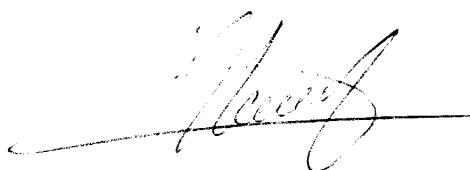


Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу

На правах рукопису

**КСЕНИЧ АНДРІЙ ІВАНОВИЧ**

УДК 622.691.4



**ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ГІДРАВЛІЧНОЇ  
ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

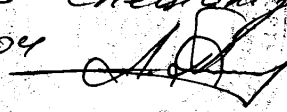
**ДИСЕРТАЦІЯ**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук, професор

*Всі примірники дисертації ідентичні  
за змістом.  
Вчений секретар спеціалізованої вченої  
ради Д 20.052.04  Пилипів А.В.  
17.02.2012р.*

Івано-Франківськ - 2012



d430

## ЗМІСТ

с.

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПИТАНЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ.....	9
1.1 Загальні тенденції та перспективи розвитку газових мереж населених пунктів в Україні.....	9
1.2 Аналіз теоретичних основ гідравлічних розрахунків газових мереж населених пунктів.....	15
1.3 Аналіз формул для визначення коефіцієнта гідравлічного опору сталевих і поліетиленових газопроводів.....	20
1.4 Аналіз методів проектних та експлуатаційних розрахунків газових мереж населених пунктів.....	28
1.5 Постановка задач досліджень.....	31
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ В СТАЛЕВИХ І ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ.....	33
2.1 Порівняння гідравлічної енерговитратності сталевих і поліетиленових труб у рамках існуючих підходів до їх гідравлічного розрахунку.....	34
2.2 Дослідження впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж населених пунктів у рамках існуючих підходів до їх гідравлічного розрахунку.....	45
2.3 Удосконалення методу урахування впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску.....	55
2.4 Висновки по розділу 2.....	64
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ ГАЗУ В ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОПРОВОДАХ.....	66
3.1 Опис експериментальної установки для дослідження газодинаміки поліетиленових газопроводів.....	67
3.2 Методика математичної обробки результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів.....	76

3.3 Методика розробки математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького тиску.....	81
3.4 Аналіз результатів математичного моделювання гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску.....	84
3.5 Висновки по розділу 3.....	93
<b>РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ.....</b>	<b>95</b>
4.1 Уточнена методика гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням результатів експериментальних досліджень їх гідравлічної енерговитратності.....	96
4.2 Розробка методу коригування діаметрів поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності.....	107
4.3 Розробка методу коригування діаметрів поліетиленових газових мереж середнього тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності .....	117
4.4 Розробка рекомендацій щодо реконструкції підземних сталевих трубопроводів із використанням поліетиленових труб.....	122
4.5 Розробка номограми для розрахунку поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності.....	140
4.6 Розробка способу виявлення несанкціонованих урізувань в газовій мережі населених пунктів з метою зменшення втрат газу.....	144
4.7 Висновки по розділу 4.....	147
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>149</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>151</b>
<b>ДОДАТОК А Текст програми уточненого розрахунку газових мереж низького тиску з урахуванням фактичної енерговитратності поліетиленових труб, впливу профілю траси і умов навколишнього середовища.....</b>	<b>163</b>
<b>ДОДАТОК Б Матеріали щодо впровадження розробок з питань прогнозування пропускної здатності та енерговитратності поліетиленових газових мереж населених пунктів.....</b>	<b>178</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Окрім унікальної системи магістральних газопроводів на теренах України функціонує на порядок більша за протяжністю система газових мереж населених пунктів. Вона служить для постачання природним газом побутових, комунальних та промислових споживачів. Ця система має складну геометричну конфігурацію, проходить в різноманітних топографічних умовах, характеризується різними величинами робочого тиску, передбачає використання труб із різного матеріалу. В останнє десятиріччя для газифікації населених пунктів України окрім традиційних сталевих труб почали широко застосовувати поліетиленові газопровідні труби. Проектування та експлуатація систем газопостачання із поліетиленових труб має ряд особливостей, які на сьогодні ще до кінця не вивчені. Основні відмінності сталевих і поліетиленових газових мереж полягають в особливостях газодинамічних процесів, що супроводжують рух газу. Відмінність газодинамічних процесів впливає на гідравлічну енерговитратність, а отже і пропускну здатність системи газопостачання. Наявні на сьогодні методи прогнозування технологічних та енергетичних параметрів експлуатації поліетиленових газових мереж базуються на використанні газодинамічних математичних моделей, одержаних дослідним шляхом у випадку руху рідини і газу в сталевих трубах. Автоматичне перенесення закономірностей руху газу в сталевих трубах на поліетиленові труби призводить до суттєвих похибок і не дає можливості адекватно прогнозувати режим їх експлуатації.

Другим чинником, який суттєво впливає на енерговитратність і пропускну здатність систем розподілу газу, є додаткові втрати енергії на подолання газом різниці геодезичних позначок траси. Існуючі на сьогодні методи не передбачають урахування даного чинника при розрахунках зовнішніх газових мереж, що призводить до неточного визначення проектних та експлуатаційних параметрів експлуатації газових мереж.

Ось чому сьогодні одним із важливих завдань у сфері розподілу газу є оцінювання фактичної енерговитратності та пропускну здатності газових мереж

Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу

На правах рукопису

**КСЕНИЧ АНДРІЙ ІВАНОВИЧ**

УДК 622.691.4

**ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ГІДРАВЛІЧНОЇ  
ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**ДИСЕРТАЦІЯ**

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник  
доктор технічних наук,  
професор Середюк М.Д.

Івано-Франківськ, 2012

населених пунктів з урахуванням закономірностей газодинамічних процесів руху газу в поліетиленових газопроводах та додаткового впливу особливостей профілю траси.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до положень «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України №145-р від 15.03.2006 р., «Програми енергозбереження на підприємствах «Нафтогаз України» на 2008-2012 роки» та держбюджетної НДР «Вдосконалення технологічних процесів транспортування, зберігання та розподілу нафти, нафтопродуктів і газу».

**Мета і задачі дослідження.** Розробка методів прогнозування пропускної здатності та гідравлічної енерговитратності поліетиленових газових мереж населених пунктів.

Поставлена мета реалізується через вирішення таких задач:

- встановлення кількісних показників зменшення гідравлічної енерговитратності транспортування газу у поліетиленових газових мережах в рамках існуючих газодинамічних підходів;
- виявлення ступеня впливу профілю траси на енерговитратність газових мереж низького тиску;
- встановлення закономірностей газодинамічних процесів, що супроводжують рух газу в поліетиленових газових мережах низького та середнього тиску;
- розробка математичних моделей коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу для різних режимів руху газу;
- реалізація одержаних моделей в методах уточненого гідравлічного розрахунку газових мереж із поліетиленових труб з урахуванням їх гідравлічної енерговитратності, впливу профілю траси та умов навколишнього середовища.

**Об'єктом досліджень** є газові мережі систем газопостачання населених пунктів України.

**Предметом досліджень** є газодинамічні процеси, що супроводжують рух газу в поліетиленових та сталевих газових мережах.

**Методи дослідження.** Обробка результатів експериментальних досліджень виконана з використанням методів статистичного аналізу. При розробці математичних моделей стаціонарного руху газу у кільцевих та розгалужених газових мережах використовувались методи диференціального та інтегрального числення, а також методи математичного моделювання, які реалізовані у комп'ютерних програмах.

**Положення, що захищаються.** Закономірності газодинамічних процесів руху газу в поліетиленових газопровідних трубах і взаємозв'язок профілю траси та енерговитратності газових мереж населених пунктів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі в результаті виконання експериментальних та теоретичних досліджень вперше:

- виявлені чинники і ступінь зменшення енерговитратності транспортування газу в газових мережах при використанні поліетиленових труб замість сталевих;
- встановлені закономірності взаємодії потоку газу і внутрішньої поверхні поліетиленового газопроводу, що спричиняють особливості законів внутрішнього тертя;
- виявлені границі дії різних законів тертя, що відповідають ламінарному, перехідному і турбулентному режимам руху газу в поліетиленових газопроводах;
- встановлені закономірності впливу профілю на енерговитратність та пропускну здатність газових мереж низького тиску.

**Практична цінність отриманих результатів:**

- розроблені методика та програмне забезпечення для порівняння гідравлічної енерговитратності сталевих і поліетиленових газових мереж високого, середнього і низького тиску;

- одержані аналітичні вирази для коефіцієнта гідравлічного опору залежно від режиму руху газу в поліетиленових газових мережах низького та середнього тиску;

- запропонована уточнена методика визначення пропускної здатності поліетиленових газових мереж з урахуванням результатів експериментальних досліджень їх енерговитратності;

- розроблені рекомендації щодо реконструкції підземних сталевих трубопроводів низького тиску шляхом протягування в них поліетиленових труб; запропоновані значення діаметрів ділянок і величина робочого тиску, які забезпечують повне збереження пропускної здатності газових мереж;

- створені номограми для проектних та експлуатаційних розрахунків поліетиленових газових мереж низького і середнього тиску;

- розроблений спосіб виявлення несанкціонованого урізування в газові мережі населених пунктів, що зменшує втрати газу та енерговитратність газопостачання.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. В опублікованих роботах автором особисто:

- запропонована модифікація формули Колбрука з метою застосування її для оцінювання гідравлічної енерговитратності газових мереж населених пунктів;

- досліджений вплив матеріалу труб на гідравлічний опір газової мережі, одержані залежності для оцінювання енерговитратності поліетиленових труб;

- доведена необхідність урахування профілю траси на пропускну здатність та енерговитратність зовнішніх газових мереж низького тиску;

- розроблений метод оцінювання впливу особливостей профілю траси на газодинамічні процеси руху газу в газових мережах низького тиску;

- розроблена методика проведення експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газових мереж;



- запропонована методика математичної обробки результатів експериментальних досліджень енерговитратності поліетиленових газових мереж, одержані математичні моделі для коефіцієнта гідравлічного опору;

- запропонований спосіб визначення місця несанкціонованого урізування у газові мережі населених пунктів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на:

- Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії» (м. Івано-Франківськ, 2008);

- Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» ( м. Івано-Франківськ, 2009).

- V Міжнародній навчально-науково-практичній конференції «Трубопровідний транспорт-2009» ( м. Уфа, 2009).

- VI Міжнародній навчально-науково-практичній конференції «Трубопровідний транспорт-2010» ( м. Уфа, 2010).

- Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика-2011» ( м. Івано-Франківськ, 2011).

- VII Міжнародній науково-технічній конференції «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (м. Новополюцьк, 2011).

У повному об'ємі результати досліджень доповідались на засіданні кафедри транспорту і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ та науковому семінарі факультету нафтогазопроводів зазначеного університету.

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 10 друкованих праць, із них 5 у фахових виданнях та одержано 1 патент.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація викладена на 185 сторінках, складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, 53 рисунків, 25 таблиць, списку використаних джерел, який містить 121 найменувань, та 2 додатків.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПИТАНЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

### 1.1 Загальні тенденції та перспективи розвитку газових мереж населених пунктів в Україні

Інтенсивний розвиток газової індустрії в Україні, як нової важливої галузі, розпочався в повоєнні роки після прийняття Верховною Радою СРСР у березні 1946 року Закону "Про відбудову і розвиток народного господарства". Було створено інфраструктуру газової промисловості, прокладено нові газопроводи, здійснено геологорозвідувальні роботи; започатковано діяльність низки проектно-конструкторських та наукових закладів з питань розвитку газової галузі, серед яких відомі далеко за межами України "Київгазпроект" (сьогодні - ВАТ "УкрНДІінжпроект", Інститут газу НАН України). Природний газ став широко використовуватись в промисловості і комунальному господарстві. Зокрема, після введення в дію газопроводу Дашава – Київ у 1948 році природний газ отримали споживачі Києва та Тернополя.

З газифікацією областей та більшості міст України в 50-60-і роки минулого століття було створено комбінати комунальних підприємств, які після організації в 1975 році Республіканського об'єднання з газопостачання та газифікації "Укргаз" стали спеціалізованими об'єднаннями газового господарства.

Республіканське об'єднання "Укргаз", до складу якого входило 25 обласних та 20 самостійних міських газових господарств, почало проводити єдину технічну та економічну політику, визначати основні напрямки та перспективи розвитку господарств, впроваджувати у їх діяльність досягнення науково-технічного прогресу, розширювати виробництво газових приладів та запасних деталей до них, розвивати законодавчу та нормативну базу. На початок 1975 року було по-

будовано близько 23 тис. км міських та селищних газорозподільних мереж, газифіковано природним і скрапленим газом 8,1 млн. квартир.

У той же час рівень газифікації в сільській місцевості складав лише 4 відсотки. Тому за ініціативою Республіканського об'єднання "Укргаз" Радою Міністрів УРСР у квітні 1983 року прийнято постанову "Про заходи з прискорення газифікації на селі".

На час здобуття Україною незалежності у 1991 році було збудовано 99,6 тис. км газорозподільних мереж, газифіковано понад 15 млн. квартир. За останнє десятиріччя в рамках загальної соціально-економічної реформи в Україні відбуваються широкомасштабні зміни і в газовій галузі. Природний газ став товарною продукцією, що закріплено Законом України "Про нафту і газ" (№ 2665-III від 12 червня 2001 р.). Найбільш актуальними завданнями у цій сфері є:

- впровадження заходів з енергозбереження та зменшення енергоємності виробництва;
- забезпечення темпів розвитку капітального будівництва та реконструкції газових мереж за рахунок використання передових технологічних процесів, матеріалів і обладнання;
- повсюдне забезпечення встановлення засобів обліку газу;
- забезпечення своєчасних та повних розрахунків за спожитий газ.

Основними завданнями ДК "Газ України" є надійне постачання природного газу споживачам, забезпечення стовідсоткових розрахунків за спожитий енергоносій та сприяння в експлуатації й розвитку систем газопостачання [1].

На сьогоднішній день Україна є значним споживачем природного газу і його головним транзитером до європейських ринків. Її газотранспортна система є другою за розмірами в Європі після Росії й однією з найбільших у світі. Згідно з даними офіційного інтернет ресурсу НАК «Нафтогаз України» довжина магістральних газопроводів – 38,2 тис. км різного призначення та продуктивності, 73 компресорні станції (КС), понад 1600 газорозподільних станцій (ГРС), 13 під-

земних сховищ газу (загальною ємністю 32 млрд. куб. м) та об'єкти інфраструктури, які забезпечують функціонування системи.

На рисунку 1.1 наведено структуру споживання енергоресурсів в Україні

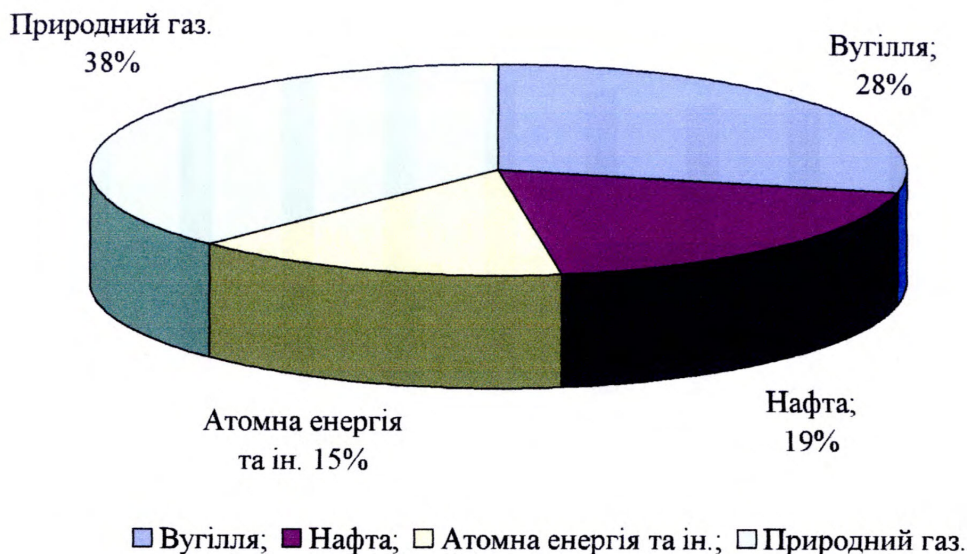


Рисунок 1.1 - Структура споживання енергоресурсів в Україні

Як видно з рисунку 1.1, 38 % споживання енергоресурсів в Україні припадає на природний газ. У 1991 році споживання газу становило 118,1 млрд. м<sup>3</sup> і Україна посідала третє місце в світі за рівнем споживання газу, поступаючись тільки США і Росії. За останні роки намітилась тенденція зменшення обсягів споживання газу. Так, використання природного газу в Україні у 2010 році склало 57,6 млрд. м<sup>3</sup>. На рисунку 1.2 наведено тенденцію зміни обсягу споживання природного газу в Україні.

Забезпечення споживачів природним газом здійснюється газовими мережами (з надлишковим тиском до 1,2 МПа), довжина яких в Україні становить 349,2 тисяч км. Необхідний режим газопостачання в цих мережах забезпечують 61 тисяча газорозподільних пунктів. Сумарна протяжність газових мереж низького тиску становить 254 тисяч км, з яких 88 тисяч км прокладено в містах, а близько 166 тисяч км прокладено в сільській місцевості.



Рисунок 1.2 - Тенденція зміни обсягу споживання природного газу в Україні

З метою визначення працездатності розподільних газопроводів та споруд запроваджений моніторинг їх фактичного технічного стану. Роботи з обстеження розподільних газопроводів проводяться у відповідності з довгостроковою програмою обстеження і моніторингу технічного стану газорозподільних мереж на 2008-2012 роки, якою передбачено обстеження 200 тисяч км (60 % протяжності) газових мереж. Успішна реалізація програми передбачає придбання сучасного обладнання та приладів контролю і діагностики технічного стану газорозподільних мереж на загальну суму 60 млн. грн., а в подальшому – складання планів капітального ремонту газопроводів та об'єктів газового господарства. За результатами проведеного обстеження вже зараз в Україні вичерпаний термін амортизації 12 тисяч км газорозподільних мереж (близько 7 % від загальної протяжності), близько 500 км газопроводі вимагають капітального ремонту, а 55 км – заміни. Найбільшої гостроти ця проблема набула у Львівській, Івано-Франківській, Чернівецькій та Одеській областях, де газорозподільні мережі збудовані та експлуатуються понад 50 років. На виконання доручення НАК

“Нафтогаз України” фахівцями ДК “Газ України” розроблений проект перспективного плану капітального будівництва та ремонту розподільних газових мереж з використанням поліетиленових труб на період 2004-2012 рр. Передбачено будівництво 544 км нових розподільних мереж та капітальний ремонт 352 км газопроводів із заміною сталевих труб на поліетиленові. Реконструкція систем газопостачання повинна проводитися з використанням енергоефективних технологій, що дозволятимуть зменшити обсяг витрат та втрат природного газу. До однієї з таких технологій відноситься використання поліетиленових газопроводів при будівництві, реконструкції або заміні газових мереж населених пунктів, про що свідчить Постанова КМУ № 726 від 10 липня 1997 р. «Про виробництво і використання поліетиленових труб у будівництві та реконструкції газових мереж у сільській місцевості». Згідно з даною постановою проведення газифікації сільських населених пунктів та реконструкція існуючих газових мереж повинна виконуватися виключно з використанням поліетиленових газопроводів.

Протягом останніх років поліетилен набув широкого використання при будівництві інженерних мереж у всіх європейських країнах.

В Україні у 1980-1983 роках будівництво газопроводів тиском до 0,6 МПа здійснювалось з поліетиленових труб загального призначення, що не давало цілковитої безпеки їх функціонування. З використанням труб із поліетилену марки ПЕ 63 було побудовано перші газопроводи в Миколаївській області. З часом розроблялись якісніші поліетиленові та досконаліше обладнання для їх зварювання та експлуатації. Розпочинаючи з 1985 року і понині, в різних регіонах України побудовано понад 13 тисяч кілометрів газопроводів із поліетиленових труб. При цьому станом на 01.06.2004 р. за даними Асоціації ділового співробітництва підприємств газового ринку встановлено лише один випадок руйнації даного типу газопроводів – розрив неякісно звареного стику (дзеркала). Тільки в Донецькій області на сьогоднішній день в експлуатації знаходиться більше 235 км газопроводів із поліетиленових труб тиском до 0,6 МПа, частина яких експлуатується близько 18 років. Виробництво нових типів поліетилену ПЕ 80 та ПЕ 100 з коефіцієнтом запасу міцності 2,0 дозволило їх застосовувати в єв-

ропейських країнах для будівництва розподільних газопроводів високим тиском до 1 МПа. В Україні є 16 заводів, що виробляють поліетиленові труби для газопроводів, два з яких мають випробувальні лабораторії та в змозі забезпечити відповідну якість труб.

Ураховуючи законодавчі акти щодо використання поліетиленових газопроводів, їхню якісну характеристику, темпи зростання загальної протяжності газових мереж з поліетиленових труб є стрімкими. Так, наприклад, за 2001-2004 роки загальна протяжність газових мереж населених пунктів зросла на 42,9 тисячі км, з яких 22,3 тисячі км є поліетиленові газопроводи. Тобто, в структурі приросту протяжності газопроводів більше 50 % припадає на поліетиленові газопроводи. За останні десять років мала місце тенденція подвоєння протяжності поліетиленових газопроводів в Україні протягом року. Станом на 2010 р. загальна протяжність поліетиленових газопроводів становить 76,9 тисячі км.

Важливе значення для широкого впровадження поліетиленових труб в системах газопостачання України має створення сучасної нормативної бази. З 01.08.2010 року введені у дію Державні будівельні норми України «Газопроводи з поліетиленових труб» (ДБН В.2.5-41:2009). Цей документ регламентує правила проектування та будівництва газопроводів із поліетиленових труб з максимальним робочим тиском не більше 1,0 МПа у розвиток базових ДБН В.2.5-20 «Газопостачання» та згідно з НПАОП 0.00-1.20 «Правила безпеки систем газопостачання України».

Ці Норми розроблені згідно з вимогами стандартів Європейського Союзу EN 1555-1:2002, EN 1555-2:2002, EN 1555-5:2002, EN-12007-2:2000, гармонізованих з ними національних стандартів України, з урахуванням сучасного рівня національного виробництва труб, з'єднувальних деталей з поліетилену для газопроводів та досвіду експериментального будівництва та експлуатації газопроводів з поліетиленових труб з коефіцієнтом запасу міцності 2,0 у розподільних мережах газопостачання України.

Надійність системи газопостачання у значній мірі залежить від правильності проведених проектних та експлуатаційних розрахунків. У зв'язку з постій-

ним та стрімким зростанням обсягу використання поліетиленових газопроводів в системах газопостачання важливе практичне значення має розробка достовірних методів гідравлічних розрахунків поліетиленових газових мереж.

## **1.2 Аналіз теоретичних основ гідравлічних розрахунків газових мереж населених пунктів**

Рух газу газовими мережами населених пунктів супроводжується відносно невеликими втратами енергії, викликаними роботою сил тертя. Але враховуючи те, що загальна протяжність газових мереж населених пунктів є великою, сумарні затрати енергії на транспортування газу є значними. Тому актуальним питанням сьогодення є дослідження енерговитратності газопроводів, виготовлених з різних матеріалів, з метою розробки достовірних методів гідравлічних розрахунків та одержання енергоефективних режимів роботи газових мереж населених пунктів.

Слід зазначити, що теоретична база гідравлічного розрахунку газових мереж принципово не відрізняється від теоретичної бази розрахунку магістральних газопроводів. Гідравлічний розрахунок газових мереж базується на використанні відомих рівнянь газової динаміки, які пов'язують між собою геометричні характеристики трубопроводу, фізичні властивості газу, параметри режиму руху газу і втрати енергії при русі газу в трубопроводі.

Дослідження стаціонарних та нестаціонарних процесів, що супроводжують рух газу у простих та складних за структурою газопроводах, розпочалися у вісімдесяті роки минулого століття [2,3,4]. Питання керування режимами роботи магістральних газопроводів були предметом досліджень Яковлева Е.І., Максимова Ю.І., Кучина Б.Л., Алтуніна А.Е., Мишкіна Б.М., Гандельмана М.Х, та інших [5,6,7,8].

Значний внесок у вирішення проблеми оптимізації режимів роботи складних газотранспортних систем забезпечили роботи Бобровського С.А., Грудза В.Я., Житкової М.О., Ковалка М.П., Казака О.С., Капцова І.І., Лур'є М.В., Ми-



халківа В.Б., Тимківа Д.Ф., Щербакова С.Г., Яковлева Е.І. та їх учнів Деркача М.П., Ключа Б.О., Костіва В.В., Михалеви́ча О.Т., Лінчевського М.П., Рудника А.А., Соляника В.Г., Ізбаша В.І., Шимка Р.Я., та ін. [8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22].

Дослідженням енерговитратності розгалужених та кільканиткових газопроводів та пошуку шляхів економії енергоресурсів присвячені роботи Середюк М.Д. і Фика М.І. [23,24,25,26,27,28,29].

Газодинамічні процеси в газопроводах за характером протікання можна поділити на стаціонарні і нестаціонарні. Оскільки в трубопроводах завжди присутні пульсації параметрів в часі внаслідок турбулентності руху газу, то з фізичної точки зору стаціонарні процеси в газопроводах неможливі. Дані процеси можна розглядати як квазістаціонарні, тобто використовувати з певним ступенем вірогідності моделі стаціонарного руху газу.

Математична модель нестаціонарного неізотермічного руху газу в газопроводі з урахуванням профілю траси може бути побудована на основі диференціальних рівнянь руху газу, нерозривності та енергії, які у векторній формі мають вигляд [8,30]

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \bar{W} = 0, \quad (1.1)$$

$$C_p \left( \frac{d\bar{T}}{dt} + \bar{W} \text{grad } \bar{T} \right) = -\frac{1}{\rho} \text{div } \bar{q} + \frac{1}{\rho} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} (\Phi + \bar{q}^*),$$

де  $\rho$  – 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 в навколишнє середовище;

$\Phi$  – дисипативна функція Релея;

$\bar{q}^*$  – питомий тепловий потік через стінки.

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 [3,19,21,30,32,33,34,35,36,37,38,39].

Першочерговою проблемою є розвиток напівемпіричних теорій турбулентності для випадку нестационарних течій. При квазістационарному методі розрахунку можливе застосування напівемпіричних теорій Прандтля або Кармана, коли у кожен момент часу реальні характеристики потоку замінюються стационарними. Але дані методи квазістационарного розрахунку неправомірно використовувати, оскільки вони дають суттєву неточність, що підтверджена проведеними останнім часом дослідженнями.

Недоліками наведених теорій є припущення про сталість фізичних властивостей середовища та його нестисливість. Крім того, для нестационарних процесів перекачування газу виникає проблема допустимості осереднення параметрів турбулентних течій. Тому для розрахунків, пов'язаних із транспортуванням газу по магістральних газопроводах, 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 по перерізу трубопроводу у рівняння руху можна ввести коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda$ . З урахуванням цього систему рівнянь (1.1) можна подати у вигляді [8,30]

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = -W \frac{\partial M}{\partial x} - F \frac{\partial P}{\partial x} - W \lambda \frac{M}{2D} - \rho g F \frac{\partial z}{\partial x},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{1}{F} \frac{\partial M}{\partial x}, \quad (1.2)$$

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

де  $M$  – масова витрата газу;

$W$  – середня для перерізу лінійна швидкість газу;

$F$  – площа поперечного перерізу труби;

$P$  – абсолютний тиск;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$g$  – прискорення сили тяжіння;

$D$  – внутрішній діаметр труби;

$x$  – лінійна координата;

$z$  – геодезична позначка;

$\tau$  – час;

$C_p$  – ізобарна теплоємність газу;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газу;

$T_2$  – температура газу в певному перерізі.

Розв'язування рівнянь нестационарного руху газу в газопроводах пов'язано з низкою проблем у зв'язку з неможливістю врахування всіх параметрів газодинамічних процесів. Тому в світовій практиці більш широко використовується стаціонарна модель руху газу в газопроводі [30,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52].

Стаціонарний рух газу в газопроводі, в тому числі в газових мережах, можна описати такою системою рівнянь [53,54,55]:

рівняння руху газу

$$\frac{dP}{\rho} + gdh + \frac{d(w^2)}{2} + \frac{dP_\tau}{\rho} = 0; \quad (1.3)$$

рівняння нерозривності потоку газу

$$M = \rho w F ; \quad (1.4)$$

рівняння стану газу

$$\frac{P}{\rho} = zRT ; \quad (1.5)$$

рівняння Дарсі-Вейсбаха для елементарних втрат тиску від тертя

$$\frac{dP_{\tau}}{\rho} = \lambda \frac{1}{D} \frac{w^2}{2} . \quad (1.6)$$

Вихідні рівняння зводяться до одного рівняння

$$-zRT \frac{d(w^2)}{w^2} + d(w^2) + 2gdh + \lambda w^2 \frac{dx}{D} = 0 , \quad (1.7)$$

де  $h$  - геодезична позначка довільної точки траси;

$w$  - середня для перерізу лінійна швидкість газу;

$z$  - коефіцієнт стисливості газу;

$R$  - газова стала;

$T$  - термодинамічна температура газу;

$\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного опору.

У результаті спільного розв'язування рівняння руху, рівняння нерозривності потоку і рівняння стану реального газу за припущень, що відповідають умовам газових мереж низького тиску, одержана формула для визначення втрат тиску від тертя [ 49,53,54,55,56,57,58,59]

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{D} \frac{w^2}{2} \rho , \quad (1.8)$$

де  $l$  - довжина газопроводу.

Формула (1.8) засвідчує, що газові мережі низького тиску з точки зору гідродинамічних процесів аналогічні трубопроводам для перекачування нестисливої в'язкої рідини – нафти або нафтопродуктів.

Із формули (1.8) випливає, що енерговитратність газових мереж низького тиску безпосередньо залежить від значення коефіцієнта гідравлічного опору, який у свою чергу є складною функцією числа Рейнольдса та стану внутрішньої поверхні труб.

### **1.3 Аналіз формул для визначення коефіцієнта гідравлічного опору сталевих і поліетиленових газопроводів**

Зазвичай коефіцієнти гідравлічного опору трубопроводів розраховуються за формулами емпіричного походження. Більша їх частина отримана за результатами дослідів при перекачуванні води з невеликими швидкостями руху в трубопроводах малого діаметра. Використання даних залежностей для іншого робочого середовища, ніж вода, не дає впевненості в адекватності отриманих результатів. Тому, з точки зору надійності газонафтопостачання, здебільшого приймають завищені значення коефіцієнтів гідравлічного опору, що призводить до збільшення матеріальних затрат у трубопровідну систему.

На початку ХХ століття були здійснені перші кроки до створення універсальних формул для визначення коефіцієнта гідравлічного опору, які давали би адекватні результати для різних робочих середовищ, геометричних характеристик трубопроводу, швидкості потоку та матеріалу трубопроводу. Формули Блиля, Ланга, Флямана, Максименка, Базена, Веймаунта, Куттера, Форхгеймера були отримані виключно емпіричним шляхом без спроб відобразити процес гідравлічного опору, мали невірну розмірність, що сильно звужувало межі їхнього використання та піддавало сумніву достовірність отриманих результатів [58,59,60,61].

Блазіус в 1913 році, використовуючи метод теорії подібності, увів поняття гладких та шорстких труб як два граничних випадки. Шляхом обробки результатів експериментів Сафа і Шодера була встановлена залежність коефіцієнта гідравлічного опору для гідравлічно гладких труб від числа Рейнольдса [62]

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (1.9)$$

де  $Re$  - число Рейнольдса в трубопроводі.

Блазіусом було введено поняття відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу

$$\varepsilon = \frac{k}{d}, \quad (1.10)$$

де  $k$  - лінійний розмір виступів нерівностей внутрішньої поверхні.

Стентон і Пеннел підтвердили адекватність залежності Блазіуса для всіх рідин, а Ліз удосконалив її та запропонував розрахункову формулу [59]

$$\lambda = a + \frac{b}{Re^n} \quad (1.11)$$

де – коефіцієнти,  $a=0,0072$ ;  $b=0,6104$ ;  $n=0,35$ .

У подальші роки багато науковців вносили свої корективи в формулу Ліза шляхом зміни числових значень коефіцієнтів емпіричним шляхом. Але отримані моделі були зроблені виключно для рідин і в літературі не підтверджено їхню достовірність для газоподібного середовища на основі експериментальних досліджень. На основі дослідів Хопфа і Фрома Шифрінсоном була запропонована залежність [57,58,59]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k}{d} \right)^{0,25}. \quad (1.12)$$

Наведені вище емпіричні залежності адекватно описують коефіцієнт гідравлічного опору при перекачуванні рідини і не доведено їхню адекватність для газоподібного середовища.

Перші кроки теоретичного підходу до дослідження рівномірного турбулентного руху в трубах, які дали змогу отримати розрахункові залежності для двох окремих випадків руху робочого середовища (зона гідравлічно гладких та шор-

стких труб) належить Прандлю [63,64] і Карману [65,66]. Широкомасштабні дослідження з метою визначення коефіцієнта гідравлічного опору були проведені Нікурадзе [67,68]. Досліди були проведені на гідравлічно гладких та трубах з штучною шорсткістю. Для гідравлічно гладких труб Нікурадзе припустив існування елементарного пристінного прошарку рідини, що рухається в ламінарному режимі, і коефіцієнт гідравлічного опору є функцією виключно від числа Рейнольдса та не залежить від шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу. З урахуванням даних припущень для гідравлічно гладких труб була запропонована залежність

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8. \quad (1.13)$$

Для випадку гідравлічно шорстких труб величина пристінного прошарку рідини є меншою, ніж висота виступів нерівності внутрішньої поверхні, а отже, гідравлічний опір залежить вже виключно від шорсткості поверхні. Для даного випадку на основі праць Кармана Нікурадзе запропонував залежність

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log\left(\frac{d}{k_e}\right) + 1,74, \quad (1.14)$$

де  $k_e$  - абсолютна еквівалентна шорсткість поверхні труб.

На основі дослідних даних Нікурадзе уперше побудував графік залежності  $\lg(1000\lambda)$  від  $\lg(Re)$  для ряду значень відносної шорсткості труби  $\varepsilon$ .

Для перехідного режиму руху робочого середовища між зоною гідравлічно гладких та шорстких труб, де коефіцієнт гідравлічного опору залежить від числа Рейнольдса і шорсткості внутрішньої поверхні труб Колбруком і Уайтом у 1937 році запропонована універсальна залежність [58,59,69,70,71]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_e}{3,7d}\right). \quad (1.15)$$

Дана формула для коефіцієнта гідравлічного опору сьогодні найбільш широко використовується в світовій практиці, оскільки вона є універсальною для всіх зон турбулентного режиму руху рідини [57,58,59].

Слід відзначити, що перехідна зона між ламінарним і турбулентним режимом руху при числах Рейнольдса  $2100 < Re < 4000$  до сьогодні детально не досліджена, не запропоновано адекватної математичної залежності для моделювання коефіцієнта гідравлічного опору в даній зоні. Через це присутнє значне нестикування значень, отриманих за наведеними вище формулами на межі двох режимів руху.

Необхідно відмітити, що Нікурадзе досліджував труби з штучною шорсткістю внутрішньої поверхні, утвореної шляхом наклеювання частинок піску на внутрішню стінку трубопроводу. Проведені в останні роки дослід з природною шорсткістю показали, що в графіки Нікурадзе при турбулентному режимі руху газу необхідно вносити суттєві поправки, які призводять до зростання втрат тиску в трубопроводі. З урахуванням реальної шорсткості сталевих труб Шевельовим А.Ф. були запропоновані такі залежності для визначення коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі руху рідини чи газу [72]:

для гідравлічно гладких труб

$$\lambda = 1,18 \cdot 1,15 \frac{0,25}{Re^{0,226}}, \quad (1.16)$$

для зони змішаного тертя

$$\lambda = 1,18 \cdot 1,15 \frac{0,23}{d^{0,226}} \left( 1,9 \cdot 10^{-6} + \frac{\nu}{w} \right)^{0,226}, \quad (1.17)$$

для квадратичної зони

$$\lambda = 1,18 \cdot 1,15 \frac{0,0121}{d^{0,226}}, \quad (1.18)$$



де 1,18 та 1,15 – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив зварних стиків і погіршення якості прокладання трубопроводу по відношенню до експериментальних умов.

На основі вище наведених залежностей побудовано номограму, яка дозволяє визначати значення коефіцієнта гідравлічного опору залежно від числа Рейнольдса та відносної шорсткості сталевих трубопроводів. Недоліком даних досліджень є те, що вони були проведені на воді стосовно сталевих трубопроводів. Окрім того, експериментально не було обґрунтовано значення поправочних коефіцієнтів для урахування додаткових втрат тиску в місцевих опорах.

Свемі П.К. і Джеїн А.К. в 1976 році проводили дослідження формули Колбрука і Уайта і запропонували спрощену модель для розрахунків [73]

$$\lambda = 1,325 \left[ \log \left( \frac{k_e}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^{-2}. \quad (1.19)$$

Всі наведені вище дослідження були проведені з використанням сталевих труб, оскільки широке промислове використання поліетиленових труб почалося тільки з 80-х років минулого століття.

У 1989 році Вон Бернут Р.Д. і Вілсон Т. [74] вперше провели дослідження гідравлічного опору трьох ділянок полівінілхлоридного (PVC) газопроводу малого діаметра. Вони довели адекватність степеневі залежності для опису коефіцієнта гідравлічного опору для чисел Рейнольдса, менших за 100000. Ними була запропонована модифікована формула Колбрука і Уайта для коефіцієнта гідравлічного опору полівінілхлоридних труб

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,86 \ln \left( \frac{k_e}{3,76D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right). \quad (1.20)$$

Дана залежність адекватно описує коефіцієнт гідравлічного опору в полівінілхлоридному газопроводі при перекачуванні рідини з числами Рейнольдса, більшими за 4000.

Дослідження Свемі П.К. [75] в 1993 році дали змогу на основі експериментів Бернут і Вілсон отримати універсальну залежність коефіцієнта гідравлічного опору для всіх режимів руху в трубопроводі [75]

$$\lambda = \left\{ \left( \frac{64}{\text{Re}} \right)^8 + 9,5 \left[ \log \left( \frac{k_e}{3,7d} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{\text{Re}} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (1.21)$$

За останні роки в рамках наукових програм Євросоюзу та США проведені експериментальні дослідження закономірностей газодинамічних процесів в газопроводах. Зокрема на кафедрі механіки та аерокосмічної техніки Принстонського університету та на кафедрі фізики університету Євген штату Орегон в США проведені дослідження особливостей руху газу в сталевих газопроводах [77,78,79,80,81]. Одержані нові закономірності руху газу в сталевих газопроводах і доведено адекватність формул Колбрука і Уайта та Нікурадзе для ширшого діапазону чисел Рейнольдса. На основі проведених досліджень в 2004 р. МсКеон запропонував емпіричну модель коефіцієнта гідравлічного опору для гідравлічно гладких труб [78]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,930 \cdot \log(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,537 \quad (1.22)$$

Дана модель з похибкою до 2 % описує гідравлічну енерговитратність сталевого газопроводу для чисел Рейнольдса  $\text{Re} < 300000$ .

Грунтовні дослідження газодинаміки та гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів були проведені у 2001 р. у Російській Федерації Карасевичем А.М., Сухарєвим М.Г., Тверською І.В. та Самойловим Р.В. [82]. Досліди проводилися на таких двох об'єктах:

- поліетиленовому газопроводі DN 32 протяжністю 118,7 м з робочим середовищем повітря;
- поліетиленовому газопроводі DN 63 протяжністю 855 м з робочим середовищем повітря і метан.

Авторами роботи проведено профілеметрію внутрішньої поверхні газопроводу, за результатами якої абсолютна шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленових труб становила 0,00185 см.

Результати досліджень показали суттєву розбіжність експериментальних і теоретичних даних величини гідравлічного опору, що дало змогу зробити такі висновки:

а) механізм утворення турбулентності біля стінки поліетиленового трубопроводу суттєво відрізняється від механізму взаємодії газу і стінки сталевого газопроводу, чим пояснюється різниця експериментальних та теоретичних значень коефіцієнта гідравлічного опору;

б) формули Колбрука і Уайта та Альтшуля, одержані для сталевих трубопроводів, не можна використовувати для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів, оскільки вони дають значні похибки;

в) різниця експериментальних значень коефіцієнта гідравлічного опору при перекачуванні природного газу і повітря є незначною і знаходиться в межах похибки експерименту;

г) за результатами експериментів не вдалося знайти певне стале значення еквівалентної шорсткості поверхні поліетиленових труб, яке після підстановки у загальноприйняті формули адекватно описувало би гідравлічні втрати тиску від тертя. Величина еквівалентної шорсткості із зростанням турбулентності руху газу зменшується і при певному режимі стає від'ємною.

Авторами запропоновано за результатами експериментів модифікувати формулу Альтшуля, суттєво змінивши числові коефіцієнти

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{300}{Re} + \frac{k_e}{d} \right)^{0,3n} \quad (1.23)$$

де  $n$  - коефіцієнт математичної моделі.

Слід відмітити, що наведені вище дослідження російських учених не вирішують до кінця питання енерговитратності поліетиленових труб, оскільки мають такі недоліки:

- основні експерименти проводилися на трубопроводі DN 63 загальною протяжністю 855 м, який був спаяний з окремих ділянок. В роботі не зазначено, чи було враховано додаткові втрати тиску на місцевих опорах;
- тиск робочого середовища змінювався в межах від 1,5 до 3 кгс/см<sup>2</sup>. Отже, дослідженню підлягали газові мережі середнього тиску і не обґрунтовано адекватність використання запропонованих формул для газових мереж низького тиску;
- діапазон чисел Рейнольдса, за яких проводилися експериментальні дослідження, неповний, не охоплює фактичне завантаження газових мереж систем газопостачання;
- отримані математичні моделі не характеризуються високим ступенем вірогідності апроксимації;
- при проведенні експериментів на трубопроводі DN 32 для визначення витрати газу використовувалася мірна діафрагма діаметром 25,1 мм, що на 0,9 мм менше внутрішнього діаметра трубопроводу. У зв'язку з цим піддається сумніву достовірність отриманих значень витрати газу в газопроводі, оскільки перепад тиску на діафрагмі малий.

В 2006 р. ученими гірничогеологічного університету «Св. Івана Рильського» міста Софія (Болгарія) проведені дослідження коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу [83]. Експерименти проводилися на установці, основною частиною якої була поліетиленова труба DN 32 довжиною 4,5 м. За результатами експериментів отримані графічні залежності коефіцієнта гідравлічного опору від режиму руху робочого середовища та запропоновані відповідні математичні залежності. Слід відмітити такі недоліки зазначеної роботи: недостатня довжина модельного газопроводу, що спричинює незначні втрати тиску; застосування для вимірювання перепаду тиску недостатньо точних приладів; вузький діапазон чисел Рейнольдса (3000-7400). Сумнівні і ре-

зультати, адже запропоновані степеневі математичні моделі мають низьку ступінь вірогідності апроксимації ( $R^2 = 0,52$  та  $R^2 = 0,62$ ), а отримані експериментальні значення коефіцієнта гідравлічного опору в 5- 8 разів менші, ніж теоретично розраховані за загальноприйнятими формулами.

Роботи вітчизняних учених [84,85,86,87,88,89,90,91] присвячені оцінюванню впливу місцевих опорів на гідравлічну енерговитратність поліетиленових газових мереж. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження динаміки руху газу терморезисторними з'єднаннями поліетиленових трубопроводів та визначені коефіцієнти їх місцевих опорів. Визначено коефіцієнти еквівалентної довжини залежно від типу та кількості місцевих опорів на 1 км довжини газових мереж. Розроблені рекомендації з удосконалення конструкції терморезисторних з'єднань та досліджено ефективність їх практичного застосування.

#### **1.4 Аналіз методів проектних та експлуатаційних розрахунків газових мереж населених пунктів**

На сьогодні в Україні гідравлічні розрахунки газових мереж проводяться за методикою, рекомендованою ДБН В.2.5-20 [92]. Згідно з нею гідравлічний розрахунок газових мереж виконують за низки припущень: густину та кінематичну в'язкість газу приймають за нормальних умов; температуру газу в газовій мережі приймають рівною  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; не враховують реальні властивості газу, тобто коефіцієнт стисливості газу приймають рівним одиниці; для визначення коефіцієнта гідравлічного опору за турбулентного режиму незалежно від робочого тиску в трубопроводі використовують формулу Альтшуля. З урахуванням зазначених припущень практичні формули для визначення втрат тиску газу від тертя на ділянці газової мережі низького тиску мають такий вигляд:

за умови  $Re \leq 2000$  (ламінальний режим руху)

$$\Delta P = 1,132 \cdot 10^6 \frac{Q_{zod_i}}{D^4} v_n \rho_n l, \quad (1.24)$$

за умови  $2000 < Re \leq 4000$  (критичний або перехідний режим руху)

$$\Delta P = 0,516 \frac{Q_{zod}^{2,333} \rho_n l}{D^{5,333} v_n^{0,333}}, \quad (1.25)$$

за умови  $Re_i > 4000$  (турбулентний режим руху)

$$\Delta P = 69 \left( \frac{k_e}{D} + 1922 \frac{v_n D}{Q_{zod}} \right)^{0,25} \frac{\rho_n Q_{zod}^2 l}{D^5}, \quad (1.26)$$

де  $v_n$  - кінематична в'язкість газу за нормальних умов;

$\rho_n$  - густина газу за нормальних умов;

$Q_{zod}$  - розрахункова годинна витрата газу на ділянці.

Практична формула для гідравлічного розрахунку ділянки газової мережі середнього чи високого тиску згідно з рекомендаціями ДБН В.2.5-20 є такою:

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{l} = 1,4 \cdot 10^{-5} \left( \frac{k_e}{D} + 1922 \frac{v_n D}{Q_{zod}} \right)^{0,25} \frac{Q_{zod}^2}{D^5} \rho_n, \quad (1.27)$$

де  $P_1, P_2$  - абсолютний тиск газу на початку та в кінці ділянки.

Враховуючи низку припущень, що закладені в нормативні формули гідравлічного розрахунку газових мереж, можна стверджувати, що вони не є досконалими і дають суттєві неточності [93,94,95,96].

