Пер. с англ. Под ред. А.С. Плешанова]. - М.: Мир, 1971. - 292 с.
188. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: наука, 1974. / 711 с.
189. 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.
190. Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С.Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 206 с.
191. Юдин Д.Б. Линейное программирование. Теория и конечные методы / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. - М.: Физматгиз, 1963. - 775 с.
192. Юренко В.В. Городское газовое хозяйство / В.В. Юренко. - М.: Недра, 1991. – 207 с.
193. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование / И.М. Яглом. – М.: Сов.радио, 1980. – 145 с.
194. Яковлев Е.И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами / Е.И. Яковлев // Изв. вузов. Нефть и газ Баку. – 1968. - №2. – С. 72-76
195. Яковлев Е.И. Газовые сети и газохранилища : [учеб. для вузов по спец. Проектирование, сооружение, эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ"] / Е.И.Яковлев. - 2-е изд.,перераб.и доп. - М. : Недра, 1991. - 300 с. - ISBN 5-247-01548-7
196. Яковлев Є.І. Режими газотранспортних систем / [Є.І. Яковлев, О.С. Назак, В.Б. Михалків, Д.Ф. Тимків, В.Я. Грудз]. – Львів: Світ, 1992. – 170 с.
197. Cross H. Fnalysis of flow in networks of conduits or conductors – Illinois University, Urbana Eng. Exp.Station, Bul. 286, 1936.

198. Dynamic modelling of large-scale networks with application to gas distribution / Królík J., Stiegler P., Vostrá Z., Zóvorka J. Academia Prague: 1988, 160p.
199. Hunn R., Mc Intire R., Austin K. Evaluation and design of pipeline networks – Chem. Eng. Progr. Sym. Ser., 1960, 56, No. 31.
200. Kralík J. Modeling the dynamic of flow in gaz pipelines // IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. – 1984. - №4. – P. 586-596 .
201. Pipeline rules of thumb handbook: quick and accurate solutions to your everyday pipeline problems / W.E. McAllister, editor—5 th ed, – 2001. – 535 p. - ISBN 0-7506-7471-7
202. PPI Handbook of Polyethylene Pipe – 1st Edition, 2006. – 542 p.
203. Zagarola M.V., Smits A.J. Meanflow scaling of turbulent pipe flows // J. Fluid Mech. – Vol. 373. – 1998. - pp. 89-94

ДОДАТОК А

**МЕТОДИКА СТЕНДОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ОПОРІВ ФІТИНГІВ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНУ
РІЗНОГО ДІАМЕТРУ ТА КОНСТРУКЦІЇ**

МЕТОДИКА СТЕНДОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ОПОРІВ ФІТИНГІВ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНУ РІЗНОГО ДІАМЕТРУ ТА КОНФІГУРАЦІЇ

Для вивчення одночасного впливу ряду чинників (багаточинниковий експеримент) на досліджуваний об'єкт застосовують методи математичного планування експерименту.

Основна особливість методів математичного планування експерименту полягає в тому, що на основі мінімальної кількості дослідів виявляють загальні закономірності в межах зміни кожного заданого чинника. Це досягається тим, що кожний експеримент відрізняється від інших неповторним сполученням обраних чинників.

За результатами проведення експерименту необхідно знайти математичну модель об'єкта дослідження, під якою розуміють рівняння, що зв'язує показники процесу з чинниками, що діють на нього

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Головним завданням планування експерименту є розкриття механізму явища, тобто визначення такого аналітичного виразу

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

який у межах допустимих значень чинників досить точно збігається з невідомою залежністю (1).

Об'єкт дослідження може мати кілька змінних, що визначають його стан, причому чим їх буде менше, тим стислим буде план експерименту. Існують різні способи зменшення кількості змінних:

- зміна мети дослідження;
- розподіл досліджуваного об'єкта на складові;
- встановлення зв'язку між змінними стану.

Досвід показує, що здебільшого вдається обмежитись однією змінною стану. Якщо ж таких змінних кілька, досліди повторюють щодо кожної з них.

Вибираючи змінну стану, необхідно враховувати такі вимоги:

- вона повинна мати кількісне значення, тобто вимірюватись;
- має однозначно описувати об'єкт дослідження;
- під час проведення дослідів має бути статистично ефективною, тобто з найменшою дисперсією.

Вибір чинників – це найвідповідальніший етап підготовки до планування експерименту, від нього залежить правильність розв'язання поставленої задачі.

Під час проведення експерименту беруть до уваги усі чинники, які можуть суттєво впливати на процес, що вивчається. Вони повинні бути керовані і однозначні. Керувати чинником – значить мати можливість встановлювати потрібне його значення і підтримувати його сталим на час дослідження. Чинники мають безпосередньо діяти на об'єкт дослідження.

Вибираючи чинники, враховуємо наступне:

- кожен чинник має бути регульованим;
- зміна одного чинника немає спричиняти зміни інших;
- точність вимірювання і керування чинниками має бути відомою і достатньо високою.

До чинників та змінних стану одночасно ставляться й такі вимоги:

- чинники і змінні стану повинні мати області визначення, задані технологічними або принциповими обмеженнями;
- між чинниками та змінними стану має бути однозначна відповідність.

До чинників, які впливають на хід процесу віднесемо:

- витрату газу в трубопроводі, яка регулюється голковим вентилям та вимірюється двоканальним обчислювачем об'єму газу;
- початковий тиск газу в газопроводі, який встановлюється і регулюється.

Для спрощення розрахунків значення чинників перетворюємо в умовні одиниці, тобто так, щоб вони відповідали числам -1 ; $+1$.

В умовні одиниці їх перетворюємо так:

- встановлюємо мінімальне, максимальне та нульове (середнє) значення (рівні) відповідно до найвигіднішого значення даного чинника: $x_{i\min}$, $x_{i\max}$,

$$x_{i\text{сep}} = \frac{x_{i\min} + x_{i\max}}{2};$$

- задаємо інтервал або крок зміни h_i , тобто таке значення чинників в натуральних одиницях, додавання якого до нульового рівня дає верхній, а віднімання – нижній рівень:

$$h_i = x_{i\text{сep}} - x_{i\min}; \quad (3)$$

в) вираховуємо умовне значення рівнів чинників (-1; +1).

Кодування чинників означає перехід від системи координат у натуральних одиницях до системи координат у кодованій формі.

Витрату газу в трубопроводі, початковий тиск в системі змінюватимемо відповідно від 41 до 92 $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ та від 106 до 127 кПа.

Введемо позначення: $x_1 = Q$, $x_2 = P_n$, $y = \Delta P$,

де Q – витрата газу в трубопроводі, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$;

P_n – початковий тиск в системі, кПа;

ΔP – перепад тиску на фітингу, Па.

Тоді чинники матимуть такі значення:

$$x_{1\min} = 41 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$x_{2\min} = 106 \text{кПа}$$

$$x_{1\max} = 92 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$x_{2\max} = 127 \text{кПа}$$

$$x_{1\text{сep}} = 66,5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

$$x_{2\text{сep}} = 116,5 \text{кПа}.$$

Інтервали зміни значень чинників рівні

$$h_1 = 25,5 \frac{\text{М}^3}{\text{с}}, \quad h_2 = 10,5 \text{кПа}.$$

Складаємо матрицю планування експерименту, тобто план, який вміщує список усіх комбінацій чинників в кодованій формі та робочу матрицю, де усі кодовані значення чинників замінюємо дійсними (табл. 1) і згідно з нею проводимо експерименти. Для експерименту, в якому змінюються три чинники і можливі комбінації чинників під час їх зміни на двох рівнях (мінімальному та максимальному) будуть визначені чотири експериментами.