Для варіанту використання поліетиленових труб в нормативній методиці передбачено використання таких же формул, що і для сталевих газопроводів. Єдиною відмінністю є нормативне значення абсолютної еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні газопроводів  $k_e$ . Для сталевих газопроводів слід приймати  $k_e = 0,01$  см, а для поліетиленових труб –  $k_e = 0,002$  см [92]. В цей же

час, в Росії згідно з аналогічним нормативним документом СП 42-101-2003 для проведення гідравлічного розрахунку за тією ж методикою значення абсолютної шорсткості внутрішньої поверхні поліетиленових газопроводів рекомендують приймати 0,0007 см [97]. Ряд іноземних джерел рекомендують в методиках гідравлічного розрахунку приймати шорсткість поліетиленових труб рівною 0,00015 см [98,99,100,101].

Все зазначене вище свідчить про те, що питання про величину шорсткості внутрішньої поверхні поліетиленових труб і її вплив на енерговитратність перекачування газу науково не обґрунтовано і вимагає спеціальних досліджень. Результати зазначених досліджень наведені у подальших розділах роботи.

Формули (1.24)-(1.27), що рекомендуються чинними нормативними документами для гідравлічного розрахунку зовнішніх газових мереж населених пунктів, не враховують додаткових втрат енергії на подолання різниці геодезичних позначок точок траси. Аналіз робіт засвідчив, що даному питанню не приділено достатньої уваги. Тільки у роботах Яковлева Є.І. [102] пропонується методика урахування додаткових витрат енергії на подолання сил земного тяжіння для ділянки газопроводу низького тиску у разі зміни різниці позначок точок траси за лінійним законом. Запропонована така формула для тиску газу в будь-якій точці газопроводу  $x$  з урахуванням профілю траси

$$P = P_1 - \frac{A v^m \rho l}{2(3-m) F^{2-m} D^{1+m} Q_w} \left\{ (Q_T + Q_w)^{3-m} - (Q_T + q(l-x))^{3-m} \right\} + \rho g \frac{\Delta h}{l} x, \quad (1.28)$$

де  $P_1$  - тиск газу на початку ділянки газопроводу;

$A, m$  - коефіцієнти режиму руху газу;

$Q_T, Q_w$  - транзитна і шляхова витрата газу;

$\Delta h$  - різниця геодезичних позначок кінця і початку ділянки газопроводу.

Недоліками даної методики є обмеженість застосування (для однієї ділянки), використання сумнівної у випадку перекачування газу формули Блазіуса для коефіцієнта гідравлічного опору та спрощений лінійний закон зміни тиску газу із висотою.

Таким чином, наявні на сьогодні залежності для коефіцієнта гідравлічного опору одержані здебільшого емпіричним шляхом стосовно перекачування рідкого середовища в сталевих трубах. Як засвідчили дослідження російських вчених, механізм утворення турбулентності біля стінки поліетиленового трубопроводу суттєво відрізняється від механізму взаємодії газу і стінки сталевих газопроводів. Тому загальноприйняті формули Колбрука і Уайта та Альтшуля, одержані для сталевих трубопроводів, не можна використовувати для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів, оскільки вони дають значні похибки. Це показує необхідність проведення теоретичних та експериментальних досліджень з метою виявлення фактичної енерговитратності газових поліетиленових труб.

### 1.5 Постановка задач досліджень

Аналіз існуючих літературних джерел показав, що переважна більшість робіт, присвячених дослідженням газодинамічних процесів в трубопроводах, стосується магістрального транспорту газу і не враховує особливості руху газу в газових мережах населених пунктів. Своєрідність газодинамічних процесів в газових мережах пояснюється відносно невеликими витратами газу, наявністю значних шляхових відборів газу, малими значеннями тиску газу і надзвичайно складною геометричною структурою.

Особливістю сьогоденного етапу розвитку газопостачання в Україні є широке використання поліетиленових трубопроводів. На сьогодні питання оцінювання енерговитратності поліетиленових газових мереж, не дивлячись на надзвичайну актуальність і важливість, до кінця не вирішено. У наявних роботах, виконаних за кордоном, доведено, що коефіцієнт гідравлічного опору поліетиленових газопроводів не можна розраховувати за формулами, одержаними для сталевих трубопроводів при перекачуванні рідини. Показана необхідність експериментальних досліджень особливостей газодинаміки поліетиленових газопроводів для різних режимів руху в широкому діапазоні завантаження.



Для поліетиленових газових труб, виготовлених в Україні, експериментальні дослідження енерговитратності взагалі не виконувалися.

Аналіз напрямків розвитку системи газопостачання України, узагальнення робіт, присвячених прогнозуванню пропускної здатності та енерговитратності газових мереж населених пунктів, дали змогу сформулювати такі задачі досліджень:

Поставлена мета реалізується через вирішення таких задач:

- встановлення кількісних показників зменшення гідравлічної енерговитратності транспортування газу у поліетиленових газових мережах в рамках існуючих газодинамічних підходів;
- виявлення ступеня впливу профілю траси на енерговитратність газових мереж низького тиску;
- встановлення закономірностей газодинамічних процесів, що супроводжують рух газу в поліетиленових газових мережах низького та середнього тиску;
- розробка математичних моделей коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу для різних режимів руху газу;
- реалізація одержаних моделей в методах уточненого гідравлічного розрахунку газових мереж із поліетиленових труб з урахуванням їх гідравлічної енерговитратності, впливу профілю траси та умов навколишнього середовища.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ В СТАЛЕВИХ І ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖАХ

За останні роки в Україні продовжується розвиток систем газопостачання на базі природних газів, у першу чергу, стосовно сільських населених пунктів. Замість традиційних сталевих труб широко практикується використання поліетиленових труб, які характеризуються вищою морозостійкістю, високою еластичністю, стійкістю до дій агресивних хімічних сполук, електрохімічної корозії та блукаючих струмів. Поліетиленові труби укладають безпосередньо в ґрунт без спеціального захисту та ізоляції, їх вага у сім разів менша, ніж металевих такого ж діаметра. Трудомісткість монтажу поліетиленових труб у два-три рази менша, ніж сталевих. Гарантійний термін їх служби становить 50 років за невеликих затрат на прокладання та експлуатацію.

Окрім наведених вище переваг, поліетиленові труби характеризуються меншою енерговитратністю транспортування газу, що пояснюється суттєво меншою шорсткістю внутрішньої поверхні труб. У зв'язку з чим важливе практичне і теоретичне значення має вирішення питання кількісного оцінювання зменшення енерговитратності транспортування газу в поліетиленових газових мережах населених пунктів, оскільки у наявних на сьогодні роботах це питання не знайшло відображення. Вирішення даного питання є актуальним, оскільки безпосередньо пов'язано з впровадженням енергоощадних технологій у газовій сфері.

Природний газ, який після газорозподільної станції, надходить у газові мережі населеного пункту, має певний запас енергії, що визначається величиною його тиску. При русі газу в газових мережах запас енергії витрачається на подолання, в першу чергу, втрат тиску від тертя. До споживача газ повинен прийти з певним тиском, величина якого залежить від характеристики газового приладу.

Втрати енергії на транспортування природного газу газовими мережами населених пунктів для заданих геометричних характеристик труб та обсягів пе-

рекачування газу визначаються величиною коефіцієнта гідравлічного опору кожної ділянки трубопровідної системи. Величина втрат енергії (тиску) газу в газових мережах на тертя характеризує енерговитратність транспортування природного газу.

Другим чинником, який характеризує енерговитратність транспортування газу в газових мережах, є втрати енергії на подолання профілю траси, тобто різниці геодезичних позначок точок траси. Як зазначалось вище, в існуючих на сьогодні методах розрахунку зовнішніх газових мереж цей чинник не ураховується. Наведені нижче дослідження доводять необхідність урахування профілю траси газових мереж на їх енерговитратність та розробляють методи реалізації.

## 2.1 Порівняння гідравлічної енерговитратності сталевих і поліетиленових труб у рамках існуючих підходів до їх гідравлічного розрахунку

Порівняємо енерговитратність сталевих і поліетиленових газопроводів, базуючись на існуючих газодинамічних підходах щодо їх гідравлічного розрахунку, що знайшли відображення в чинній нормативній літературі.

Більшість газових мереж населених пунктів, окрім внутрішніх мереж житлових будинків, здійснюють транспортування газу за турбулентного режиму перекачування. Відповідно до вимог ДБН В.2.5-20 за турбулентного режиму руху газу коефіцієнт гідравлічного опору в газових мережах високого, середнього і низького тиску необхідно визначати за формулою Альтшуля [30,44,46,49,50,53,54,55,58,59]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_e}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (2.1)$$

де  $k_e$  - абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труб;

$D$  - внутрішній діаметр ділянки газопроводу;

$Re$  - число Рейнольдса для ділянки газопроводу.

Згідно з ДБН В.2.5-20 незалежно від діаметра газопроводу абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні повинна прийматися: для сталевих труб  $k_{ec}=0,01$  см, для поліетиленових труб  $k_{en}=0,002$  см.

Значна різниця нормативних значень абсолютної еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні сталевих і поліетиленових труб спричинює відмінність їх гідравлічного опору, а отже і різницю енерговитратності транспортування газу в газових мережах населених пунктів, збудованих із традиційних сталевих і перспективних на сьогодні поліетиленових труб.

Розробимо методику, яка дасть змогу кількісно оцінити зменшення енерговитратності транспортування газу газовими мережами населених пунктів у випадку застосування поліетиленових труб замість сталевих.

Першим етапом розрахунків є знаходження фізичних і термодинамічних властивостей природного газу за умов газових мереж. За відомим складом газу, що використовується у системі газопостачання, визначається молярна маса, відносна густина за повітрям і газова стала.

Враховуючи, що газові мережі населених пунктів характеризуються невеликими перепадами тиску, середній абсолютний тиск газу в газовій мережі знаходимо за формулою

$$P_{cp} = 0,5(P_n + P_k), \quad (2.2)$$

де  $P_n, P_k$  - абсолютний тиск газу на початку газової мережі та біля споживачів.

Визначаємо середнє значення коефіцієнта стисливості газу в газовій мережі [52,53,54,55]

$$z_{cp} = 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}. \quad (2.3)$$

де  $T_{cp}$  - середня температура газу в газовій мережі.

Використовуючи рівняння стану реального газу, знаходимо густину природного газу за умов газових мереж

$$\rho = \frac{P_{cp}}{z_{cp}RT_{cp}}, \quad (2.4)$$

де  $R$  - газова стала, що залежить від складу природного газу.

Використовуючи формулу Сатерленда, обчислюємо динамічну в'язкість компонентів природного газу за середньої температури в газових мережах. Визначаємо динамічну  $\eta$  і кінематичну в'язкість  $\nu$  природного газу за умов газових мереж.

Розрахунки проводимо для різних значень внутрішніх діаметрів труб, що використовуються у системах газопостачання населених пунктів.

Задаємося годинною витратою газу за нормальних умов  $Q_{годн} = Q_1$ . Обчислюємо секундну витрату газу за нормальних умов для ділянки газопроводу  $Q_n$ . Зводимо витрату газу на ділянці до робочих умов у газових мережах

$$Q = Q_n \frac{P_n T_{cp} z_{cp}}{P_{cp} T_n}, \quad (2.5)$$

де  $T_n$  - температура, що відповідає нормальним умовам,  $T_n = 273$  К;

$P_n$  - тиск, що відповідає нормальним умовам,  $P_n = 101325$  Па.

Визначаємо число Рейнольдса на ділянці газопроводу за формулою

$$Re = \frac{4Q}{\pi D \nu}. \quad (2.6)$$

Якщо рух газу відбувається при ламінарному або критичному режимі, тобто виконується умова

$$Re < 4000, \quad (2.7)$$

то збільшуємо годинну витрату газу за умовою

$$Q_{годн} = Q_{годн} + \Delta Q_m, \quad (2.8)$$

де  $\Delta Q_m$  - крок зміни витрати газу при визначенні мінімальної витрати газу на ділянці.

У результаті для заданого внутрішнього діаметра труби знаходимо мінімальне значення годинної витрати газу за нормальних умов на ділянці газопроводу  $Q_{min}$ , при якому забезпечується турбулентний режим руху газу. Використовуючи номограму для розрахунку газових мереж високого і середнього або низького тиску, знаходимо максимальне значення годинної витрати газу за нормальних умов  $Q_{max}$ , яке доцільно передбачити на ділянці газових мереж із заданим внутрішнім діаметром труби. Вибираємо крок зміни витрати газу на ділянці для проведення багатоваріантних розрахунків

$$\Delta Q = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{n}, \quad (2.9)$$

де  $n$  - кількість значень витрати газу, що необхідна для побудови графічних та аналітичних залежностей.

Для кожного значення годинної витрати газу за нормальних умов за формулою Альтшуля обчислюємо коефіцієнт гідравлічного опору для сталевих  $\lambda_c$  і поліетиленової труби  $\lambda_n$  однакового внутрішнього діаметра.

Визначимо ступінь зменшення енерговитратності транспортування газу в газових мережах населених пунктів у разі використання замість сталевих поліетиленових труб. Для цього обчислимо відносну різницю значень коефіцієнта гідравлічного опору

$$\delta_e = \frac{\lambda_n - \lambda_c}{\lambda_c} 100, \% \quad (2.10)$$

Описаний вище алгоритм реалізований нами у програмі ECONOM, яка дає змогу методом комп'ютерного моделювання дослідити вплив діаметра, ступеня завантаження газопроводу, а також температурного чинника на кількісні показники зменшення енерговитратності транспортування газу в газових мере-

жах населених пунктів у разі використання замість сталевих поліетиленових труб.

Дослідження проведені для чинного сортаменту труб, які використовуються в системах газопостачання для низького тиску, а також для середнього та високого тиску [103].

Рисунки 2.1 і 2.2 ілюструють одержані нами залежності зменшення енерговитратності поліетиленових труб на транспортування газу від витрати газу і числа Рейнольдса відповідно для різних діаметрів труб за низького тиску. На рисунках 2.3 і 2.4 наведені аналогічні залежності зменшення енерговитратності поліетиленових труб від витрати газу і числа Рейнольдса для різних діаметрів за середнього і високого тиску.

Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей. У результаті за умов низького, середнього і високого тиску для кожного діаметра труб газових мереж одержуємо математичні моделі залежності зменшення енерговитратності поліетиленових труб на транспортування газу від витрати газу і від числа Рейнольдса у вигляді полінома третього степеня або логарифмічної функції. Приклади результатів математичного моделювання наведені на рисунках 2.5 і 2.6.

Для практичного використання вибираємо більш прості логарифмічні моделі, які забезпечують необхідну точність прогнозування зменшення енерговитратності поліетиленових труб, порівняно зі сталевими з таким же номінальним діаметром.

Для поліетиленових газопроводів низького тиску аналітичні залежності зменшення енерговитратності (%) від годинної витрати газу за нормальних умов у робочому діапазоні витрат газу мають такий вигляд:

$$\text{DN 30} \quad \delta_e = -4,998 \cdot \ln Q_n + 5,575,$$

$$\text{DN 50} \quad \delta_e = -6,312 \cdot \ln Q_n + 14,798,$$

$$\text{DN 65} \quad \delta_e = -6,222 \cdot \ln Q_n + 18,334,$$

$$\text{DN 80} \quad \delta_e = -6,821 \cdot \ln Q_n + 23,363,$$

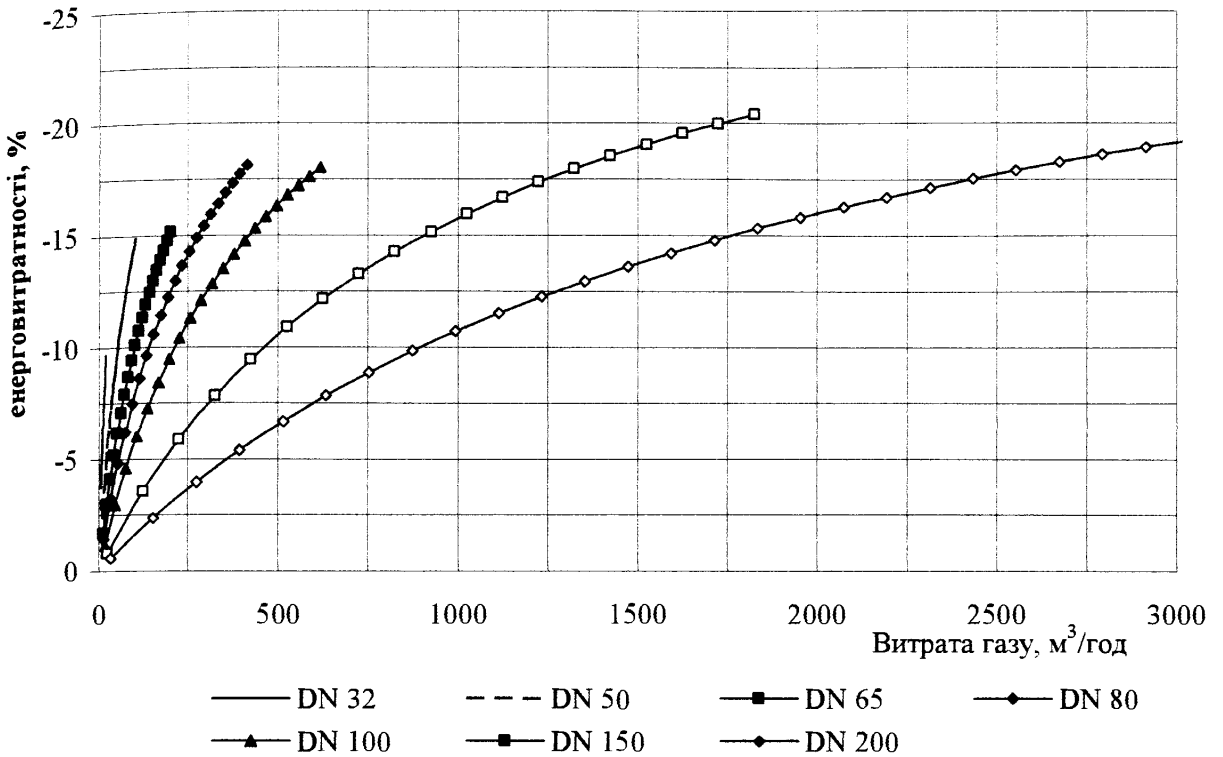


Рисунок 2.1 – Зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від витрати газу за низького тиску у разі використання поліетиленових труб замість сталевих

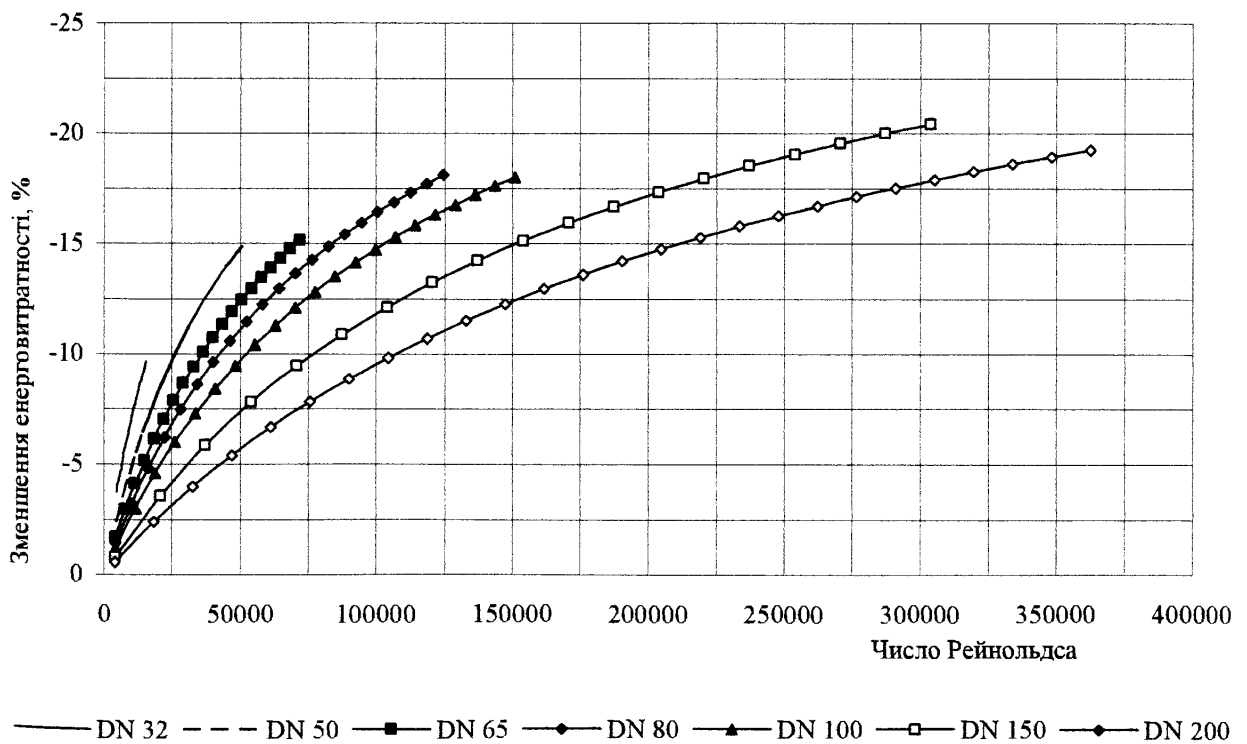


Рисунок 2.2 – Зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від числа Рейнольдса за низького тиску у разі використання поліетиленових труб замість сталевих



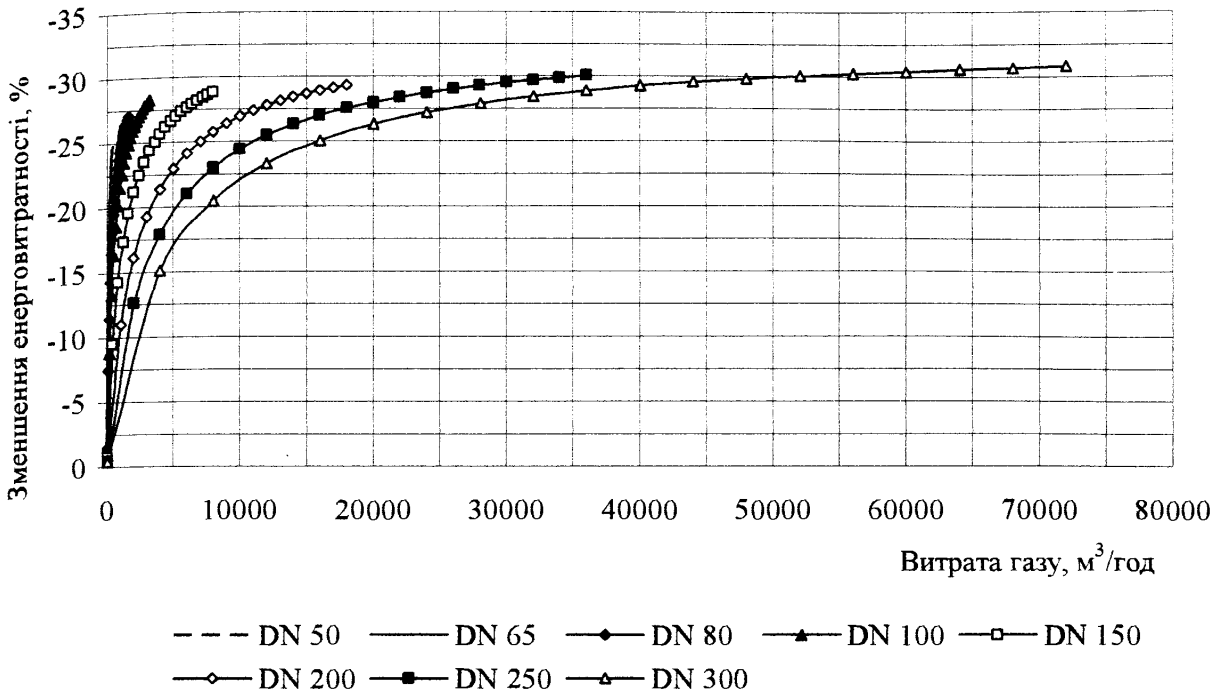


Рисунок 2.3– Зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від витрати газу за середнього та високого тиску у разі використання поліетиленових труб замість сталевих

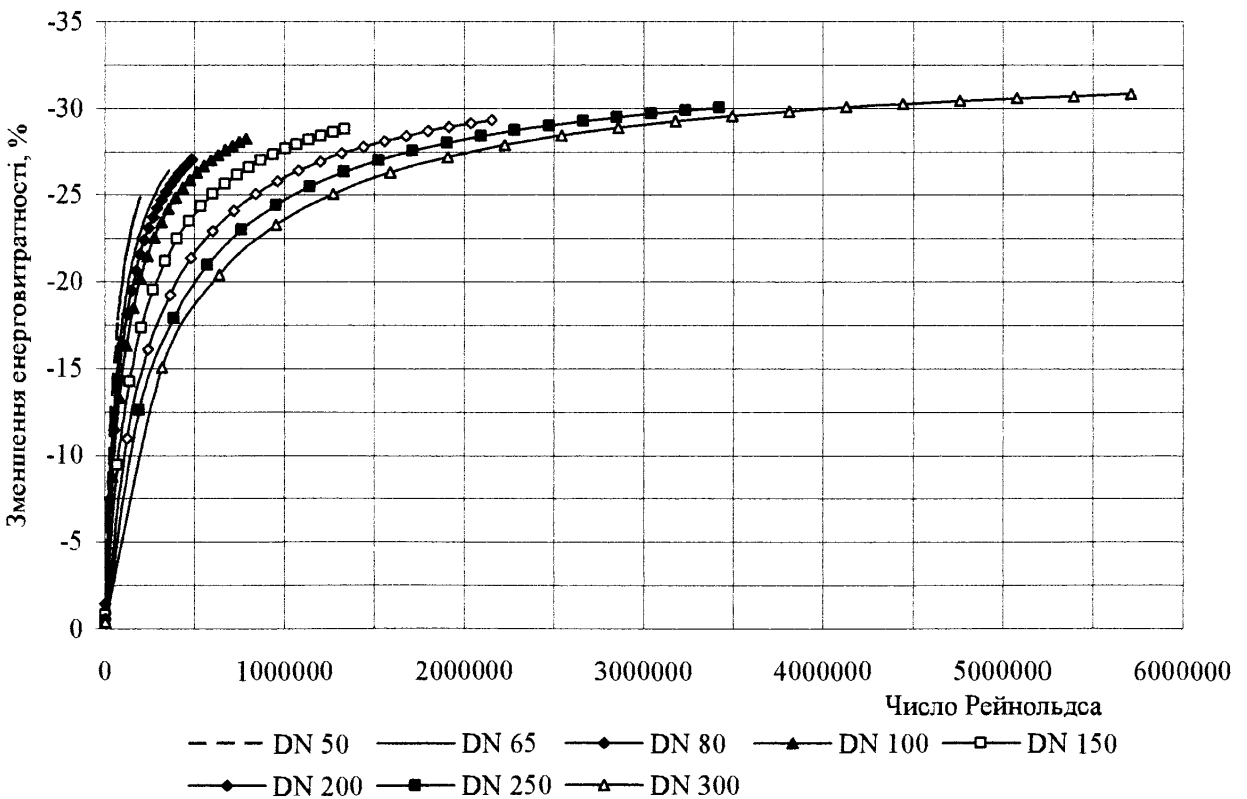


Рисунок 2.4– Зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від числа Рейнольдса за середнього та високого тиску у разі використання поліетиленових труб замість сталевих

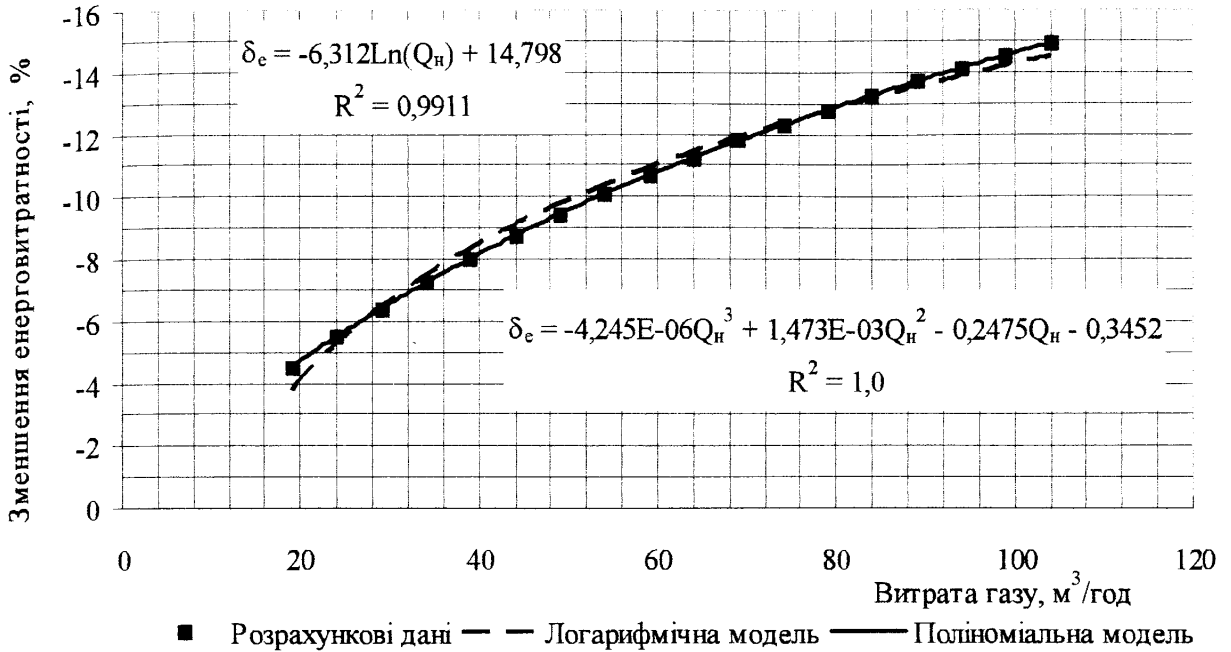


Рисунок 2.5– Математичне моделювання зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від витрати за низького тиску у разі використання поліетиленової труби DN 50 замість сталевій

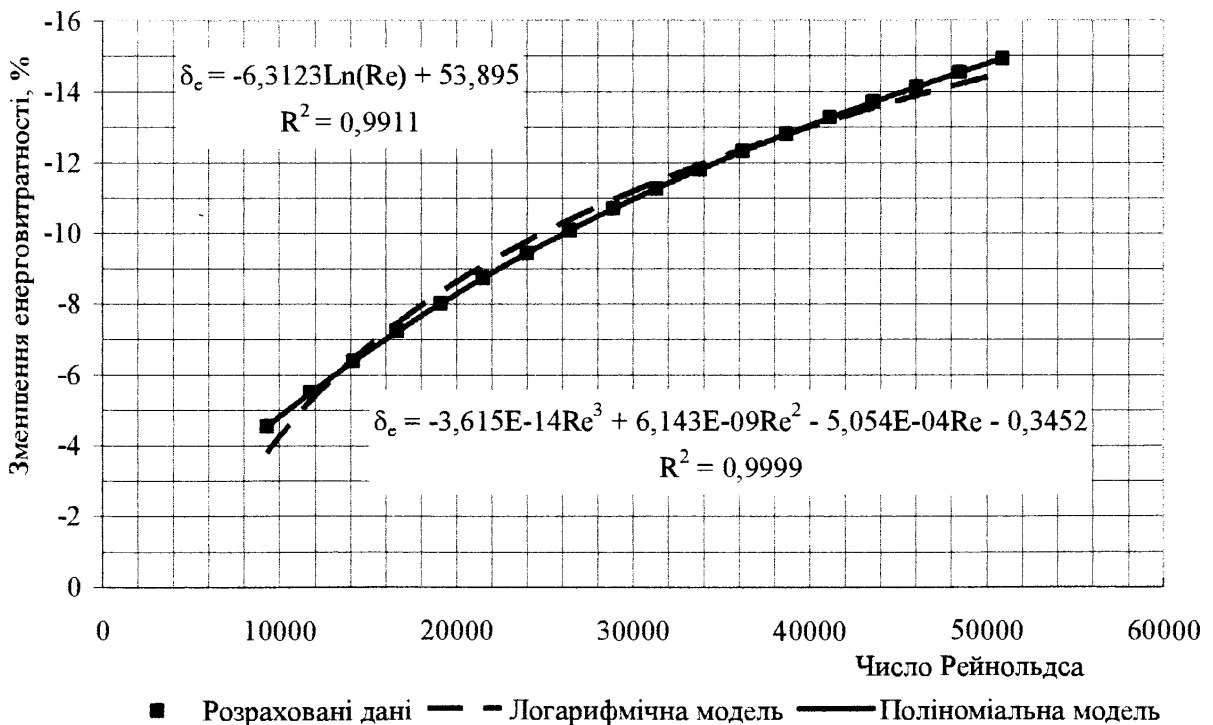


Рисунок 2.6– Математичне моделювання зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від витрати за низького тиску у разі використання поліетиленової труби DN 50 замість сталевій

$$\begin{aligned} \text{DN 100} \quad \delta_e &= -6,752 \cdot \ln Q_n + 25,776, \\ \text{DN 150} \quad \delta_e &= -7,212 \cdot \ln Q_n + 33,957, \\ \text{DN 200} \quad \delta_e &= -6,756 \cdot \ln Q_n + 35,383. \end{aligned}$$

Для поліетиленових газопроводів низького тиску аналітичні залежності зменшення енерговитратності (%) від числа Рейнольдса у робочому діапазоні витрат газу мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \text{DN 30} \quad \delta_e &= -4,998 \cdot \ln Re + 38,861, \\ \text{DN 50} \quad \delta_e &= -6,312 \cdot \ln Re + 53,895, \\ \text{DN 65} \quad \delta_e &= -6,222 \cdot \ln Re + 54,903, \\ \text{DN 80} \quad \delta_e &= -6,821 \cdot \ln Re + 62,289, \\ \text{DN 100} \quad \delta_e &= -6,752 \cdot \ln Re + 62,918, \\ \text{DN 150} \quad \delta_e &= -7,212 \cdot \ln Re + 70,847, \\ \text{DN 200} \quad \delta_e &= -6,756 \cdot \ln Re + 67,701. \end{aligned}$$

Для поліетиленових газопроводів середнього і високого тиску аналітичні залежності зменшення енерговитратності (%) від годинної витрати газу за нормальних умов у робочому діапазоні витрат газу мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \text{DN 50} \quad \delta_e &= -7,265 \cdot \ln Q_n + 18,605, \\ \text{DN 65} \quad \delta_e &= -7,134 \cdot \ln Q_n + 22,525, \\ \text{DN 80} \quad \delta_e &= -7,039 \cdot \ln Q_n + 24,413, \\ \text{DN 100} \quad \delta_e &= -6,746 \cdot \ln Q_n + 62,555, \\ \text{DN 150} \quad \delta_e &= -6,551 \cdot \ln Q_n + 62,719, \\ \text{DN 200} \quad \delta_e &= -6,297 \cdot \ln Q_n + 61,577, \\ \text{DN 250} \quad \delta_e &= -5,856 \cdot \ln Q_n + 57,054, \\ \text{DN 300} \quad \delta_e &= -5,140 \cdot \ln Q_n + 48,062. \end{aligned}$$

Для поліетиленових газопроводів середнього і високого тиску аналітичні залежності зменшення енерговитратності (%) від числа Рейнольдса у робочому діапазоні витрат газу мають такий вигляд:

DN 50	$\delta_e = -7,265 \cdot \ln Re + 63,603,$
DN 65	$\delta_e = -7,134 \cdot \ln Re + 64,450,$
DN 80	$\delta_e = -7,039 \cdot \ln Re + 64,581,$
DN 100	$\delta_e = -6,746 \cdot \ln Re + 62,555,$
DN 150	$\delta_e = -6,551 \cdot \ln Re + 62,719,$
DN 200	$\delta_e = -6,297 \cdot \ln Re + 61,577,$
DN 250	$\delta_e = -5,856 \cdot \ln Re + 57,054,$
DN 300	$\delta_e = -5,140 \cdot \ln Re + 57,054.$

Опишемо наведені вище формули у вигляді узагальнених щодо номінального діаметра трубопроводу залежностей. Дослідження засвідчили, що з максимальною похибкою 9 % зменшення енерговитратності транспортування газу залежно від витрати газу і числа Рейнольдса у разі використання поліетиленових труб можна описати такими рівняннями:

$$\delta_e = A \cdot \ln Q_n + B_1, \quad (2.11)$$

$$\delta_e = A \cdot \ln Re + B_2, \quad (2.12)$$

де  $A, B_1, B_2$  - коефіцієнти, значення яких залежить від робочого тиску газу і номінального діаметра труби.

Виконавши математичне моделювання наведених вище виразів методом найменших квадратів, одержуємо такі поліноміальні залежності:

для газопроводів низького тиску

$$A = -3,429 - 0,0689D_N + 0,0004D_N^2 - 7 \cdot 10^{-7} D_N^3, \quad (2.13)$$

$$B_1 = -8,752 + 0,5628D_N - 0,0024D_N^2 + 3 \cdot 10^{-6} D_N^3, \quad (2.14)$$

$$B_2 = 19,478 + 0,8171D_N - 0,0043D_N^2 + 7 \cdot 10^{-6} D_N^3, \quad (2.15)$$

для газопроводів середнього і високого тиску

$$A = -8,117 + 0,213D_N - 0,0001D_N^2 + 2 \cdot 10^{-7} D_N^3, \quad (2.16)$$

$$B_1 = 11,178 + 0,1864D_N - 0,0004D_N^2 - 3 \cdot 10^{-7} D_N^3, \quad (2.17)$$

$$B_2 = 67,321 - 0,093D_N + 0,0008D_N^2 - 2 \cdot 10^{-6} D_N^3. \quad (2.18)$$

Приклад математичного моделювання залежності коефіцієнта  $A$  від величини номінального діаметра труби для газопроводів середнього і високого тиску наведений на рисунку 2.7.

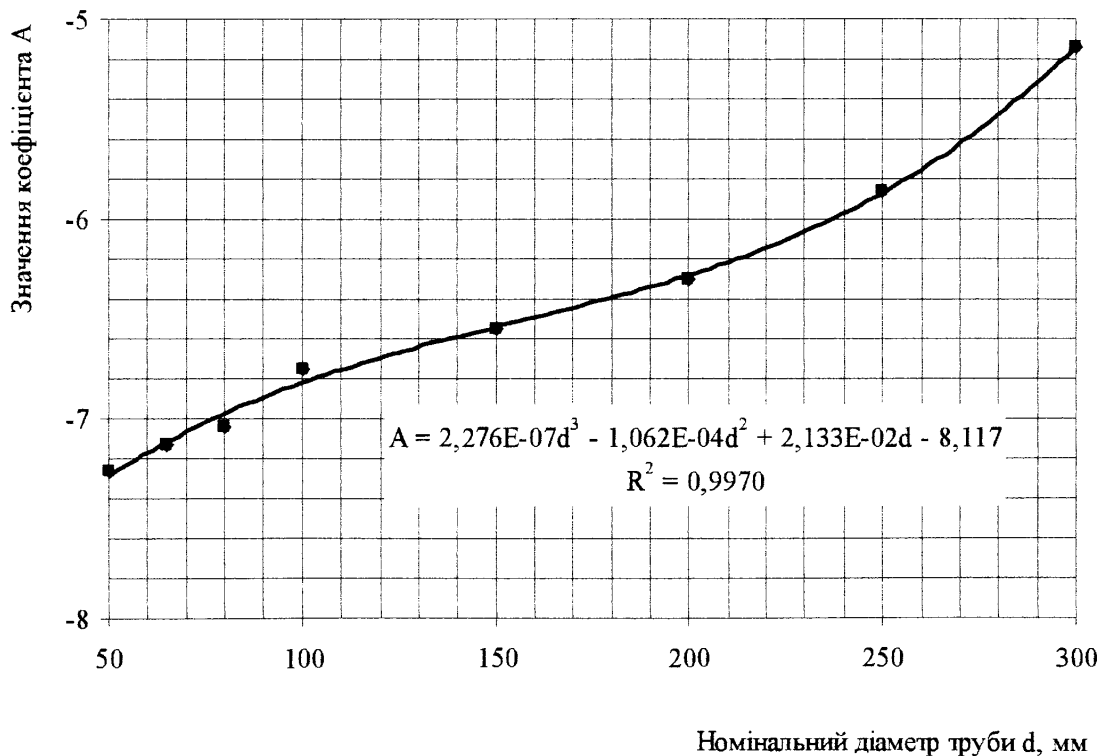


Рисунок 2.7- Результати математичного моделювання залежності коефіцієнта  $A$  від величини номінального діаметра труби для газопроводів середнього і високого тиску

## 2.2 Дослідження впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж населених пунктів у рамках існуючих підходів до їх гідравлічного розрахунку

За останні роки, не дивлячись на кризу, продовжується розвиток та реконструкція газових мереж населених пунктів України. Газові мережі населених пунктів – це складні трубопровідні системи, що характеризуються різним робочим тиском, різноманітною геометричною конфігурацією, різним профілем траси. Якісне проектування та ефективне обслуговування газових мереж вимагає удосконалення методів їх проектних та експлуатаційних гідравлічних розрахунків. Це визначає актуальність досліджень, виконаних у даній роботі, оскільки вони присвячені удосконаленню методики гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску з урахуванням впливу особливостей профілю траси.

Чинні нормативні документи [92] передбачають урахування профілю траси газопроводів виключно при гідравлічних розрахунках внутрішніх газових мереж будівель. При гідравлічних розрахунках зовнішніх газових мереж високого, середнього і низького тиску зазначений чинник не враховується. На сьогодні відсутні роботи, в яких науково обґрунтовані умови врахування особливостей профілю траси на проектні та експлуатаційні розрахунки газових мереж населених пунктів.

Метою досліджень, результати яких наведені нижче, є обґрунтування доцільності та розробка методів, які дадуть можливість урахувати особливості профілю траси як при проектних, так і при експлуатаційних розрахунках газових мереж низького тиску систем газопостачання населених пунктів.

Складову, що враховує вплив профілю траси на гідравлічний опір газових мереж, будемо вводити як у нормативну методику розрахунку, що рекомендована [53,54,55,92], так і в уточнену методику розрахунку газових мереж низького тиску, розроблену нами у роботі [93].

При використанні уточненої методики втрати тиску від тертя на ділянці газових мереж низького тиску визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха. Кое-

фіцієнт гідравлічного опору знаходиться за модифікованою формулою Колбрука. Фізичні і термодинамічні властивості транспортованого природного газу обчислюються за умов газових мереж [53,54,55]. При використанні традиційної методики зазначені розрахунки виконуються згідно з рекомендаціями нормативних документів [92].

Додатковий перепад тиску на ділянці газопроводу низького тиску, зумовлений впливом профілю траси на величину надлишкового тиску газу, може бути обчислений за наближеною формулою, яка пропонується чинними нормативними документами для розрахунку внутрішніх газових мереж [92]

$$\Delta P_{zc} = g(h_n - h_k)(\rho_{новн} - \rho_n), \quad (2.19)$$

де  $g$  - прискорення сили тяжіння;

$h_n$  - геодезична позначка початку ділянки газопроводу;

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

$\rho_{новн}$  - густина повітря за нормальних умов;

$\rho_n$  - густина газу за нормальних умов.

Із формули (2.19) випливає, що якщо геодезична позначка кінця ділянки більша за геодезичну позначку початку, то гідростатичний перепад тиску буде від'ємний, в іншому випадку – додатній.

Спочатку дослідимо вплив профілю траси на результати проектного розрахунку газової мережі низького тиску кільцевої структури.

Розглянемо газову мережу низького тиску довільної структури, яка складається з будь-якої кількості контурів. Кожний контур складається з довільної кількості ділянок низького тиску. Кожний контур може мати ділянки, які межують з будь-яким іншим контуром.

Вхідні дані для проектного розрахунку кільцевої газової мережі такі:

- конфігурація газової мережі;
- набір значень стандартних внутрішніх діаметрів труб, які застосовуються для прокладання газових мереж низького тиску;

- масиви довжин, розрахункових витрат газу і геодезичних позначок на початку та в кінці ділянок газової мережі;
- допустимий перепад тиску у газовій мережі  $\Delta P_{\text{дон}}$ ;
- фізичні властивості газу;
- середня температура газу в газовій мережі  $T$ ;
- абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труб  $k_e$ .

Мета розрахунків полягає у визначенні діаметрів ділянок мережі, при яких максимально використовується заданий перепад тиску і виконуються закони Кірхгофа із необхідною точністю.

Позначаємо кількість контурів у газовій мережі  $n_k$ . Номер контуру позначаємо індексом  $k$  ( $k = 1, \dots, n_k$ ), номер ділянки у контурі в довільному порядку позначаємо індексом  $i$  ( $i = 1, \dots, n_{\text{dk}}$ ). Таким чином, довільна ділянка одержує подвійний індекс: перша цифра показує номер контуру, друга – номер ділянки у контурі. Для розпізнавання структури газової мережі для кожної ділянки вводимо третій індекс  $j$ , який показує номер контуру, з яким межує  $i$ -та ділянка  $k$ -ого контуру. Для ділянок, які не межують з іншими контурами, приймаємо  $j = 0$ .

Знаходимо середній гідравлічний нахил у газовій мережі

$$I_{\text{cp}} = \frac{\Delta P_{\text{дон}}}{1,1 \cdot L_o}, \quad (2.20)$$

де  $L_o$  - довжина найбільш протяжного основного напрямку руху газу в газовій мережі; 1,1 – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску в місцевих опорах.

Розрахунок передбачає виконання однотипних операцій для кожної ділянки газової мережі. Тому для проведення цих розрахунків у комп'ютерній програмі організовуються цикли. У межах двох циклів, зовнішнього за індексом  $k$  і внутрішнього за індексом  $i$ , виконуються такі операції. Для кожної ділянки газової мережі задаємося найменшим стандартним значенням внутрішнього діаметра труби  $D_{k,i} = D_{\text{min}}$ .



Визначаємо розрахункове значення гідравлічного нахилу на ділянці за прийнятого діаметра труби

$$I_{k,i} = \frac{\Delta P_{k,1}}{1,1 \cdot l_{k,i}}, \quad (2.21)$$

де  $\Delta P_{k,1}$  - загальний перепад тиску на  $i$ -ій ділянці  $k$ -ого контуру,

$$\Delta P_{k,1} = \Delta P_{T_{k,i}} + \Delta P_{zc_{k,i}}; \quad (2.22)$$

$\Delta P_{T_{k,i}}$  - втрати тиску від тертя і у місцевих опорах на  $i$ -ій ділянці  $k$ -ого контуру;

$\Delta P_{zc_{k,i}}$  - зміна гідростатичного тиску, спричинена профілем траси  $i$ -ої ділянки  $k$ -ого контуру;

$l_{i,k}$  - геометрична довжина  $i$ -ої ділянки  $k$ -ого контуру.

Втрати тиску газу від тертя та у місцевих опорах  $\Delta P_{k,i}$  для кожної ділянки визначаємо згідно з рекомендаціями чинних нормативних документів [92] або за уточненою методикою розрахунку газових мереж, розробленою нами у роботі [93].

Зміну гідростатичного тиску, спричинену впливом профілю траси для кожної ділянки газової мережі знаходимо за формулою

$$\Delta P_{zc_{k,i}} = g(h_{n_{k,i}} - h_{к_{k,i}})(\rho_{новн} - \rho_n), \quad (2.23)$$

де  $h_{n_{k,i}}$  - геодезична позначка початку (за рухом газу) ділянки газопроводу;

$h_{к_{k,i}}$  - геодезична позначка кінця (за рухом газу) ділянки газопроводу.

Загальний перепад тиску газу на ділянці обчислюємо за формулою

$$\Delta P_{k,i} = \Delta P_{T_{k,i}} + \Delta P_{zc_{k,i}}. \quad (2.24)$$

Порівнюємо розрахункове значення гідравлічного нахилу на ділянці з середнім значенням цього параметра для газової мережі. За виконання умови

$$I_{pk,i} > I_{cpo} \quad (2.25)$$

вибираємо для ділянки наступне найближче більше значення стандартного внутрішнього діаметра труби і розрахунки повторюємо, розпочинаючи з формули (2.21).

Те значення діаметра, за якого відбувається зміна знаку нерівності у формулі (2.25), вважаємо кінцевим значенням діаметра для  $i$ -ої ділянки  $k$ -ого контуру.

Для перевірки ступеня виконання другого закону Кірхгофа витраті газу на ділянці  $Q_{k,i}$  і перепаду тиску на ділянці  $\Delta P_{k,i}$  присвоюємо знак “плюс”, якщо рух газу на ділянці відбувається за годинниковою стрілкою, і знак “мінус”, якщо газ на ділянці рухається проти стрілки годинника.

Для всіх контурів газової мережі обчислюємо значення похибки, величина якої показує ступінь виконання другого закону Кірхгофа. Якщо хоча би для одного контуру похибка перевищує задану точність розрахунку, то необхідно виконати гідравлічну ув'язку шляхом уведення поправочних витрат газу. Гідравлічна ув'язка кілець виконується за методикою, що наведена у [53,54,55]. Розрахунок повторюється до тих пір, доки похибка Кірхгофа для всіх контурів не стане меншою від заданої точності розрахунку.

Описаний вище алгоритм реалізований нами у програмі PROFK, яка дає змогу методом комп'ютерного моделювання дослідити вплив профілю траси на результати гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску кільцевої структури.

Аналогічно дослідимо вплив профілю траси на результати проектного розрахунку газової мережі низького тиску розгалуженої структури. Алгоритм розрахунку довільної ділянки розгалуженої газової мережі співпадає з алгоритмом розрахунку довільної ділянки кільцевої газової мережі. Відмінність методики гідравлічного розрахунку полягає у тому, що у газових мережах розгалуженої структури не діють закони Кірхгофа і відпадає необхідність виконання процедури гідравлічної ув'язки. Розроблена нами програма PROFR дає змогу мето-

дом комп'ютерного моделювання дослідити вплив профілю траси на результати гідравлічного розрахунку розгалужених газових мереж низького тиску. За один захід розраховуються послідовно з'єднані ділянки газопроводів – певний напрям руху газу. Спочатку розглядається основний напрямок руху газу, а далі всі відгалуження і відводи.

Дослідження впливу профілю траси виконаємо на модельних елементах систем газопостачання населених пунктів. Спочатку виконаємо проектний розрахунок газової мережі низького тиску кільцевої структури сільського населеного пункту, розрахункова схема якої наведена на рисунку 2.8.

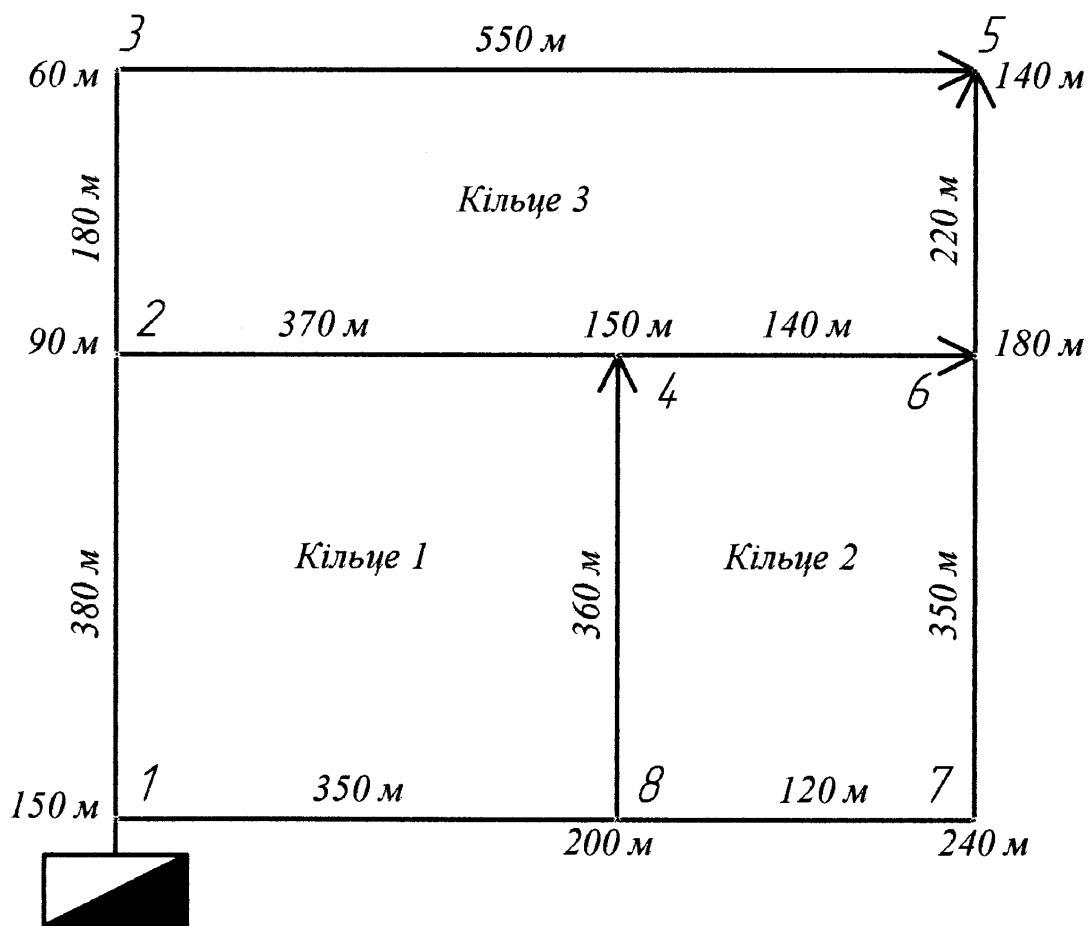


Рисунок 2.8- Розрахункова схема газової мережі низького тиску кільцевої структури

Результати визначення розрахункових витрат газу для ділянок газової мережі низького тиску кільцевої структури наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку витрат газу в кільцевій газовій мережі низького тиску

Ділянка	Довжина $l_i$ , м	Витрата газу, м <sup>3</sup> /год		
		шляхова $Q_{ш}$	транзитна $Q_{т}$	розрахункова $Q_p$
3-5	550	66,0	0	33,0
2-3	180	21,6	66,0	76,8
4-6	140	16,8	0	8,4
2-4	370	44,4	16,8	39,0
1-2	380	45,6	148,8	171,6
5-6	220	26,4	0	13,2
7-6	350	42,0	26,4	47,4
8-7	120	14,4	68,4	75,6
8-4	360	43,2	0	21,6
1-8	350	42,0	126,0	147,0

За програмою PROFK виконуємо гідравлічні розрахунки кільцевої газової мережі, наведеної на рисунку 2.8, без урахування та з урахуванням профілю траси. Одержані результати необхідних діаметрів ділянок, перепадів тиску і надлишкових тисків газу у характерних точках мережі показані на рисунках 2.9 і 2.10. Тут наведені проектні діаметри ділянок, перепади тисків газу на ділянках і величина надлишкового тиску на початку і в кінці кожної ділянки.

Аналіз результатів розрахунків засвідчив, що урахування профілю траси суттєво вплинуло на технологічні параметри кільцевої газової мережі низького тиску. Змінилися як проектні діаметри низки ділянок газової мережі, так і величина надлишкового тиску у характерних точках мережі.

Аналогічно дослідимо вплив профілю траси на результати проектного розрахунку газової мережі низького тиску розгалуженої структури сільського населеного пункту, розрахункова схема якої зображена на рисунку 2.11. Результати визначення розрахункових витрат газу наведені у таблиці 2.2.

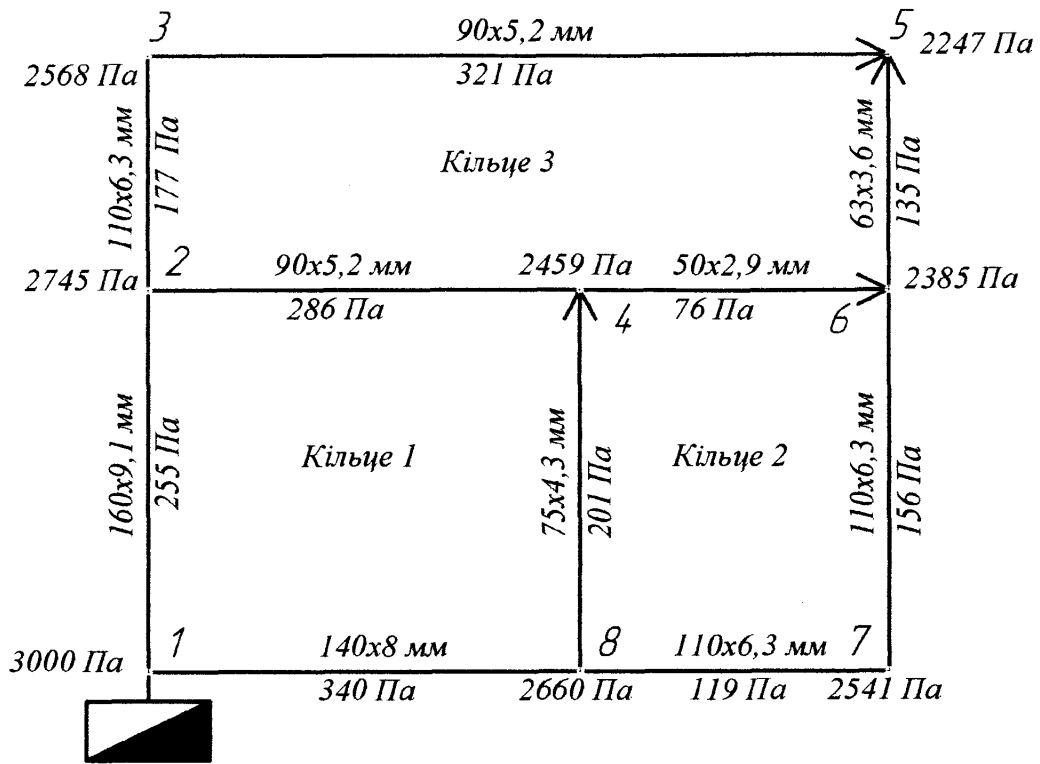


Рисунок 2.9- Результати проектного розрахунку газової мережі низького тиску кільцевої структури без урахування профілю траси газопроводів

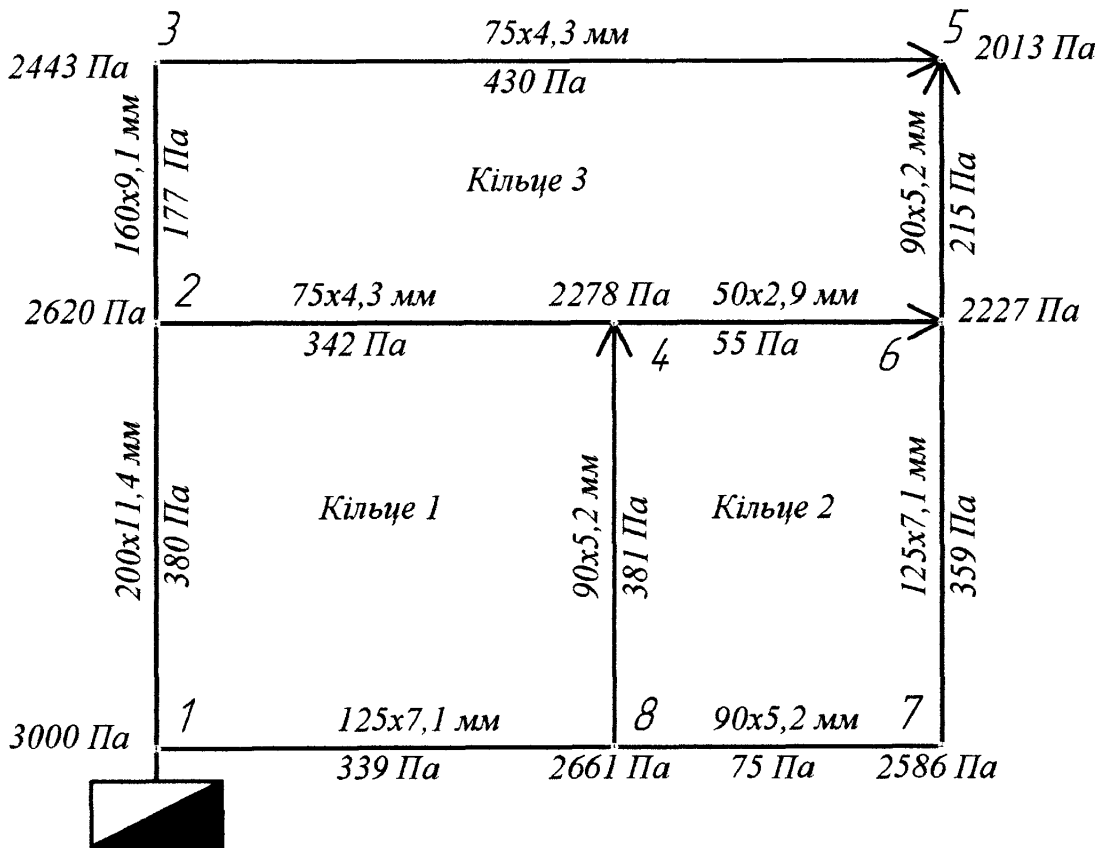


Рисунок 2.10- Результати проектного розрахунку газової мережі низького тиску кільцевої структури з урахуванням профілю траси газопроводів

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку витрат газу в розгалуженій газовій мережі низького тиску

Ділянка	Довжина $l_i, \text{ м}$	Витрата газу, $\text{ м}^3/\text{ год}$		
		шляхова $Q_{ш}$	транзитна $Q_m$	розрахункова $Q_p$
6-8	420	50,4	0	25,2
6-7	320	38,4	0	19,2
4-6	260	31,2	88,8	104,4
4-5	230	27,6	0	13,8
2-4	210	25,2	147,6	160,2
2-3	210	25,2	0	12,6
1-2	280	33,6	198	214,8

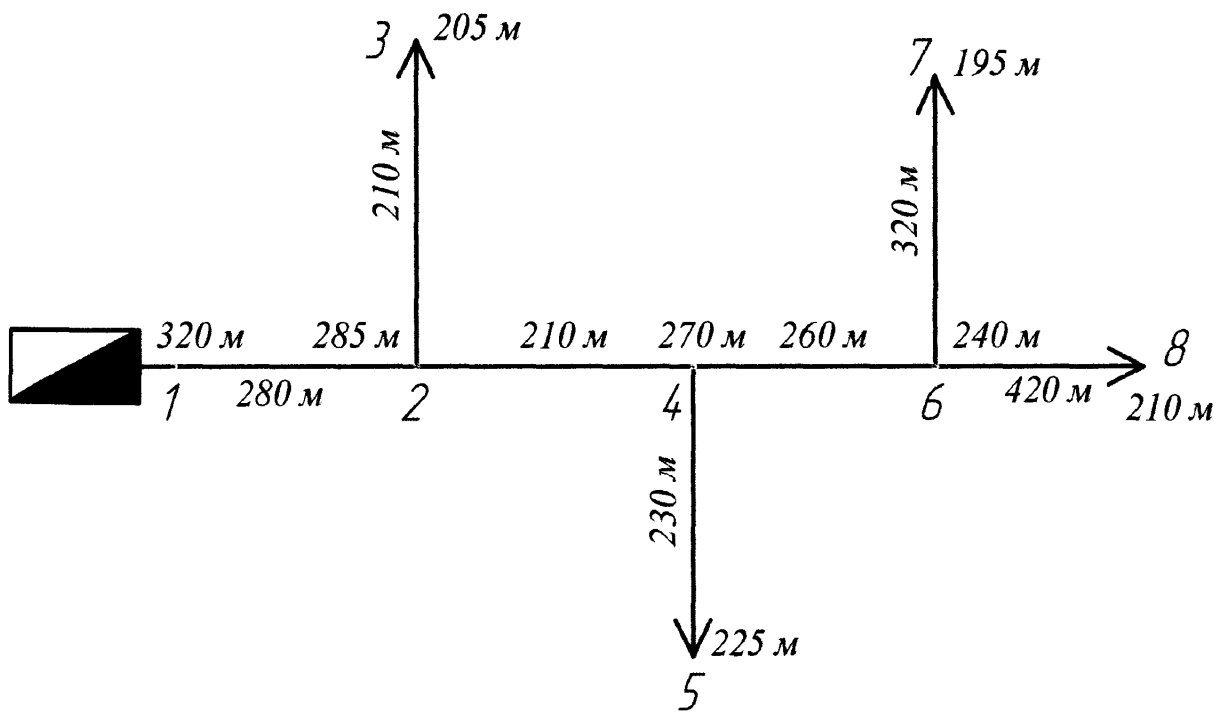


Рисунок 2.11 - Розрахункова схема розгалуженої газової мережі низького тиску

За програмою PROFR виконуємо гідравлічні розрахунки розгалуженої газової мережі без урахування та з урахуванням профілю траси. Одержані результати необхідних діаметрів ділянок, перепадів тиску і надлишкових тисків газу у характерних точках мережі зображені на рисунках 2.12 і 2.13.

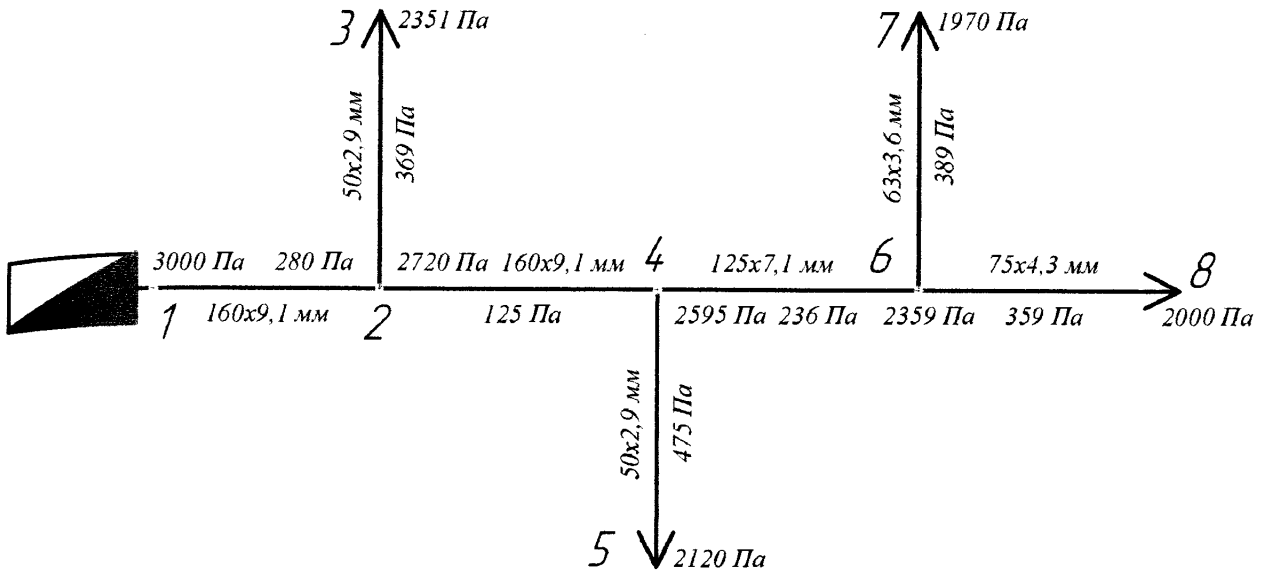


Рисунок 2.12- Результати розрахунку розгалуженої газової мережі низького тиску без урахування профілю траси газопроводів

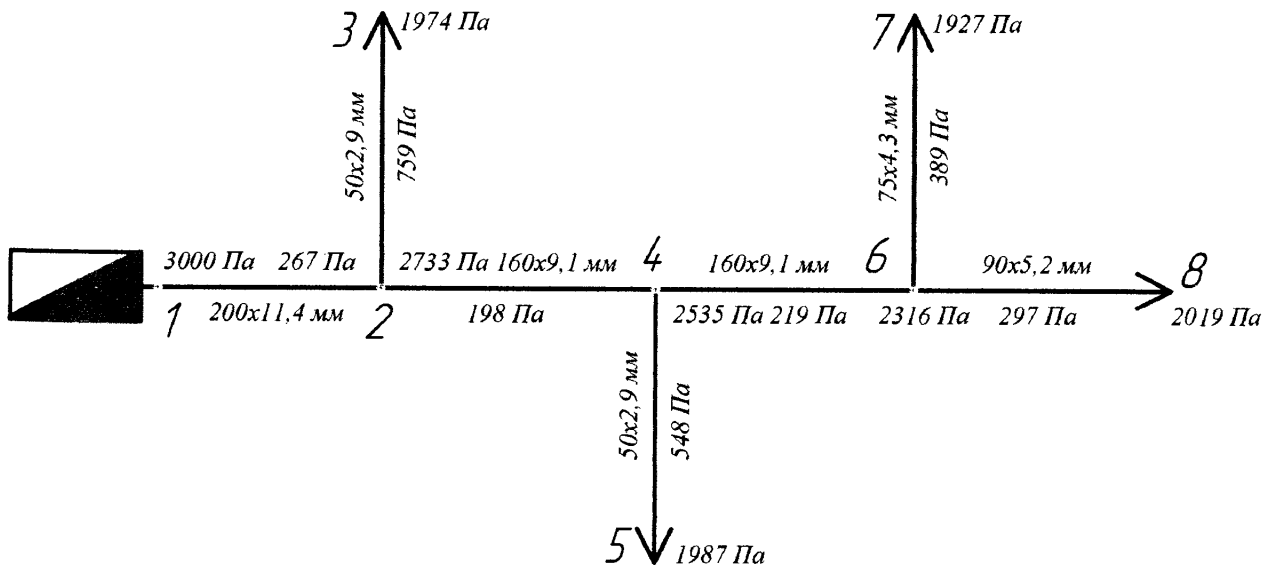


Рисунок 2.13 - Результати розрахунку розгалуженої газової мережі низького тиску з урахуванням профілю траси газопроводів

Рисунки 2.12 і 2.13 засвідчують, що вплив профілю траси суттєво змінює проектні параметри розгалуженої газової мережі низького тиску. При цьому

змінюються як необхідні діаметри низки ділянок, так і закономірності зміни тиску газу в мережі.

Слід відзначити, що зміна необхідних діаметрів ділянок газової мережі спричинює відповідні зміни капітальних вкладень у будівництво системи газопостачання населеного пункту. Відмінності тисків газу в елементах газової мережі спричинюють відповідні зміни режиму роботи газових приладів споживачів газу.

Таким чином, дослідження засвідчили, що урахування профілю траси газових мереж низького тиску кільцевої та розгалуженої конфігурації дає змогу виконати більш якісний проект газопостачання населених пунктів, підвищує достовірність визначення технологічних параметрів газових мереж, дає можливість більш точно обчислити економічні показники системи газопостачання.

У процесі експлуатації газових мереж урахування профілю траси дає змогу більш точно прогнозувати витрати і тиски газу в елементах газової мережі, забезпечуючи нормальний режим газопостачання споживачів.

### **2.3 Удосконалення методу урахування впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску**

Значна кількість сільських населених пунктів розміщена на територіях зі складними топографічними умовами, що спричинює різноманітність профілю траси газових мереж систем газопостачання.

Як зазначалось вище, чинні нормативні документи не передбачають урахування впливу профілю траси газопроводів у процесі виконання гідравлічних розрахунків зовнішніх газових мереж. У підрозділі 2.2 нами доведено, що нехтування впливом профілю траси може призвести до значних похибок при проектних та експлуатаційних розрахунках газових мереж низького тиску. Запропонована методика, яка уможливує виконання гідравлічних розрахунків газових мереж низького тиску кільцевої та розгалуженої структури з урахуванням впливу профілю траси. При цьому для врахування впливу профілю траси на гі-



гравітаційний розрахунок ділянки газової мережі використана спрощена лінійна залежність зміни гідростатичного тиску газу від висоти над рівнем моря. Метою досліджень, що наведені нижче, є удосконалення методу урахування впливу особливостей профілю траси на результати гравітаційного розрахунку газових мереж низького тиску шляхом використання більш точної формули, яка описує зміну тиску газу у полі сили тяжіння.

Удосконалення методології гравітаційних розрахунків газових мереж сприяє підвищенню якості проектування та ефективності експлуатації систем газопостачання населених пунктів, що визначає важливість та актуальність наведених у даній роботі досліджень.

Залежність тиску газу від висоти можна описати більш точно барометричною формулою [96]. Ця залежність зумовлена дією поля тяжіння Землі і тепловим рухом молекул газу (повітря). Для ідеального газу при сталій температурі для однорідного поля тяжіння Землі барометрична формула має такий вигляд

$$P = P_o \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right), \quad (2.26)$$

де  $P_o$  - абсолютний тиск газу на нульовому рівні (біля поверхні Землі, на рівні моря тощо);

$P$  - абсолютний тиск газу на висоті  $h$ ;

$m$  - маса молекули;

$k$  - стала Больцмана;

$T$  - термодинамічна температура газу.

Стала Больцмана – це фізична стала, що визначає зв'язок між температурою та енергією. Її значення у системі SI дорівнює

$$k = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}. \quad (2.27)$$

Виражаємо масу молекули ідеального газу через молярну масу і кількість молекул, що міститься в одному кіломолі будь-якого газу

$$m = \frac{\mu}{N}, \quad (2.28)$$

де  $\mu$  - молярна маса газу;

$N$  - кількість молекул, що міститься в одному кіломолі будь-якого газу,

$$N = 6,022045 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}. \quad (2.29)$$

Формула (2.26) з урахуванням (2.27)-(2.29) приймає вигляд

$$P = P_o \exp\left(-\frac{\mu gh}{kNT}\right). \quad (2.30)$$

Після введення у формулу (2.29) газової сталої за умовою

$$R = \frac{kN}{\mu} \quad (2.31)$$

барометрична формула для ідеального газу приймає вигляд

$$P = P_o \exp\left(-\frac{gh}{RT}\right). \quad (2.32)$$

Для реального газу барометрична формула може бути записана так

$$P = P_o \exp\left(-\frac{gh}{zRT}\right), \quad (2.33)$$

де  $z$  - середнє значення коефіцієнта стисливості газу.

Використаємо барометричну формулу (2.33) для врахування впливу профілю траси при гідравлічних розрахунках газових мереж низького тиску.

Для вертикальної чи нахиленої ділянки газових мереж зміна тиску природного газу, спричинена дією сили тяжіння Землі, може бути обчислена за формулою

$$P_{к_2} = P_n \exp\left[-\frac{g(h_k - h_n)}{z_2 RT}\right], \quad (2.34)$$

де  $P_n$  - абсолютний тиск газу на початку ділянки газових мереж;

$P_k$  - абсолютний тиск газу у кінці ділянки газових мереж;

$T$  - середня температура газу на ділянці газових мереж;

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

Аналогічно описуємо зміну атмосферного тиску у кінці ділянки газових мереж

$$P_{кнов} = P_{нб} \exp\left[-\frac{g(h_k - h_n)}{z_{нов} R_{нов} T}\right]. \quad (2.35)$$

де  $P_{нб}$  - барометричний тиск повітря на початку ділянки, за відсутності

інших даних слід приймати  $P_{нб} = 101325$  Па;

$R_{нов}$  - газова стала повітря,  $R_{нов} = 287,1$  Дж/(кг·К);

$z_{нов}$  - коефіцієнт стисливості повітря, приймаємо  $z_{нов} = 1$ .

Зміна гідростатичного тиску, спричинена значною різницею газових сталей природного газу і повітря, може бути визначена за формулою

$$\Delta P_{зс} = (P_{н_2} - P_{ннов}) - (P_{к_2} - P_{кнов}) \quad (2.36)$$

або з урахуванням виразів (2.34) і (2.35)

$$\Delta P_{зсб} = (P_{н_2} - P_{ннов}) - P_n \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{z_2 RT}\right] + P_{нб} \exp\left[\frac{g(h_n - h_k)}{R_{нов} T}\right]. \quad (2.37)$$

Уточнена формула (2.37) замість спрощеної формули (2.19) може бути використана для врахування впливу профілю траси при гідравлічних розрахунках газових мереж низького тиску населених пунктів.

Дослідимо вплив різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки газопроводу, а також середньої температури газу на ділянці на величину уточнення зміни гідростатичного тиску за рахунок використання замість спрощеної формули запропонованої нами уточненої формули (2.37).

Для цього розробляємо комп'ютерну програму BarF, яка дає можливість для ділянки газопроводу з довільною різницею геодезичних позначок початку і кінця у разі використання природного газу із заданим складом компонентів визначити зміну гідростатичного напору за спрощеною і запропонованою методиками.

У процесі комп'ютерного моделювання різницю геодезичних позначок початку і кінця ділянки газопроводу приймаємо у діапазоні від 10 м до 500 м. Середню температуру газу на ділянці газопроводу змінюємо від 0 °С до 30 °С.

Приймаємо абсолютний тиск на початку модельного газопроводу рівним максимальному значенню для газових мереж низького тиску  $P_{nz} = 104325$  Па.

Для визначення доцільності застосування більш точних, але у той же час більш складних розрахункових формул введемо поняття відносного уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці за умовою

$$\delta = \frac{(\Delta P_{\text{сб}} - \Delta P_{\text{сc}})}{\Delta P_{\text{сc}}} 100, \% \quad (2.38)$$

де  $\Delta P_{\text{сб}}$  - зміна гідростатичного тиску газу на ділянці, знайдена за барометричною формулою (2.37);

$\Delta P_{\text{сc}}$  - зміна гідростатичного тиску газу на ділянці, визначена за спрощеною формулою (2.19).

У результаті багатоваріантних розрахунків одержуємо графічні залежності відносного уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці як функцію середньої температури газу для різних значень різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки. Приклад однієї із них наведений на рисунку 2.14.

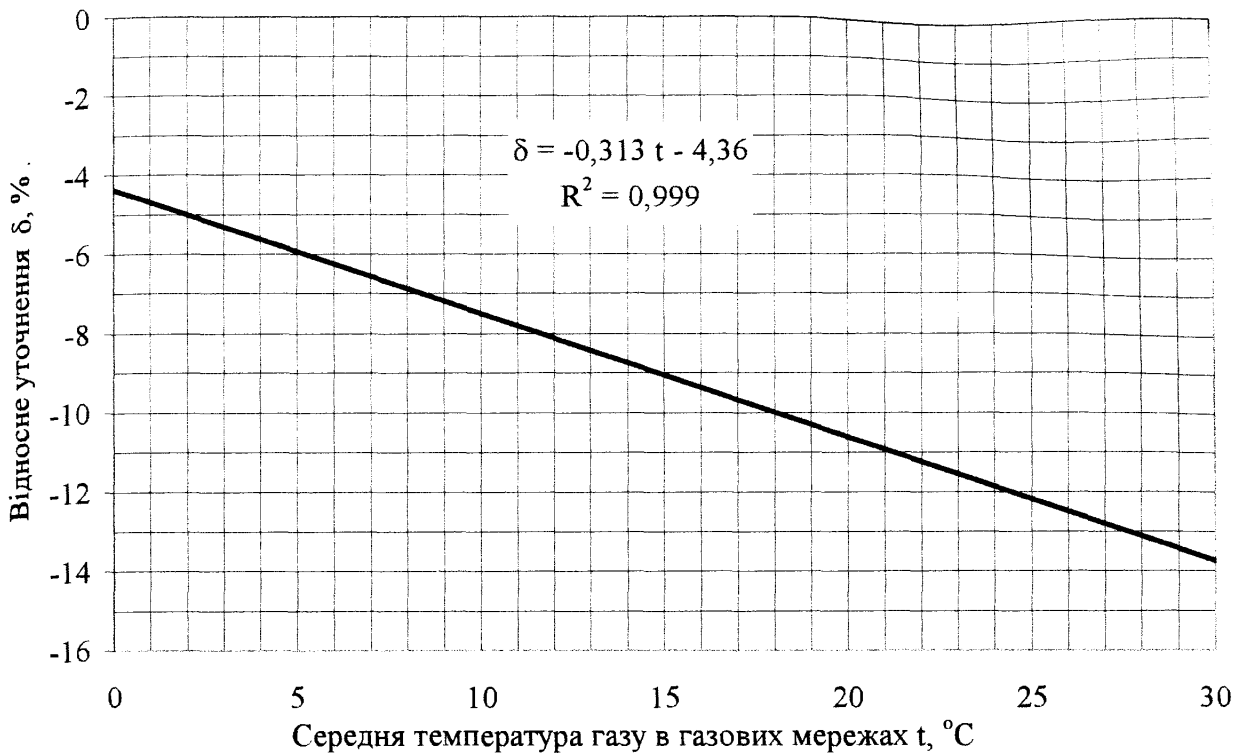


Рисунок 2.14 - Залежність відносного уточнення гідростатичного перепаду тиску від температури газу (різниця геодезичних позначок кінців ділянки 10 м)

Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання зазначених графічних залежностей. У результаті одержуємо такі аналітичні залежності відносного уточнення зміни гідростатичного тиску у відсотках від середньої температури газу на ділянці газової мережі низького тиску  $t$  (°C):

для $h_k - h_n = 10$ м	$\delta = -0,313 \cdot t - 4,36$ ;
для $h_k - h_n = 50$ м	$\delta = -0,310 \cdot t - 4,74$ ;
для $h_k - h_n = 100$ м	$\delta = -0,308 \cdot t - 5,22$ ;
для $h_k - h_n = 200$ м	$\delta = -0,302 \cdot t - 6,16$ ;
для $h_k - h_n = 300$ м	$\delta = -0,296 \cdot t - 7,10$ ;
для $h_k - h_n = 400$ м	$\delta = -0,290 \cdot t - 8,02$ ;
для $h_k - h_n = 500$ м	$\delta = -0,285 \cdot t - 8,93$ .

Дослідження засвідчили, що відносне уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску можна адекватно описати функцією різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки та середньої температури газу

$$\delta = A \cdot t + B, \quad (2.39)$$

де  $A, B$  - коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежать від різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки газової мережі низького тиску.

Використовуючи Microsoft Excel, будемо графічні залежності коефіцієнтів  $A$  і  $B$  від різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки газової мережі низького тиску (див. рисунки 2.15 і 2.16).

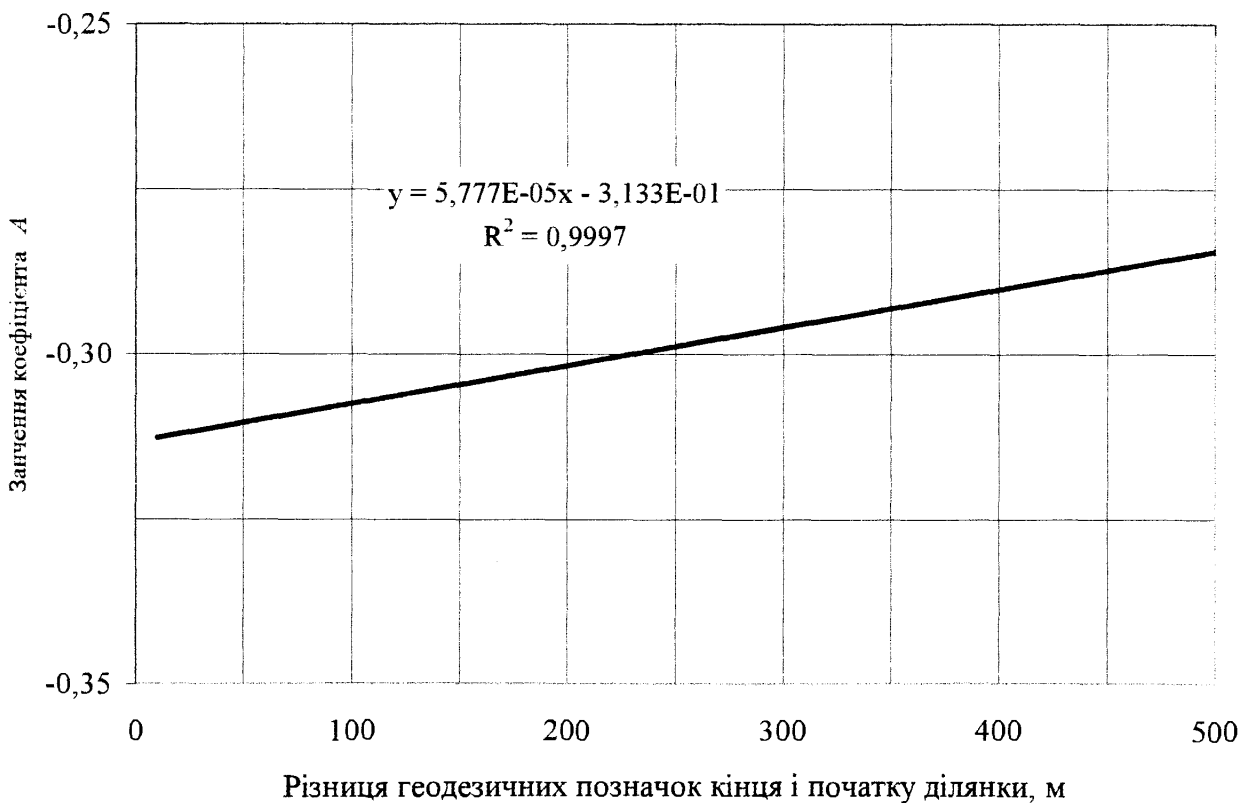


Рисунок 2.15 - Залежність коефіцієнта моделі  $A$  від різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки низького тиску

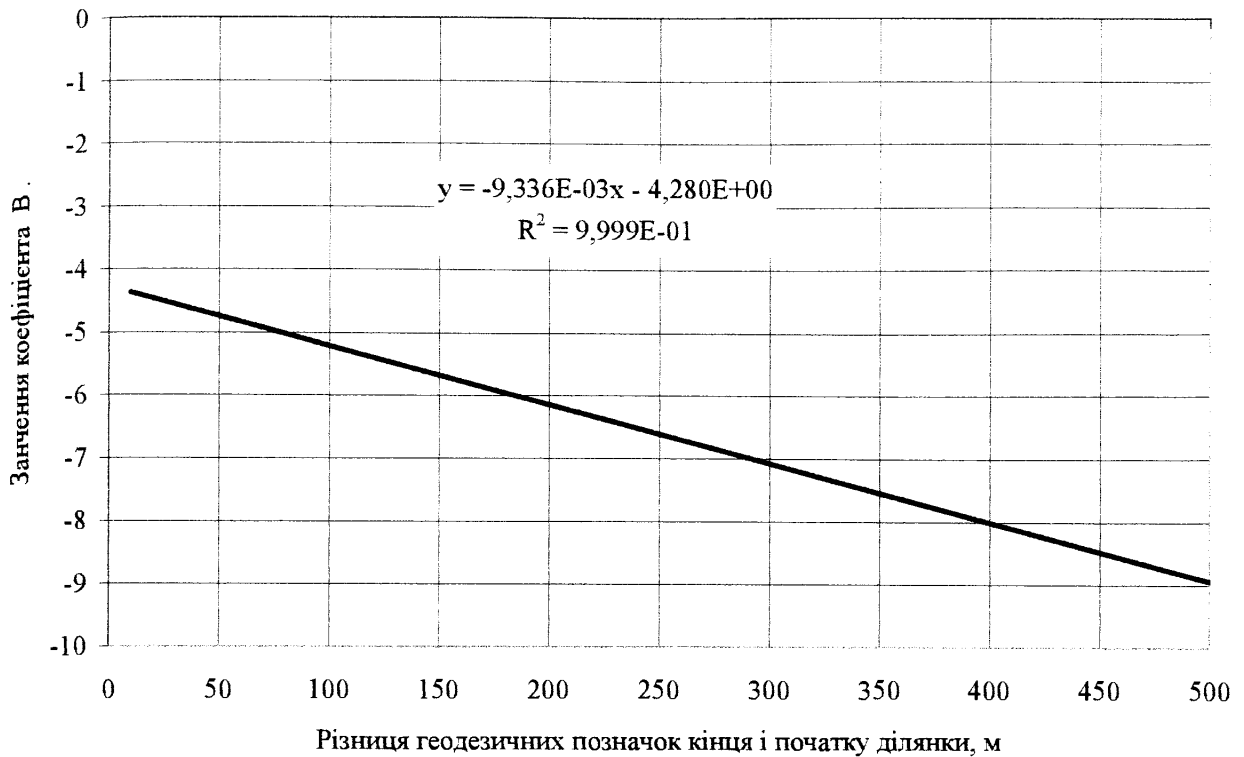


Рисунок 2.16 - Залежність коефіцієнта моделі  $B$  від різниці геодезичних позначок кінця і початку ділянки низького тиску

Виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей. У результаті одержуємо такі аналітичні вирази для коефіцієнтів моделі:

$$A = -5,78 \cdot 10^{-5} (h_n - h_k) - 0,313; \quad (2.40)$$

$$B = 9,336 \cdot 10^{-3} (h_n - h_k) - 4,280. \quad (2.41)$$

Дослідження засвідчили, що похибка результатів у разі використання математичних моделей (2.40) і (2.41) не перевищує 1 %.

За наявності таких точних моделей відпадає необхідність закладати в обчислювальні алгоритми газових мереж низького тиску досить складну барометричну формулу (2.37). Розрахунки можна вести за спрощеною формулою, увівши до неї коригувальний коефіцієнт, що включає відносне уточнення зміни гідростатичного тиску, розраховане за формулами (2.40)-(2.41).

Уточнене значення зміни гідростатичного тиску на ділянці газових мереж низького тиску з точністю до 1 % буде дорівнювати

$$\Delta P_{зсб} = (1 + \delta) \cdot \Delta P_{зсc} . \quad (2.42)$$

Покажемо приклад використання запропонованих розрахункових формул. Нехай необхідно визначити зміну гідростатичного тиску за рахунок профілю траси на ділянці газопроводу низького тиску за таких умов: геодезична позначка початку ділянки  $h_n = 42$  м, геодезична позначка кінця ділянки  $h_k = 105$  м, газова стала  $R = 511,5$  Дж/(кг·К), густина природного газу за нормальних умов  $\rho_n = 0,7256$  кг/м<sup>3</sup>, середня температура газу на ділянці 12 °С.

За спрощеною формулою (2.19) маємо

$$\Delta P_{зсc} = 9,81 \cdot (42 - 105) \cdot (1,293 - 0,7256) = -350,7 \text{ Па.}$$

За формулами (2.40 і (2.41) обчислюємо значення коефіцієнтів математичної моделі

$$A = -5,78 \cdot 10^{-5} (42 - 105) - 0,313 = -0,309 ;$$

$$B = 9,336 \cdot 10^{-3} (42 - 105) - 4,280 = -4,868 .$$

За формулою (2.39) знаходимо значення відносного уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску

$$\delta = -0,309 \cdot 12 - 4,868 = -8,6 \text{ \%} .$$

За формулою (2.42) обчислюємо уточнене значення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску

$$\Delta P_{зсб} = -(1 - 0,086) \cdot 350,7 = -320,5 \text{ Па.}$$

Одержане значення практично співпадає зі значенням зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску, що обчислене за барометри-



чною формулою (2.37),  $\Delta P_{зсб} = -320,2$  Па. Це свідчить про адекватність запропонованих математичних моделей і можливість їх застосування про проектних та експлуатаційних розрахунках газових мереж населених пунктів.

## 2.4 Висновки по розділу 2

Порівняння гідравлічної енерговитратності сталевих і поліетиленових газопроводів у рамках існуючих підходів до їх гідравлічних розрахунків дав змогу зробити такі висновки:

- зменшення енерговитратності транспортування газу при використанні замість сталевих поліетиленових труб залежить від завантаження труби, внутрішнього діаметра, температури і тиску газу в газових мережах;
- у разі застосування поліетиленових труб замість сталевих у газових мережах низького тиску енерговитратність транспортування газу зменшується на 4 - 19 % , а у газових мережах середнього або високого тиску на 6 - 31 % залежно від зазначених вище чинників;
- залежності зменшення енерговитратності поліетиленових труб на транспортування газу від витрати газу і числа Рейнольдса незалежно від робочого тиску для різних діаметрів можна з похибкою до 1 % описати поліномом третього степеня або з похибкою до 4 % логарифмічною функцією;
- запропонований метод дає змогу у кожному конкретному випадку розрахувати кількісні показники зменшення енерговитратності транспортування газу у разі застосування поліетиленових труб замість традиційних сталевих у системах газопостачання населених пунктів.