Таблиця 1

Матриця планування експерименту

Номер експерименту	x_0	Значення чинників			
		Умовна одиниця		Фактична величина	
		x_1	x_2	$Q, \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$	$P_n, \text{кПа}$
1	+1	+1	+1	92	127
2	+1	-1	+1	41	127
3	+1	+1	-1	92	106
4	+1	-1	-1	41	106

Примітка. x_0 – це стовпець значень фіктивної величини

Враховуючи, що на значення вихідної змінної впливають похибки, досліди повторюємо кілька разів. Отримуємо m паралельних значень змінної стану. Після отримання результатів експериментів визначаємо середнє значення функції відгуку \bar{y}_i i -го рядка матриці планування (табл. 2).

За середніми значеннями функції відгуку відшукуємо рівняння лінійної моделі або рівняння регресії

$$y = b_0 x + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (4)$$

Експериментальні значення функції відгуку

Номер експерименту	Експериментальні значення функції відгуку, Па				\bar{y}_u , Па
	y_1	y_2	y_3	y_4	
1	57,8	54,91	58,96	52,80	56,12
2	11,2	10,64	11,10	10,40	10,84
3	64,3	61,09	65,59	62,30	63,32
4	14,3	14,50	14,59	13,90	14,32

Коефіцієнти рівняння визначаємо за формулою

$$b_n = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{nu} \bar{y}_u, \quad (5)$$

де N - число рядків матриці планування.

Коефіцієнти рівняння регресії рівні

$$b_0 = 36,148, \quad b_1 = 23,569, \quad b_2 = -2,672.$$

Тоді лінійне рівняння регресії матиме вигляд

$$\Delta P = 36,148 + 23,569Q - 2,672P_n. \quad (6)$$

Після визначення коефіцієнтів рівняння регресії проводимо статистичний аналіз рівняння регресії, що складається з трьох етапів:

- оцінки дисперсії відтворення або помилки експерименту;
- оцінки значимості коефіцієнтів рівняння регресії;
- оцінки адекватності моделі.

Помилку досліду або дисперсію відтворення S_0^2 оцінюємо за паралельними дослідами. Перед розрахунком помилки досліду необхідно, в першу чергу, з'ясувати, чи можна припуститися, що розсіювання результатів дослідів не перевищує деякого значення. З цією метою розраховуємо рядкові дисперсії S_u^2 і перевіряємо їх однорідність. Розрахунок проводимо за формулою

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{uk} - \bar{y}_k)^2, \quad (7)$$

де m - число паралельних дослідів.

Рядкові дисперсії рівні

$$S_1^2 = 7,784, S_2^2 = 0,144, S_3^2 = 4,044, S_4^2 = 0,093.$$

Перевірити однорідність дисперсії S_u^2 можна за критерієм Кохнера, значення якого становить

$$G_p = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}, \quad (8)$$

де $S_{u \max}^2$ - максимальне значення з розрахованих рядкових дисперсій;

$\sum_{u=1}^N S_u^2$ - сума усіх дисперсій за N рядками матриці планування.

Критерій Кохнера рівний $G_p = 0,65$.

Якщо виконується умова $G_p < G_T$, то гіпотеза про однорідність дисперсій є справедливою.

Для чисел ступенів свободи $f_1 = m - 1 = 4 - 1 = 3$ і $f_2 = N = 4$ та при 5% значимості (у технічних розрахунках приймають 5% рівень значимості) $G_T = 0,6841$ [118]. У нашому випадку дисперсія однорідна, так як $G_p < G_T$, а отже можемо визначити помилку експерименту S_0^2 за формулою

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2. \quad (9)$$

Помилка експерименту рівна $S_0^2 = 3,016$.

Середньоквадратичне відхилення, або похибка відтворюваності рівна $\delta = 1,737$.

На другому етапі аналізу рівняння регресії виконуємо перевірку значимості коефіцієнтів рівняння регресії. Для оцінки впливу чинників на змінну плану перевіряємо значимість кожного коефіцієнта двома рівноцінними способами. В обох випадках спочатку визначаємо дисперсію коефіцієнтів регресії за формулою

$$S_{bn}^2 = \frac{S_0^2}{Nm}. \quad (10)$$

Дисперсія коефіцієнтів регресії рівна $S_{bn}^2 = 0,251$.