Урахування впливу профілю траси на енерговитратність газових мереж суттєво впливає на її проектні та експлуатаційні параметри. При цьому змінюються як необхідні діаметри низки ділянок, так і закономірності зміни тиску газу в газовій мережі як кільцевої, так і розгалуженої структури.

Доведено, що використання барометричної формули замість спрощеної лінійної залежності для врахування профілю траси дає можливість на 10-15 %

уточнити результати гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску, що підвищує ефективність проектування та експлуатації систем газопостачання населених пунктів.

### РОЗДІЛ 3

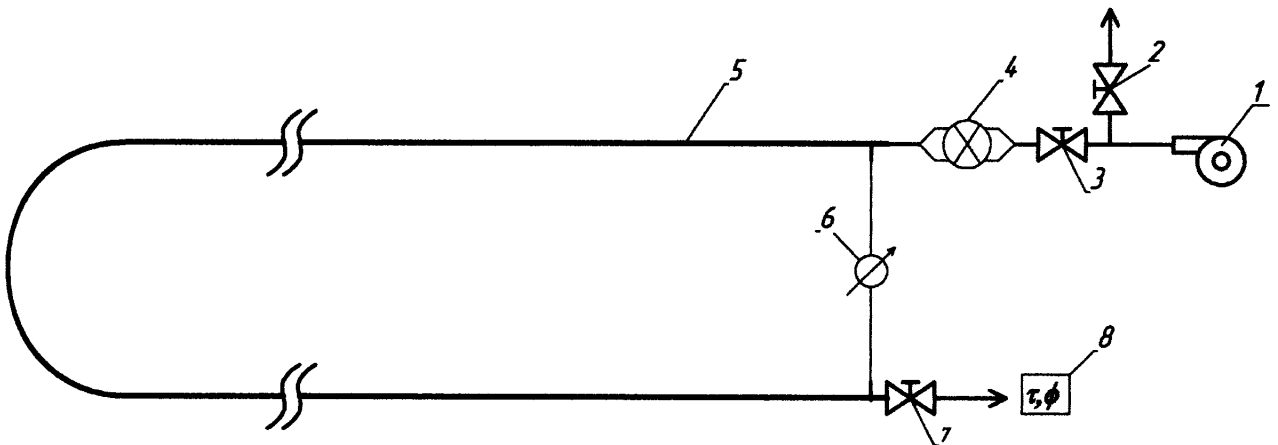
## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Як зазначалось вище, однією із переваг поліетиленових газопроводів є менша гідравлічна енерговитратність порівняно зі сталевими газопроводами. Дослідження вчених, у тому числі зарубіжних, довели, що газодинамічні процеси, які супроводжують рух газу в поліетиленових газопроводах мають низку особливостей [74,76,82,83]. Дослідження, проведені вченими Росії, Болгарії та Індії [76,82,83], засвідчили, що для визначення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу не можна використовувати загальноприйняті формули газової динаміки, оскільки вони одержані для сталевих труб у разі перекачування рідини і тому не здатні урахувати особливості взаємодії газу з внутрішньою поверхнею поліетиленової труби. Наявні на сьогодні роботи пропонують розрахункові формули для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленової труби виключно для газових мереж високого тиску. Для поліетиленових газових мереж низького тиску адекватні математичні моделі коефіцієнта гідравлічного опору відсутні. Особливості руху газу в поліетиленових газопроводах можна виявити лише дослідним шляхом. Це дасть можливість одержати адекватні залежності для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів. На сьогоднішній день значна частина сталевих газопроводів систем газопостачання населених пунктів потребує реконструкції та модернізації. Згідно постанови КМУ № 726 від 10 липня 1997 р. «Про виробництво і використання поліетиленових труб у будівництві та реконструкції газових мереж у сільській місцевості» проведення газифікації сільських населених пунктів та реконструкція існуючих газових мереж повинна виконуватися виключно з використанням поліетиленових газопроводів. У зв'язку з цим постає необхідність та актуальність проведення експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів при відносно невеликих числах Рейнольдса, тобто для умов роботи газових мереж низького тиску.

### 3.1 Опис експериментальної установки для дослідження газодинаміки поліетиленових газопроводів

Експериментальна установка, розроблена нами, розміщена в лабораторії трубопровідного транспорту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [104]. Основою установки є поліетиленова газова труба діаметром 32x3 мм довжиною 63,65 м. Даний поліетиленовий газопровід має сертифікат відповідності, який засвідчує, що він відповідає ДСТУ Б В.2.7-73-98 «Труби поліетиленові для подачі горючих газів» і може використовуватися для подачі горючих газів, а саме, природного газу, споживачам з надлишковим тиском до 0,6 МПа.

Принципова схема експериментальної установки для дослідження енерговитратності поліетиленових газопроводів наведена на рисунку 3.1.



- 1 – відцентровий компресор; 2,3,7 - сферичні крани DN 20; 4 – аналоговий давач витрати повітря AWM720P1; 5 – поліетиленовий газопровід 32x3 мм; 6 – аналоговий давач диференційного перепаду тиску повітря MPX5010DP; 8 – цифровий давач температури повітря і відносної вологості SHT15

Рисунок 3.1 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження трубопровідної газодинаміки поліетиленових газопроводів

Враховуючи результати досліджень російських учених про тотожність природного газу і повітря як робочих середовищ з точки зору визначення енерговитратності поліетиленових труб [82], експерименти проводилися на повітрі.

Для зменшення пульсацій тиску і витрати повітря в експериментальній установці для дослідження енерговитратності поліетиленових газопроводів використаний компресор відцентрового типу. Це дало можливість забезпечити сталу витрату повітря з надлишковим тиском, що відповідає повному діапазону завантаження газових мереж низького тиску.

Сферичний кран 2 призначений для перепускання надлишку повітря, що подається відцентровим компресором, в атмосферу, що дає змогу регулювати необхідну витрату повітря на вході в аналоговий давач витрати повітря 4, і відповідно в поліетиленову трубу 5.

Зміна режиму роботи газопроводу відбувається шляхом дроселювання потоку повітря на крані 3. Це також дає змогу додатково регулювати величину витрати повітря, що подається в експериментальний поліетиленовий трубопровід.

Для визначення витрати повітря в експериментальній установці передбачено аналоговий давач витрати AWM720P1 фірми Honeywell (США), загальний вигляд якого наведений на рисунку 3.2.

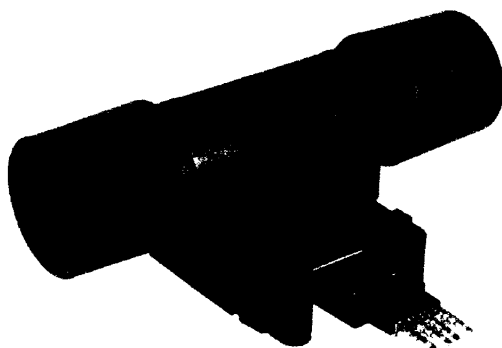


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд аналогового давача витрати повітря AWM720P1 фірми Honeywell (Сполучені Штати Америки)

Даний витратомір характеризується високою точністю вимірювання витрати повітря, яка зумовлена сучасним високотехнологічним підходом до вимірювання. Цей давач включає нагрівальний елемент і два, розташованих по обидва боки, термочутливих елементи. Принцип дії цієї системи заснований на механізмі передачі потоком повітря відносної кількості теплоти над поверхнею вимірювача з подальшою реєстрацією різниці температур термодавачів моста на вході та виході з давача.

Загальна характеристика аналогового давача витрати повітря AWM720P1 наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Загальна характеристика аналогового давача витрати повітря AWM720P1

Параметр	Значення
Максимальна витрата повітря за нормальних умов, м <sup>3</sup> /год	12
Номінальна напруга живлення, В	10
Середовище калібрування	Повітря
Максимальна похибка вимірювання, %	± 0,5 %
Час відклику давача, мс	6
Діапазон робочих температур, °С	від мінус 25 до плюс 85 °С

Для визначення витрати повітря через давач використовуються дані калібрування за повітрям, взяті з його технічного паспорта. Для цього побудована залежність напруги на виході з давача (В) залежно від витрати повітря, зведеної до нормальних умов (л/хв). Залежність змодельована в середовищі Excel і наведена на рисунку 3.3.

Для достовірного моделювання зазначеної залежності весь діапазон вимірювання було розбито на два проміжки – до 100 л/хв, та більше 100 л/хв. Отримані математичні моделі мають найвище значення достовірності апроксимації, що свідчить про їх точність. Вони використані в подальших розрахунках при обробці дослідних даних. Отримане значення витрати повітря вже є зведеним до нормальних умов (при температурі 0 °С, та абсолютному тиску 101325 Па), оскільки в будові давача передбачена компенсація за температурою і надлишковим тиском.

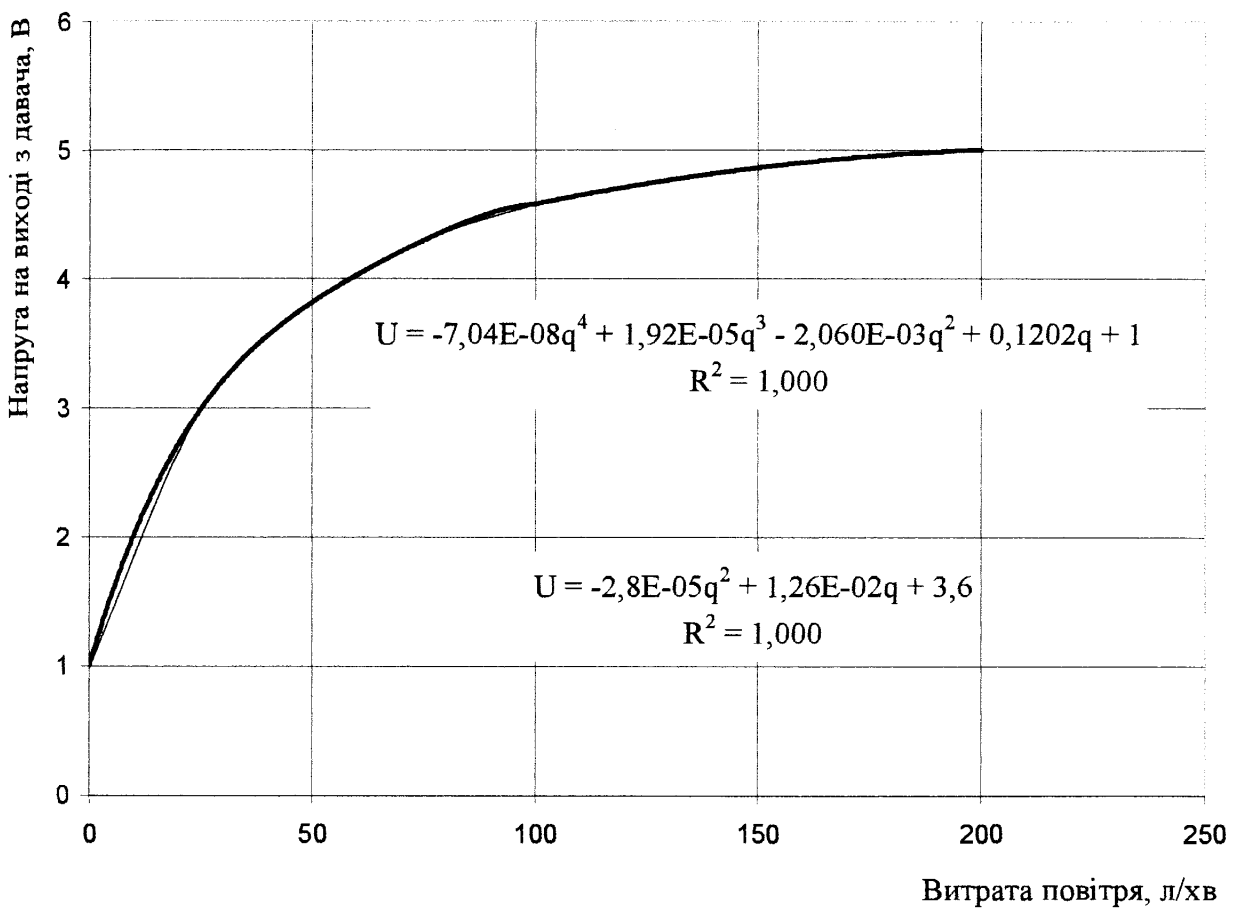


Рисунок 3.3 – Залежність напруги на виході з давача витрати AWM720P1 від витрати повітря

Для визначення перепаду тиску повітря в поліетиленовій газовій трубі використано сучасний аналоговий давач диференційного перепаду тиску MPX5010DP фірми Freescale Semiconductor (США). Загальний вигляд давача наведений на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 - Загальний вигляд диференційного давача тиску MPX5010DP  
фірми Freescale Semiconductor

У принцип роботи давача закладено сучасний метод вимірювання тиску, який базується на утворенні різниці потенціалів на чутливому п'єзоелементі, з подальшим підсиленням сигналу та термокомпенсацією на терморезисторному мості. Це дає змогу компенсувати зміну фізичних властивостей п'єзоелемента, зумовлених зміною його температури, і відповідно збільшити точність визначення тиску. Загальна характеристика аналогового диференційного давача тиску MPX5010DP наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Загальна характеристика аналогового диференційного давача тиску MPX5010DP

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання перепаду тиску, Па	0 - 10000 Па
Напруга на виході давача при нульовій різниці перепадів тиску, В	0,2
Максимальна напруга при максимальному значенні перепаду тиску повітря, В	4,7
Чутливість давача, мВ/кПа	450
Номінальна напруга живлення, В	5
Максимальна похибка вимірювання, %	± 1 %
Час відклику давача, мс	1
Діапазон робочих температур, °С	від мінус 40 до плюс 125 °С



Для визначення температури повітря і його відносної вологості використовується цифровий давач SHT15 фірми Sensirion (Швейцарія). Загальний вигляд даного давача наведений на рисунку 3.5.

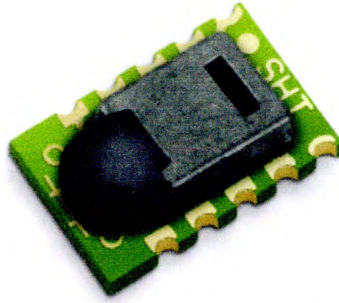


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд цифрового давача температури та відносної вологості повітря SHT15 фірми Sensirion (Швейцарія)

На відміну від інших модифікацій, давач SHT15 є цифровим давачем і вихідний сигнал видає в цифровому форматі. В давачі є вбудований 14-ти бітний аналогово-цифровий перетворювач з часом відклику 8 секунд. Це дає змогу з великою точністю передавати сигнал про величину температури і вологості робочого середовища. Загальна характеристика давача SHT15 наведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Загальна характеристика давача SHT15

Параметр	Значення при	
	вимірюванні температури	вимірюванні вологості
Діапазон вимірювання	від мінус 40 до плюс 123 °C	від 0 до 100%
Точність вимірювання	± 0,3 °C	± 2 %
Напруга живлення, В	5	
Кількість біт передачі сигналу	14	12
Час відклику, с	5	8

Для перетворення аналогових сигналів з MPX5010DP та AWM720P1 нами розроблені відповідні 22-х бітні аналогово-цифрові перетворювачі з джерелом високоточної взірцевої напруги для АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) та для живлення датчиків. Це дало змогу з високою точністю обробляти отриманий сигнал та перетворювати його в цифровий формат. На рисунку 3.6 наведена принципова схема керування та передачі даних датчиками.

Для передачі цифрової інформації від датчиків на комп'ютер нами розроблено мікроконтролерний блок керування, функцією якого є збір даних з датчиків і посилення пакету даних на комп'ютер за запитом із нього. Передача даних з датчиків здійснюється за допомогою SPI інтерфейсу до мікроконтролерного блоку керування. Даний блок, за запитом з комп'ютера, посилає на нього дані значень з датчиків за допомогою послідовного інтерфейсу передачі даних (COM порт).

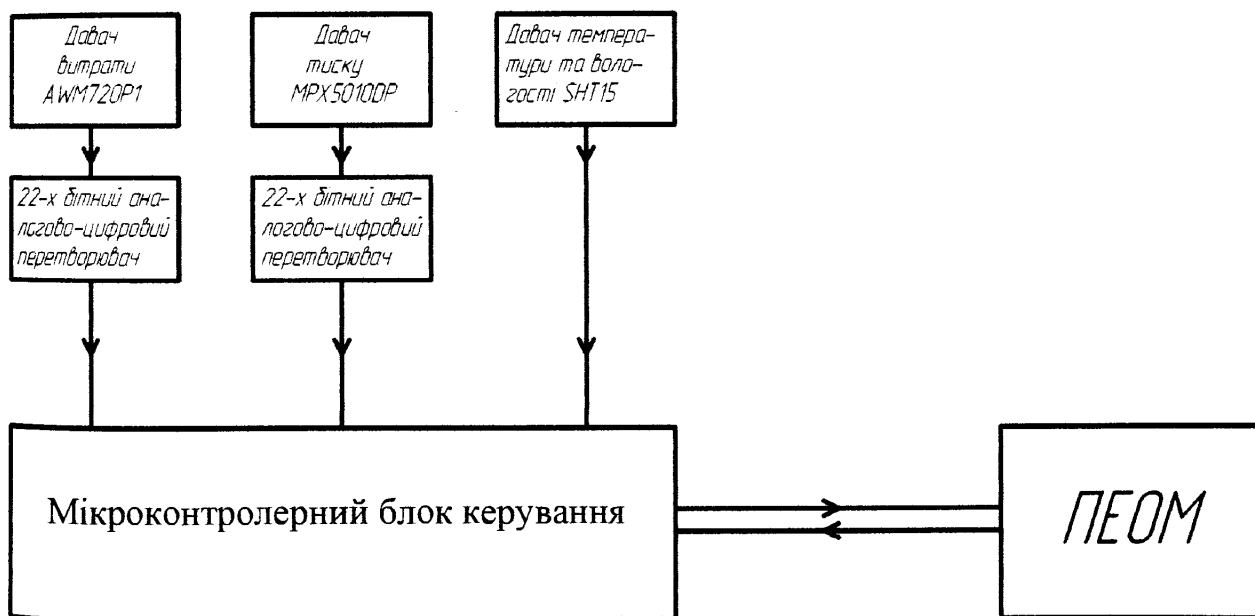


Рисунок 3.6 - Принципова схема керування датчиками

Відповідно до принципів схем (рисунок 3.1 та рисунок 3.6), нами змонтована експериментальна установка для дослідження енерговитратності поліетиленового газопроводу, загальний вигляд якої наведений на рисунку 3.7.

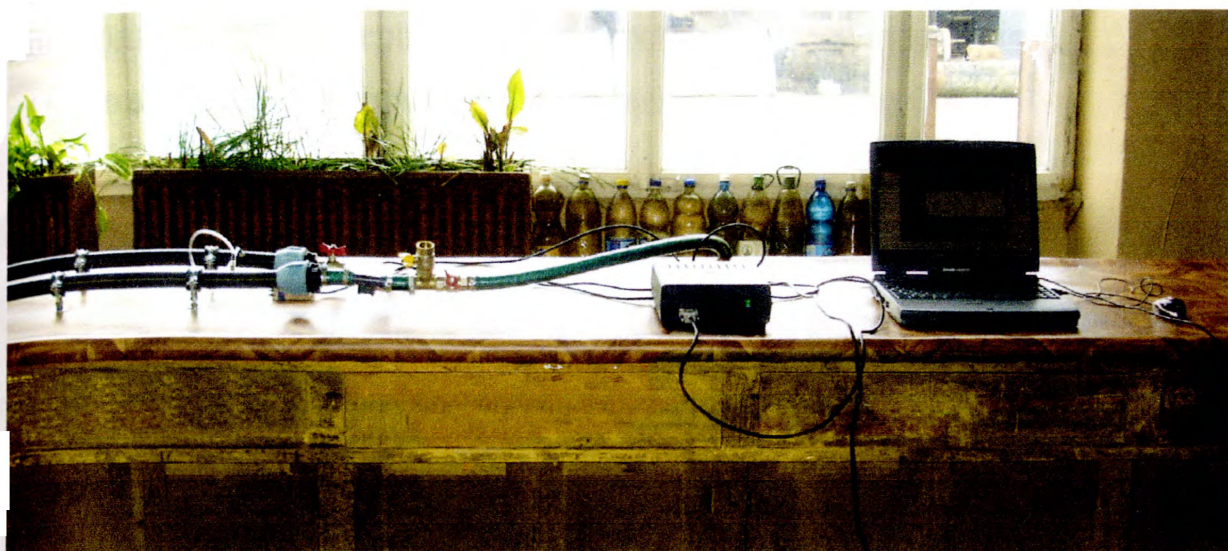


Рисунок 3.7 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження трубопровідної газодинаміки поліетиленового трубопроводу

Для отримання даних вимірювання розроблено програмне забезпечення GMCOM. Програма розроблена в середовищі об'єктно-орієнтованого програмування DELPHI, і є незалежним файлом.

Основними функціями і можливостями програми є:

- можливість посилання запитів на зняття показів як з кожного давача окремо, так і зі всіх давачів одночасно;
- одинарне посилання запиту або циклічне посилання запиту отримання даних з давачів з можливістю встановлення необхідної витримки між запитамі;
- усереднення значень показів з давачів при певній кількості знятих значень;
- калібрування давачів для отримання початкових нульових значень;
- збереження отриманих значень показів у середовищі Microsoft Excell для подальшої обробки результатів;
- можливість підключення додаткових давачів до двох вільних високошвидкісних портів АЦП, що може мати місце в майбутньому;

- можливість роботи на будь-якому сучасному комп'ютері без встановлення додаткових драйверів чи іншого програмного забезпечення.

Основне вікно програми GMCOM наведено на рисунку 3.8.

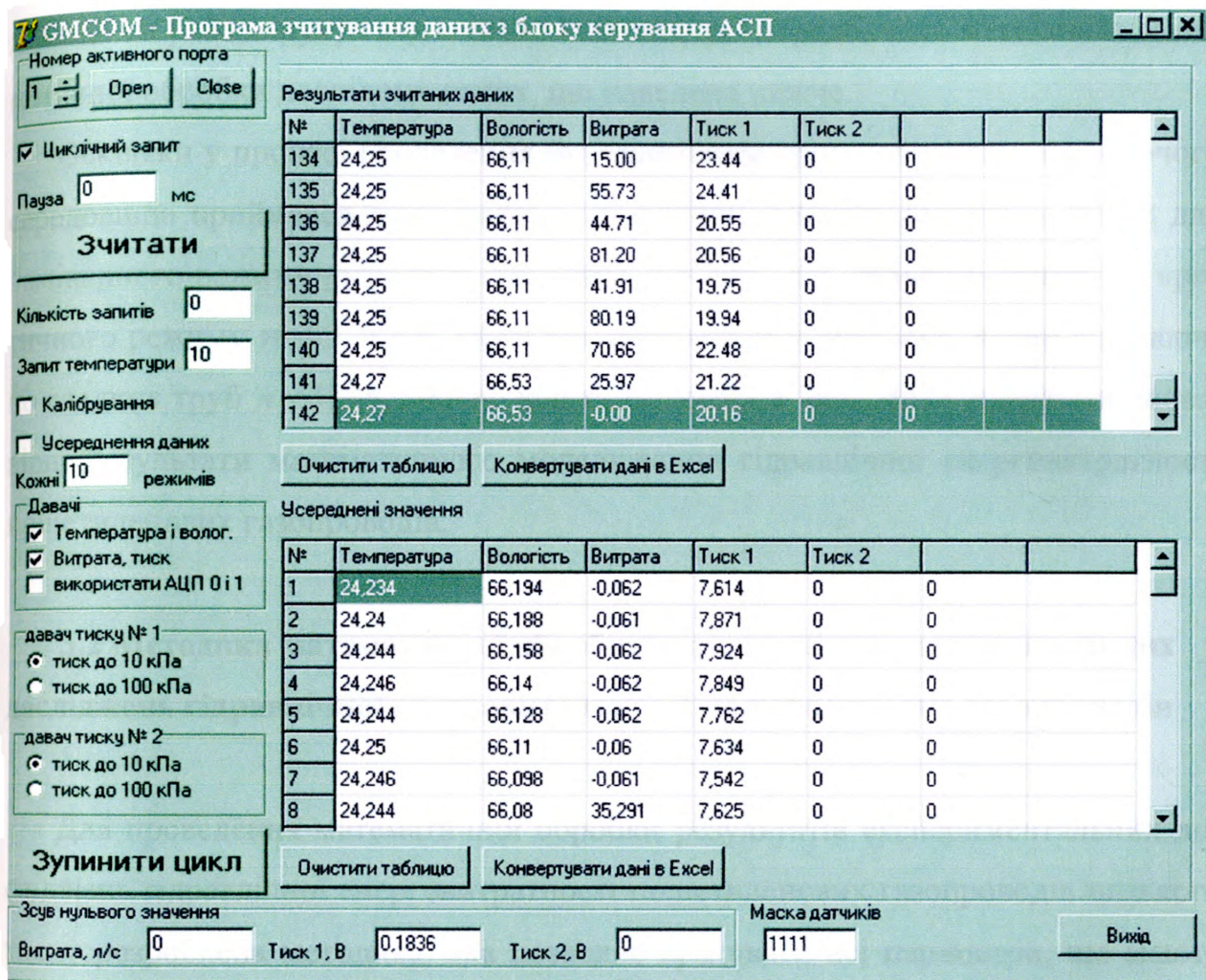


Рисунок 3.8 – Основне вікно програми GMCOM

Для математичної обробки результатів експериментів з метою визначення гідравлічної енерговитратності поліетиленових газових мереж передбачене конвертування даних в середовище Microsoft Excel.

За допомогою описаної вище експериментальної установки протягом 2010-2011 років нами проведені багатосерійні експериментальні дослідження енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску в діапазоні витрат, що відповідає робочим умовам в системах газопостачання населених пунктів.

Аналіз результатів серій дослідів, проведених у різні дні, засвідчив, що початковий тиск у межах, які властиві газопроводам низького тиску, не впливає на вигляд залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленової труби від числа Рейнольдса. Урахування впливу температури та вологості робочого середовища на режим руху газу - число Рейнольдса передбачено методикою математичної обробки дослідних даних, що наведена нижче.

Оскільки у процесі проведення експериментів крок зміни витрати робочого середовища приймався дуже малим, то сумарна вибірка дослідних даних для ламінарного режиму руху газу становить  $n = 329$ , для вузького діапазону критичного режиму  $n = 83$ , а для турбулентного режиму руху газу в зоні гідравлічно гладких труб  $n = 1246$ . Значна кількість дослідів дала змогу одержати достовірні результати математичного моделювання гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів.

### **3.2 Методика математичної обробки результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів**

Для проведення математичної обробки результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску розроблена методика, яка дозволяє врахувати всі параметри, що мають суттєвий вплив на газодинамічні процеси поліетиленового газопроводу. Зокрема враховувався барометричний тиск, вологість та коефіцієнт стисливості робочого середовища. Математичній обробці підлягав кожен із дослідів, що відповідав певному значенню витрати, температури та вологості робочого середовища.

Визначається середнє значення абсолютного тиску газу в модельному газопроводі низького тиску

$$P_{cp} = P_6 + \Delta P, \quad (3.1)$$

де  $P_6$  - величина барометричного тиску за даними вимірювання;

$\Delta P$  - перепад тиску на ділянці газопроводу за результатами вимірювання.

Для урахування реальних властивостей повітря описуємо аналітично залежність коефіцієнта стисливості повітря від температури. Як вихідні дані використовуємо результати експериментів згідно з [105]. У результаті одержуємо, що за тиску, близького до атмосферного, коефіцієнт стисливості повітря так залежить від температури

$$z = 1,0006 + 0,0037t, \quad (3.2)$$

де  $t$  - робоча температура повітря у модельному газопроводі за результатами вимірювання, °С.

Визначаємо густину робочого середовища за умов перекачування модельним газопроводом

$$\rho = \frac{P_{cp}}{RzT}, \quad (3.3)$$

де  $R$  - газова стала повітря,  $R = 287,1$  Дж/(кг·К) [106];

$T$  - термодинамічна температура повітря в модельному газопроводі за результатами вимірювання, К.

Вологість, що знаходиться у робочому середовищі – повітрі, може впливати на величину його в'язкості. Для урахування впливу ступеня вологості повітря на його в'язкість спочатку знаходимо вологовміст за формулою

$$V = \frac{R}{R_{en}} \frac{(P_{nn} - \varphi)}{(P_{cp} - P_{nn}\varphi)}, \quad (3.4)$$

де  $P_{nn}$  - пружність насиченої водяної пари за робочої температури і тиску;

$\varphi$  - відносна вологість повітря за результатами вимірювання;

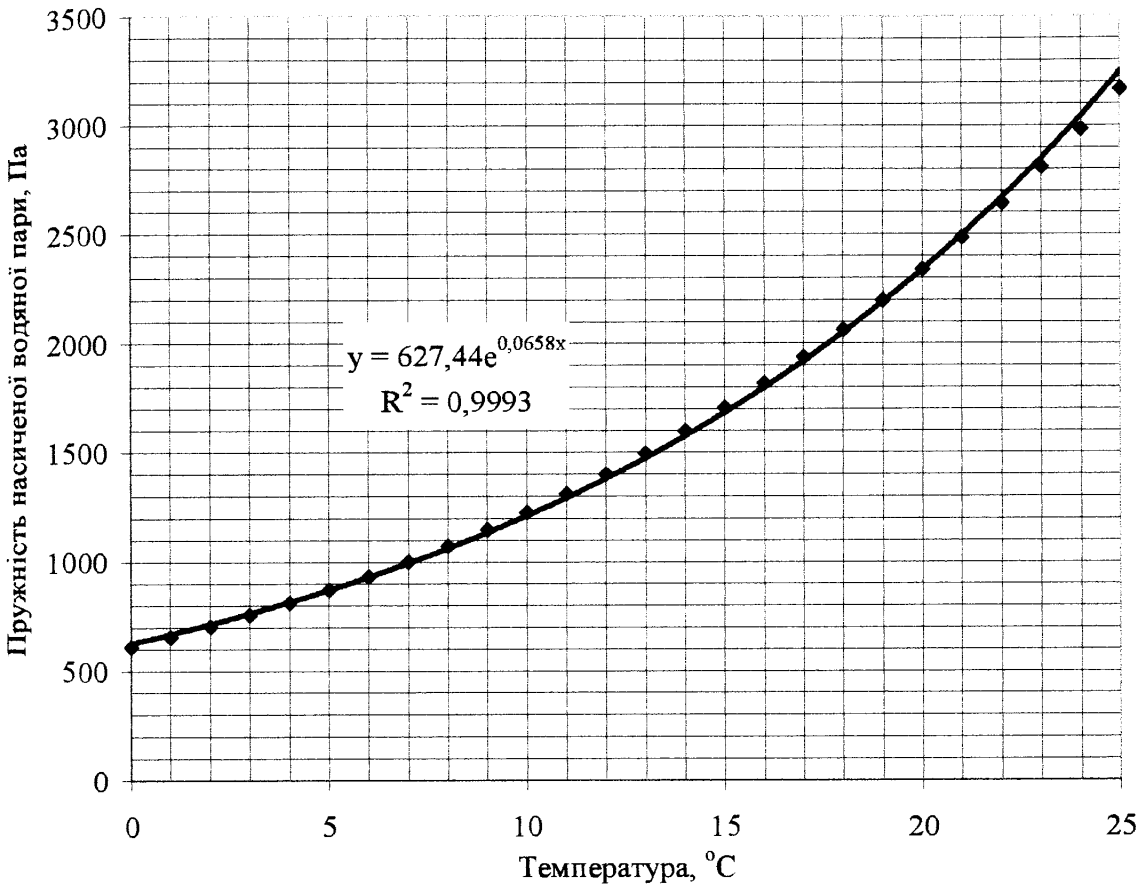
$R_{en}$  - газова стала водяної пари,  $R_{en} = 452,6$  Дж/(кг·К) [105].

Для одержання аналітичного виразу залежності пружності насиченої водяної пари від температури використовуємо експериментальні дані, які наве-

дені в [103]. Виконуємо їх математичну обробку методом найменших квадратів (рисунок 3.9).

Як видно із рисунка 3.9, залежність пружності насиченої водяної пари (Па) від температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) адекватно можна описати експоненціальною залежністю

$$P_{\text{ни}} = 627,44e^{0,0658 \cdot t} \quad (3.5)$$



◆ - дослідні дані; — експоненціальна модель

Рисунок 3.9 – Залежність пружності насиченої водяної пари від температури

Знаходимо масову кількість вологи у  $1 \text{ м}^3$  повітря

$$m_g = V\rho. \quad (3.6)$$

Ураховуючи, що у даному випадку густина водяної пари дорівнює її масі

$$\rho_{вн} = m_{вн}, \quad (3.7)$$

обчислюємо масові частки вологи і сухого повітря у робочому середовищі

$$g_{вн} = \frac{\rho_{вн}}{\rho}, \quad (3.8)$$

$$g_{нов} = 1 - g_{вн}. \quad (3.9)$$

Знаходимо молярну масу робочого середовища за формулою

$$\mu = \frac{1}{\frac{g_{вн}}{\mu_{вн}} + \frac{g_{нов}}{\mu_{нов}}}, \quad (3.10)$$

де  $\mu_{вн}$  - молярна маса водяної пари,  $\mu_{вн} = 18,02$  кг/кмоль [106];

$\mu_{нов}$  - молярна маса повітря,  $\mu_{нов} = 28,96$  кг/кмоль [106].

Переходимо від масових до об'ємних часток компонентів робочого середовища за формулами

$$r_{вн} = g_{вн} \frac{\mu}{\mu_{вн}}, \quad (3.11)$$

$$r_{нов} = 1 - r_{вн}. \quad (3.12)$$

Для урахування впливу робочої температури на динамічну в'язкість кожного компонента робочого середовища використовуємо формулу Сатерленда

$$\eta_{вн} = \eta_{внн} \frac{(273 + C_{вн})}{(T + C_{вн})} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5}, \quad (3.13)$$

$$\eta_{нов} = \eta_{новн} \frac{(273 + C_{нов})}{(T + C_{нов})} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5}, \quad (3.14)$$

де  $C_{вн}$  - стала Сатерленда для водяної пари,  $C_{вн} = 673$  [105];



$C_{нов}$  - стала Сатерланда для повітря,  $C_{нов} = 123,6$  [105];

$\eta_{внн}$  - динамічна в'язкість водяної пари за нормальних умов,

$$\eta_{внн} = 9,04 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} [105];$$

$\eta_{новн}$  - динамічна в'язкість повітря за нормальних умов,

$$\eta_{новн} = 17,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} [105].$$

Динамічну в'язкість повітря з урахуванням впливу ступеня його вологості визначаємо за формулою

$$\eta = \frac{r_{вн} \eta_{вн} \sqrt{\mu_{вн} T_{крвн}} + r_{нов} \eta_{нов} \sqrt{\mu_{нов} T_{крнов}}}{r_{вн} \sqrt{\mu_{вн} T_{крвн}} + r_{нов} \sqrt{\mu_{нов} T_{крнов}}}, \quad (3.15)$$

де  $T_{крвн}$  - критична температура водяної пари,  $T_{крвн} = 647,3$  К [106];

$T_{крнов}$  - критична температура повітря,  $T_{крнов} = 133,8$  К [106].

Обчислюємо коефіцієнт кінематичної в'язкості робочого середовища

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (3.16)$$

Об'ємну витрату робочого середовища зводимо до умов перекачування у модельному газопроводі за формулою

$$Q = Q_n \frac{P_n T z}{P_{cp} T_n z_n}, \quad (3.17)$$

де  $Q_n$  - об'ємна витрата робочого середовища за результатами вимірів;

$P_n$  - тиск, що відповідає нормальним умовам,  $P_n = 101325$  Па;

$T_n$  - температура, що відповідає нормальним умовам,  $T_n = 273$  К;

$z_n$  - коефіцієнт стисливості повітря, що відповідає нормальним умовам,

$z_n = 1,0006$ .

Обчислюємо число Рейнольдса за формулою

$$Re = \frac{4Q}{\pi D v}, \quad (3.18)$$

де  $D$  - внутрішній діаметр модельного газопроводу,  $D = 26 \text{ мм} = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

Використовуючи рівняння Дарсі-Вейсбаха, знаходимо дослідне значення коефіцієнта гідравлічного опору

$$\lambda = \frac{\pi^2 D^5 \cdot \Delta P}{8 Q^2 L \rho}, \quad (3.19)$$

де  $L$  - довжина модельного газопроводу,  $L = 63,65 \text{ м}$ .

### 3.3 Методика розробки математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького тиску

Результатами математичної обробки результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів є графічні залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу залежно від числа Рейнольдса. Графічні залежності необхідно описати аналітичними виразами.

Насамперед необхідно обґрунтувати вигляд регресійних моделей. З урахуванням специфіки газодинамічних процесів руху газу в газопроводах низького тиску, можна прогнозувати, що коефіцієнт гідравлічного опору є степеневою функцією числа Рейнольдса

$$\lambda = a \cdot Re^b, \quad (3.20)$$

де  $a, b$  - коефіцієнти, які залежать від режиму руху газу в газопроводі.

Уведемо позначення

$$x = Re, \quad y = \lambda. \quad (3.21)$$

Тому поле кореляції будемо апроксимувати залежністю

$$y = a \cdot x^b . \quad (3.22)$$

Для одержання математичних виразів для коефіцієнтів регресії методом найменших квадратів виконаємо логарифмування правої та лівої частини рівняння (3.22)

$$\ln y = \ln a + b \cdot \ln x . \quad (3.23)$$

Записуємо рівняння, яке необхідно дослідити на мінімум

$$F = \sum_{i=1}^n (\ln y_i - \ln a - b \ln x_i)^2 , \quad (3.24)$$

де  $n$  - кількість вимірювань;

$x_i$  - значення аргументу функції для  $i$ -ого вимірювання;

$y_i$  - значення функції для  $i$ -ого вимірювання.

Знаходимо похідні

$$\frac{\partial F}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n \frac{(\ln y_i - \ln a - \ln x_i)}{a} , \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (\ln y_i - \ln a - \ln x_i) \ln x_i . \quad (3.26)$$

Прирівнюємо одержані похідні до нуля, в результаті одержуємо рівняння для визначення коефіцієнтів регресійної моделі

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \ln y_i - \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln y_i}{n \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \ln x_i - \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i} , \quad (3.27)$$

$$a = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln y_i - b \sum_{i=1}^n \ln x_i}{n} \right]. \quad (3.28)$$

Для кожної серії дослідів визначалася величина дисперсії адекватності  $D_a$  і стандарт вибірки  $s$  за формулами [107]

$$D_a = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{im})^2, \quad (3.29)$$

$$s = \sqrt{D_a}, \quad (3.30)$$

де  $y_{im}$  - значення функції для  $i$ -ого вимірювання, одержане за моделлю регресії.

Критерієм близькості кореляційної залежності між  $x$  і  $y$  до функціональної залежності (3.20) є коефіцієнт кореляції  $R$ , який визначає ступінь зв'язку параметрів  $x$  і  $y$

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln x_i \ln y_i - \sum_{i=1}^n \ln x_i \sum_{i=1}^n \ln y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n \ln x_i \ln x_i - \left( \sum_{i=1}^n \ln x_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n \ln y_i \ln y_i - \left( \sum_{i=1}^n \ln y_i \right)^2 \right]}}. \quad (3.31)$$

Для знаходження відсотка розкиду функції  $y$  відносно її середнього значення, що визначається змінюваністю чисельника  $x$ , необхідно обчислити коефіцієнт детермінації

$$k_{\partial} = R^2. \quad (3.32)$$

Для підвищення адекватності розроблених регресійних моделей серед даних експерименту необхідно виявити ті, які є помилковими. Для цього кожному пункту вибірки слід перевірити на виконання умови [107]

$$|y_i - y_{im}| \leq s \left[ t^2(\sqrt[n]{p_o}, n) + \frac{1}{n} t^2(p_o, n) \right]^{0.5}, \quad (3.33)$$

де  $t(\sqrt[n]{p_o}, n)$ ,  $t(p_o, n)$  - коефіцієнти Ст'юдента, що беруться із таблиць [104];  
 $p_o$  - довірча імовірність.

Експериментальні точки, для яких умова (3.33) не виконується, вважаються грубо помилковими і їх необхідно відкинути. Оскільки на початку розрахунків величина відхилення розрахованих і експериментальних даних невідома, то на першому етапі розрахунків коефіцієнти моделі регресії визначаються за всією наявною вибіркою експериментальних даних. Знаходяться коефіцієнт кореляції та коефіцієнт детермінації. На другому етапі розрахунків програма перевіряє виконання умови (3.33) для кожної точки вимірювань. Точки, для яких зазначена умова не виконується, вилучають із множини експериментальних даних. Після цього повторно визначаються коефіцієнти моделі регресії за скоригованою вибіркою експериментальних даних. Знаходяться скориговані коефіцієнт кореляції та коефіцієнт детермінації. Описаний алгоритм реалізований нами у програмі «POL», яка дає змогу для будь-якої вибірки експериментальних даних визначити коефіцієнти моделі регресії і побудувати відповідні графічні та аналітичні залежності.

### **3.4 Аналіз результатів математичного моделювання гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску**

Як приклад на рисунках 3.10 та 3.10 наведено результати експериментальних досліджень залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу від числа Рейнольдса для двох серій експериментів. Тут же зображені результати математичного моделювання одержаних результатів [108,109,110].

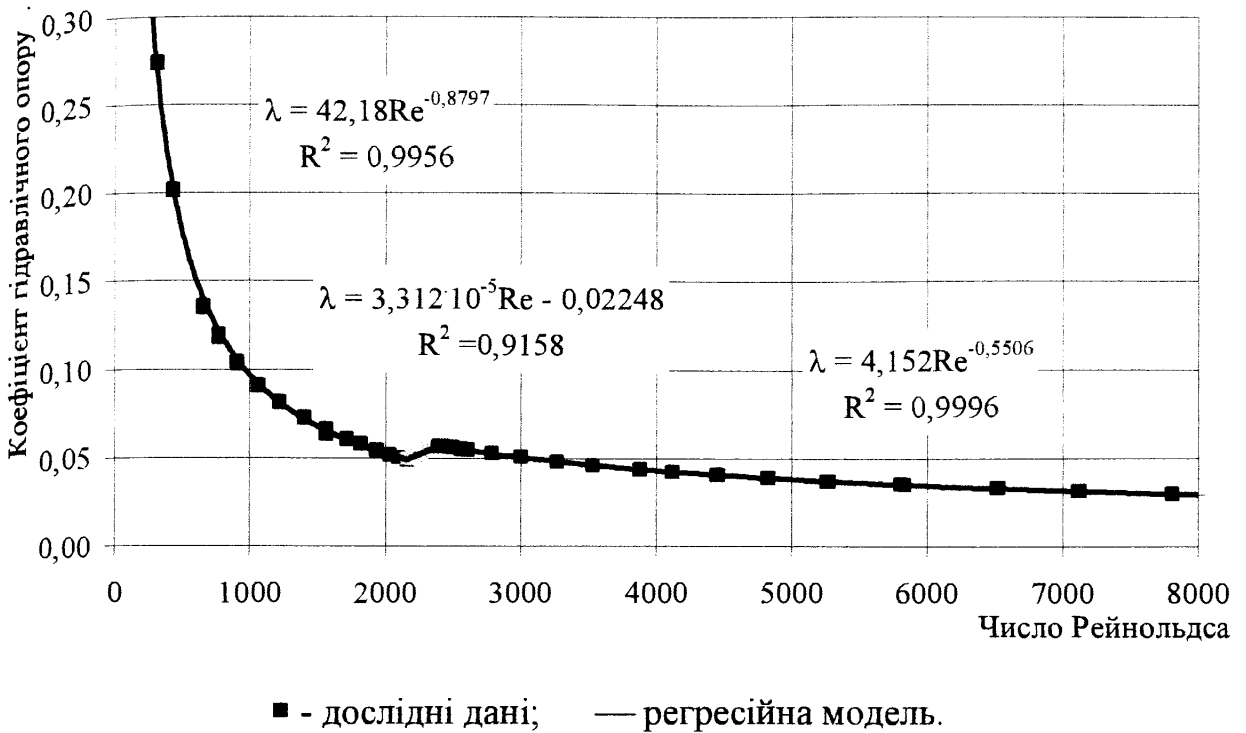


Рисунок 3.10 – Результати математичного моделювання залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса (за даними дослідів 02.11.2010 р.)

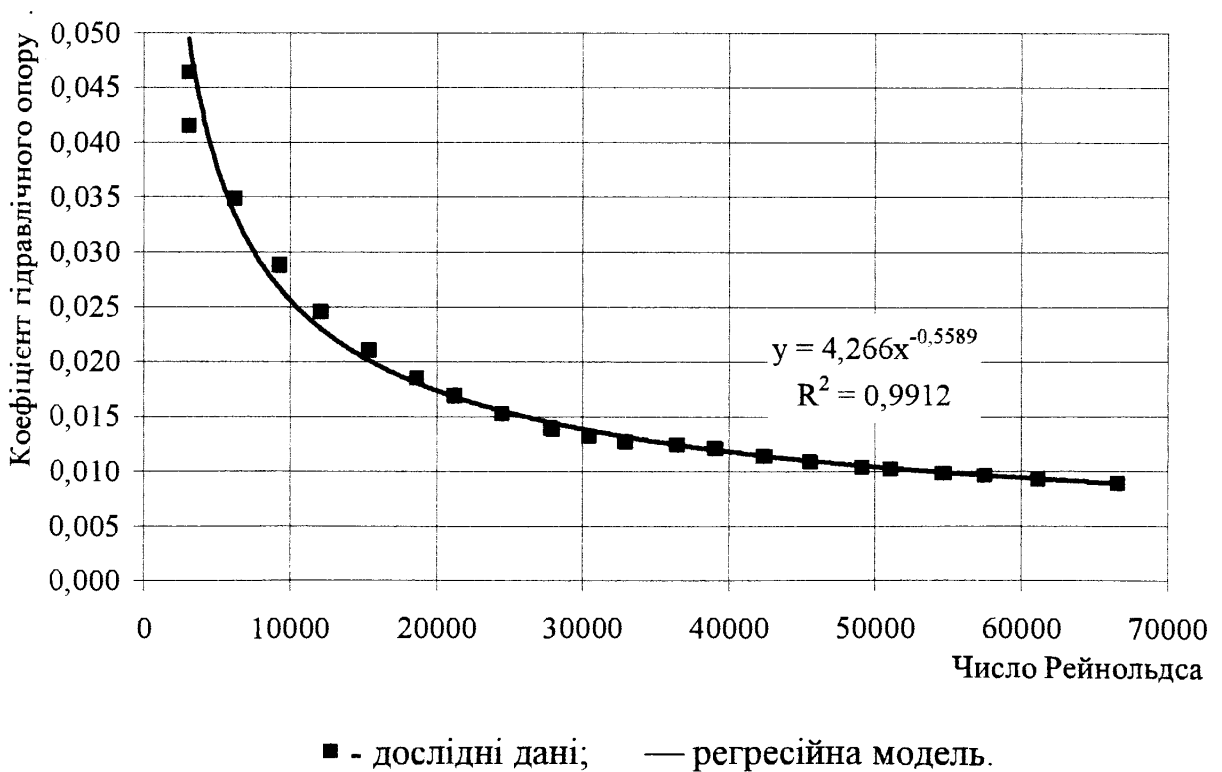


Рисунок 3.11 – Результати математичного моделювання залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса (турбулентний режим, за даними дослідів 21.10.2011 р.)

За результатами обробки всієї множини даних багатосерійних експериментів нами одержані узагальнені математичні моделі залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса для ламінарного, критичного та турбулентного режиму руху газу в зоні гідравлічного гладких труб (рисунок 3.12). Окрім того, уточнені критичне та перехідне числа Рейнольдса, які розділяють режими руху газу [109,110].

Виявлено, що перехід від ламінарного до критичного (перехідного) режиму руху газу в поліетиленовому газопроводі низького тиску відповідає критичному числу Рейнольдса

$$Re_{k1} = 2150.$$

Перехід від критичного (перехідного) до турбулентного режиму руху газу відповідає критичному числу Рейнольдса

$$Re_{k21} = 2400.$$

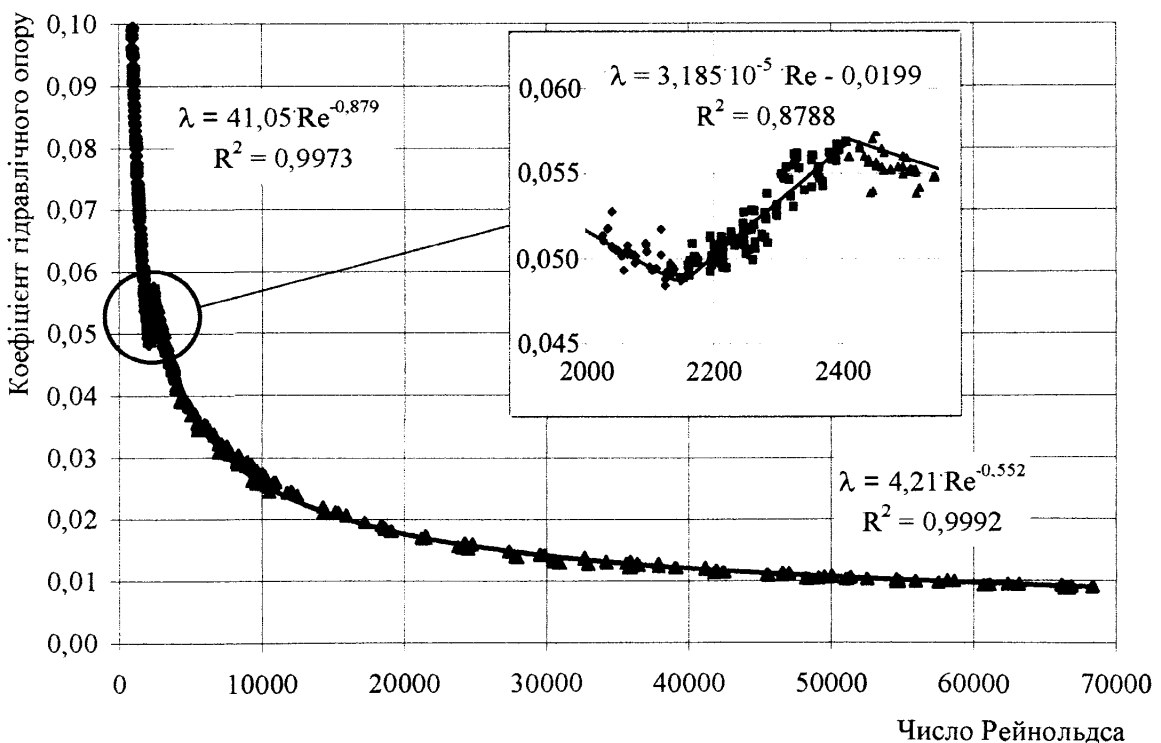


Рисунок 3.12 – Узагальнені результати математичного моделювання залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса

Із рисунка 3.12 випливає, що коефіцієнт гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску може бути розрахований за такими формулами:

- для ламінарного режиму руху  $Re < Re_k = 2150$

$$\lambda = 41,05 \cdot Re^{0,879}, \quad (3.34)$$

- для критичного режиму руху  $Re_k < Re < Re_{m1} = 2400$

$$\lambda = 3,185 \cdot 10^{-5} Re - 0,0199, \quad (3.35)$$

- для турбулентного режиму руху в зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму

$$\lambda = 4,21 \cdot Re^{-0,552}. \quad (3.36)$$

Всі отримані математичні моделі для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів мають високий ступінь вірогідності апроксимації, що свідчить про їх достовірність.

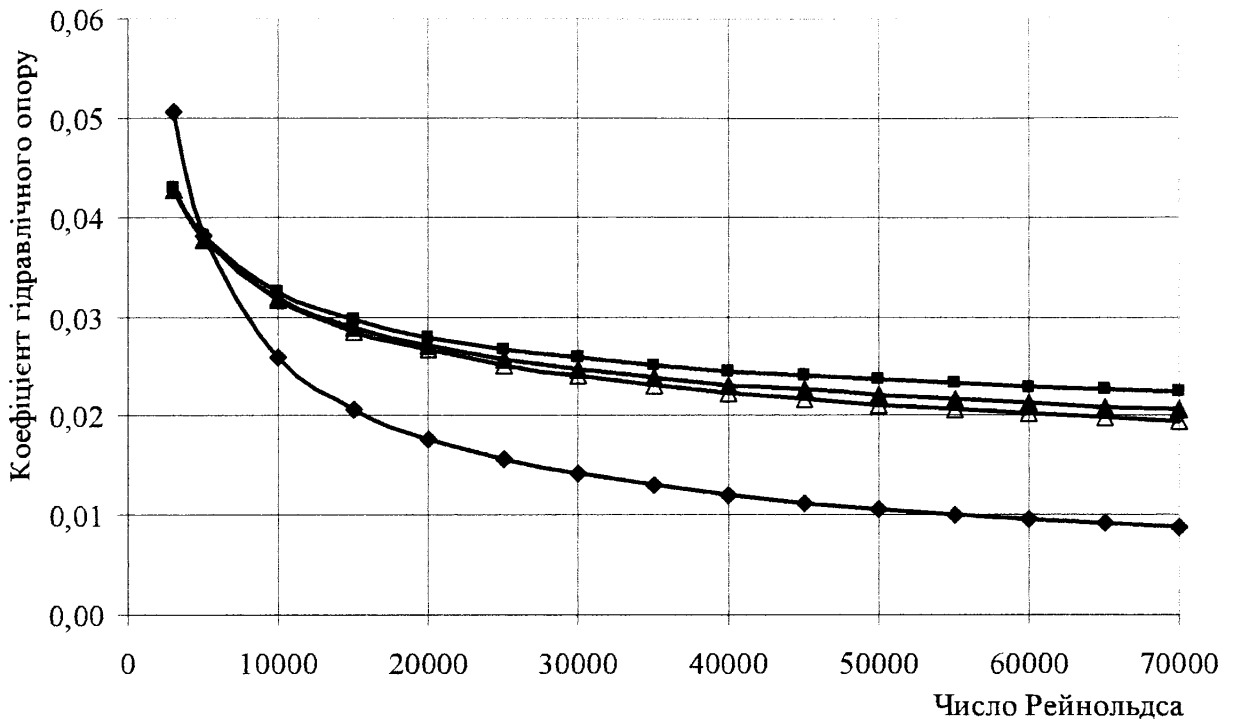
Порівняємо між собою фактичну за результатами експериментів та розраховану за наявними на сьогодні методами енерговитратність поліетиленових газопроводів. Зовнішні газопроводи низького тиску систем газопостачання населених пунктів переважно працюють в зоні гідравлічного гладких труб турбулентного режиму. Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору у зазначених умовах чинні нормативні документи передбачають використання степеневі моделі Альтшуля (2.1).

Абсолютну еквівалентну шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленового газопроводу приймаємо рівною  $k_e = 0,002$  см згідно з вимогами вітчизняного нормативного документа [92] та  $k_e = 0,0007$  см згідно з вимогами відповідного нормативного документа Російської Федерації СП 42-101-2003 [97].

У класичній гідродинаміці для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору в зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму широко використовується емпірична формула Блазіуса (1.9).



Результати розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору модельного поліетиленового газопроводу низького тиску за одержаними нами математичними моделями та за загальноприйнятими формулами для різних значень витрат газу за турбулентного режиму руху газу в зоні гідравлічних гладких труб наведено на рисунку 3.13.



◆ - дослідні значення коефіцієнта гідравлічного опору ; ■ - теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, обчислене за формулою Альтшуля за  $k_e=0,002$  см; ▲ - теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, обчислене за формулою Альтшуля за  $k_e=0,0007$  см; ▼ - теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору, обчислене за формулою Блазіуса

Рисунок 3.13– Порівняння гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску за наявними та пропонованою методиками

Рисунок 3.13 засвідчив, що формули, наведені в чинних нормативних документах, дають значення коефіцієнта гідравлічного опору, які суттєво різняться від фактичних даних енерговитратності поліетиленових газопроводів, одержаних в результаті експериментальних досліджень. Відносна різниця результатів

залежить від режиму руху газу і змінюється від  $\delta = 0 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 5000$  до  $\delta = 60 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 70000$ .

Аналогічна картина спостерігається у разі використання формули Блазіуса для визначення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького тиску. Відносна різниця розрахованих і фактичних значень коефіцієнта гідравлічного опору змінюється від  $\delta = 0 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 5000$  до  $\delta = 54 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 70000$ .

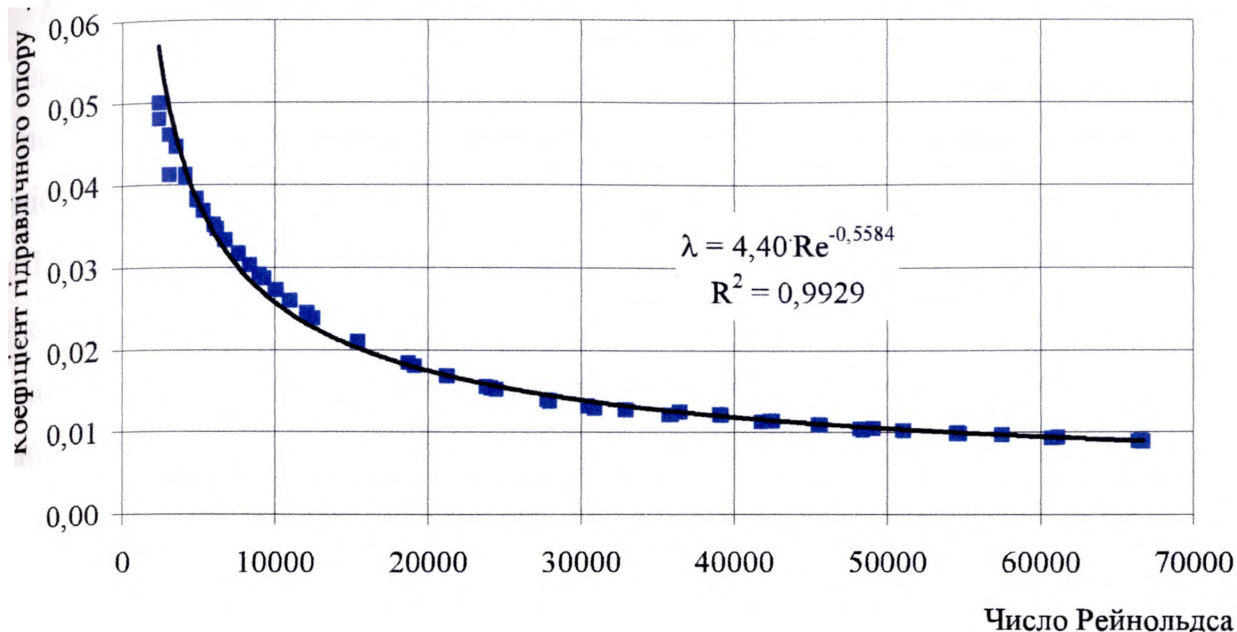
Таким чином, експерименти засвідчили абсолютну непридатність існуючих моделей коефіцієнта гідравлічного опору для визначення втрат тиску при перекачуванні природного газу в поліетиленових газових мережах низького тиску.

Слід відзначити, що окрім експериментів на низькому тиску нами проведено кілька серій експериментів при середньому тиску. Витрати робочого середовища модельного газопроводу відповідали умовам завантаження газових мереж середнього тиску сільських населених пунктів України, що відповідають діапазону чисел Рейнольдса 30000-70000. Одержані результати наведені на рисунку 3.14.

Як слід було чекати, одержані моделі для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів середнього тиску практично не різняться від тих, що знайдені для поліетиленових газопроводів низького тиску.

Використання одержаних нами математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького і середнього тиску замість рекомендованих чинними нормативними документами і класичною гідромеханікою дає змогу значно підвищити точність проектних та експлуатаційних розрахунків газових мереж населених пунктів.

Таким чином, нами виявлено, що при русі газу в поліетиленовій трубі низького і середнього тиску з внутрішнім діаметром 26 мм гідравлічно гладка зона турбулентного режиму зберігається для діапазону чисел Рейнольдса від 2400 до 70000. Цього слід було чекати ураховуючи малу шорсткість поліетиленових газових труб.



■ - дослідні дані; — регресійна модель.

Рисунок 3.14 – Узагальнені результати математичного моделювання залежності коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу середнього тиску від числа Рейнольдса

Згідно з вимогами вітчизняного нормативного документа [92] абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленового газопроводу рівна  $k_e = 0,002$  см. Згідно з вимогами відповідного нормативного документа Російської Федерації СП 42-101-2003 [97] пропонується зовсім інше значення  $k_e = 0,0007$  см. Таке розходження значень свідчить, що достовірна величина шорсткості поліетиленових газових труб невідома широкому загалу учених.

У цьому зв'язку велике значення має робота [111], яка дає можливість внести ясність у дане питання. Групою вчених з Бельгії та Голландії в 1997 році за допомогою сучасного атомно-силового мікроскопа NanoScope III проведені дослідження структури поверхні поліетиленових газопроводів високої щільності, виготовлених методом екструзії (витискуванням) з подальшим охолодженням. Така технологія якраз використовується в Україні при виробництві поліетиленових газових труб.

Метою дослідження було виявлення закономірностей впливу інтенсивності охолодження дослідного зразка поліетилену високої щільності на структуру його поверхні. За результатами дослідження одержані унікальні знімки поверхні поліетиленового зразка.

На рисунку 3.15 наведено знімок поверхні зразка поліетиленового матеріалу, одержаний за допомогою атомно-силового мікроскопа NanoScope III. Темні області відповідають впадинам на поверхні, світлі області – підвищенням. Для глибшого аналізу особливостей структури поверхні зразка поліетиленового матеріалу ними розроблено програмне забезпечення ScanProf, яке дає змогу, використовуючи знімки атомно-силового мікроскопа, побудувати профіль поверхні в довільному перерізі. Приклад одержаних результатів для перерізу 4-4 наведений на рисунку 3.16. По вертикалі відкладена висота виступів у нанометрах, по горизонталі – довжина зразка в мікрометрах.

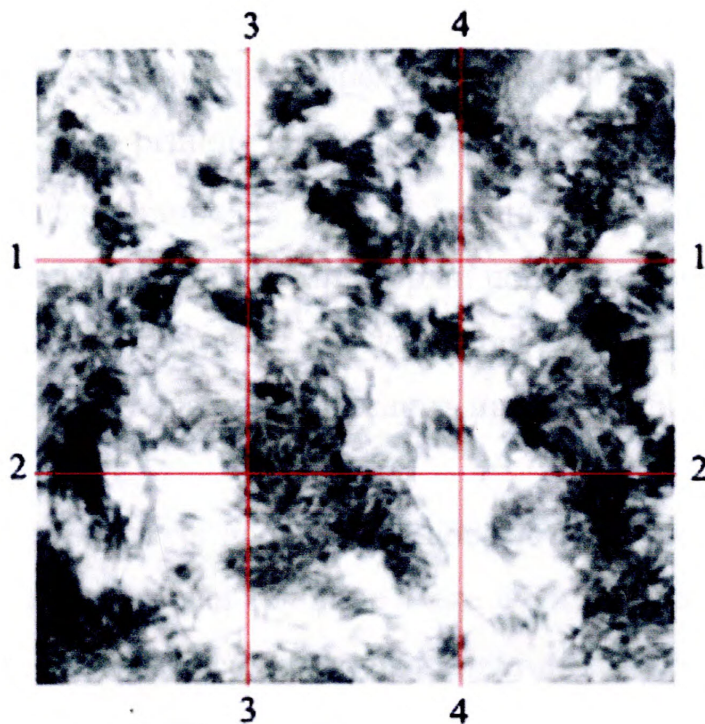


Рисунок 3.15 – Знімок поверхні зразка поліетиленового матеріалу, зроблений атомно-силовим мікроскопом NanoScope III

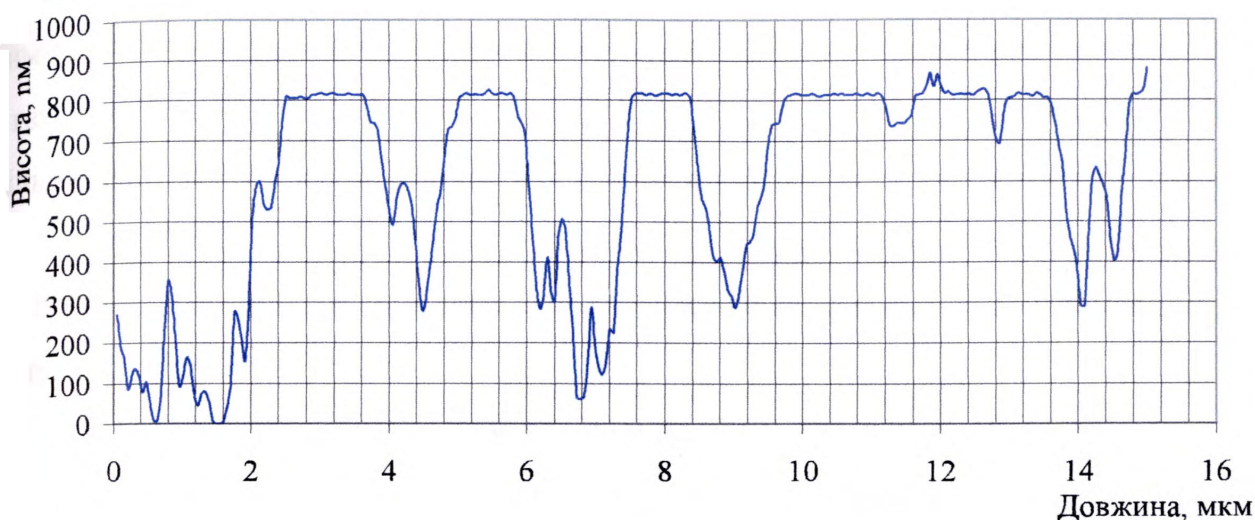


Рисунок 3.16 – Структура поверхні зразка поліетилену, одержаного за технологією, що відповідає технології виготовлення поліетиленових газових труб України

Аналіз інтерпретації результатів досліджень групи бельгійських вчених засвідчив, що максимальна різниця висот профілю структури поверхні зразка поліетиленового матеріалу становила  $880 \cdot 10^{-9}$  нанометрів. Закономірності зміни висоти та форми виступів шорсткості поверхні поліетиленового матеріалу якісно відрізняються від характеру змін виступів шорсткості сталевих труб. В структурі поліетиленового матеріалу переважають практично рівні площадки та заокруглені виступи.

Відповідно до результатів досліджень, абсолютна шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленової газової труби не може бути більша за 900 нанометрів, що відповідає  $0,9 \cdot 10^{-4}$  см. Абсолютна еквівалентна шорсткість як усереднена величина буде мати ще менше значення.

Отже виявлено, що значення абсолютної еквівалентної шорсткості поліетиленових газопроводів, яке рекомендується чинним нормативним документом, більш, ніж у 20 разів перевищує фактичне значення.

Малі значення абсолютної, а відповідно і відносної шорсткості внутрішньої поверхні поліетиленових труб підтверджують правомірність результатів експериментальних досліджень, які виявили наявність зони гідравлічно гладких труб в газових мережах низького і середнього тиску для чисел Рейнольдса до 70000. Більше того, аналіз номограм Моуді для розрахунку коефіцієнтів опору шорстких труб [59,99,100,101] дає змогу прогнозувати, що гідравлічна гладкість поліетиленових труб низького і середнього тиску буде збережена при числах Рейнольдса до 300000-400000.

Рисунок 3.16 дав змогу виявити особливості мікроструктури внутрішньої поверхні поліетиленових труб, а саме: наявність практично плоских площадок, заокругленість виступів, мала кількість гострих зубців. Ця структура дуже відрізняється від мікроструктури внутрішньої поверхні сталевих труб. Зазначена відмінність спричинила особливості взаємодії потоку газу з внутрішньою стінкою поліетиленової труби, що знайшло відображення у особливостях прояву законів тертя та математичних моделях, що їх описують.

На основі результатів експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів розроблена уточнена методика розрахунку газових мереж низького тиску, яка передбачає використання наведених вище математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору.

Методика і оригінальне програмне забезпечення представлені у розділі 4 дисертації.

### **3.5 Висновки по розділу 3**

Експериментальні дослідження газодинамічних процесів руху газу в поліетиленових газових трубах виявили нові закономірності, а саме:

Знайдені числа Рейнольдса, які розділяють різні режими руху газу в поліетиленових газопроводах, та одержані регресійні моделі для опису законів тертя. Для чисел Рейнольдса, менших за 2150, має місце ламінарний режим руху, за якого степінь при числі Рейнольдса в узагальненій моделі Лейбензона стано-

вить мінус 0,879. Для чисел Рейнольдса від 2150 до 2400 має місце критичний або перехідний режим руху газу, який можна описати лінійним законом зміни гідравлічного опору. Для чисел від 2400 до 70000 має місце турбулентний режим руху газу, за якого степінь при числі Рейнольдса становить мінус 0,552.

Досліджені особливості мікроструктури внутрішнього поверхні поліетиленових труб і суттєві відмінності від мікроструктури внутрішньої поверхні сталевих труб. Зазначена відмінність на нашу думку спричинює особливості взаємодії потоку газу з внутрішньою стінкою поліетиленової труби, що знайшло відображення у особливостях прояву законів тертя при русі газу та математичних моделях, що їх описують.

Експериментальні дослідження засвідчили абсолютну непридатність існуючих моделей коефіцієнта гідравлічного опору для визначення втрат тиску при перекачуванні природного газу в поліетиленових газових мережах низького і середнього тиску. Дослідні коефіцієнти гідравлічного опору поліетиленових газопроводів суттєво різняться від значень, одержаних за загальноприйнятими формулами газової динаміки для сталевих труб. Для степеневі формули Альтшуля відносна різниця результатів залежить від режиму руху газу і змінюється від  $\delta = 0 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 5000$  до  $\delta = 60 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 70000$ . Для формули Блазіуса відносна різниця розрахованих і фактичних значень коефіцієнта гідравлічного опору змінюється від  $\delta = 0 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 5000$  до  $\delta = -54 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 70000$ .

Використання одержаних математичних моделей для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газопроводів низького і середнього тиску замість рекомендованих чинними нормативними документами і класичною гідромеханікою дає змогу значно підвищити точність проектних та експлуатаційних розрахунків газових мереж населених пунктів.

## РОЗДІЛ 4

### РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Технологічне проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів вимагають надійного прогнозування пропускної здатності та енерговитратності газових мереж високого, середнього та низького тиску. Враховуючи сучасні тенденції щодо ускладнення структури газових мереж, широкого використання поліетиленових газопроводів, погіршення умов прокладання підземних та надземних газопроводів, забезпечення достовірних результатів гідравлічних розрахунків є актуальним питанням. У зв'язку з цим важливе практичне значення мають розробка достовірних методів гідравлічних розрахунків газових мереж, а також їх реалізація у програмному забезпеченні. Одним із шляхів удосконалення методів розрахунку систем газопостачання є використання більш точних математичних моделей.

Як зазначалось у розділі 1, методики гідравлічного розрахунку газових мереж, які рекомендовані чинними нормативними документами, базуються на низці припущень, основні з яких такі: фізичні властивості газу беруться за нормальних умов, витрата газу зводиться до нормальних умов, температура газу приймається рівною 0 °С, коефіцієнт гідравлічного опору при турбулентному режимі незалежно від зони тертя і матеріалу труб обчислюється за формулою Альтшуля, не враховуються втрати енергії на подолання різниці геодезичних позначок точок траси.

Зазначені припущення погіршують точність прогнозування пропускної здатності та енерговитратності газових мереж, що здорожує проекти газифікації населених пунктів, ускладнює експлуатацію системи газопостачання, а у деяких випадках може призвести до виникнення аварійних ситуацій.

У розділі 2 дисертації доведена необхідність урахування профілю траси на пропускну здатність і загальну енерговитратність газових мереж низького тиску довільної структури та запропоновані математичні моделі для урахування



зазначеного чинника. Одержані результати стосуються в однаковій мірі як сталевих, так і поліетиленових газових мереж.

У розділі 3 дисертації шляхом обробки дослідних даних одержані математичні моделі для коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газових мереж низького і середнього тиску для різних режимів руху у повному діапазоні зміни витрат газу.

Для практичного використання одержані математичні моделі доцільно закласти в уточнені методики гідравлічного розрахунку газових мереж. Це дасть можливість підвищити якість виконання проектних та експлуатаційних розрахунків систем газопостачання населених пунктів.

#### **4.1 Уточнена методика гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням результатів експериментальних досліджень їх гідравлічної енерговитратності**

На сьогодні переважна більшість газових мереж низького і середнього тиску проектується з використанням поліетиленових труб. Це визначає особливу важливість розробки уточненої методики гідравлічного розрахунку поліетиленових газопроводів.

Методика, що пропонується, базується на результатах експериментальних досліджень енерговитратності поліетиленових газопроводів і не передбачає уведення зазначених вище припущень.

Враховуючи, що газові мережі низького тиску характеризуються невеликими перепадами тиску, визначається середній абсолютний тиск газу в газовій мережі за формулою

$$P_{cp} = P_n + 0,5(P_n + P_k), \quad (4.1)$$

де  $P_n$  - значення атмосферного тиску;

$P_n, P_k$  - надлишковий тиск на початку газової мережі і біля споживачів.

Ураховуються реальні властивості газу, для цього обчислюється середнє значення коефіцієнта стисливості газу в газовій мережі за формулою

$$z_{cp} = 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}, \quad (4.2)$$

де  $T_{cp}$  - середня температура газу в газовій мережі, К;

$\Delta$  - відносна густина природного газу за повітрям.

Із рівняння стану реального газу знаходиться густина природного газу за умов газових мереж

$$\rho = \frac{P_{cp}}{z_{cp} R T_{cp}}, \quad (4.3)$$

де  $R$  - газова стала природного газу.

Як свідчать результати досліджень, в умовах газових мереж впливом тиску на в'язкість природного газу можна знехтувати. Залежність динамічної в'язкості компонентів природного газу від температури адекватно описує формула Сатерленда. Використовуючи дану залежність, проводимо перерахунок динамічної в'язкості всіх компонентів природного газу

$$\eta_j = \eta_{nj} \frac{273 + C_j}{T_{cp} + C_j} \left( \frac{T_{cp}}{273} \right)^{1,5}, \quad (4.4)$$

де  $C_j$  - стала Сатерленда для  $j$ -ого компонента природного газу.

Визначається динамічна в'язкість природного газу за умов газових мереж

$$\eta \approx \sum_{j=1}^n \eta_j r_j, \quad (4.5)$$

де  $r_j$  - об'ємна частка  $j$ -го компонента природного газу.

Обчислюється кінематична в'язкість природного газу за умов газових мереж низького тиску

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (4.6)$$

Витрата газу на ділянці зводиться до робочих умов в газових мережах

$$Q_i = Q_{ni} \frac{P_n T_{cp} z_{cp}}{P_{cp} T_n}, \quad (4.7)$$

де  $Q_{ni}$  - витрата газу за нормальних умов для  $i$ -ої ділянки газової мережі;

$T_n$  - температура, що відповідає нормальним умовам,  $T_n = 273$  К.

Визначається число Рейнольдса на ділянці газопроводу низького тиску за формулою

$$Re_i = \frac{4Q_i}{\pi D_i \nu_i}, \quad (4.8)$$

де  $D_i$  - внутрішній діаметр ділянки газопроводу.

Залежно від співвідношення між розрахованим значенням числа Рейнольда та запропонованими критичним і перехідним числами Рейнольдса із формул (3.34)-(3.36) вибирається відповідна математична модель для визначення коефіцієнта гідравлічного опору  $i$ -ої ділянки поліетиленового газопроводу низького тиску  $\lambda_i$ .

Обчислюється уточнені втрати тиску від тертя на ділянці газової мережі низького тиску

$$\Delta P_i = \lambda_i \frac{l_i}{D_i} \frac{w_i^2}{2} \rho, \quad (4.9)$$

де  $l_i$  - геометрична довжина ділянки газопроводу.

Додатковий перепад тиску на ділянці, зумовлений впливом профілю траси, спочатку визначають на спрощеною лінійною залежністю

$$\Delta P_{gc_i} = g(h_{ni} - h_{ki})(\rho_{повн} - \rho_n), \quad (4.10)$$

де  $h_{n_i}, h_{к_i}$  - геодезична позначка початку і кінця ділянки відповідно.

Обчислюються значення коефіцієнтів математичної моделі

$$A_i = -5,78 \cdot 10^{-5} (h_{n_i} - h_{к_i}) - 0,313; \quad (4.11)$$

$$B_i = 9,336 \cdot 10^{-3} (h_{n_i} - h_{к_i}) - 4,280. \quad (4.12)$$

Знаходиться величина уточнення зміни гідростатичного тиску на ділянці газової мережі низького тиску як функція різниці геодезичних позначок початку і кінця ділянки та середньої температури газу

$$\delta_i = A_i \cdot t + B_i, \quad (4.13)$$

Уточнюємо перепад тиску на ділянці, зумовлений впливом профілю траси

$$\Delta P_{гсб_i} = (1 + \delta_i) \cdot \Delta P_{гс_i}. \quad (4.14)$$

На основі уточненої методики гідравлічного розрахунку ділянок газової мережі низького тиску та методології проведення гідравлічних розрахунків газових мереж населених пунктів кільцевої структури, нами розроблене програмне забезпечення GMNU. Дана програма реалізована на мові програмування Visual Basic в середовищі Microsoft Excell (рисунки 4.1 - 4.3) Програма за структурою розгалужена, циклічна, у ній реалізується метод послідовних наближень.

Розроблене програмне забезпечення дає змогу проводити гідравлічний розрахунок газової мережі низького тиску кільцевої структури довільної конфігурації як за нормативною, так і за уточненою методикою. Це дає змогу використовувати даний програмний продукт для проектних та експлуатаційних розрахунків систем газопостачання населених пунктів.

Для прикладу використаємо програму GMNU для проектного розрахунку кільцевої газової мережі низького тиску, розрахункова схема якої зображена на рисунку 4.4. Це система вуличних газопроводів сільського населеного пункту.

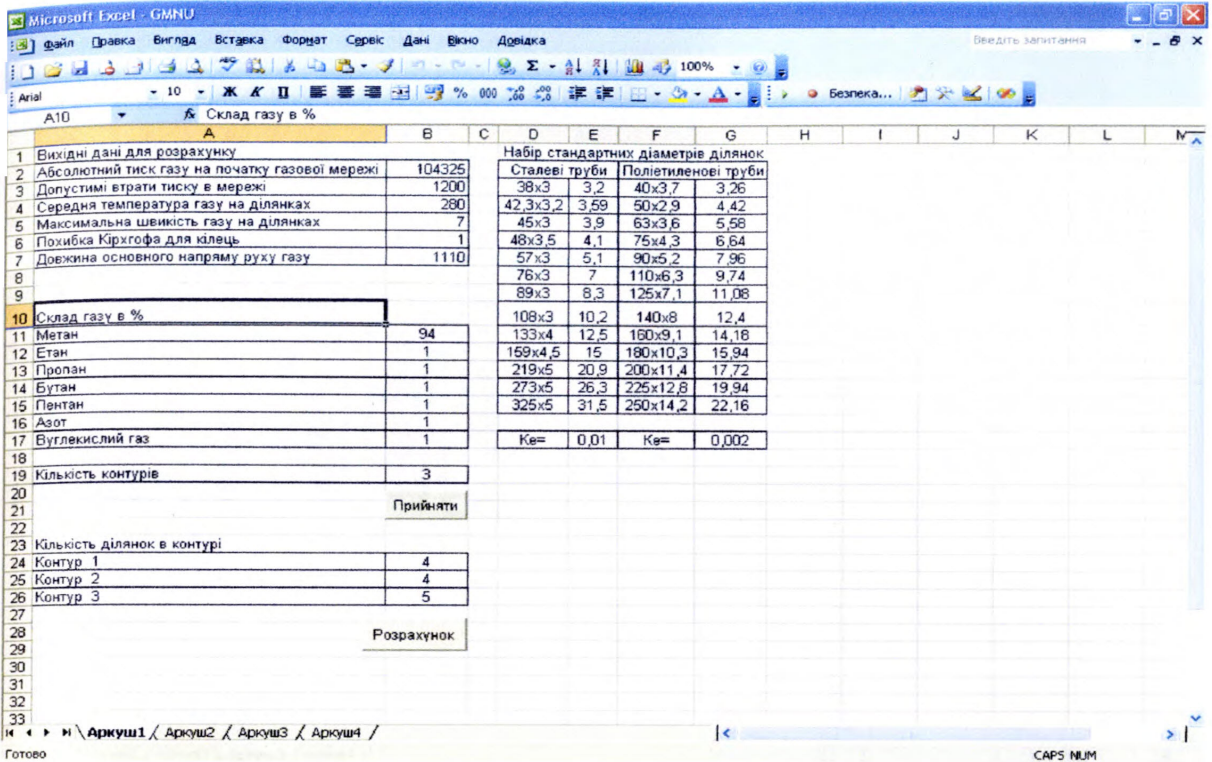


Рисунок 4.1 – Вікно введення вихідних даних газової мережі низького тиску із поліетиленових труб

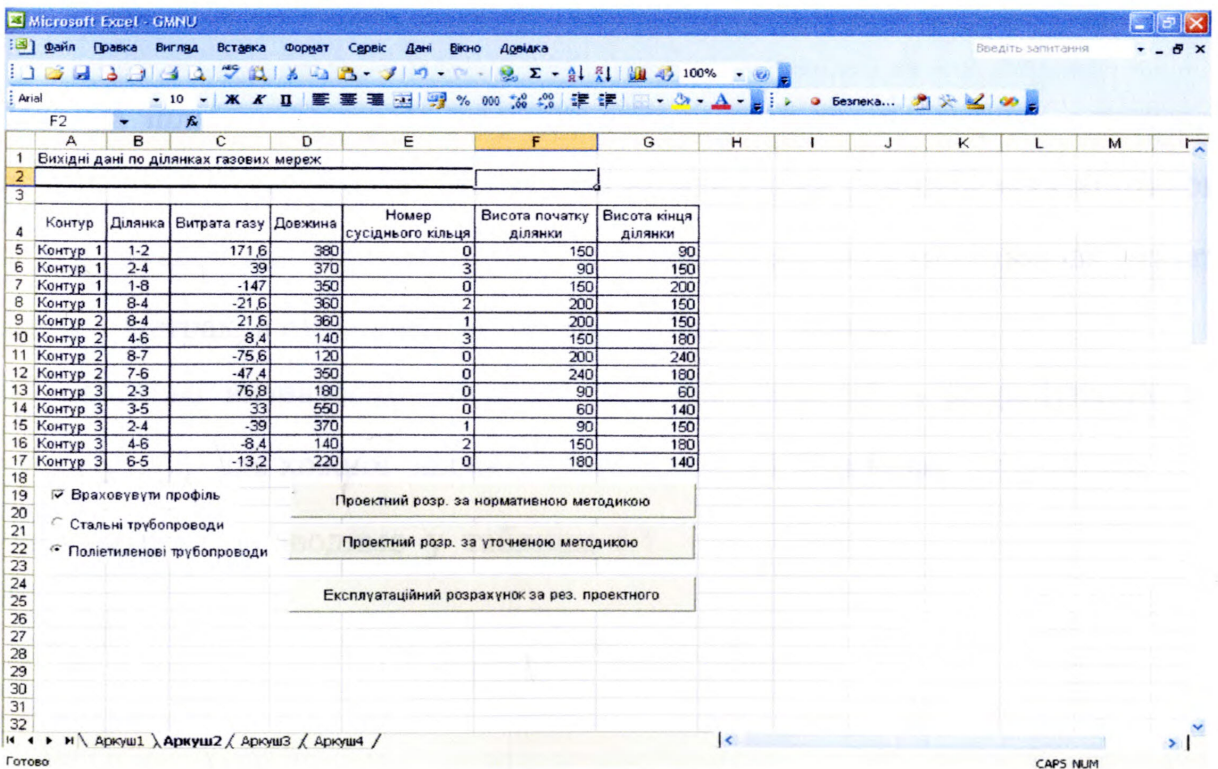


Рисунок 4.2 – Вікно введення параметрів ділянок газової мережі низького тиску із поліетиленових труб

Microsoft Excel - GMNU  
Файл Правка Видгляд Вставка Формат Сервіс Дані Бісно Довідка  
Безпека...

Результати розрахунку ділянок газової мережі  
Експлуатаційний розрахунок за уточненою методикою з  
врахуванням профілю траси

Контур	Ділянка	Довжина ділянки	Уточнена витрата газу	Діаметр ділянки	Втрати тиску, Па
Контур 1	1-2	380	171,6	160x9,1	421
Контур 1	2-4	370	39,0	90x5,2	-56
Контур 1	1-8	350	-147,0	140x8	32
Контур 1	8-4	360	-21,6	75x4,3	-430
Контур 2	8-4	360	21,6	75x4,3	430
Контур 2	4-6	140	8,4	50x2,9	-15
Контур 2	8-7	120	-75,6	110x6,3	107
Контур 2	7-6	350	-47,4	110x6,3	-386
Контур 3	2-3	180	76,8	110x6,3	252
Контур 3	3-5	550	33,0	90x5,2	-110
Контур 3	2-4	370	-39,0	90x5,2	56
Контур 3	4-6	140	-8,4	50x2,9	15
Контур 3	6-5	220	-13,2	63x3,6	-313

Готово CAPS NUM

Рисунок 4.3 – Вікно результатів гідравлічного розрахунку газової мережі низького тиску із поліетиленових труб

Питома шляхова витрата газу для всіх ділянок газової мережі однакова і становить  $q = 0,125 \text{ м}^3/(\text{год}\cdot\text{м})$ . Допустимі втрати тиску у газовій мережі становлять  $\Delta P_{\text{дон}} = 1200 \text{ Па}$ . На рисунку 4.4 для кожної ділянки газопроводу вказані довжини у метрах, а стрілками позначені тупикові ділянки.

Попередньо визначаємо шляхову  $Q_{\text{ш}}$ , транзитну  $Q_{\text{T}}$  і розрахункову витрату газу  $Q_{\text{р}}$  для кожної ділянки газової мережі. Одержані результати розрахунку витрат газу зводимо у таблицю 4.1.

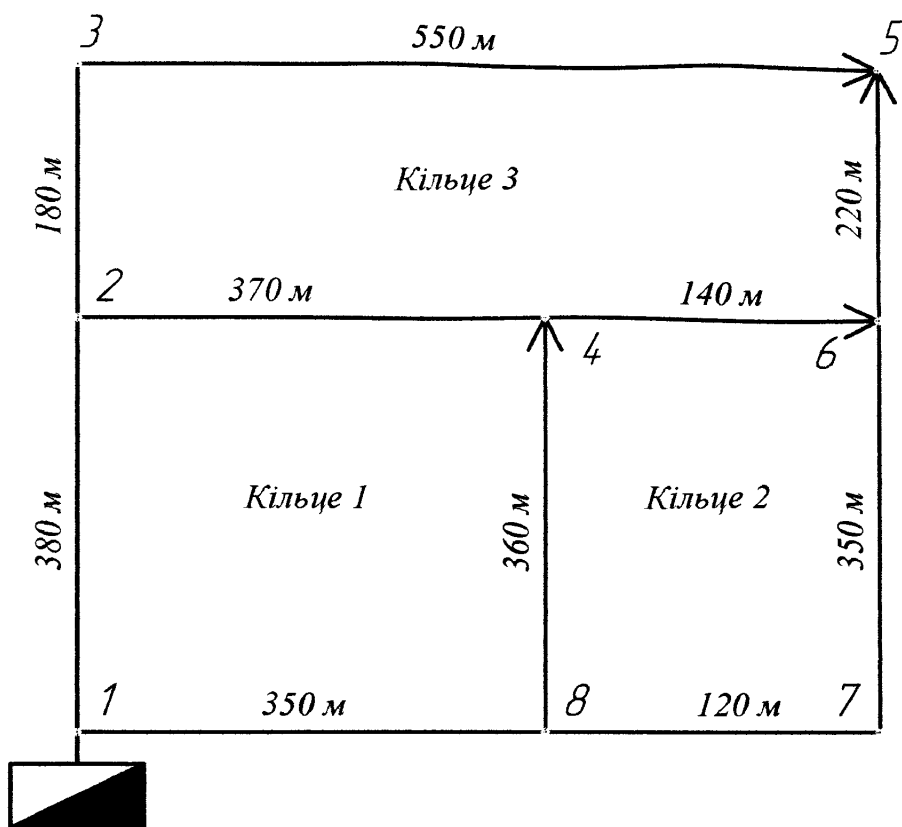


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема газової мережі низького тиску кільцевої структури

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку витрат газу ділянок газової мережі низького тиску із поліетиленових труб

Ділянка	Довжина $l_i$ , м	Витрата газу, м <sup>3</sup> /год		
		шляхова $Q_{ш}$	транзитна $Q_m$	розрахункова $Q_p$
3-5	550	66,0	0	33,0
2-3	180	21,6	66,0	76,8
4-6	140	16,8	0	8,4
2-4	370	44,4	16,8	39,0
1-2	380	45,6	148,8	171,6
5-6	220	26,4	0	13,2
7-6	350	42,0	26,4	47,4
8-7	120	14,4	68,4	75,6
8-4	360	43,2	0	21,6
1-8	350	42,0	126,0	147,0

Використовуючи програму GMNU, проведемо три варіанти гідравлічного розрахунку газової мережі:

- 1) проектний розрахунок згідно з нормативною методикою, що рекомендована чинними нормативними документами [92];
- 2) проектний розрахунок з використанням уточненої методики;
- 3) експлуатаційний розрахунок газової мережі з використанням уточненої методики на основі результатів проектного розрахунку за нормативною методикою.

Результати гідравлічних розрахунків газової мережі низького тиску за різними методиками зображені на рисунках 4.5-4.7.