За першим способом значимість коефіцієнтів регресії оцінюємо за критерієм Стюдента, розрахункове значення якого рівне

$$t_{np} = \frac{|b_n|}{\sqrt{S_{bn}^2}}, \quad (11)$$

$$t_{0,p} = 72,102, \quad t_{1,p} = 47,013, \quad t_{2,p} = 5,330.$$

Тоді значимість коефіцієнтів регресії оцінюють порівнюючи розрахункові та табличне t_T значення критерію Стюдента. Якщо $t_{np} > t_T$, то n -й коефіцієнт вважається значимим.

Для числа степенів свободи $f_0 = N(m-1) = 4(4-1) = 12$ та при 5% значимості табличне значення критерію Стюдента рівне $t_T = 2,18$ [118]. У

шому випадку умова $t_{np} > t_T$ виконується для кожного коефіцієнта регресії, а же вони значимі.

За другим способом перевірки значимості коефіцієнтів регресії користують довірчий інтервал Δb_n , який внаслідок рівності S_{bn} для всіх коефіцієнтів регресії, буде однаковим для всіх b_n

$$\Delta b_n = \pm \sqrt{S_{bn}^2}; \quad (12)$$

$$\Delta b_n = \pm 0,501.$$

Тоді значимість оцінюють, порівнюючи абсолютні значення коефіцієнта регресії і довірчого інтервалу $|b_n| > |\Delta b_n|$. У нашому випадку умова $|b_n| > |\Delta b_n|$ виконується для кожного коефіцієнта, а отже вони значимі.

Третій етап аналізу рівняння регресії – перевірка його адекватності.

Придатність лінійного рівняння для розв'язання задачі пошуку області оптимуму (оптимум – сукупність найсприятливіших умов) перевіряємо порівнянням двох дисперсій: адекватності S_{ao}^2 та помилки досліду S_o^2 .

Дисперсія адекватності показує розсіювання середніх дослідних даних однієї стану \bar{y}_u відносно тих значень змінної стану \tilde{y}_u , які розраховуються за отриманим рівнянням регресії, значення якої розраховується за формулою

$$S_{ao}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (13)$$

l - число членів у рівнянні регресії, що залишилися після перевірки їх значимості.

Визначаємо значення змінної стану \tilde{y}_u для кожного рядка за отриманим рівнянням регресії (6)

$$\tilde{y}_1 = 57,045, \quad \tilde{y}_2 = 9,906, \quad \tilde{y}_3 = 62,389, \quad \tilde{y}_4 = 15,250.$$

Дисперсію адекватності обчислюємо за формулою (3.30) $S_{ao}^2 = 13,799$.

Адекватність перевіряємо оцінкою співвідношення $F_p = \frac{S_{ao}^2}{S_0^2} = 4,58$ за

критерієм Фішера $F_p < F_T$.

Табличне значення критерію Фішера при ступенях свободи $f_{\infty} = N - l = 4 - 3 = 1$ та $f_0 = N(m - 1) = 4(4 - 1) = 12$ і при 5% значимості рівне $F_T = 4,75$ [118].

Умова $F_p < F_T$ виконується, лінійне рівняння регресії (6) адекватне, тобто розсіювання експериментальних даних змінної стану відносно рівняння регресії має такий самий порядок, як і розсіювання, спричинене випадковими змінами в об'ємі дослідження (помилка досліду).

Як видно з результатів перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії найбільший вплив на змінну стану (втрати тиску на фітингу) має витрата газу в трубопроводі та тиск на початку ділянки. А тому потрібно провести експериментальні дослідження впливу витрати газу в трубопроводі та початкового тиску на швидкість руху газу фітингами, а відповідно втрати тиску на з'єднувальному елементі.

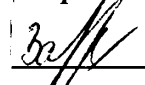
Для експериментального вивчення функціональної залежності динаміки руху газу фітингами від витрати газу в трубопроводі та початкового тиску проводимо ряд вимірювань перепадів тиску ΔP (до фітингу та після нього) для різних значень витрати повітря в трубопроводі Q та початкових тисків. Вимірювання (для одних і тих же значень чинників) проводимо кілька разів. На основі середніх значень результатів вимірювань проводимо розрахунок чисел Рейнольдса та коефіцієнта місцевого опору, які залежать від відповідних параметрів: $Re = f(Q, d)$; $\zeta = f(Q, \Delta P)$.