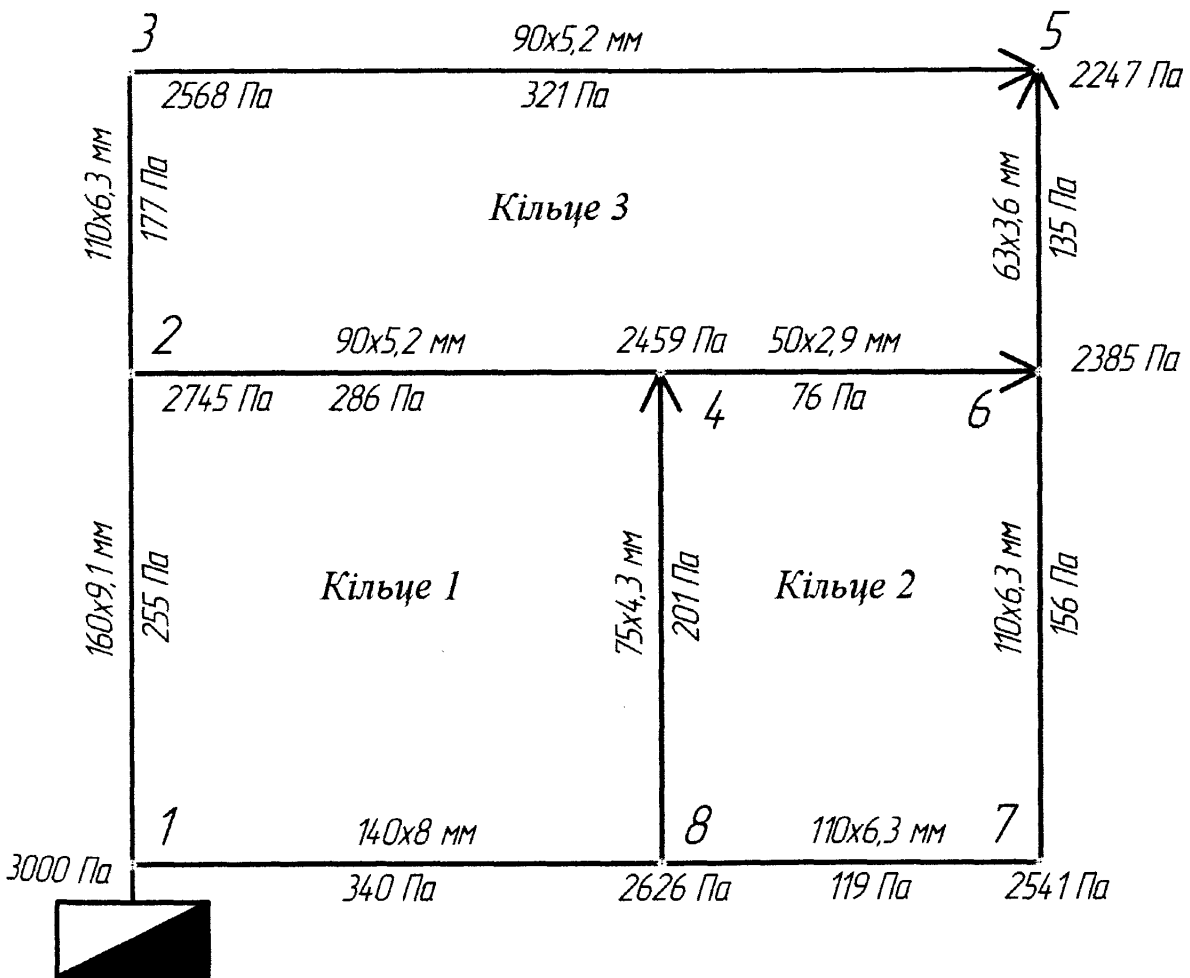


Рисунок 4.5 – Результати проектного гідравлічного розрахунку

поліетиленової газової мережі

низького тиску за нормативною методикою



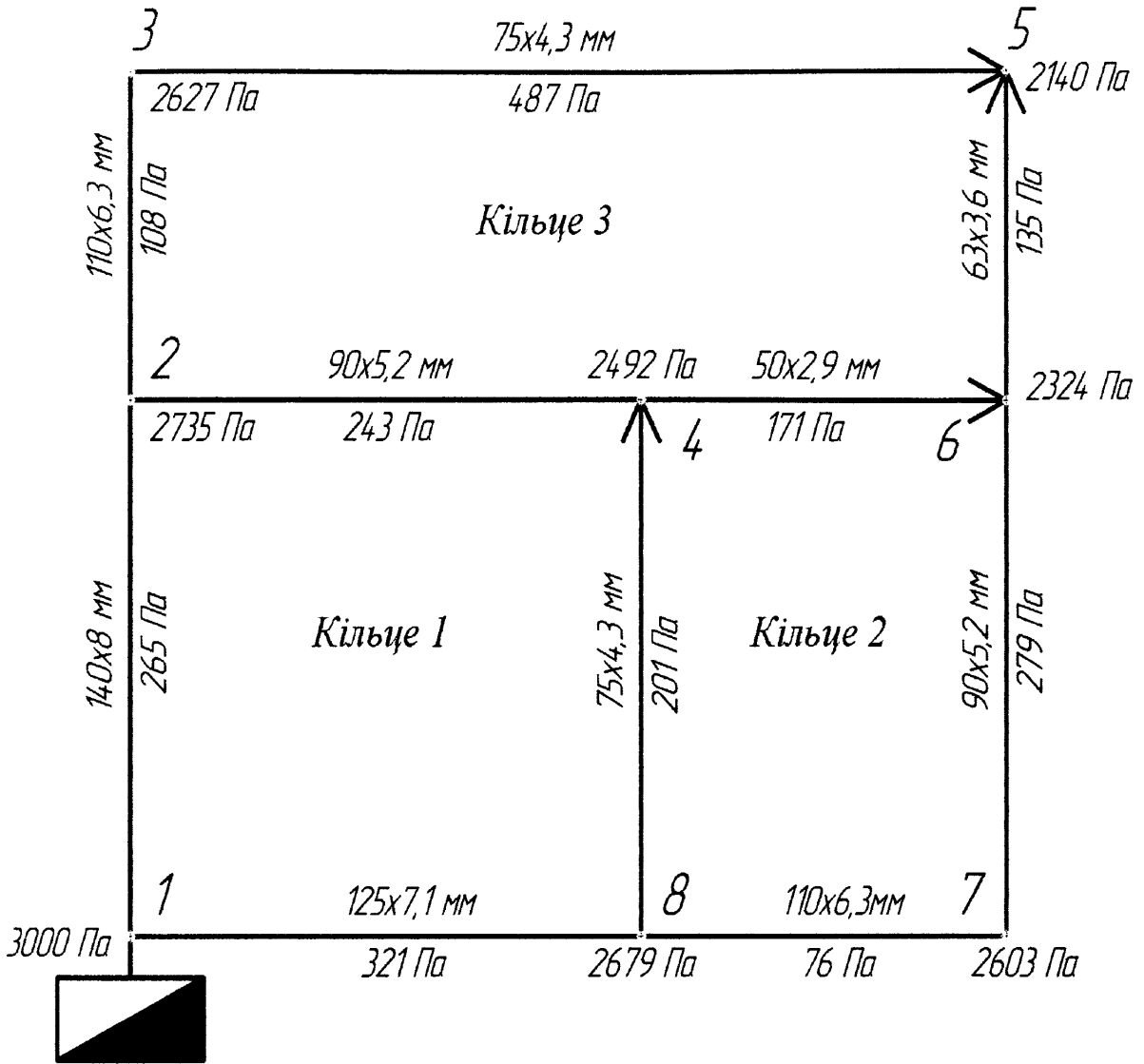


Рисунок 4.6 – Результати проектного гідравлічного розрахунку поліетиленової газової мережі низького тиску за уточненою методикою

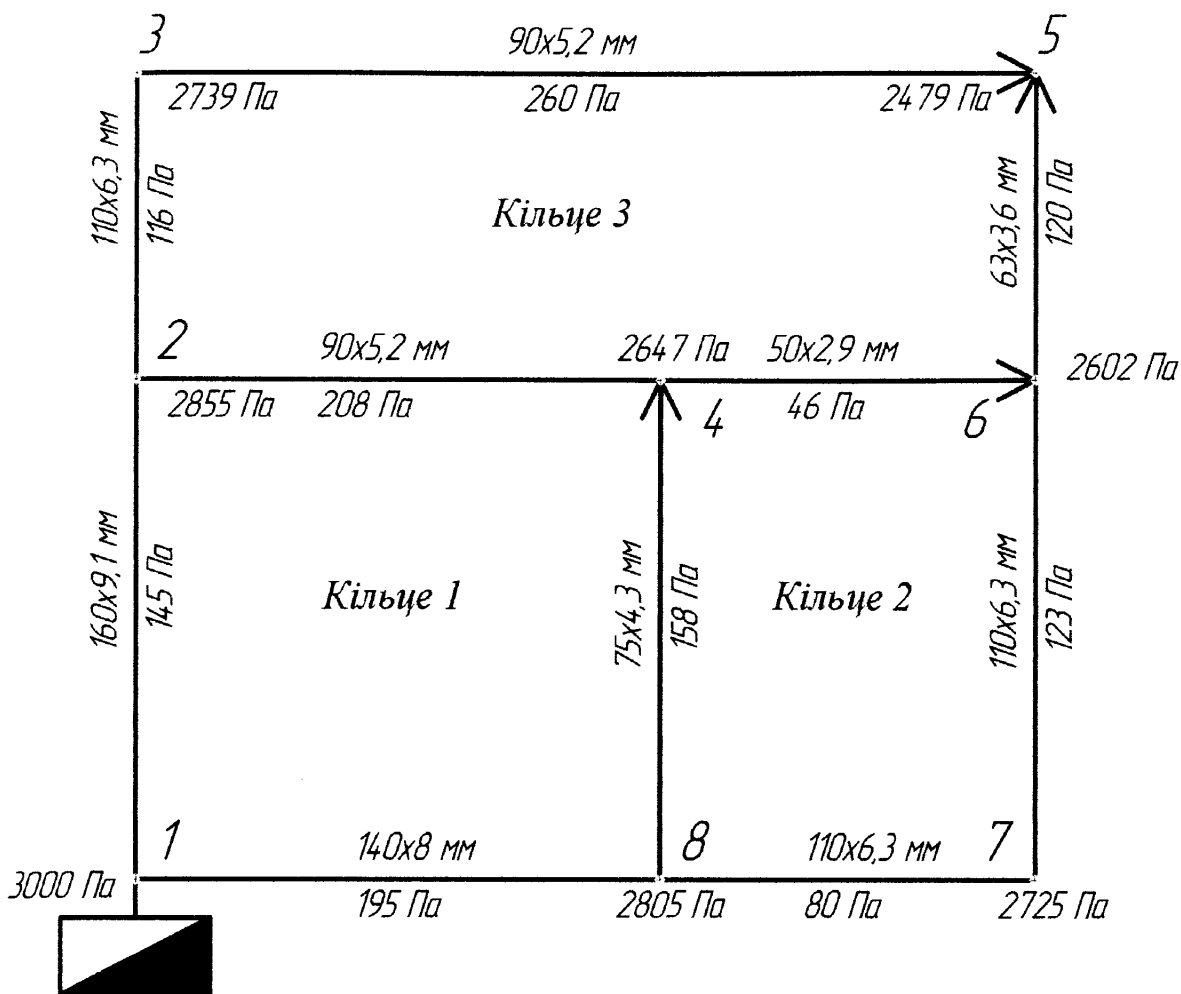


Рисунок 4.7 – Результати експлуатаційного розрахунку поліетиленової газової мережі низького тиску за уточненою методикою

Як засвідчило порівняння параметрів газових мереж низького тиску на рисунках 4.5 та 4.6, результати проектних розрахунків за нормативною та уточненою методиками суттєво відрізняються. Різняться як діаметри деяких ділянок, так і значення тиску у вузлах газової мережі. Зокрема на ділянках 1-2, 1-8, 3-5, 7-6 за розробленою уточненою методикою прийняті менші значення діаметрів ділянок, що зменшує капіталовкладення в будівництво газової мережі.

Нами виконаний техніко-економічний розрахунок двох конкуруючих варіантів системи розподілу газу із поліетиленових труб, схеми яких наведені на рисунках 4.5 та 4.6. У результаті одержано, що за реалізації варіанта, розрахованого за уточненою методикою, капіталовкладення у будівництво системи газифікації села зменшуються на 18,1 %.

Порівняння результатів експлуатаційних розрахунків поліетиленової газової мережі низького тиску за двома методиками (рисунки 4.6 і 4.7) виявило суттєві відмінності у розподілі тиску газу в елементах мережі, а отже в режимі роботи газопроводів. Так за нормативною методикою сумарний перепад тиску газу по довжині основного напрямку руху газу в газовій мережі ГРП-1-2-3-5 становить 753 Па. За уточненою методикою розрахунку цей параметр становить 521 Па, що на 31 % менше.

Таким чином апробація розробок для конкретної газорозподільної системи довела, що використання уточненої методики у процесі проектних розрахунків поліетиленових газових мереж низького тиску дає можливість скоригувати до менших значень діаметри ділянок і тим самим помітно зменшити витрати в будівництво системи газопостачання населеного пункту. Зазначений висновок можна поширити на газову мережу низького тиску довільної конфігурації. Це впливає із порівняльного аналізу результатів розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску за традиційними та запропонованими формулами.

Проведені дослідження засвідчили, що наявні на сьогодні методики гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску не можуть бути використані для поліетиленових газопроводів, оскільки вони дають суттєву неточність при визначенні коефіцієнтів гідравлічного опору, що призводить до недостовірності результатів проектних та експлуатаційних розрахунків систем газопостачання. Тому вважаємо доцільним увести корективи в державні та галузеві нормативні документи щодо методики гідравлічного розрахунку поліетиленових газопроводів, передбачивши застосування одержаних нами формул для коефіцієнта гідравлічного опору.

## 4.2 Розробка методу коригування діаметрів поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності

При проектуванні системи газопостачання населеного пункту, а також при реконструкції та ремонті виникає необхідність визначати необхідні діаметри ділянок газових мереж. Від правильного вибору діаметрів газопроводів залежить ефективність та економічність системи розподілу газу, а також затрати на її реалізацію.

Теоретичні та експериментальні дослідження, результати яких наведені у попередніх розділах дисертації, засвідчили, що методи, розрахунку, розроблені для сталевих газових мереж, не дають можливості адекватно прогнозувати пропускну здатність та гідравлічну енерговитратність поліетиленових газових мереж.

У результаті дослідження особливостей газодинамічних процесів в поліетиленових газопроводах нами одержані формули для коефіцієнта гідравлічного опору при різних режимах руху газу. Використання зазначених залежностей дає змогу науково обґрунтувати вибір необхідних діаметрів поліетиленових газопроводів.

Порівняємо між собою значення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленових газових мереж низького тиску, знайдені за методикою, яка рекомендована чинним нормативним документом [92] та обчислені за одержаною нами формулою (3.36). Порівняння проведемо для повного діапазону зміни чисел Рейнольдса в газових мережах населеного пункту від 5000 до 70000. Відносне зменшення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску  $\delta_\lambda$  у відсотках залежно від числа Рейнольдса можна представити у вигляді графіка (рисунок 4.8). Математична обробка за допомогою Microsoft Excel показала, що дана графічна залежність з достовірністю 99 % може бути описана логарифмічною функцією

$$\delta_\lambda = 185,55 - 22,237 \cdot \ln Re. \quad (4.15)$$

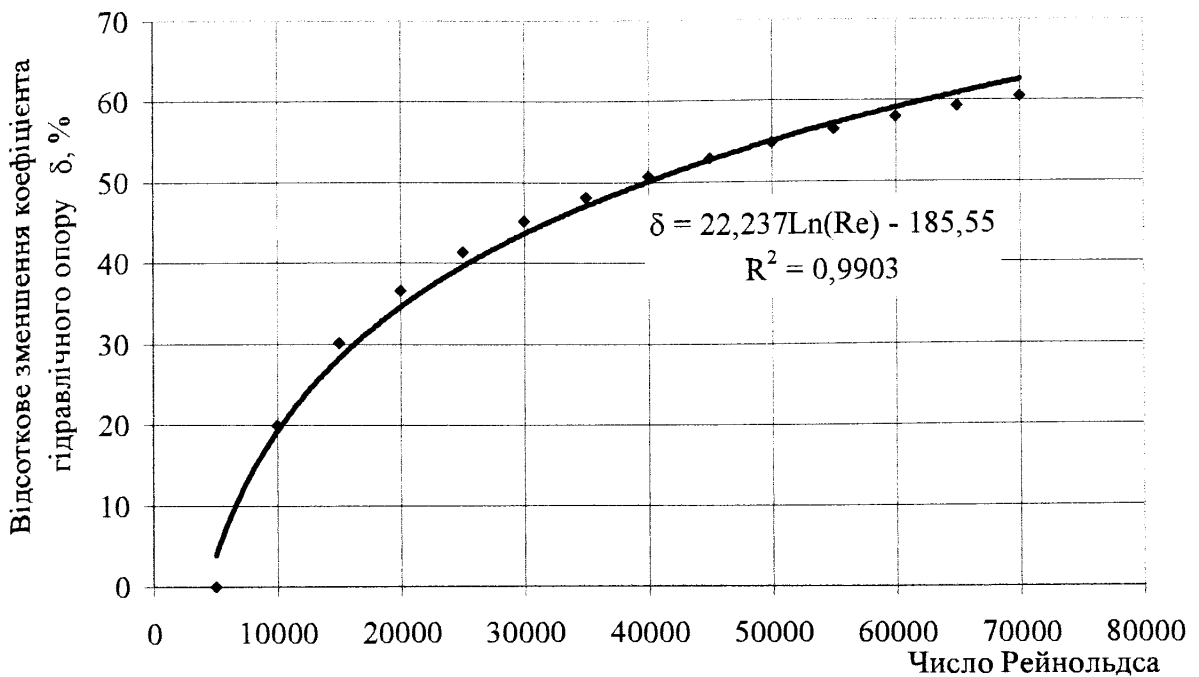


Рисунок 4.8 – Залежність відносного зменшення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску від числа Рейнольдса для турбулентного режиму в зоні гідравлічно гладких труб

Формула (4.15) дає змогу прогнозувати відносне зменшення коефіцієнта гідравлічного опору поліетиленового газопроводу низького тиску (порівняно зі значенням за нормативною методикою) за умови сталого числа Рейнольдса для турбулентного режиму в зоні гідравлічно гладких труб.

Однак, на практиці зазначений критерій завантаження ділянки газової мережі практично не використовується. Ступінь завантаження ділянки газової мережі низького тиску характеризується енергетичним параметром - гідравлічним нахилом.

$$I = \frac{\Delta P}{l}, \quad (4.16)$$

де  $\Delta P$  - втрати тиску від тертя на ділянці газової мережі;

$l$  - геометрична довжина ділянки.

Визначимо, на скільки можуть бути змінені проектні параметри ділянки поліетиленової газової мережі низького тиску, якщо замість нормативної мето-

дики застосовувати одержані нами залежності. Як умову порівняння варіантів вибираємо рівність значення гідравлічного нахилу.

За нормативною методикою при турбулентному режимі руху газу гідравлічний нахил так пов'язаний із необхідним внутрішнім діаметром ділянки газопроводу низького тиску  $D_1$

$$I = 69 \left( \frac{k_e}{D_1} + 1922 \frac{v_n D_1}{Q_n} \right)^{0,25} \frac{\rho_n Q_n^2}{D_1^5}, \quad (4.17)$$

де  $k_e$  - абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні поліетиленових труб,  $k_e = 0,01$  см;

$v_n, \rho_n$  - кінематична в'язкість і густина газу за нормальних умов;

$Q_n$  - витрата газу за нормальних умов.

У зв'язку із тим, що фактична гідравлічна енерговитратність поліетиленових труб менша за нормативну, той самий гідравлічний нахил буде забезпечений при меншому значенні внутрішнього діаметра ділянки  $D_k$ .

За методикою, що пропонується, гідравлічний нахил може бути виражений через внутрішній діаметр  $D_k$

$$I = \beta_T \frac{Q^{2-m} v^m}{D_k^{5-m}}, \quad (4.18)$$

де  $\beta_T$  - комплекс, значення якого залежить від режиму руху газу,

$$\beta_T = \frac{8A\rho}{4^m \pi^{2-m}}; \quad (4.19)$$

$Q$  - витрати газу за умов газових мереж;

$\rho$  - густина газу за умов газових мереж;

$A, m$  - коефіцієнти режиму руху в узагальненій моделі Лейбензона для коефіцієнта гідравлічного опору.

Із одержаної нами формули (3.36) маємо

$$A = 4,21; \quad m = 0,552.$$

Спільне розв'язання системи рівнянь (4.17) і (4.18) дає змогу для кожного стандартного значення внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу низького тиску  $D_1$  визначити витрату газу та скориговане значення внутрішнього діаметра  $D_k$ , які відповідають певному значенню гідравлічного нахилу.

В газопостачанні населених пунктів України використовується сортамент поліетиленових труб низького тиску, для яких зовнішні діаметри, товщина стінки, а отже і внутрішні діаметри відповідають ДБН В.2.5-41:2009. Скориговане значення внутрішнього діаметра труби  $D_k$  зазвичай не співпадає зі стандартним.

Тому для забезпечення певного значення гідравлічного нахилу можна передбачити укладання послідовно труб різного діаметра - частину із труб з базовим внутрішнім діаметром  $D_1$ , решту – із труб з найближчим меншим стандартним значенням внутрішнього діаметра  $D_2 < D_k$ .

Із рівняння балансу енергії маємо

$$\frac{l}{D_k^{5-m}} = \frac{l-x}{D_1^{5-m}} + \frac{x}{D_2^{5-m}}, \quad (4.20)$$

де  $l$  - довжина ділянки поліетиленового газопроводу;

$x$  - довжина труби з найближчим меншим до базового стандартним значенням внутрішнього діаметра.

Уведемо поняття частки довжини поліетиленової труби із найближчим меншим стандартним внутрішнім діаметром

$$\delta_l = \frac{x}{l}. \quad (4.21)$$

Розв'язуємо рівняння (4.20) з урахуванням (4.21) відносно  $\delta_l$

$$\delta_l = \frac{(D_1^{5-m} - D_k^{5-m})}{(D_1^{5-m} - D_2^{5-m})} \cdot \left( \frac{D_2}{D_k} \right)^{5-m} \quad (4.22)$$

Описана вище методика розрахунку реалізована в комп'ютерній програмі KORN, яка написана на мові програмування Visual Basic в середовищі MicroSoft Excel.

Використовуючи програму KORN, виконуємо дослідження можливих змін проектних параметрів поліетиленових газопроводів низького тиску з урахуванням їх фактичної гідравлічної енерговитратності. Розглядаємо набір базових стандартних зовнішніх діаметрів від 50 до 160 мм. Дослідження проводимо для різного завантаження газових мереж низького тиску у діапазоні гідравлічних нахилів від 0,4 до 3 Па/м.

На рисунку 4.9 наведені графічні залежності відносного зменшення внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу низького тиску від гідравлічного нахилу, а також результати їх математичного моделювання.

Результати досліджень оформляємо у вигляді графічних залежностей частки довжини поліетиленової труби із найближчим меншим стандартним внутрішнім діаметром від гідравлічного нахилу для різних базових внутрішніх діаметрів труб (рисунок 4.10). Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей. У результаті отримуємо, що з достовірністю апроксимації 99 % графічні залежності можна описати такими логарифмічними функціями:

для діаметра 125x7,1 мм за умови  $0,4 < I < 1,3$

$$\delta_l = 0,3714 \cdot \ln(I) + 0,883; \quad (4.23)$$

для діаметра 110x6,3 мм за умови  $0,4 < I < 3$

$$\delta_l = 0,2026 \cdot \ln(I) + 0,399; \quad (4.24)$$

для діаметра 90x5,2 мм за умови  $0,4 < I < 3$



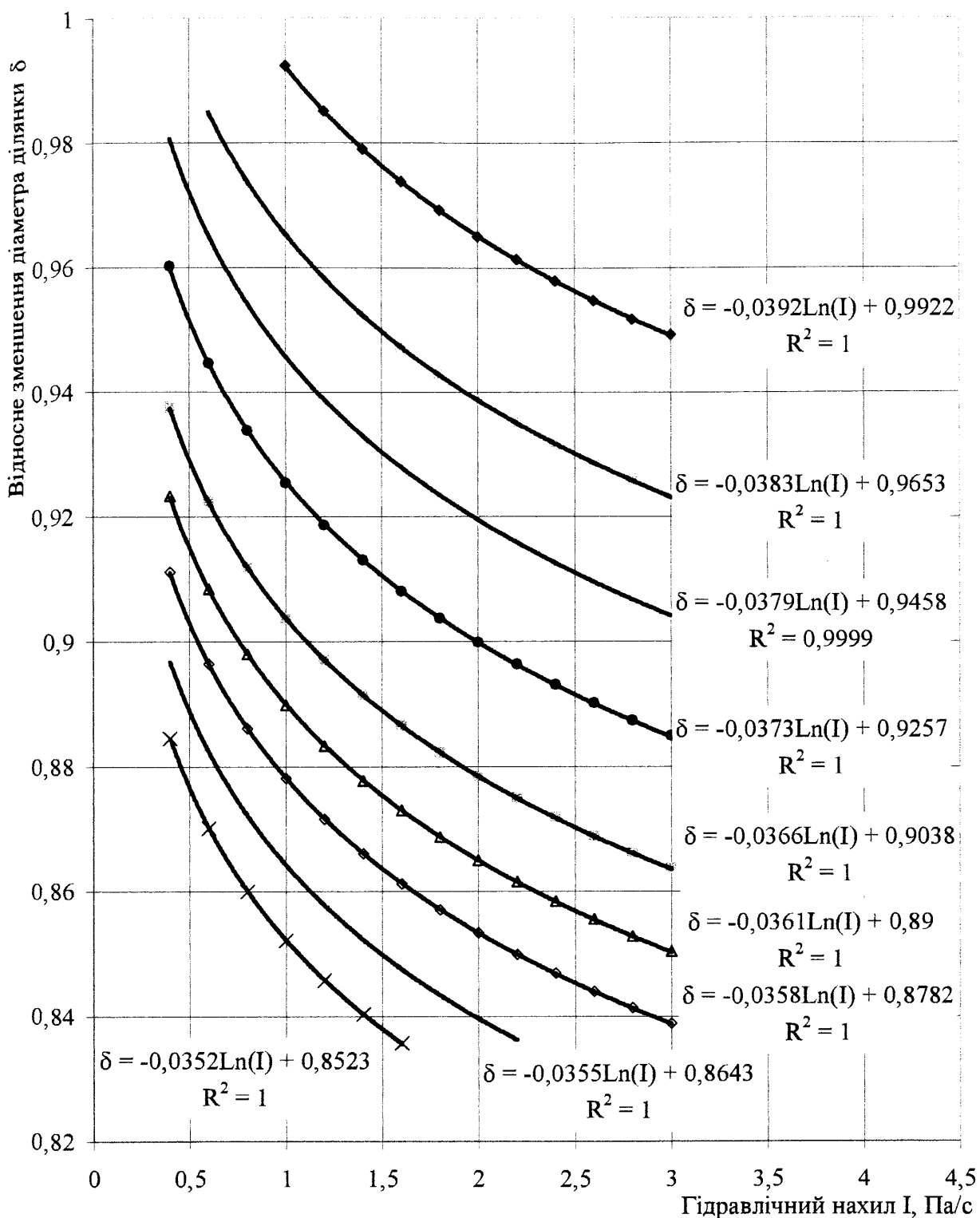


Рисунок 4.9 – Залежність відносного зменшення необхідного внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу низького тиску від гідравлічного нахилу

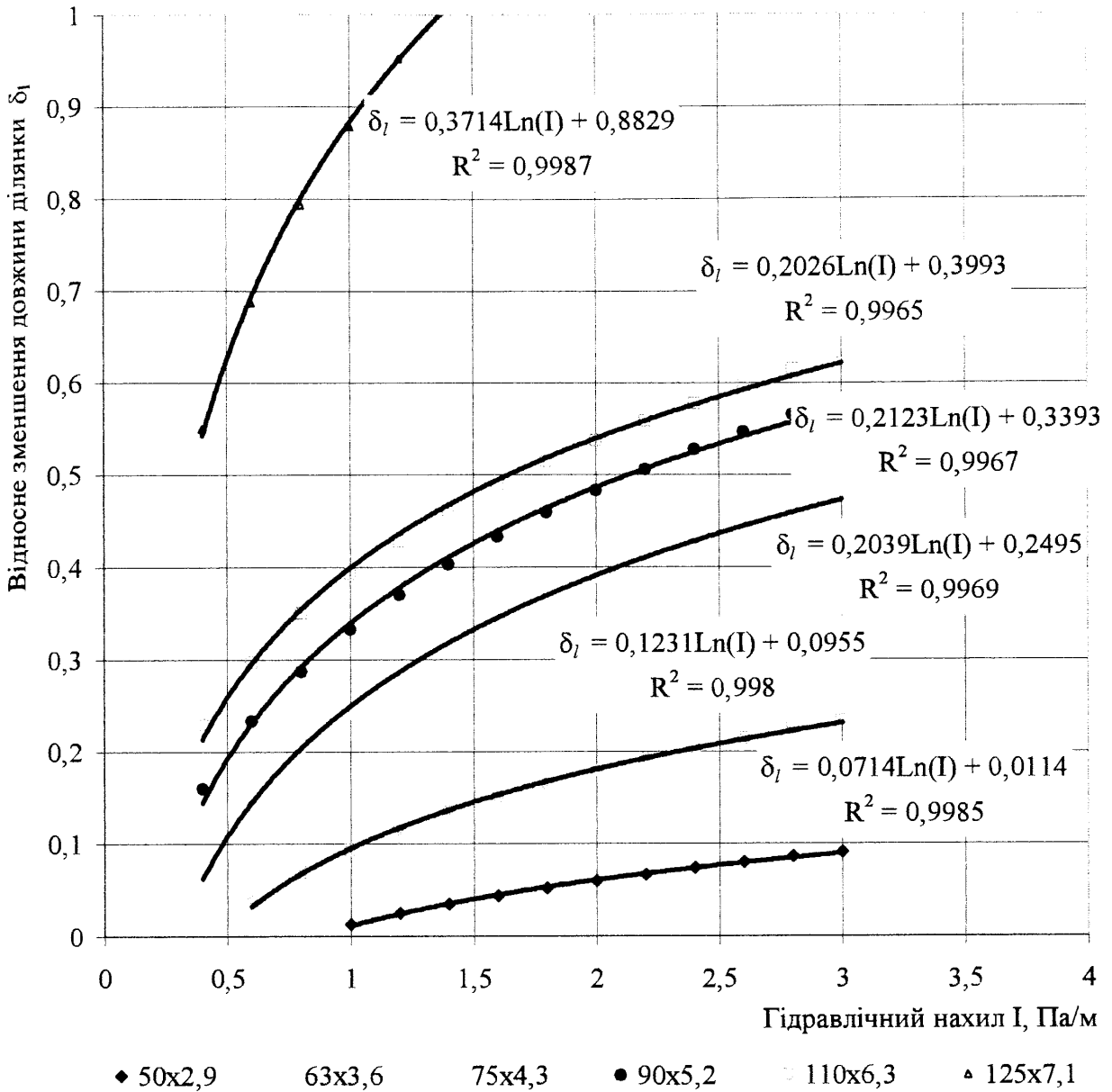


Рисунок 4.10 - Залежність частки довжини поліетиленової труби низького тиску із найближчим меншим стандартним діаметром від гідравлічного нахилу для різних базових внутрішніх діаметрів труб

$$\delta_l = 0,2123 \cdot \ln(I) + 0,339; \quad (4.25)$$

для діаметра 75x4,3 мм за умови  $0,4 < I < 3$

$$\delta_l = 0,2039 \cdot \ln(I) + 0,250; \quad (4.26)$$

для діаметра 63x3,6 мм за умови  $0,6 < I < 3$

$$\delta_l = 0,1231 \cdot \ln(I) + 0,096; \quad (4.27)$$

для діаметра 50x2,9 мм за умови  $1 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0714 \cdot \ln(I) + 0,011. \quad (4.28)$$

Результати досліджень показали, що за певних умов за рахунок зменшення гідравлічного опору можна частково передбачити укладання не найближчого, а наступного меншого стандартного значення внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу низького тиску. Рисунок 4.11 ілюструє графічні залежності частки довжини поліетиленової труби із наступним меншим стандартним діаметром від гідравлічного нахилу для різних базових внутрішніх діаметрів труб. Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей. У результаті отримуємо, що з достовірністю апроксимації 99 % графічні залежності можна описати такими логарифмічними функціями:

для діаметра 180x10,3 мм за умови  $0,4 < I < 1,6$

$$\delta_l = 0,1744 \cdot \ln I + 0,508; \quad (4.29)$$

для діаметра 160x9,1 мм за умови  $0,4 < I < 2,2$

$$\delta_l = 0,1749 \cdot \ln I + 0,464; \quad (4.30)$$

для діаметра 140x8,0 мм за умови  $0,4 < I < 3$

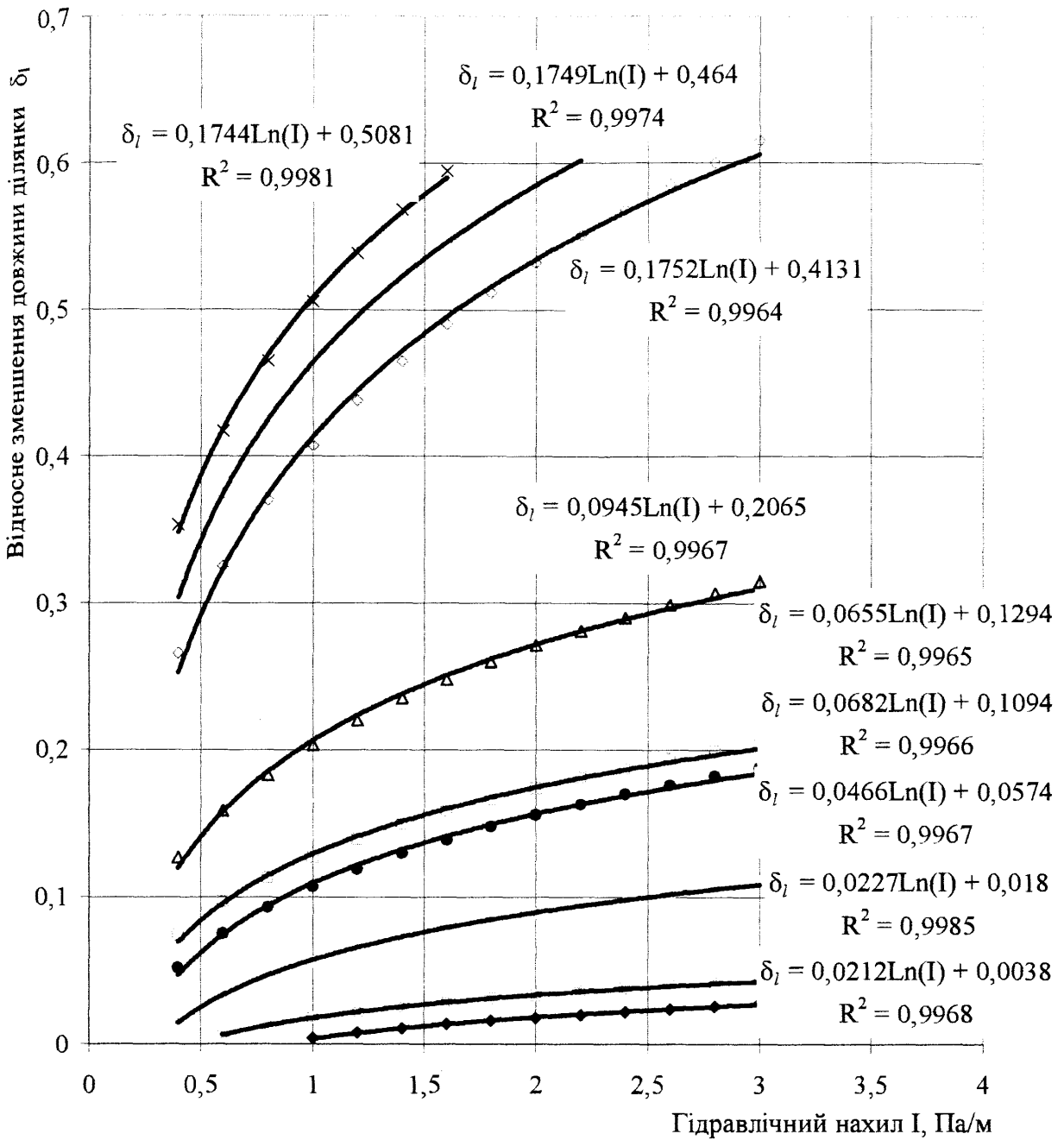
$$\delta_l = 0,1752 \cdot \ln I + 0,413; \quad (4.31)$$

для діаметра 125x7,1 мм за умови  $0,4 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0945 \cdot \ln I + 0,2065; \quad (4.32)$$

для діаметра 110x6,3 мм за умови  $0,4 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0655 \cdot \ln I + 0,129; \quad (4.33)$$



◆ 50x2,9    63x3,6    75x4,3    ● 90x5,2    110x6,3    △ 125x7,1    ◇ 140x8    160x9,1    × 180x10,3

Рисунок 4.11- Залежність частки довжини поліетиленової труби низького тиску із наступним меншим стандартним діаметром від гідравлічного нахилу для різних базових внутрішніх діаметрів труб

для діаметра 90x5,2 мм за умови  $0,4 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0682 \cdot \ln I + 0,109; \quad (4.34)$$

для діаметра 75x4,3 мм за умови  $0,4 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0466 \cdot \ln I + 0,057; \quad (4.35)$$

для діаметра 63x3,6 мм за умови  $0,6 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0227 \cdot \ln I + 0,018; \quad (4.36)$$

для діаметра 50x2,9 мм за умови  $1 < I < 3$

$$\delta_l = 0,0212 \cdot \ln I + 0,004. \quad (4.37)$$

Формули (4.23)- (4.37) дають можливість скоригувати у менший бік проектні діаметри ділянок газових мереж систем газопостачання населених пунктів. Зменшення діаметрів призводить до зменшення вартості будівництва газових мереж. Для виконання техніко-економічних розрахунків опишемо у вигляді графіків вартість одного метра поліетиленової труби низького і середнього тиску як функцію внутрішнього діаметра ( рисунок 4.12).

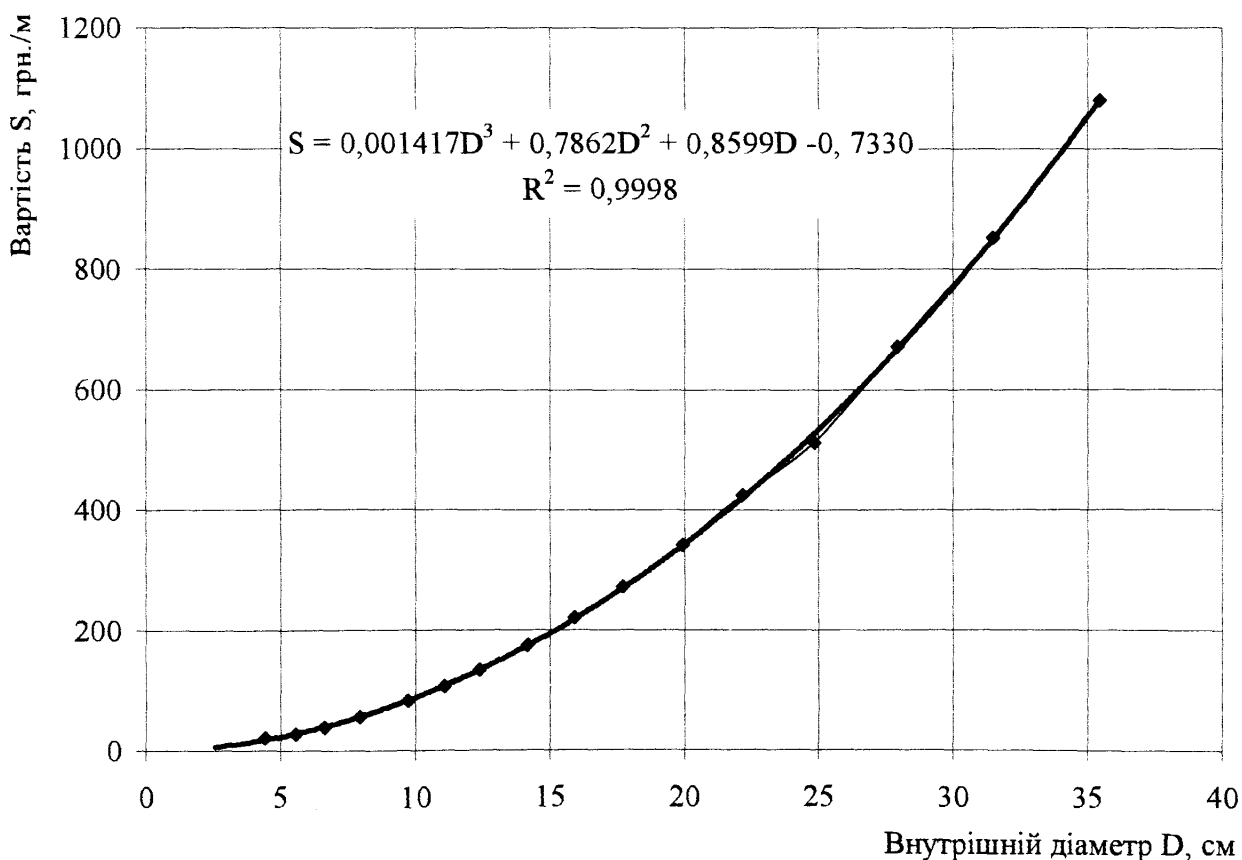


Рисунок 4.12 – Залежність вартості одного метра поліетиленової труби низького і середнього тиску від внутрішнього діаметра

Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання графічної залежності. У результаті отримуємо, що з достовірністю апроксимації 99 % залежність вартості 1 м поліетиленової труби низького і середнього тиску від її внутрішнього діаметра можна описати такою поліноміальною функцією:

$$S = -0,733 + 0,860D + 0,786D^2 + 0,00142D^3, \text{ грн./м.} \quad (4.38)$$

Виконані нами розрахунки показали, що для однієї ділянки системи газопостачання населеного пункту економія коштів на придбання поліетиленових труб в середньому становить 1 тис. грн. У системах газопостачання реальних населених пунктів число ділянок становить десятки або навіть сотні, що значно збільшує економічний ефект від впровадження запропонованого методу.

#### **4.3 Розробка методу коригування діаметрів поліетиленових газових мереж середнього тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності**

В останні роки при газифікації сільських населених пунктів почали широко використовувати одноступеневі системи розподілу газу, що складаються із складної системи поліетиленових газопроводів середнього тиску. Для безпосереднього подавання газу низького тиску побутовим споживачам у таких системах використовуються комбіновані будинкові регулятори тиску. Розрахункові витрати газу у таких системах розподілу відносно невеликі, тому числа Рейнольдса для ділянок зазвичай не перевищують 60000-70000.

За зазначених умов для оцінювання гідравлічної енерговитратності поліетиленового газопроводу середнього тиску можна застосовувати одержану у розділі 3 формулу для коефіцієнта гідравлічного опору (3.36).

Ступінь завантаження ділянки газової мережі середнього тиску характеризується енергетичним параметром – параметром  $A$

$$A = \frac{P_1^2 - P_2^2}{l}, \quad (4.39)$$

де  $P_1, P_2$  - абсолютний тиск газу на початку і у кінці ділянки газової мережі відповідно.

Визначимо, на скільки можуть бути змінені проектні параметри ділянки поліетиленової газової мережі середнього тиску, якщо замість нормативної методики розрахунку застосовувати одержані нами залежності. Як умову порівняння варіантів вибираємо рівність значення параметра  $A$ .

За нормативною методикою при турбулентному режимі руху газу гідравлічний нахил так пов'язаний із необхідним внутрішнім діаметром ділянки газопроводу низького тиску  $D_1$

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{l} = 1,54 \cdot 10^{-5} \left( \frac{k_e}{D_1} + 1922 \frac{v_H D_1}{Q_H} \right)^{0,25} \frac{\rho_H Q_H^2}{D_1^5}. \quad (4.40)$$

У зв'язку із тим, що фактична гідравлічна енерговитратність поліетиленових труб менша за нормативну, той самий параметр  $A$  буде забезпечений при меншому значенні внутрішнього діаметра ділянки  $D_k$ .

За методикою, що пропонується, параметр  $A$  може бути виражений через внутрішній діаметр  $D_k$

$$Q = 0,03585 D_k^{2,5} \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{\lambda z \Delta T l}}, \quad (4.41)$$

де  $z$  - коефіцієнт стисливості газу;

$\Delta$  - відносна густина газу за повітрям;

$T$  - середня температура газу в газопроводі.

Спільне розв'язання системи рівнянь (4.40) і (4.41) дає змогу для кожного стандартного значення внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу середнього тиску  $D_1$  визначити витрату газу та скориговане значення внутрішнього діаметра  $D_k$ , які відповідають певному значенню параметра  $A$ .

Згідно з ДБН В.2.5-41:2009 сортамент поліетиленових труб середнього тиску співпадає із сортаментом труб низького тиску. Скориговане значення внутрішнього діаметра труби  $D_k$  зазвичай не співпадає зі стандартним.

Тому для забезпечення певного значення параметра  $A$  можна передбачити укладання послідовно труб різного діаметра - частину із труб з базовим внутрішнім діаметром  $D_1$ , решту – із труб з найближчим меншим стандартним значенням внутрішнього діаметра  $D_2 < D_k$ .

Оскільки газові мережі середнього тиску одноступеневих систем розподілу газу в сільських населених пунктах працюють в зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму, то рівняння балансу енергії буде мати вигляд (4.20). За формулою (4.22) можна знайти частку довжини поліетиленової труби середнього тиску із найближчим меншим стандартним внутрішнім діаметром  $\delta_1$ .

Описана вище методика розрахунку реалізована в комп'ютерній програмі KORS, яка написана на мові програмування Visual Basic в середовищі Microsoft Excel.

Використовуючи програму KORS, виконуємо дослідження можливих змін проектних параметрів поліетиленових газопроводів середнього тиску з урахуванням їх фактичної гідравлічної енерговитратності. Розглядаємо набір базових стандартних зовнішніх діаметрів від 40 до 63 мм, які найбільше застосовуються в одноступеневих системах газопостачання сіл. Дослідження проводимо для різного завантаження газових мереж середнього тиску у діапазоні значень параметра  $A$  від  $0,2 \cdot 10^{-2}$  до  $1,6 \cdot 10^{-2}$  МПа/км.

На рисунку 4.13 наведені графічні залежності відносного зменшення внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу середнього тиску від величини параметра  $A$ , а також результати їх математичного моделювання.

Результати досліджень оформляємо у вигляді графічних залежностей частки довжини поліетиленової труби із найближчим меншим стандартним внутрішнім діаметром від величини параметра  $A$  для різних базових внутрішніх діаметрів труб (рисунок 4.14). Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей.



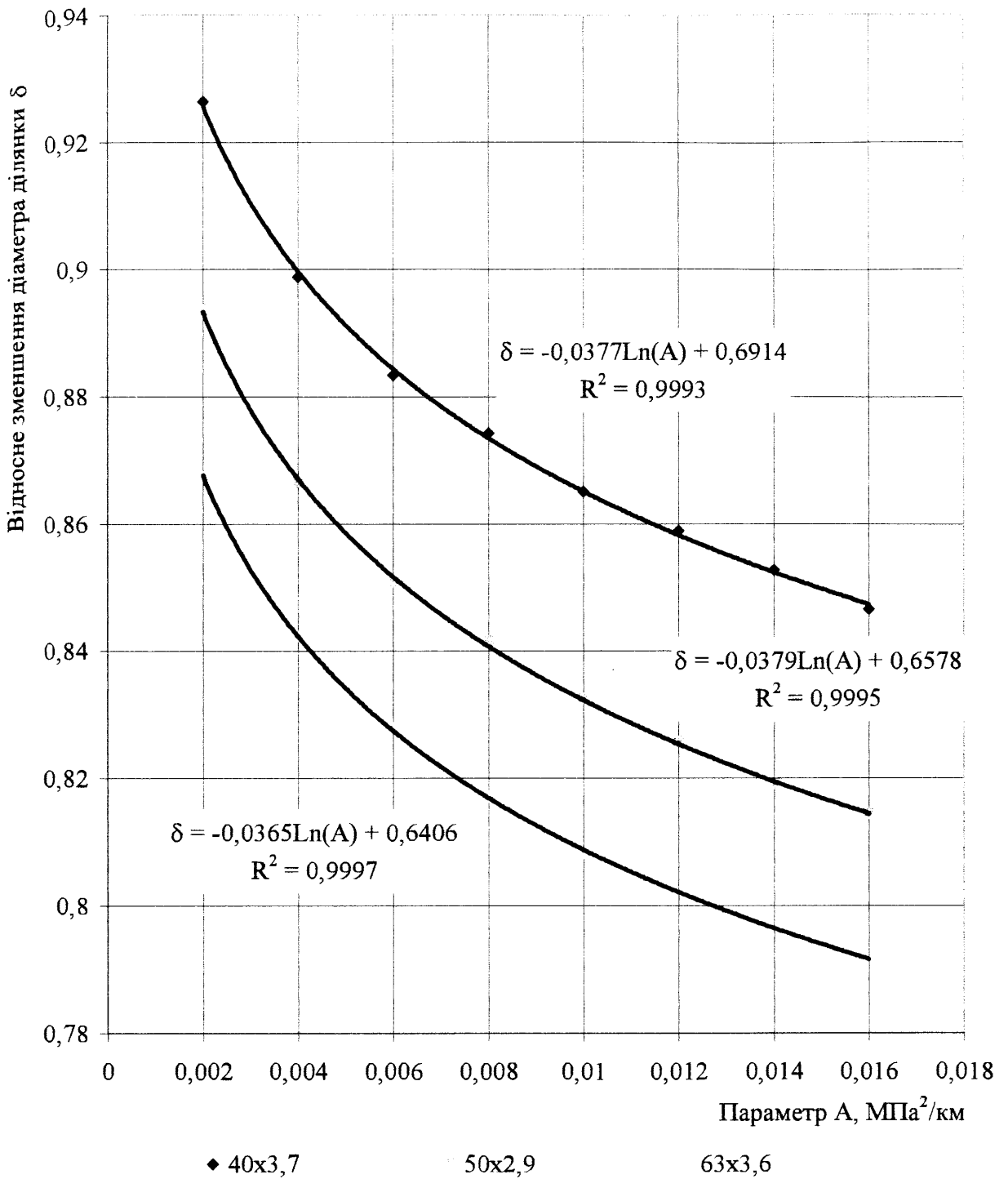


Рисунок 4.13 – Залежність відносного зменшення необхідного внутрішнього діаметра поліетиленового газопроводу середнього тиску від величини параметра  $A$

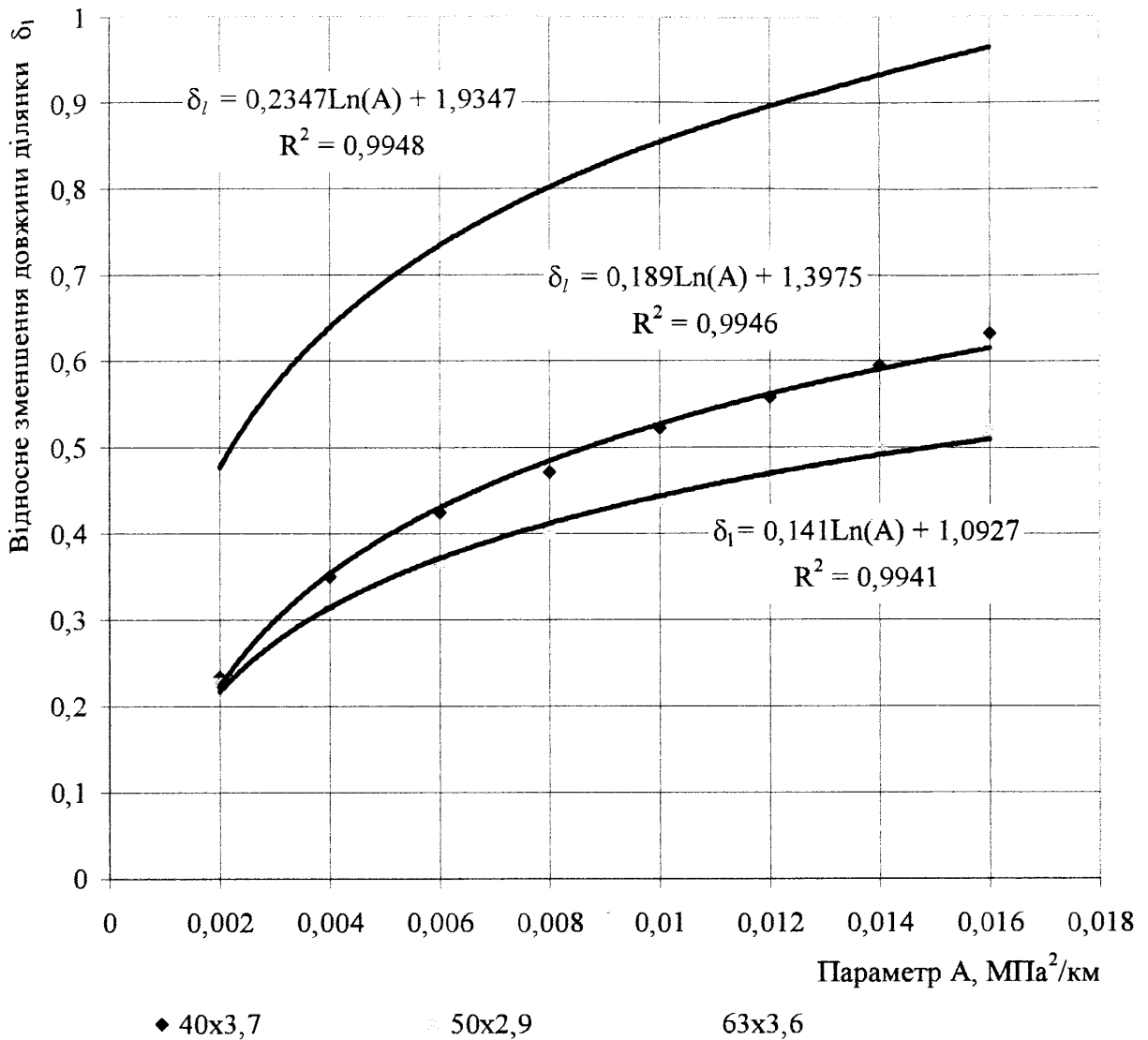


Рисунок 4.14 – Залежність відносної довжини ділянки з найближчим меншим внутрішнім діаметром поліетиленового газопроводу середнього тиску від величини параметра  $A$

У результаті отримуємо, що з достовірністю апроксимації 99 % графічні залежності частки довжини газопроводу із найближчим меншим стандартним діаметром поліетиленової труби середнього тиску від величини параметра  $A$  можна описати такими логарифмічними функціями:

для діаметра 63x3,6 мм за умови  $0,2 < A < 1,6$

$$\delta_l = 0,235 \cdot \ln A + 1,935; \quad (4.42)$$

для діаметра 50x2,9 мм за умови  $0,2 < A < 1,6$

$$\delta_l = 0,189 \cdot \ln A + 1,398. \quad (4.43)$$

для діаметра 40x3,7 мм за умови  $0,2 < A < 1,6$

$$\delta_l = 0,141 \cdot \ln A + 1,093. \quad (4.44)$$

Формули (4.42)- (4.44) дають можливість скоригувати у менший бік проектні діаметри ділянок газових мереж одноступеневих систем газопостачання населених пунктів. Зменшення діаметрів призводить до зменшення вартості будівництва газових мереж. Для виконання техніко-економічних розрахунків може бути використана залежність вартості 1 м поліетиленової труби низького і середнього тиску від внутрішнього діаметра згідно із формулою (4.38).

Розрахунки показали, що для сільського населеного пункту, де проживають 1000 жителів, економія коштів на придбання поліетиленових труб становить 26 тис. грн. Слід зазначити, що зменшення діаметра труби призводить також до зменшення вартості запірної арматури і з'єднувальних деталей, зменшує затрати в будівельно-монтажні роботи тощо. Тому економічний ефект більш точного оцінювання гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів буде значно більший за зазначений вище.

#### **4.4 Розробка рекомендацій щодо реконструкції підземних сталевих трубопроводів із використанням поліетиленових труб**

Однією із прогресивних технологій в газопостачання України є реконструкції зношених підземних сталевих газопроводів із використанням їх як каркаса для протягання в них поліетиленових труб. Державні будівельні норми України ДБН В.2.5-41:2009 [112] допускають використання як каркаса раніше виведених з експлуатації газопроводів після відповідного їхнього очищення та перевірки.

Рішення про використання конкретного варіанта безтраншейного відновлення працездатності газорозподільних мереж приймається після складання загальної схеми реконструкції газової мережі на підставі техніко-економічного порівняння варіантів і розрахунку пропускної здатності газопроводу з урахуванням вимог ДБН В.2.5-20. Використання даного методу реконструкції газових мереж низького (надлишковий тиск до 0,005 МПа включно), середнього (понад 0,005 МПа до 0,3 МПа включно) і високого (до 1,0 МПа включно) тисків із застосуванням поліетиленових труб є доцільним для всіх природно-геологічних умов, що передбачені чинними нормативними документами для прокладання газопроводів із поліетиленових труб.

При реконструкції сталевих газопроводів низького тиску поліетиленові труби, що протягнені у ньому, можуть використовуватися для подачі газу як низького, так і середнього або високого тиску. Доцільність переведення існуючих газових мереж із низького тиску на середній або високий може бути встановлена на підставі визначення пропускної здатності газових мереж.

Перед реконструкцією газопровід обстежують та очищують. Спосіб очищення внутрішньої поверхні газопроводу визначається залежно від ступеня та виду забруднень і може бути проведений за допомогою скребоків, поршнів, піскоструминних апаратів тощо, після цього відеокамерою перевіряється можливість безперешкодного протягання поліетиленової труби по всій довжині газопроводу, що відновлюється. При цьому необхідно враховувати стан внутрішньої поверхні сталевих газопроводів: зсув кромки труб; наявність напливів металу або підварок у корені шва; наявність заставних кілець, що залишаються (підкладок); особливості профілю траси; можливість накопичення конденсату та інших рідких домішок в понижених точках газопроводу, які можуть перешкоджати вільному проходженню поліетиленової труби. Реконструкція сталевих газопроводів передбачається ділянками. Для видалення забруднень внутрішньої поверхні газопроводу довжина ділянок, що підлягають очищенню, повинна прийматися, як правило, не більше 100 м [112].

Відкрите прокладання поліетиленових газопроводів (поза каркасом) допускається в місцях з'єднання труб деталями із закладними нагрівальними елементами, переходів труб з одного діаметра на іншій, у місцях установлення переходів "поліетилен-сталь", трійників, поворотів газопроводу, а також на ділянках сталевих газопроводу, що видаляються та перешкоджають протягуванню поліетиленових труб.

Технологія протягання усередині сталевих зношеного газопроводу поліетиленової труби передбачає використання труби із меншим діаметром. При незмінному робочому тиску це спричиняє зменшення пропускної здатності газопроводу. Тому при розробленні робочого проекту реконструкції системи газопостачання можуть розглядатися такі варіанти технічних рішень:

- збереження існуючого тиску в мережі, коли це можливо за умовами забезпечення газом споживачів;
- повне переведення мереж низького тиску на середній з установленням кожному споживачеві комбінованих будинкових регуляторів тиску;
- часткове переведення мереж низького тиску на середній з установленням регуляторів тиску для групи споживачів газу зі збереженням низького тиску для частини мережі, що залишилася;
- переведення газопроводу середнього тиску на високий, коли це можливо, за умов забезпечення газом споживачів.

Найбільш актуальними на сьогодні є два перших варіанти технічних рішень реконструкції газових мереж, рекомендації щодо яких наведені нижче.

Співвідношення зовнішніх діаметрів сталевих і поліетиленових труб, що протягуються в них, згідно з рекомендаціями ДБН В.2.5-41:2009, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Співвідношення діаметрів сталевих і поліетиленових труб, що протягуються в них, згідно з рекомендаціями ДБН В.2.5-41:2009

Зовнішній (умовний) діаметр сталевого газо- проводу, що відновлюється, мм	Номінальний зовнішній діаметр поліетиленових труб, що рекоменду- ються до протягання, мм	Коефіцієнт зменшення прохідного перерізу	
		<i>SDR 11</i>	<i>SDR 17,6</i>
40	20	8,6	-
50	32	4,9	-
65	40	4,6	-
80	50	4,2	-
100	63	3,8	-
150	110	2,8	-
200	160	2,6	2,2
250	200	2,6	2,2
250	225	2,0	1,7
300	250	2,3	2,0
350	315	1,9	1,7

Виконаний нами аналіз даних таблиці 4.2 засвідчив, що при її складанні урахувались лише технічна можливість розміщення поліетиленової труби меншого діаметра всередині порожнини сталевий труби більшого діаметра і не враховані аспекти збереження пропускної здатності елемента газорозподільної мережі, яка підлягає реконструкції. Такий підхід не зможе забезпечити ефектної роботи системи газопостачання після реконструкції.

Ось чому важливе теоретичне і практичне значення має вирішення задачі знаходження необхідного діаметра поліетиленового газопроводу для протягування, який би забезпечував пропускну здатність, що була до реконструкції.

Спочатку вирішимо зазначену задачу стосовно реконструкції сталевих газопроводів низького тиску. Необхідний діаметр поліетиленової труби для замі-

ни сталевій зі збереженням пропускної здатності будемо знаходити як за нормативною методикою, так за методикою, що пропонується. Остання враховує фактичну енерговитратність поліетиленових труб і фактичні температурні умови перекачування газу.

Наперед прогнозуємо, що якщо не змінювати робочий тиск, то необхідний діаметр поліетиленової труби для заміни сталевій зі збереженням пропускної здатності буде більшим за те значення, яке рекомендується таблицею 4.2.

Тому практичне значення має вирішення наступної задачі – на скільки знизиться пропускна здатність елемента газорозподільної мережі, якщо виконати заміну труб відповідно до рекомендацій таблиці 4.2.

Нормативна методика визначення пропускної здатності газопроводу низького тиску базується на використанні формули (4.17) при відомому значення гідравлічного нахилу  $I$ .

Методика, що пропонується, базується на використанні формул (4.1)-(4.15), які охарактеризовані у підрозділі 4.1.

Для реалізації методик нами розроблена програма RECONST-N, яка дає можливість провести багатоваріантні розрахунки стосовно заміни труби сталевій на поліетиленову без зміни робочого тиску.

Одержані результати для можливого діапазону зміни гідравлічного нахилу в системах газопостачання населених пунктів зведені у таблиці 4.3-4.8.

У таблицях 4.3 - 4.8 для кожного із стандартних діаметрів сталевих газопроводів низького тиску  $D_3 \times \delta$  наведені такі параметри: пропускна здатність  $Q$ , розрахований за двома методиками необхідний діаметр поліетиленової труби, який забезпечує збереження пропускної здатності; відсоток зниження пропускної здатності при використанні діаметра поліетиленової труби відповідно до рекомендацій таблиці 4.2.

Рисунок 4.15 ілюструє графічну залежність зниження пропускної здатності газопроводу від внутрішнього діаметра сталевих газопроводів низького тиску у разі протягування у ньому поліетиленової труби з діаметром, який рекоменду-

Таблиця 4.3 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби низького тиску при реконструкції ста-  
левого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=0,5$  Па/м

Діаметр ста- левого газо- проводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з но- рмативною методикою		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з уто- ченою методикою		Зниження пропускної здат- ності, %	
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	за норматив- ною методи- кою	за уточне- ною мето- дою
38x3	3	14	20x3	32,0	40x3,7	35,6	50x2,9	95	96
57x3	10	26	32x3	50,7	63x3,6	51,0	63x3,6	80	87
76x3	23	32,6	40x3,7	69,5	90x5,2	67,4	90x5,2	85	87
89x3	36	44,2	50x2,9	82,4	110x6,3	78,2	90x5,2	81	83
108x3	62	55,8	63x3,6	101,1	125x7,1	93,8	110x6,3	80	80
159x4,5	177	97,4	110x6,3	148,4	180x10,3	131,5	160x9,1	68	60
219x5	431	141,8	160x9,1	206,3	250x14,2	175,8	200x11,4	64	48

Таблиця 4.4 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби низького тиску при реконструкції ста-  
левого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=1,0$  Па/м

Діаметр ста- левого газо- проводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з но- рмативною методикою		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з уто- ченою методикою		Зниження пропускної здат- ності, %	
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	за норматив- ною методи- кою	за уточне- ною мето- дою
38x3	4	14	20x3	32,0	40x3,7	33,6	50x2,9	92	94
57x3	14	26	32x3	50,6	63x3,6	49,5	63x3,6	81	84
76x3	33	32,6	40x3,7	69,3	90x5,2	65,4	75x4,3	87	88
89x3	53	44,2	50x2,9	82,1	110x6,3	75,9	90x5,2	81	81
108x3	92	55,8	63x3,6	100,8	125x7,1	90,9	110x6,3	80	78
159x4,5	259	97,4	110x6,3	147,8	180x10,3	127,4	160x9,1	68	56
219x5	630	141,8	160x9,1	205,4	250x14,2	170,2	200x11,4	63	43



Таблиця 4.5 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби низького тиску при реконструкції ста-  
левого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу I=1,5 Па/м

Діаметр ста- левого газо- проводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з но- рмагивною методикою		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з уго- ченою методикою		Зниження пропускної здат- ності, %	
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	за норматив- ною методи- кою	за уточне- ною мето- дикою
38x3	5	14	20x3	31,8	40x3,7	32,3	40x3,7	90	93
57x3	18	26	32x3	50,5	63x3,6	48,6	63x3,6	82	85
76x3	42	32,6	40x3,7	69,2	90x5,2	64,2	75x4,3	87	88
89x3	66	44,2	50x2,9	82,0	110x6,3	74,5	90x5,2	81	80
108x3	115	55,8	63x3,6	100,6	125x7,1	89,2	110x6,3	80	76
159x4,5	323	97,4	110x6,3	147,4	180x10,3	125,0	160x9,1	67	53
219x5	784	141,8	160x9,1	204,7	250x14,2	166,9	200x11,4	63	39

Таблиця 4.6 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби низького тиску при реконструкції ста-  
левого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу I=2,0 Па/м

Діаметр ста- левого газо- проводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з но- рмагивною методикою		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з уго- ченою методикою		Зниження пропускної здат- ності, %	
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	за норматив- ною методи- кою	за уточне- ною мето- дикою
38x3	6	14	20x3	31,7	40x3,7	31,9	40x3,7	89	92
57x3	21	26	32x3	50,4	63x3,6	48,0	63x3,6	83	85
76x3	49	32,6	40x3,7	69,1	90x5,2	63,4	75x4,3	87	87
89x3	77	44,2	50x2,9	81,8	110x6,3	73,5	90x5,2	81	79
108x3	134	55,8	63x3,6	100,4	125x7,1	88,0	110x6,3	80	75
159x4,5	377	97,4	110x6,3	147,1	180x10,3	123,2	140x8	67	51
219x5	916	141,8	160x9,1	204,3	250x14,2	164,5	200x11,4	63	37

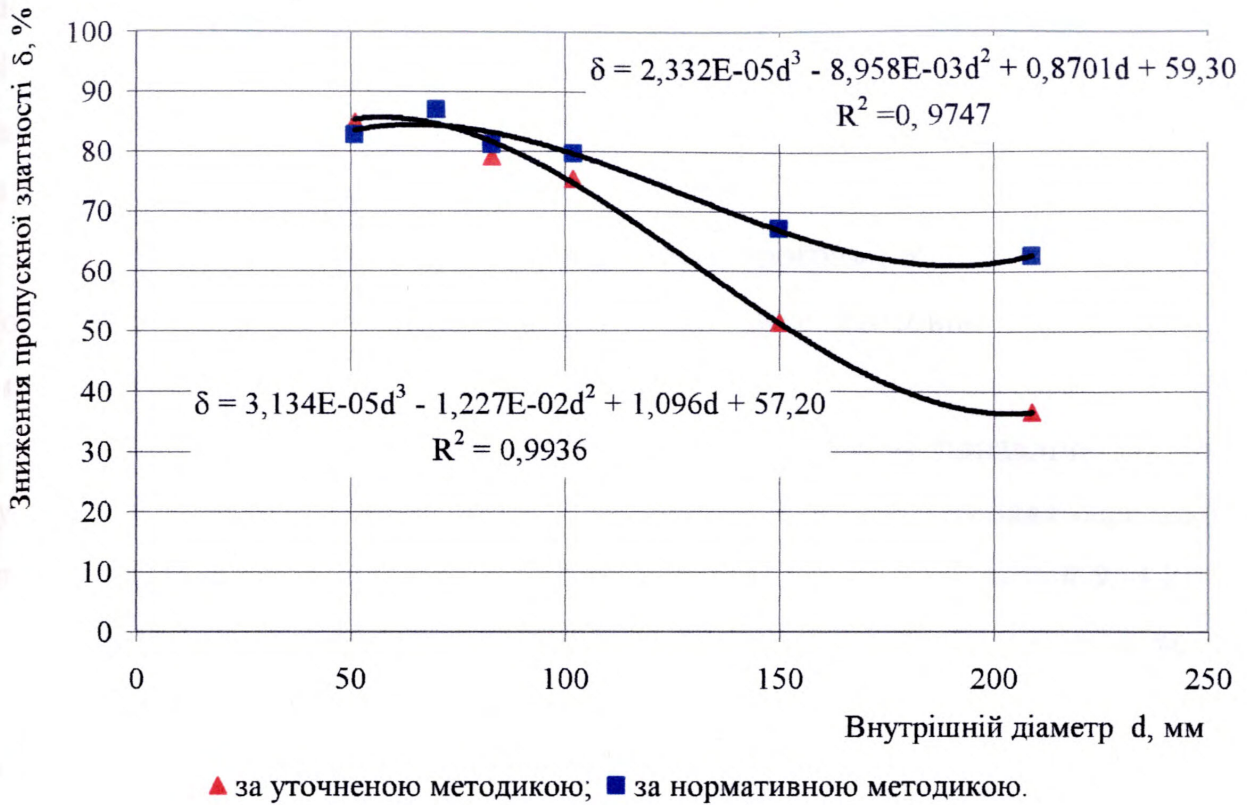
Таблиця 4.7 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби низького тиску при реконструкції ста-  
левого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу І=2,5 Па/м

Діаметр ста- левого газо- проводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_{\text{н}}, \text{м}^3 / \text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з но- рмативною методикою		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з уго- щеною методикою		Зниження пропускної здат- ності, %	
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	за норматив- ною методи- кою	за уточне- ною мето- дикою
38x3	7	14	20x3	31,7	40x3,7	31,6	40x3,7	88	92
57x3	24	26	32x3	50,4	63x3,6	47,5	63x3,6	83	84
76x3	55	32,6	40x3,7	69,0	90x5,2	62,7	75x4,3	87	87
89x3	87	44,2	50x2,9	81,7	110x6,3	72,8	90x5,2	81	78
108x3	152	55,8	63x3,6	100,2	125x7,1	87,1	110x6,3	79	75
159x4,5	426	97,4	110x6,3	146,8	180x10,3	121,9	140x8	67	50
219x5	1032	141,8	160x9,1	203,9	250x14,2	162,7	200x11,4	62	34

Таблиця 4.8 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби низького тиску при реконструкції ста-  
левого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу І=3 Па/м

Діаметр ста- левого газо- проводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_{\text{н}}, \text{м}^3 / \text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з но- рмативною методикою		Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з уго- щеною методикою		Зниження пропускної здат- ності, %	
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	За норматив- ною методи- кою	За уточне- ною мето- дикою
38x3	7	14	20x3	31,3	40x3,7	20x3	14	87	91
57x3	26	26	32x3	47,1	63x3,6	32x3	26	83	84
76x3	61	32,6	40x3,7	62,2	75x4,3	40x3,7	32,6	87	86
89x3	96	44,2	50x2,9	72,1	90x5,2	50x2,9	44,2	81	78
108x3	167	55,8	63x3,6	86,3	110x6,3	63x3,6	55,8	79	74
159x4,5	469	97,4	110x6,3	120,8	140x8	110x6,3	97,4	67	48
219x5	1138	141,8	160x9,1	161,2	200x11,4	160x9,1	141,8	62	32

ється ДБН В.2.5-41:2009, без зміни робочого тиску для одного із значень гідравлічного нахилу. Розрахунки виконані за пропонованою уточненою методикою.



Рисунк 4.15- Залежність зменшення пропускної здатності газопроводу від діаметра сталевих труб у разі її заміни на поліетиленову без зміни робочого тиску для гідравлічного нахилу 2 Па/м

Аналіз даних таблиць 4.3-4.8 засвідчив, що для можливого діапазону зміни гідравлічного нахилу в системах газопостачання населених пунктів використання діаметрів поліетиленових труб, рекомендованих ДБН В.2.5-41:2009, за умови збереження низького тиску призводить до значного зменшення пропускної здатності системи. Втрата пропускної здатності елемента газорозподільної системи становить від 40 до 95 % залежно від діаметра сталевих газопроводу. Тому такий варіант реконструкції систем розподілу газу не є ефективним і не може бути рекомендований до реалізації.

Тому наступним етапом досліджень є визначення необхідного діаметра поліетиленового газопроводу середнього тиску для заміни сталевих газопроводу.

проводу низького тиску за умови збереження пропускної здатності. Розрахунки також виконаємо за двома методиками – за нормативною та уточненою, що пропонується. Нормативна методика базується на використанні формули (4.40), що рекомендована ДБН В.2.5-20:2001. Уточнена методика розрахунку газових мереж середнього тиску базується на використанні формул (3.36) і (4.41) при відомому значенні параметра  $A$  згідно з формулою (4.39).

Для реалізації методик нами розроблена програма RECONST-S, яка дає можливість провести багатоваріантні розрахунки стосовно заміни труб із зміною робочого тиску із низького на середній.

Одержані результати для можливого діапазону зміни гідравлічного нахилу в газопроводах низького тиску і параметра  $A$  в газопроводах середнього тиску систем газопостачання населених пунктів зведені у таблиці 4.9.-4.20.

Таблиці 4.9-4.14 містять результати розрахунків необхідних діаметрів поліетиленових труб за нормативною методикою, а таблиці 4.15-4.20 – за пропонованою уточненою методикою.

Аналіз даних таблиць 4.9-4.20 засвідчив, що для кожного стандартного діаметра сталеві труби за певного значення гідравлічного нахилу існує конкретне мінімальне значення параметра  $A$ , за якого стає можливим виконати рекомендації ДБН В.2.5-41:2009 щодо вибору діаметра поліетиленової труби для протягування її всередині сталеві із збереженням пропускної здатності.

Рисунок 4.16 ілюструє графічну залежність мінімального значення параметра  $A$  в поліетиленовій трубі середнього тиску від гідравлічного нахилу в сталевій трубі низького тиску для сортаменту сталевих газопроводів низького тиску за умови збереження пропускної здатності. Розрахунки виконані за пропонованою уточненою методикою.

Таблиця 4.9 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=0,5$  Па/м (нормативна методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_{н}, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за нормативною методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при вихористанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009	
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001		0,0005
38x3	3	14	20x3	8,2	13,2	21,3	24,7	0,00752
57x3	10	26	32x3	12,4	19,8	32,0	37,1	0,00273
76x3	23	32,6	40x3,7	17,0	27,2	43,9	50,8	0,00420
89x3	36	44,2	50x2,9	20,2	32,3	52,1	60,2	0,00220
108x3	62	55,8	63x3,6	24,9	39,7	64,0	73,9	0,00193
159x4,5	177	97,4	110x6,3	36,7	58,4	93,9	108,5	0,00085
219x5	431	141,8	160x9,1	51,3	81,5	130,7	150,9	0,00068

Таблиця 4.10 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=1,0$  Па/м (нормативна методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_{н}, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за нормативною методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при вихористанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009	
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001		0,0005
38x3	4	14	20x3	9,2	14,7	23,8	27,5	0,01278
57x3	14	26	32x3	14,3	22,9	37,0	42,7	0,00543
76x3	33	32,6	40x3,7	19,6	31,4	50,7	58,6	0,00839
89x3	53	44,2	50x2,9	23,3	37,3	60,1	69,4	0,00438
108x3	92	55,8	63x3,6	28,7	45,8	73,7	85,2	0,00384
159x4,5	259	97,4	110x6,3	42,3	67,4	108,2	124,9	0,00167
219x5	630	141,8	160x9,1	59,1	93,8	150,5	173,7	0,00134

Таблиця 4.11 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=1,5$  Па/м (нормативна методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_{н}, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за нормативною методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при виконанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001	
38x3	5	14	20x3	9,7	15,6	25,3	0,01702
57x3	18	26	32x3	15,5	24,9	40,2	0,00812
76x3	42	32,6	40x3,7	21,4	34,2	55,1	0,01257
89x3	66	44,2	50x2,9	25,4	40,5	65,2	0,00655
108x3	115	55,8	63x3,6	31,2	49,8	80,1	0,00573
159x4,5	323	97,4	110x6,3	46,0	73,2	117,4	0,00248
219x5	784	141,8	160x9,1	64,2	101,9	163,2	0,00198

Таблиця 4.12 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=2,0$  Па/м (нормативна методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_{н}, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за нормативною методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при виконанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001	
38x3	6	14	20x3	10,3	16,6	26,8	0,02277
57x3	21	26	32x3	16,5	26,4	42,6	0,01081
76x3	49	32,6	40x3,7	22,7	36,2	58,4	0,01675
89x3	77	44,2	50x2,9	26,9	43,0	69,2	0,00871
108x3	134	55,8	63x3,6	33,1	52,8	84,9	0,00762
159x4,5	377	97,4	110x6,3	48,8	77,5	124,4	0,00328
219x5	916	141,8	160x9,1	68,1	107,9	172,9	0,00263

Таблиця 4.13 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=2,5$  Па/м (нормативна методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за нормативною методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при викирстанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009	
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001		0,0005
38x3	7	14	20x3	10,8	17,4	28,1	32,5	0,02842
57x3	24	26	32x3	17,3	27,7	44,6	51,6	0,01350
76x3	55	32,6	40x3,7	23,7	37,9	61,1	70,6	0,02092
89x3	87	44,2	50x2,9	28,2	45,0	72,4	83,6	0,01086
108x3	152	55,8	63x3,6	34,6	55,2	88,8	102,5	0,00949
159x4,5	426	97,4	110x6,3	51,0	81,1	130,1	150,2	0,00408
219x5	1032	141,8	160x9,1	71,2	112,9	180,7	208,6	0,00326

Таблиця 4.14 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=3,0$  Па/м (нормативна методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за нормативною методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при викирстанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009	
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001		0,0005
38x3	7	14	20x3	11,2	18,0	29,1	33,7	0,03414
57x3	26	26	32x3	17,9	28,7	46,3	53,5	0,01617
76x3	61	32,6	40x3,7	24,6	39,4	63,4	73,3	0,02510
89x3	96	44,2	50x2,9	29,2	46,6	75,1	86,7	0,01300
108x3	167	55,8	63x3,6	36,0	57,3	92,1	106,4	0,01137
159x4,5	469	97,4	110x6,3	53,0	84,1	134,9	155,8	0,00488
219x5	1138	141,8	160x9,1	73,9	117,1	187,4	216,2	0,00389

Таблиця 4.15 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=0,5$  Па/м (уточнена методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу з ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску, розрахований за уточненою методикою при $A, \text{МПа}^2/\text{км}$			Мінімальне значення параметра $A$ при виконанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001	
38x3	3	14	20x3	8,7	13,9	24,2	0,01185
57x3	10	26	32x3	12,4	20,8	34,9	0,00372
76x3	23	32,6	40x3,7	16,4	27,5	46,1	0,00469
89x3	36	44,2	50x2,9	19,0	31,9	53,6	0,00236
108x3	62	55,8	63x3,6	22,8	38,3	64,2	0,00187
159x4,5	177	97,4	110x6,3	32,0	53,7	90,1	0,00071
219x5	431	141,8	160x9,1	42,8	71,8	120,4	0,00049

Таблиця 4.16 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=1,0$  Па/м (уточнена методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску, розрахований за уточненою методикою при $A, \text{МПа}^2/\text{км}$			Мінімальне значення параметра $A$ при виконанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001	
38x3	4	14	20x3	9,5	16,0	26,3	0,01823
57x3	14	26	32x3	14,1	23,6	39,6	0,00652
76x3	33	32,6	40x3,7	18,6	31,2	52,3	0,00821
89x3	53	44,2	50x2,9	21,6	36,2	60,8	0,00412
108x3	92	55,8	63x3,6	25,8	43,4	72,8	0,00326
159x4,5	259	97,4	110x6,3	36,2	60,8	102,0	0,00123
219x5	630	141,8	160x9,1	48,4	81,2	136,2	0,00084



Таблиця 4.17 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=1,5$  Па/м (уточнена методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу з ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску, розрахований за уточненою методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при виході з пристані діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009	
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001		0,0005
38x3	5	14	20x3	10,1	16,9	27,5	32,5	0,02300
57x3	18	26	32x3	15,1	25,4	42,7	49,9	0,00904
76x3	42	32,6	40x3,7	20,0	33,5	56,3	65,8	0,01136
89x3	66	44,2	50x2,9	23,2	38,9	65,3	76,4	0,00569
108x3	115	55,8	63x3,6	27,8	46,6	78,3	91,4	0,00450
159x4,5	323	97,4	110x6,3	38,9	65,3	109,6	128,1	0,00169
219x5	784	141,8	160x9,1	52,0	87,2	146,3	171,0	0,00115

Таблиця 4.18 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=2,0$  Па/м (уточнена методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3/\text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску, розрахований за уточненою методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при виході з пристані діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009	
		$D_3, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001		0,0005
38x3	6	14	20x3	10,6	17,8	28,7	33,9	0,02908
57x3	21	26	32x3	16,0	26,8	44,9	52,5	0,01139
76x3	49	32,6	40x3,7	21,0	35,3	59,3	69,3	0,01429
89x3	77	44,2	50x2,9	24,4	41,0	68,8	80,4	0,00716
108x3	134	55,8	63x3,6	29,2	49,1	82,4	96,2	0,00565
159x4,5	377	97,4	110x6,3	40,9	68,7	115,3	134,7	0,00212
219x5	916	141,8	160x9,1	54,7	91,7	153,9	179,8	0,00144

Таблиця 4.19 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=2,5$  Па/м (уточнена методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3 / \text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за уточненою методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при вихористанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001	
38x3	7	14	20x3	11,0	18,5	29,7	0,03475
57x3	24	26	32x3	16,6	27,9	46,8	0,01361
76x3	55	32,6	40x3,7	21,9	36,8	61,7	0,01705
89x3	87	44,2	50x2,9	25,4	42,7	71,6	0,00854
108x3	152	55,8	63x3,6	30,4	51,1	85,7	0,00674
159x4,5	426	97,4	110x6,3	42,6	71,5	119,9	0,00253
219x5	1032	141,8	160x9,1	56,8	95,3	160,0	0,00172

Таблиця 4.20 – Результати визначення необхідного діаметра поліетиленової труби середнього тиску при реконструкції сталевого газопроводу за умови збереження пропускної здатності для гідравлічного нахилу  $I=3,0$  Па/м (уточнена методика розрахунку)

Діаметр сталевого газопроводу, $D_3 \times \delta, \text{мм}$	Пропускна здатність, $Q_n, \text{м}^3 / \text{год}$	Діаметр поліетиленового газопроводу згідно ДБН В.2.5-41:2009		Внутрішній діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску розрахований за уточненою методикою при А, МПа <sup>2</sup> /км			Мінімальне значення параметра А при вихористанні діаметра газопроводу згідно з ДБН В.2.5-41:2009
		$D, \text{мм}$	$D_3 \times \delta, \text{мм}$	0,1	0,01	0,001	
38x3	7	14	20x3	11,4	19,1	30,5	0,04026
57x3	26	26	32x3	17,2	28,8	48,3	0,01573
76x3	61	32,6	40x3,7	22,6	38,0	63,7	0,01970
89x3	96	44,2	50x2,9	26,3	44,1	73,9	0,00986
108x3	167	55,8	63x3,6	31,4	52,7	88,5	0,00778
159x4,5	469	97,4	110x6,3	44,0	73,8	123,8	0,00291
219x5	1138	141,8	160x9,1	58,7	98,4	165,2	0,00197

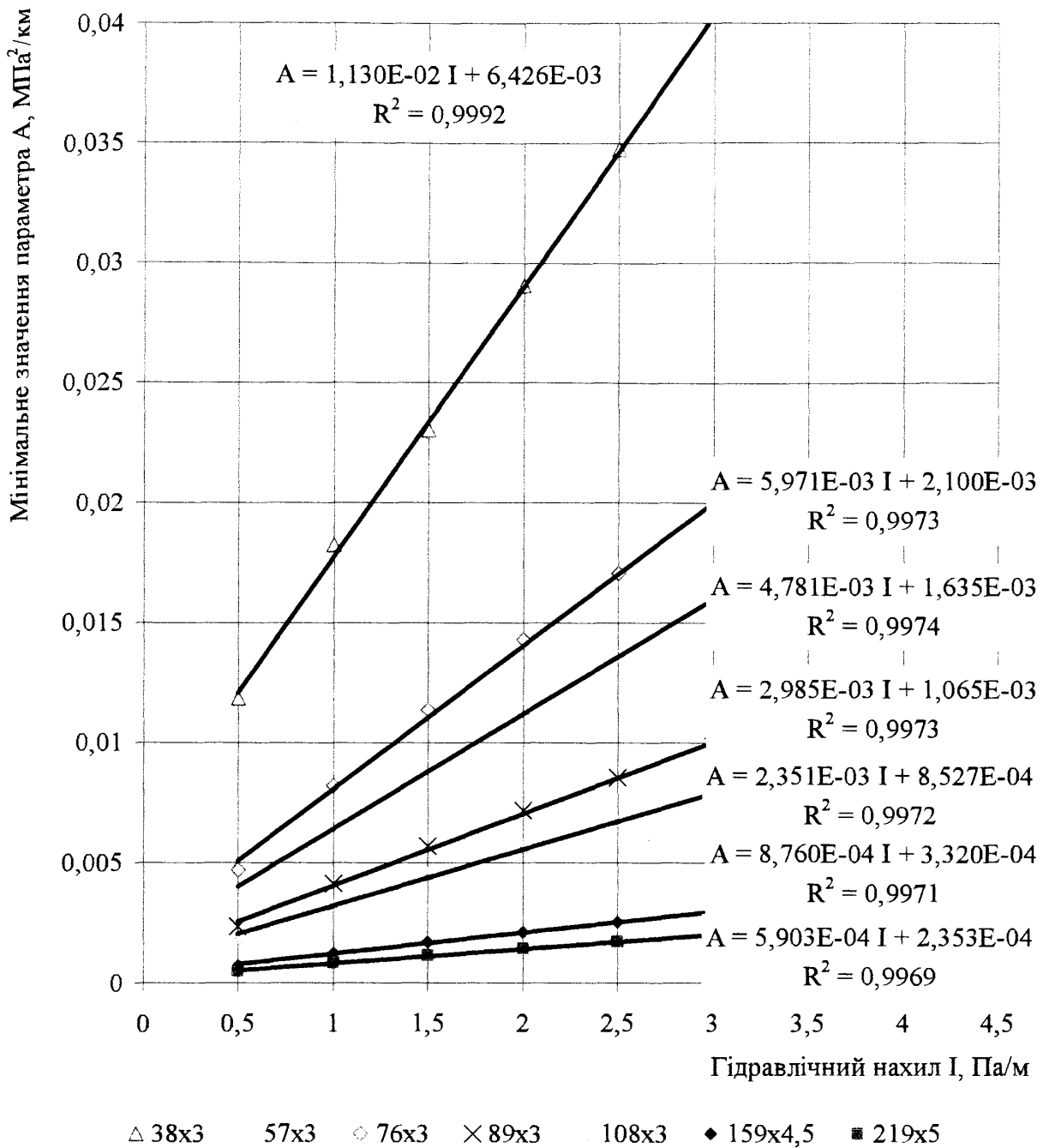


Рисунок 4.16 – Графічні залежності мінімального значення параметра А в поліетиленовій трубі середнього тиску від гідралічного нахилу в сталевій трубі низького тиску за умови збереження пропускної здатності

Використовуючи Microsoft Excel, виконуємо математичне моделювання одержаних графічних залежностей. У результаті отримуємо, що з достовірністю апроксимації 99 % графічні залежності можна описати такими логарифмічними функціями (за умови  $0,5 < I < 3$ ):

для діаметра 219x5 мм

$$A_{\min} = 5,903 \cdot 10^{-4} \cdot I + 2,353 \cdot 10^{-4}, \quad (4.45)$$

для діаметра 159x4,5 мм

$$A_{\min} = 8,76 \cdot 10^{-4} \cdot I + 3,32 \cdot 10^{-4}, \quad (4.46)$$

для діаметра 108x3 мм

$$A_{\min} = 2,351 \cdot 10^{-3} \cdot I + 8,527 \cdot 10^{-4}, \quad (4.47)$$

для діаметра 89x3 мм

$$A_{\min} = 2,985 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,065 \cdot 10^{-3}, \quad (4.48)$$

для діаметра 76x3 мм

$$A_{\min} = 5,971 \cdot 10^{-3} \cdot I + 2,10 \cdot 10^{-3}, \quad (4.49)$$

для діаметра 57x3 мм

$$A_{\min} = 4,781 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1,635 \cdot 10^{-3}, \quad (4.50)$$

для діаметра 38x3 мм

$$A_{\min} = 1,13 \cdot 10^{-2} \cdot I + 6,426 \cdot 10^{-3}. \quad (4.51)$$

Використовуючи номограми на рисунку 4.16 або аналітичні залежності (4.45)-(4.51), можна для будь-якого діаметра сталевих газопроводів низького тиску за будь-якого ступеня завантаження, що характеризується величиною гідралічного нахилу  $I$ , визначити необхідну величину енергетичного параметра  $A_{\min}$  в поліетиленовому газопроводі середнього тиску, яка забезпечить повне збереження пропускної здатності.

Розроблені рекомендації можуть бути безпосередньо використані при реконструкції систем газопостачання конкретних населених пунктів. Так наприклад, для реконструкції сталевих газопроводів низького тиску діаметром 76x3 мм державні будівельні норми ДБН В.2.5-41:2009 пропонують протягування полі-

етиленової труби діаметром 40x3,7 мм. Якщо поліетиленова труба буде газопроводом низького тиску, то при такій технології відповідно до таблиці 4.6 при гідравлічному нахилі  $I = 2$  Па/м пропускна здатність знизиться на 87 % , що є неприпустимо. Однак при зміні в поліетиленовій трубі низького тиску на середній і забезпеченні параметра  $A \geq 0,01429$  (МПа)<sup>2</sup>/км (таблиця 4.18) зазначена заміна труб дасть можливість повністю зберегти пропускну здатність системи газопостачання.

#### **4.5 Розробка номограми для розрахунку поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності**

У практиці проектування та експлуатації газових мереж населених пунктів широко використовується графоаналітичний метод гідравлічного розрахунку. Він базується на використанні номограм, які пов'язують між собою внутрішні стандартні діаметри труб, витрату газу і параметр, що характеризує втрати енергії від тертя на одиниці довжини трубопроводу. На сьогодні розроблені номограми для розрахунку газових мереж високого, середнього і низького тиску із сталевих труб. Зазначені номограми не можна використовувати при гідравлічних розрахунках поліетиленових газових мереж.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки номограм для гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж з урахуванням їх фактичної енерговитратності.

Номограми – це графічне представлення виявлених закономірностей газодинамічних процесів руху газу в поліетиленових газопроводах. Стосовно поліетиленових газопроводів низького тиску одержані закономірності описані формулами (4.1)-(4.15) у підрозділі 4.1.

Використовуючи створену нами програму NOM-N, для кожного стандартного внутрішнього діаметра поліетиленових труб низького тиску змінюємо з певним кроком витрату газу за нормальних умов  $Q_n$  і знаходимо відповідний гідравлічний нахил  $I$ . За виконаними обчисленнями, використовуючи Microsoft

Excel, будуємо графічні залежності гідравлічного нахилу від витрати газу за нормальних умов для всього сортаменту поліетиленових труб низького тиску (рисунок 4.17).

Одержана номограма дає змогу виконувати проектні та експлуатаційні розрахунки поліетиленових газових мереж низького тиску за відсутності відповідного програмного забезпечення, що часто має місце на підприємствах з експлуатації газового господарства.

Аналогічні дослідження виконуємо для поліетиленових газопроводів середнього тиску малого діаметра, які використовуються в одноступеневих системах газопостачання сільських населених пунктів.

Стосовно поліетиленових газопроводів середнього тиску одержані закономірності руху газу описані формулами (3.36), (4.39) і (4.41) у підрозділі 4.2 дисертації.

Використовуючи створену нами програму NOM-S, для кожного стандартного внутрішнього діаметра поліетиленових труб середнього тиску змінюємо з певним кроком витрату газу за нормальних умов  $Q_n$  і знаходимо відповідне значення параметра  $A$ . За результатами обчислень, використовуючи Microsoft Excel, будуємо графічні залежності величини параметра  $A$  від витрати газу за нормальних умов для сортаменту поліетиленових труб середнього тиску, що працюють в зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму (рисунок 4.18).

Одержана номограма дає змогу виконувати проектні та експлуатаційні розрахунки поліетиленових газових мереж середнього тиску за відсутності відповідного програмного забезпечення, що часто має місце на підприємствах з експлуатації газового господарства.