Науковий керівник

т.н., доцент кафедри ТЗНГ ІФНТУНГ

 Михалків В. Б.

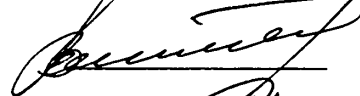
Асистент

 Зарубіна Ю. І.

Головний інженер

ВАТ "Івано-Франківськгаз"

Василевич В. Л.



"17"  2010 р.

ДОДАТОК Б

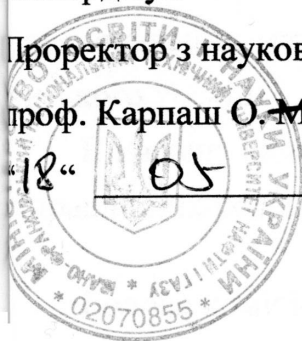
**АКТ ТА ПРОТОКОЛ СТЕНДОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ОПОРІВ ФІТИНГІВ ІЗ
ПОЛІЕТИЛЕНУ РІЗНОГО ДІАМЕТРУ ТА КОНСТРУКЦІЇ**

Затверджую

Проректор з наукової роботи ІФНТУНГ

проф. Карпаш О. М.

“18” 05 2010 р.



Головний інженер

ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Василевич В. Л.

“17” травня 2010 р.



АКТ

стендових експериментальних досліджень коефіцієнтів місцевих опорів фітингів із поліетилену різного діаметру та конфігурації

Комісія у складі:

Голова комісії:

Василевич В. Л.

Головний інженер

ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Члени комісії:

Кішка С. О.

Начальник відділу зварювання і контролю

ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Микицей Р. В.

Провідний інженер відділу зварювання і контролю

ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Макар В. М.

Завідувач лабораторії промислових лічильників газу

ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Коляджин І. М.

Начальник відділу метрологічного забезпечення зразковими засобами вимірювання

ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Зарубіна Ю. І.

Дисертант,
асистент кафедри ТЗНГ
ІФНТУНГ

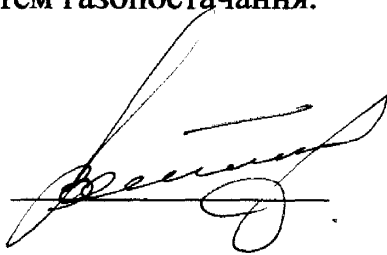
вклала цей акт у тому, що з 28.05.2008 по 03.07.2008 були проведені стендові експериментальні дослідження динаміки руху газового потоку фітингами із поліетилену.

Дослідження проводились згідно із “Методикою стендових експериментальних досліджень коефіцієнтів місцевих опорів фітингів із поліетилену різного діаметру та конфігурації” в лабораторії перевірки промислових лічильників газу на природному газі ВАТ “Івано-Франківськгаз”.

Проведені дослідження дозволяють зробити висновки про необхідність удосконалення методик гідравлічних розрахунків газових мереж середнього та низького тисків.

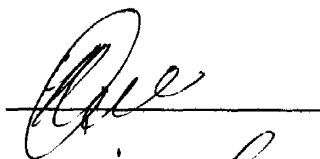
Виявлені закономірності рекомендовані для застосування при проектних гідравлічних розрахунках систем газопостачання.

Голова комісії:

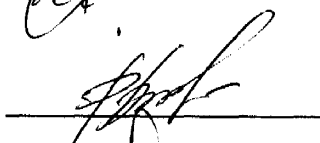


Василевич В. Л.

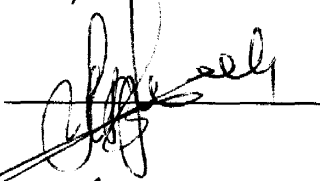
Члени комісії:



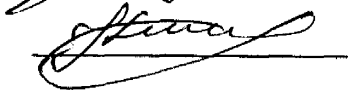
Кішка С. О.



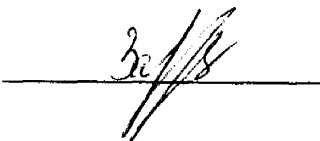
Микицей Р. В.



Макар В. М.



Коляджин І. М.



Зарубіна Ю. І.

ПРОТОКОЛ

стендових експериментальних досліджень коефіцієнтів місцевих опорів фітингів із поліетилену різного діаметру та конфігурації

03 липня 2008 р.

м. Івано-Франківськ

Комісія у складі

Голова комісії:

Василевич В. Л.

Головний інженер
ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Члени комісії:

Кішка С. О.

Начальник відділу зварювання і контролю
ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Микицей Р. В.

Провідний інженер відділу зварювання і контролю
ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Макар В. М.

Завідувач лабораторії промислових лічильників газу
ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Коляджин І. М.

Начальник відділу метрологічного забезпечення зразковими засобами вимірювання
ВАТ “Івано-Франківськгаз”

Зарубіна Ю. І.

Дисертант,
асистент кафедри ТЗНГ
ІФНТУНГ

Період з 28.05.2008 по 03.07.2008 провела стендові експериментальні дослідження динаміки руху газу фітингів із поліетилену різного діаметру та конфігурації згідно з “Методикою стендових експериментальних досліджень коефіцієнтів місцевих опорів фітингів із поліетилену різного діаметру та конфігурації”.

Стендові дослідження проводились в лабораторії перевірки промислових лічильників газу на природному газі ВАТ “Івано-Франківськгаз”.

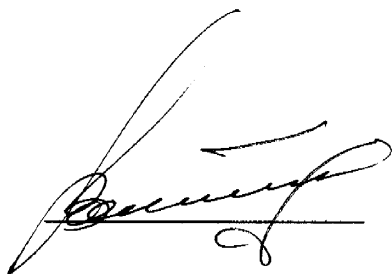
Експериментальні дослідження були проведені для:

- дослідження динаміки руху газу фітингів поліетиленових трубопроводів;
- встановлення значень місцевих опорів фітингів поліетиленових трубопроводів різного діаметру.

Висновки комісії:

- рекомендувати використовувати встановлені значення для проекту гідравлічних розрахунків систем газопостачання із неметалевих труб.

Голова комісії:

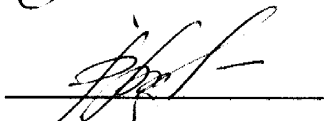


Василевич В. Л.

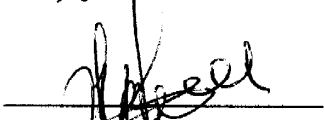
Члени комісії:



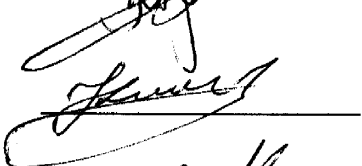
Кішка С. О.



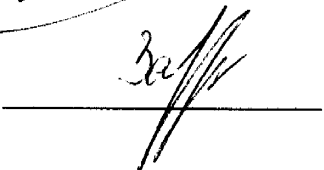
Микицей Р. В.



Макар В. М.



Коляджин І. М.



Зарубіна Ю. І.

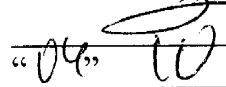
ДОДАТОК В

**КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГАЗОВИХ
МЕРЕЖ ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ І СТАЛЕВИХ ТРУБ**

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
ІНСТИТУТ “УКРГАЗПРОЕКТ”

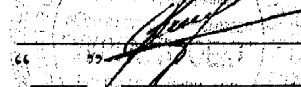
ПОГОДЖЕНО

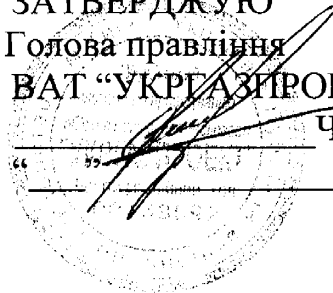
Проректор з наукової роботи
ІФНТУНГ, д.т.н., проф.

 Карпаш О.М.
“04” 10 2010 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління
ВАТ “УКРГАЗПРОЕКТ”

 Чабанович Л.Б.
“ ” 2010 р.



**КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА
РОЗРАХУНКУ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ
ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ і СТАЛЕВИХ ТРУБ**

ДОДАТОК Д
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА РОЗРАХУНОК
ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ

Затверджую

Проректор з наукової роботи

ІФНТУНГ

проф. Карпаш О.М.

“19” 04 2010

Директор

ТЗОВ “Прикарпатська

полімерна компанія”



2010

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Дорошенко Юлії Іванівни

“УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ СЕРЕДНЬОГО ТА НИЗЬКОГО ТИСКУ”

Ми, які підписалися нижче, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Дорошенко Юлії Іванівни “Удосконалення методів проектування газових мереж середнього та низького тиску” у вигляді пропозицій по удосконаленню конструкції фітингів передані для використання ТЗОВ “Прикарпатська полімерна компанія” в м. Івано-Франківськ. Розробки дають змогу зменшити втрати тиску на фітингу, що дає змогу заощадити енергоресурси при експлуатації існуючих систем газопостачання населених пунктів та при проектуванні нових. Очікуваний економічний ефект від впровадження розробок (розрахунок додається), становить 20 тис. грн.

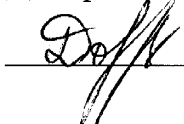
Науковий керівник

к.т.н., доцент кафедри ТЗНГ

ІФНТУНГ

 Михалків В.Б.

Дисертант

 Дорошенко Ю.І.

Директор ТЗОВ

“Прикарпатська полімерна
компанія”

Богович З.М.

“19” 04 2010

**РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ
УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ФІТИНГІВ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ
ТРУБОПРОВОДІВ**

діаметр, тощ.ст	ціна, грн.	1 варіант (без м.о.)		2 варіант (із м.о.)		3 варіант (удоск. м.о.)	
		довжина, км	Вартість, тис.грн.	довжина, км	Вартість, тис.грн.	довжина, км	Вартість, тис.грн.
40x3.5	10.96	2.486	27.25	1.591	17.44	1.591	17.44
50x2.9	12.18	1.297	15.80	2.192	26.70	2.315	28.20
63x3.6	19.5	0.3	5.85	0.357	6.96	0.234	4.56
75x4.3	26.68	0.923	24.63	0.866	23.10	0.866	23.10
90x5.2	37.5	0.784	29.40	0.648	24.30	0.784	29.40
110x6.3	61.93	0.474	29.35	0.61	37.78	0.474	29.35
125x7.1	72.15	0.091	6.57	0.091	6.57	0.137	9.88
140x8	91.58	0.801	73.36	0.704	64.47	0.801	73.36
160x9.1	121.35	0.387	46.96	0.484	58.73	0.341	41.38
180x10.3	151.8	0.622	94.42	0.622	94.42	0.622	94.42
200x11.4	186.45	0.065	12.12	0.065	12.12	0.065	12.12
225x12.8	231.13	0.354	81.82	0.179	41.37	0.354	81.82
250x14.2	291.5	0.388	113.10	0.563	164.11	0.388	113.10
280x15.9	385.75	0.489	188.63	0.489	188.63	0.489	188.63
		9.461	749.25	9.461	766.71	9.461	746.77

Кінц. тиск по основним напрямкам, Па

1-й	2433	2215	2352
2-й	2350	2094	2251
3-й	2635	2653	2661


Різниця 1-2, тис.грн	17.46	дешевше 1-й
Різниця 2-3, тис.грн	19.94	дешевше 3-й
Різниця 1-3, тис.грн	2.48	дешевше 3-й

Науковий керівник

к.т.н., доцент кафедри ТЗНГ

 /Михалків В. Б./

Дисертант

 /Дорошенко Ю. І./