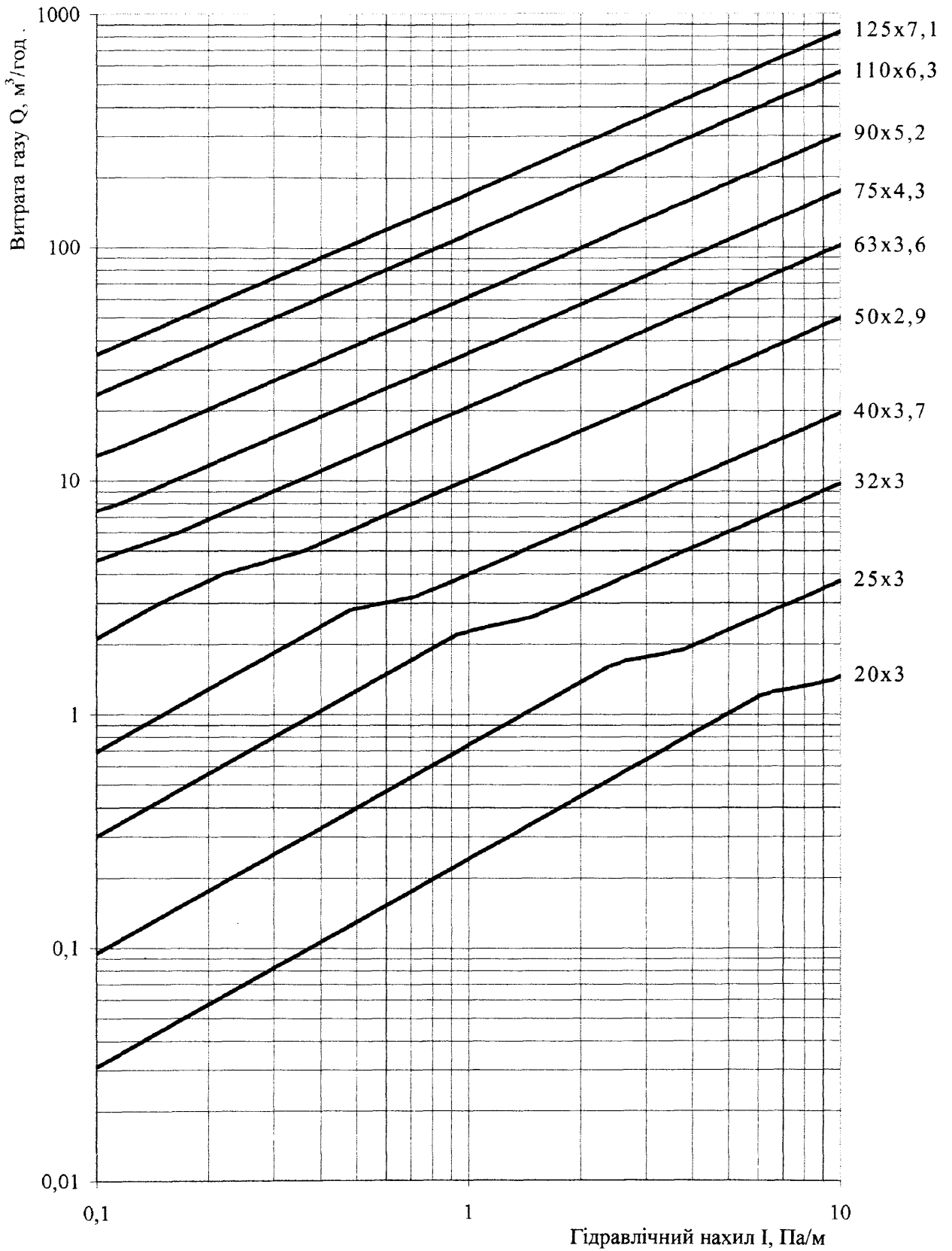


Рисунок 4.17 – Номограма для гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж низького тиску

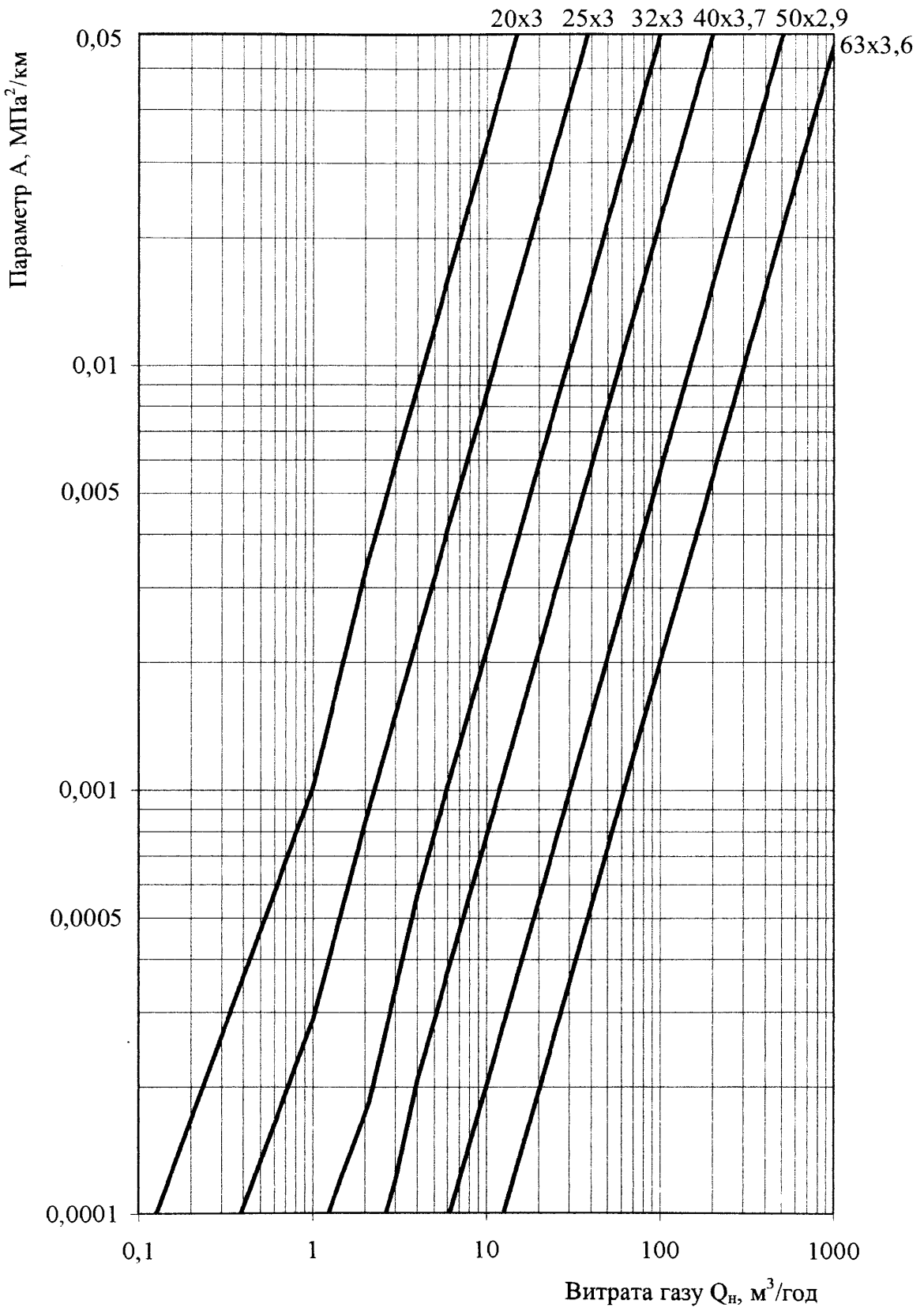


Рисунок 4.18 – Номограма для гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж середнього тиску в зоні гідравлічно гладких труб



#### **4.6 Розробка способу виявлення несанкціонованих урізувань в газові мережі населених пунктів з метою зменшення втрат газу**

На ефективність та економічність експлуатації системи газопостачання населених пунктів України значний вплив має величина втрат природного газу при транспортуванні та реалізації. За даними підприємств з газопостачання та газифікації і висновками комісій, які за дорученнями НАК «Нафтогаз України» здійснювали перевірку дотримання дисципліни газоспоживання, до 15 % від загального обсягу споживання газу становлять втрати газу, пов'язані з несанкціонованим, самовільним підключенням споживачів до систем газопостачання населених пунктів.

Оперативне виявлення місця самовільного урізування в газову мережу дасть можливість суттєво зменшення величину втрат газу, що у свою чергу підвищить ефективність та економічність експлуатації систем газопостачання населеного пункту.

Відомі способи визначення координат джерела акустичної емісії [113,114,115,116,117,118], але вони стосуються деталей, об'єктів малої протяжності або гірських порід і тому не можуть бути використані для виявлення місць порушення цілісності труби (врізувань у трубу) через неможливість розміщення перетворювачів сигналів акустичної емісії по довжині укладеного у ґрунт газопроводу населеного пункту. Запропонований ультразвуковий спосіб визначення координат джерела [119], який базується на використанні ультразвукових хвиль, що реєструються ультразвуковими перетворювачами різної конструкції, але і цей спосіб не може бути застосований для виявлення місць врізувань в укладені в ґрунт газопроводи населених пунктів.

У роботі [120] запропонований спосіб створення акустичних сигналів ударним способом, при якому створену акустичну хвилю використовують для виявлення дефектів в обмеженій за розмірами деталі. І цей спосіб не може бути застосований для виявлення місць врізувань в укладені в ґрунт газопроводи населених пунктів.

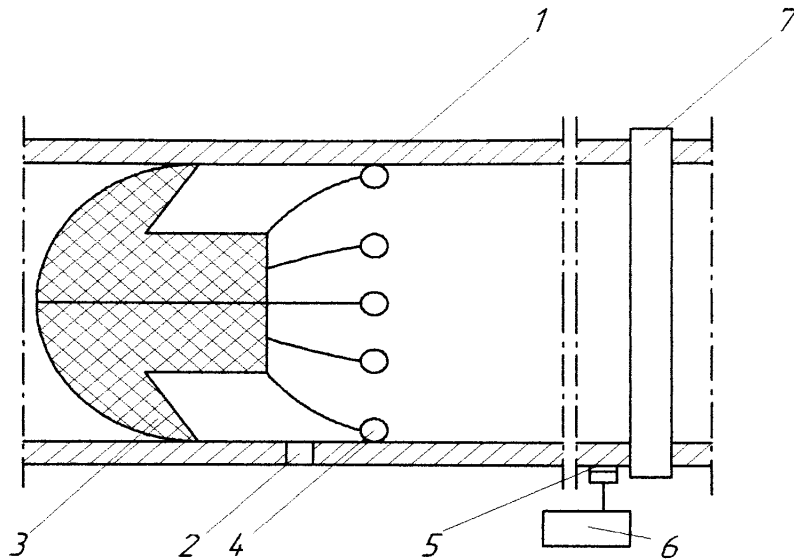
Запропонований нами винахід [121] відноситься до газової промисловості і може бути використаний в системах газопостачання населених пунктів з метою неруйнівного контролю для виявлення несанкціонованих врізувань до газових мереж населених пунктів.

В основу винаходу поставлена задача створення простого та доступного з точки зору елементів конструкції способу виявлення місць несанкціонованих врізувань у газопроводи населених пунктів шляхом використання відомого ударного способу створення у металі акустичних коливань, подальшого їх приймання та аналізу.

Запропонований нами спосіб виявлення місць урізувань в газопроводи населених пунктів полягає у створенні акустичних коливань ударним способом на внутрішній поверхні укладеної у ґрунт труби, і відрізняється тим, що з метою неруйнівного контролю і виявлення отворів та їх координат на певній ділянці газопроводу акустичні коливання створюються ударним способом ударниками, змонтованими на еластичному поршні, який рухається трубопроводом; акустичний сигнал приймають акустичним приймачем, що контактує з поверхнею трубопроводу, а координату врізування визначають за витратою, тиском газу та його температурою.

На рисунку 4.19 представлений загальний вигляд системи для виявлення врізувань в трубопровід та визначення їх координат.

Спосіб реалізується так. До початку газопроводу населеного пункту, стан якого необхідно діагностувати, під'єднують лічильник об'єму газу 7 і монтують п'єзодавач 5 з аналізатором акустичного сигналу 6. У порожнину газопроводу вставляють еластичний поршень 3 з приєднаними до нього на пружних елементах металевими ударниками 4, які завдяки пружним елементам притискаються до внутрішньої поверхні труби і ковзають по ній. Під дією тиску поршень переміщується по газопроводу зі швидкістю, практично рівною середній швидкості потоку газу. Завдяки еластичному корпусу поршень здатний проходити наявні на трасі газопроводів повороти.



- 1 - газопровід населеного пункту, 2 – отвір урізування,  
 3 - еластичний поршень 4- ударник на пружному елементі,  
 5 - п'єзодавач з аналізатором сигналу 6, 7- лічильник об'єму газу.

Рисунок 4.19 - Спосіб виявлення місць урізувань у газопроводи населених пунктів

За наявності отвору в газопроводі ударник ударяє по краю отвору, створюючи при цьому акустичний сигнал, який поширюється у стінці труби і приймається п'єзодавачем 5 та аналізується аналізатором сигналу 6. За показами лічильника об'єму газу та приладів для вимірювання тиску і температури розраховується відстань від початку газопроводу до виявленого місця врізування. Винахід базується на явищі поширення акустичного сигналу від удару кульки по краю отвору в трубопроводі і малого коефіцієнта його затухання у металі, що дає змогу приймати та аналізувати акустичний сигнал на значній відстані від місця його утворення, яка відповідає протяжності ділянок газопроводів населених пунктів. Зазначений спосіб фіксує всі врізування на певній ділянці газопроводу. Порівняння одержаних результатів із технологічною схемою газових мереж дає змогу не розглядати технологічні врізування і виявити несанкціоно-

вані, пов'язані із незаконними відборами газу із систем газопостачання населених пунктів.

#### 4.7 Висновки по розділу 4

Реалізація математичних моделей, що одержані шляхом проведення експериментальних та теоретичних досліджень особливостей газодинамічних процесів руху газу в поліетиленових газопроводах, дала можливість розробити методологію прогнозування пропускної здатності та енерговитратності газових мереж населених пунктів, а саме:

- створена методика гідравлічного розрахунку газових мереж, що враховує фактичну енерговитратність поліетиленових газових мереж, вплив профілю траси та умов навколишнього середовища;

- розроблений метод коригування діаметрів поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності. Економічний ефект від використання зазначеного методу становить в середньому 280 грн. на 100 м газової мережі;

- запропонований метод коригування діаметрів поліетиленових газових мереж середнього тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності. Економічний ефект від використання зазначеного методу становить в середньому 520 грн. на 100 м газової мережі;

- розроблені рекомендації щодо реконструкції підземних сталевих трубопроводів із використанням поліетиленових труб. Виявлено, що при протягуванні поліетиленових труб з діаметрами, які рекомендовані чинним нормативним документом, без зміни робочого тиску має місце зниження пропускної здатності від 60 до 95 % залежно від діаметра сталевих газопроводу. Тому обов'язковим в процесі реконструкції є зміна робочого тиску із низького на середній. Для кожного стандартного діаметра сталевих труб виявлено мінімальне значення параметра  $A$ , за якого стає можливим виконати рекомендації ДБН

В.2.5-41:2009 щодо вибору діаметра поліетиленової труби для протягування її всередині сталевий із збереженням пропускної здатності;

- розроблені зручні у практичному використанні номограми для виконання проектних та експлуатаційних розрахунків поліетиленових газових мереж низького і середнього тиску;

- розроблений захищений патентом спосіб оперативного виявлення несапціонованих урізувань в газовій мережі, який дає змогу скоротити втрати газу і тим самим зменшити енерговитратність системи газопостачання населених пунктів.

## ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена наукова задача виявлення ефективності поліетиленових газових мереж з точки зору газодинамічних підходів, виконане кількісне оцінювання зменшення енерговитратності системи газопостачання у разі заміни сталевих труб на поліетиленові, встановлений взаємозв'язок між особливостями профілю траси, умовами навколишнього середовища і втратами енергії на транспортування газу; розроблений пакет методик і програм для прогнозування пропускної здатності та гідравлічної енерговитратності газових мереж, а саме:

1 Методом математичного моделювання встановлений взаємозв'язок між завантаженням газопроводу, діаметром, значеннями робочих тисків і температури та зменшенням гідравлічної енерговитратності поліетиленових газових мереж у разі їх використання замість сталевих. Встановлено, що в газових мережах низького тиску енерговитратність транспортування газу зменшується на 4 - 19 % , у газових мережах середнього або високого тиску на 6 - 31 % залежно від зазначених вище чинників.

2 Доведено, що урахування впливу профілю траси на енерговитратність газових мереж суттєво впливає на їх проектні та експлуатаційні параметри. При цьому змінюються як необхідні діаметри ділянок, так і закономірності зміни тиску газу в газовій мережі. Використання барометричної формули для врахування профілю траси дає можливість на 10-15 % уточнити результати гідравлічного розрахунку газових мереж низького тиску, що підвищує ефективність проектування та експлуатації систем газопостачання населених пунктів.

3 Експериментальні дослідження газодинамічних процесів руху газу в поліетиленових газових мережах виявили існування різних режимів руху, що відрізняються законом внутрішнього тертя. За чисел Рейнольдса, менших за 2150, має місце ламінарний режим руху, для чисел Рейнольдса від 2150 до 2400 - критичний режим руху газу. Для чисел Рейнольдса від 2400 до 70000 має місце турбулентний режим руху газу в зоні гідравлічно гладких труб.

4 Експериментальні дослідження засвідчили непридатність існуючих моделей коефіцієнта гідравлічного опору для визначення втрат тиску в поліетиленових газових мережах низького і середнього тиску. Для ступеневої формули Альтшуля, використання якої рекомендується чинним нормативним документом, відносна різниця розрахованих і фактичних значень коефіцієнта гідравлічного опору змінюється від  $\delta = 0 \%$  для числа Рейнольдса  $Re = 5000$  до  $\delta = 60 \%$  для  $Re = 70000$ .

5 Розроблений комплекс методів і комп'ютерних програм для прогнозування пропускної здатності та енерговитратності газових мереж населених пунктів з урахуванням особливостей газодинаміки поліетиленових труб, впливу профілю траси та умов навколишнього середовища. Встановлено, що при заміні сталевих труб на поліетиленові втрати енергії в середньому на 28 % менші від нормативних, що дає можливість передбачити укладання труб меншого діаметра. При цьому вартість системи газопостачання зменшується в середньому на 2,8 тис. грн. на 1 км газової мережі низького тиску та 5,2 тис. грн. на 1 км газової мережі середнього тиску. Розробки увійшли у комплексну галузеву методичку і впроваджені в проектному інституті «Укргазпроект» та ПАТ «Івано-Франківськгаз».

**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Енергетична безпека держави: високоефективні технології видобування, постачання і використання природного газу / [Є.І. Крижанівський, М.І. Гончарук, В.Я. Грудз та ін.]. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2006. – 281 с.
2. Бобровский С.А. Движение газа в газопроводе с путевым отбором /С.А. Бобровский. – М.: Наука, 1972. – 193 с.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 439 с.
4. Бусленко Н.П. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
5. Максимов Ю.И. Имитационные системы оперативного планирования и управления магистральным транспортом газа / Ю.И. Максимов. – Новосибирск: Наука, 1982. – 194 с.
6. Кучин Б.Л. Управление системой газоснабжения в осложненных условиях эксплуатации / Б.Л. Кучин, А.Е. Алтунин. –М.: Недра, 1987. – 209 с.
7. Семухин М.В. Расчет и оптимизация нелинейной системы для сети материальных потоков : [Математическое и информационное моделирование (сб. науч. трудов)] / М.В. Семухин. – Тюмень: ТюмГУ, 1997. – С. 118-124.
8. Режимы газотранспортных систем / [ Є.І. Яковлев, О.С. Козак, В.Б. Михалків та ін.]. – Львів: Світ, 1992. – 187 с.
9. Керування режимами газотранспортних систем / [В.Я. Грудз, М.П. Лінчевський, В.Б. Михалків та ін.] – К.: Укргазпроект, 1996. – 140 с.
10. Ковалко М.П. Методи та засоби підвищення ефективності функціонування системи трубопровідного транспорту газу / М.П. Ковалко. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2001. – 288 с.
11. Жидкова М.А. Переходные процессы в магистральных газопроводах / М.А. Жидкова. – К.: Наукова думка, 1979. – 255 с.
12. Жидкова М.О. Формування системи розрахункових моделей для оцінювання ефективності функціонування лінійних ділянок магістральних газопрово-



дів / М.О. Житкова, А.А. Руднік // Экология и ресурсосбережение. – 2001. – № 6. – С. 66–69.

13. Жидкова М.О. Ринкова концепція аналізу та оцінювання ефективності трубопровідного транспорту газу / М.О. Жидкова, С.Ф. Білик, А.А. Руднік // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – № 4. – С. 3–5.

14. Руднік А.А. Методика узагальненого оцінювання та підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу / А.А. Руднік // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 6. – С. 36–38.

15. Руднік А.А. Прикладні моделі виробничих функцій лінійних ділянок магістральних газопроводів / А.А. Руднік // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 1. – С. 39–41.

16. Михалевич О.Т. Вплив зміни параметрів газу на розподіл тиску в горизонтальних трубопроводах / О.Т. Михалевич, Д.Ф. Тимків, Я.Д. П'янило // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 4(9). – С. 37–40.

17. Михалевич О.Т. Розрахунок параметрів об'єктів регулювання газопотоком / О.Т. Михалевич, Я.Д. П'янило, М.Г. Притула // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2003. – № 481. – С. 136–142.

18. Грудз В.Я. Нестационарне температурне поле в ґрунті навколо двох паралельних газопроводів / В.Я. Грудз, Т.Ф. Тутко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – Вип. 38 (Т.3). – С. 161–172.

19. Тутко Т.Ф. Система характеристичних рівнянь нестационарного неізотермічного руху газу в негоризонтальних трубопроводах / Т.Ф. Тутко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – Вип.38 (Т.5). – С. 45–61.

20. Шимко Р.Я. Моделювання нестационарного газодинамічного процесу в ПСГ за умов пружного режиму закачки газу / Р.Я. Шимко, В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, Я.В. Грудз // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2002. – № 2(3). – С. 52–53.

21. Михалків В.Б. Оптимальне керування аварійним запасом труб для лінійної частини магістральних газопроводів / В.Б. Михалків, М.П. Лінчевський

// Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – Вип. 38. (Т.3). – С. 86–91.

22. Середницький Я.И. Противокоррозионная изоляция магистральных газонефтепроводов / Я.И. Середницький, Ю.В. Банахевич, А.В. Драгилев. – Киев-Львов: Сплайн, 2008. – 494 с.

23. Середюк М.Д. Визначення пропускної здатності кільканиткового газопроводу при роботі з відкритими перемичками на ділянках / М.Д. Середюк, А.І. Ксеняч, М.І. Фик // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – № 1(13). – С. 75–82.

24. Середюк М.Д. Визначення пропускної здатності кільканиткового газопроводу при роботі з відкритими перемичками на вході і виході КС / М.Д. Середюк, А.І. Ксеняч, М.І. Фик // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – № 2(14). – С. 110–118.

25. Фик М.І. Визначення пропускної здатності газотранспортних систем розгалуженої структури / М.І. Фик, М.Д. Середюк, М.П. Андрійшин // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2007. – № 1(15). – С. 94–98.

26. Фик М.І. Спрощена система газодинамічних рівнянь математичної моделі однопіткової лінійної ділянки газопроводу / М. І. Фик // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 6. – С. 39–43.

27. Фик М.І. До питання розрахування газодинамічних параметрів потоку газу в міжнитковій перемичці магістрального газопроводу / М.І. Фик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 4(29). – С. 80–82.

28. Фик І.М. До питання вибору базових стратегій технічного переозброєння газотранспортних підприємств з енергетичної точки зору / І.М. Фик, М.І. Фик // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 6. – С. 47–50.

29. Фик М.І. Аспекти застосування сучасних гладких покриттів у вітчизняній ГТС високого тиску / М.І. Фик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 1(30). – С. 103–107.

30. Трубопровідний транспорт газу / [ М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін.]. – К.: Арена, 2002. – 398 с.

31. Макоин Р.Л. Расчет турбулентного переноса импульса и тепла при течении в трубах несжимаемой жидкости и газа с переменными физическими свойствами / Р.Л. Макоин, Б.С. Петухов, А.Ф. Поляков // Вопросы конвективного и радиационно-конвективного теплообмена. – М.: Нефть и газ, 1980. – С. 5–41.

32. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / Лурье М.В. – М.: Нефть и газ, 2003. - 325 с.

33. Гармаш В.Б. Математические модели транспорта газа и их применение в задачах оптимизации режима работы магистрального газопровода: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.13.07 «Автоматическое управление и регулирование, управление технологическими процессами в газовой промышленности» / В.Б. Гармаш. – К.: Союзпроект, 1982. – 22 с.

34. Трофимов А. С. Неизотермическая модель транспорта газа/А.С. Трофимов, В.А. Куцев, Е.В. Кочарин// Нефтегазовое дело. – 2004. – №2. – С. 1–10.

35. Фик М.І. Спрощена система газодинамічних рівнянь математичної моделі однопіткової лінійної ділянки газопроводу/ М. І. Фик // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 6. – С. 39–43.

36. Асатуриян А.М. О неустановившихся движениях газа в газопроводах / А.М. Асатуриян, З.Т. Галиуллин, В.И. Черников // Изв. вузов Нефть и газ. – 1961. – № 10. – С. 73 – 79.

37. Бабин Л.А. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов / Л.А. Бабин, Л.И. Быков, В.Я. Волохов. – М.: Недра, 1979. – 173 с.

38. Бразирович Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е.Ю. Бразирович. – М.: Сов. радио, 1971. – 519 с.

39. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 170 с.

40. Жидкова М.А. Трубопроводный транспорт газа / Жидкова М.А. – М.: Недра, 1973. – 430 с.
41. Темпель Ф.Г. Моделирование газоснабжающих систем / Ф.Г. Темпель – М.: Недра, 1986. – 245 с.
42. Торчинский В.К. Оптимизация проектируемых и эксплуатируемых газораспределительных систем / В.К. Торчинский, А.И. Маркович. – М.: Стройиздат, 1988. – 231 с.
43. Максимов Ю.И. Расчёт и эксплуатация режимов работы и параметров газоснабжающих систем / Ю.И. Максимов – М.: Стройиздат, 1971. – 275 с.
44. Яковлев Е.И. Газовые сети и газохранилища / Е.И. Яковлев. – М.: Недра, 1991. – 400 с.
45. Пешехонов Н.И. Проектирование газоснабжения / Н.И. Пешехонов. – К.: Будівельник, 1970. – 148 с.
46. Бородин И.В. Проектирование газовых сетей и установок / И.В. Бородин. – М.: Стройиздат, 1954. – 310 с.
47. Яковлев А.Т. Наружные газопроводы / А.Т. Яковлев. – М.: Недра, 1982. – 301 с.
48. Алабовский А.Н. Газоснабжение и очистка промышленных газов / А.Н. Алабовский. – М.: Недра, 1985. – 316 с.
49. Ионин А. А. Газоснабжение / А.А. Ионин. – М.: Стройиздат, 1989. – 441 с.
50. Бобровский С.А. Трубопроводный транспорт газа / С.А. Бобровский – М.: Недра, 1991. – 256 с.
51. Трубопроводный транспорт нефти и газа: Учеб. для вузов/ [Р.А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др.]. – М.: Недра, 1988. – 386 с.
52. Касперович В.К. Трубопроводный транспорт газу / В.К. Касперович – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 198 с.
53. Гончарук М.І. Довідник з газопостачання населених пунктів України / М.І. Гончарук, М.Д. Середюк, В.І. Шелудченко – Івано-Франківськ: Сімик, 2006. – 1314 с.

54. Середюк М.Д. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Середюк, В.Я. Малик, В.Т. Болонний – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 436 с.
55. Середюк М.Д. Технологічні розрахунки газових мереж населених пунктів: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Середюк, Л.Д. Пилипів, Ю.І. Зарубіна – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 183 с.
56. Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С.Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
57. Борисов С.Н. Гидравлические расчёты газопроводов / С.Н. Борисов, В.В. Даточный. – М.: Недра, 1971. – 124 с.
58. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1970. – 216 с.
59. Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах / А.Д. Альтшуль. – М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 256 с.
60. Basin M. Experiences sur la contraction des veines liquides et sur la distribution des vitesses dans leur interieur / M. Basin // Memoires Acad. Savants Etr. – 1897. – Vol. 32, № 4. – P. 234–245.
61. Павловский Н. К. О новой расчетной формуле для равномерного движения воды / Н.К. Павловский. – М.: Гостехиздат, 1949. – 254 с.
62. Blasius H. Das Aenlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgangen in Flussigkeiten / H. Blasius // VDI Forschungsheft. – 1913. – № 131. – P. 213–254.
63. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – М.: ИИЛ, 1949. – 356 с.
64. Prandtl L. Bemerkung uber den Warmeubergang im Rohr / L. Prandtl // Jbid.- 1928. – Bd. 29. – P. 487–489.
65. Karman T. Uber laminare und turbulente Reibung / T. Karman. – ZAMM, 1921. – 365 p.
66. Karman T. The analogy between fluid friction and heat transfer / T. Karman // Trans. ASME. – 1939. – Vol. 61. – P. 705–710.

67. Nikuradse J. Stromungs gesetze in rauhen Rohren / I. Nikuradse. – Forschungsheft. Volume B. VDI Verlag Berlin, Jul./Aug., 1933. – 361 p.
68. Nikuradse J. Gesetzmessigkeiten der turbuletten stromung in glatten rohren / J. Nikuradse – VDI Verlag Berlin. Translated in NASA TT F-10, 1966. – 359 p.
69. Colebrook C. F. Experiments with fluid friction in roughened pipes / C.F. Colebrook , C.M. White // Proceedings Royal Society. – 1937. – № 161. – P. 367 – 378.
70. Colebrook C. F. The reduction of carrying capacity of pipes with age / C. F. Colebrook, C. M. White // Journal Instn. Civil Engineers . – 1937. – № 1. – P. 26-52
71. Colebrook C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transitional region between smooth and rough wall laws/ C. F. Colebrook // J. Inst. Civil Eng. – 1939. – № 11. – P. 133–156.
72. Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугуновых, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб / Ф. А. Шевелев. – М.: Стройиздат, 1973. – 112 с.
73. Swamee P.K. Explicit equation for pipe flow problems / P.K. Swamee, A.K. Jain // J. Hydr. Div. – 1976. – № 102(5). – P. 657–664.
74. Von Bernuth R. D. Friction factors for small diameter plastic pipes / R. D. Von Bernuth, T. Wilson // J. Hydraul. Eng. – 1989. – № 115(2). – P. 183–192.
75. Swamee P. K. Design of a submarine oil pipeline / P. K. Swamee // J. Transportation Eng. – 1993. – № 119 (1). – P. 159–170.
76. Hanafy M. A simple model for designing microirrigation lateral with the microtube as an emission point / M Hanafy, A. M. El-Berry, A. R. Abu-Habsa // Misr J. Ag. Eng. – 2006. – № 23(1). – P. 96 – 107.
77. Zagarola M. V. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow / M. V. Zagarola, A. J. Smits // J. Fluid Mech. –1998. – Vol. 373. – P. 33–79.
78. McKeon B.J. Friction factors for smooth pipe flow / B.J. McKeon, C.J. Swanson, M. V. Zagarola // J.Fluid Mechanics. – 2004. – Vol. 511. – P. 41–44.

79. McKeon B. J. A new friction factor relationship for fully developed pipe flow / B. J. McKeon, M. V. Zagarola, A. J. Smits // *J. Fluid Mech.* – 2005. – Vol. 538. – P. 429–443.
80. McKeon B. J. Static pressure correction in high Reynolds number fully developed turbulent pipe flow / B. J. McKeon, A. J. Smits // *Meas. Sci. Tech.* – 2002. – Vol. 13. – P. 1608–1614.
81. McKeon B. J. Further observations on the mean velocity distribution in fully developed pipe flow / B. J. McKeon, J. F. Morrison, A. J. Smits // *J. Fluid Mech.* – 2002. – Vol. 501. – P. 135–147.
82. Карасевич А. М. Анализ результатов экспериментов по оценке гидравлического сопротивления полиэтиленовых труб / А.М. Карасевич, М.Г. Сухарев, И.В. Тверской // Развитие компьютерных комплексов моделирования, оптимизации режимов работы систем газоснабжения и их роль в диспетчерском управлении технологическими процессами в газовой отрасли. Сборник тезисов докладов I международной научно-технической конференции «DISCOM 2002». – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – С. 41–42.
83. Мартин М.Б. Теоретични и стендови изследвания за определяне коефициента на хидравлично съпротивление при движение на газ в полиетиленови тръби използвани за изграждане на газоразпределителни мрежи / М.Б. Мартин, Х.Х. Милко // Годишник на минно-геоложкия университет “св. Иван рилски” Геология и геофизика. – 2007. – № 50. – С. 27–35.
84. 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.
85. 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.

86. 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.

87. 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. 104–113.

88. Зарубіна Ю.І. Експериментальне дослідження місцевих опорів / Ю.І. Зарубіна // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №2(7). – С. 24–27.

89. 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.

90. Дорошенко Я.В. Застосування сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення якості проектування та спорудження трубопроводів / Я.В. Дорошенко, Ю.І. Дорошенко, С.І. Тихонов // Науковий вісник. – 2010. – №2 (24). – С. 117–120.

91. Дорошенко Ю.І. Моделювання нестационарних процесів у системах газопостачання населених пунктів / Ю.І. Дорошенко, В.Б. Михалків // Науковий вісник. – 2010. – №3 (25). – С. 116–124.

92. Газопостачання. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди: ДБН В.2.5-20:2001. – Офіц. вид. – К.: Держнаглядохоронпраці України, 2001. – 286 с. – (Державні будівельні норми України)

93. Ксеніч А.І. Розрахунок газових мереж з використанням формули Колбрука / А.І. Ксеніч // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 4(5). – С. 81–85.

94. Ксеніч А.І. Урахування впливу профілю траси на результати гідравлічних розрахунків газових мереж населених пунктів/ А.І. Ксеніч, М.Д. Середюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №1(34). – С. 138–143.

95. Ксеніч А.И. Совершенствование методов гидравлического расчета газовых сетей населенных пунктов / А.И. Ксеніч, М.Д. Середюк // Трубопроводный транспорт-2009: материалы V Междунар. учебн.-науч.-практ. конф. – Уфа: УГНТУ, 2009. – С. 95–97.



96. Середюк М.Д. Використання барометричної формули для врахування впливу профілю траси на результати гідравлічного розрахунку газових мереж / М.Д. Середюк, А.І. Ксенич // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2010. – № 3(25). – С. 97–101.
97. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб: СП 42-101-2003. – [Действующий от 2003-07-08]. – М.: ЗАО "Полимергаз", ГУП ЦПП, 2003. – 223 с. – [Свод правил по проектированию и строительству].
98. Larock В.Е. Hydraulics of pipeline systems / В. Е. Larock, W.J. Roland, Z.W. Gary – CRC Press LLC, 2000. – 533 p.
99. Handbook of polyethylene pipe / [The plastic pipe institute]. – USA.: The plastic pipe institute, inc., 2006. – 540 p.
100. Design and Engineering guide for Polyethylene piping / [ Polypipe]. – USA.: Poplypipe inc., 2005. – 78 p.
101. Cameron hydraulic data / [auth. text C.R. Westaway, A.W. Loomis]. – USA.: Ingersoll-Rand Woodeliff lake, N.J., 1995. – 227 p.
102. Яковлев Е.И. Методика расчёта сложных газотранспортных систем с пересечённым профилем трассы / Е.И. Яковлев, А.С. Казак, В.Б. Михалкив. – К.: Союзпроект, 1984. – 112 с.
103. Ксенич А.І. Порівняння енерговитратності транспортування газу в сталевих і поліетиленових газопроводах систем газопостачання населених пунктів / А.І. Ксенич, М.Д. Середюк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2009. – № 3(21). – С. 20–25.
104. Ксенич А.І. Експериментальна установка для дослідження гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів / А.І. Ксенич, С.Я. Григорський // Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовки кадрів галузі. Матеріали науково-практичної конференції 2-3 вересня 2010 року. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – 2010. – С. 57–59.

105. Зарембо К.С. Справочник по транспорту газа / К.С. Зарембо. – М: Гос-топтехиздат, 1962. – 886 с.
106. Стаскевич Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. – Л.: Недра, 1990. – 761 с.
107. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 508 с.
108. Ксенич А.И. Исследование гидравлического сопротивления полиэтиленовых газопроводов / А.И. Ксенич, М.Д. Середюк // Трубопроводный транспорт-2010: материалы VI Междунар. учебн.-науч.-практ. конф. – Уфа: УГНТУ, 2010. – С. 66–68.
109. Ксенич А.И. Исследования гидравлического сопротивления полиэтиленовых газопроводов низкого давления / А.И. Ксенич, М.Д. Середюк // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта. Материалы VII международной научно-технической конференции 22-25 ноября 2011 г. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет. – 2011. – С. 77–79.
110. Ксенич А.І. Результати експериментальних досліджень гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів низького тиску / А.І. Ксенич, М.Д. Середюк // Нафтогазова енергетика. – 2011. – №2(15). – С. 57–60.
111. Morfology of Extruded High-Density Polyethylene Pipes Studied by Atomic force Microscopy / D. Trifonova, P. Drouillon, A. Ghanem [and oth.] // Journal of Applied Polimer Science. – 1997. – Vol. 66. – P. 515–523.
112. Газопроводи з поліетиленових труб. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди: ДБН В.2.5-41:2009. – Офіц. вид. – К.: Мін-регіонбуд України, 2010. – 149 с. – (Державні будівельні норми України).
113. А. с. 1495710 А1 СССР. Способ определения координат источника акустической эмиссии / А.П. Брагинский, В.М. Медведев, А.И. Платков (СССР). – № 4264684/25-28; заявл. 18.06.87; опубл. 04.06.89, Бюл № 27.
114. А. с. 141579 А1 СССР. Способ определения координат источников акустической эмиссии / Н.С. Кузнецов (СССР). – № 4165182/25-28; заявл. 22.12.86; опубл. 23.07.88, Бюл. № 29.

115. А. с. 1334074 А1 СССР. Способ определения координат источников сигналов акустической эмиссии / П.И. Ломовцев, В.П. Стариков (СССР). – № 4071540/25-28 ; заявл. 10.04.86 ; опубл. 16.04.87, Бюл. № 32.

116. А. с. 1254371 А1 СССР. Акустический способ контроля изделий / В.И. Халиманович, Г.А. Борисов (СССР). – № 3747120/25-28 ; заявл. 25.05.84 ; опубл. 12.06.86, Бюл. № 32.

117. А. с. 1404929 А1 СССР. Способ определения местоположения дефекта в линейном объекте / А.Р. Донин, В.А. Троицкий, Л.Д. Нескромный, В.В. Иващенко (СССР). – № 4162976/25-28 ; заявл. 16.12.86 ; опубл. 07.11.88, Бюл. № 28.

118. А. с. 13922496 А1 СССР. Способ определения координат источников акустической эмиссии / А.Г. Стороженко (СССР). – № 4121932/25-28 ; заявл. 22.07.86 ; опубл. 03.02.88, Бюл. № 16.

119. А. с. 1325350 А1 СССР. Ультразвуковой способ измерения координат дефекта / А.А. Марков (СССР). – № 3740402/25-28 ; заявл. 17.05.84 ; опубл. 26.08.87, Бюл. № 27.

120. А. с. 1453316 А1 СССР. Способ определения дефектности изделия / Е.В. Беспрозванных, А.М. Алексеев, Е.Ю. Салита, Н.М. Лапенко, Ю.Б. Чириков (СССР). – № 4276349/25-28 ; заявл. 18.05.87 ; опубл. 21.02.89, Бюл. № 3.

121. Пат. 83304 Україна, МПК F17D 5/06, G01N 29/24. Спосіб виявлення місць урізувань в газопроводи населених пунктів/ Середюк М.Д., Климишин Я.Д., Ксенич А.І.; власник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № а200612993 ; заявл. 11.12.2006 ; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.

## ДОДАТОК А

Текст програми уточненого розрахунку газових мереж низького тиску  
з урахуванням фактичної енерговитратності поліетиленових труб,  
впливу профілю траси і умов навколишнього середовища

```

Private Sub CommandButton1_Click()
NK = Worksheets(1).Cells(19, 2)
Worksheets(1).Range("A24:B35").Select
Selection.ClearContents
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
For i = 1 To NK Step 1
For J = 1 To 2 Step 1
Worksheets(1).Cells(23 + i, J).Select
If J = 1 Then Worksheets(1).Cells(23 + i, 1) = "Êíòóð " + Str(i)
    With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeTop)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeRight)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
Next J
Next i
Top = 0
For i = 1 To 23 + NK Step 1
    Top = Worksheets(1).Cells(i, 1).Height + Top
Next i
    Worksheets(1).CommandButton2.Top = Top + 10
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()
Worksheets(2).Activate
Worksheets(2).Range("A5:F100").Select
Selection.ClearContents
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone

```

```

Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
nom = 0
NK = Worksheets(1).Cells(19, 2)
For i = 1 To NK Step 1
NM = Worksheets(1).Cells(23 + i, 2)
For J = 1 To NM Step 1
nom = nom + 1
For j1 = 1 To 6 Step 1
Worksheets(2).Cells(4 + nom, j1).Select
If j1 = 1 Then Worksheets(2).Cells(4 + nom, 1) = "Êïòóð " + Str(i)
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlThin
.ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlThin
.ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlThin
.ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlThin
.ColorIndex = xlAutomatic
End With
Next j1
Next J
Next i
Top = 0
For i = 1 To 4 + nom Step 1
Top = Worksheets(2).Cells(i, 1).Height + Top
Next i
Worksheets(2).CommandButton1.Top = Top + 10
Worksheets(2).CommandButton3.Top = Top + 40
Worksheets(2).CheckBox1.Top = Top + 10
Worksheets(2).OptionButton1.Top = Top + 30
Worksheets(2).OptionButton2.Top = Top + 50
End Sub
VERSION 1.0 CLASS
BEGIN
MultiUse = -1 'True
END
Attribute VB_Name = "Аркыш2"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False

```

```

Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = True
Private Sub CheckBox1_Click()
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()
60 Dim D(25, 25), L(25, 25), Q(25, 25), DP(25, 25), NM(25), DPP(25, 25), hp(25, 25), hk(25, 25)
70 Dim PQ(25, 25), SP(25), SPA(25), SPQ(25), SS(25), DE(25)
80 Dim DQK(25), DQS(25), DQ(25), J(25, 25), RE(25, 25), DS(25), dPgs(25, 25)
100 For r = 1 To 13
If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then DS(r) = Worksheets(1).Cells(r + 2, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then DS(r) = Worksheets(1).Cells(r + 2, 7)
120 Next r
ch4 = Worksheets(1).Cells(11, 2) / 100
c2h6 = Worksheets(1).Cells(12, 2) / 100
c3h8 = Worksheets(1).Cells(13, 2) / 100
c4h10 = Worksheets(1).Cells(14, 2) / 100
c5h12 = Worksheets(1).Cells(15, 2) / 100
co2 = Worksheets(1).Cells(17, 2) / 100
n2 = Worksheets(1).Cells(16, 2) / 100
mu = 16.04 * ch4 + 30.07 * c2h6 + 44.1 * c3h8 + 58.12 * c4h10 + 72.15 * c5h12 + n2 * 28.01 +
co2 * 44.01
ro = mu / 22.41
NU = (10.3 * ch4 + 8.46 * c2h6 + 7.36 * c3h8 + 6.29 * c4h10 + 6.99 * c5h12 + 16.59 * n2 + co2 *
13.8) * 0.000001 / ro
EPS = Worksheets(1).Cells(6, 2)
NK = Worksheets(1).Cells(19, 2)
If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then KE = Worksheets(1).Cells(17, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then KE = Worksheets(1).Cells(17, 7)
t = Worksheets(1).Cells(4, 2)
Pn = Worksheets(1).Cells(2, 2)
dzlo = Worksheets(1).Cells(18, 2)
LO = Worksheets(1).Cells(7, 2)
WM = Worksheets(1).Cells(5, 2)
QN = Worksheets(2).Cells(2, 6)
dps = Worksheets(1).Cells(3, 2)
nom = 4
190 For k = 1 To NK
NM(k) = Worksheets(1).Cells(23 + k, 2)
230 For i = 1 To NM(k)
nom = nom + 1
Q(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 3)
L(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 4)
J(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 5)
hp(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 6)
hk(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 7)
270 Next i
280 Next k
ig = dps / 1.1 / LO
nd = 1
For k = 1 To NK
For i = 1 To NM(k)

```

```

340 If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then dn = Worksheets(1).Cells(2 + nd, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then dn = Worksheets(1).Cells(2 + nd, 7)
RE(k, i) = 0.0354 * Abs(Q(k, i)) / dn / NU
If RE(k, i) >= 4000 Then DP(k, i) = (75.9 * (KE / dn + 1922 * NU * dn / Abs(Q(k, i))) ^ 0.25) *
Q(k, i) * Q(k, i) * ro * L(k, i) / dn ^ 5
If (RE(k, i) >= 2000) And (RE(k, i) < 4000) Then DP(k, i) = 0.567 * Abs(Q(k, i)) ^ 2.333 * ro *
L(k, i) / dn ^ 5.333 / NU ^ 0.333
If RE(k, i) < 2000 Then DP(k, i) = 1245000! * Abs(Q(k, i)) * NU * ro * L(k, i) / dn ^ 4
If CheckBox1.Value = True Then dPgs(k, i) = 9.81 * (hp(k, i) - hk(k, i)) * (1.293 - ro) Else dPgs(k,
i) = 0
ir = (DP(k, i) + dPgs(k, i)) / 1.1 / L(k, i)
If ir > ig Then nd = nd + 1: GoTo 340
nd = 1
D(k, i) = dn
" DN i DZ
Next i
Next k
470 For k = 1 To NK
480 SP(k) = 0
490 SPA(k) = 0
500 SPQ(k) = 0
510 For i = 1 To NM(k)
520 RE(k, i) = 0.0354 * Abs(Q(k, i)) / D(k, i) / NU
530 If (RE(k, i) > 2000) Then GoTo 560
540 DPP(k, i) = 1245000! * Abs(Q(k, i)) * NU * ro * L(k, i) / D(k, i) ^ 4
550 GoTo 600
560 If (RE(k, i) > 4000) Then GoTo 590
570 DPP(k, i) = 0.567 * Abs(Q(k, i)) ^ 2.333 * ro * L(k, i) / D(k, i) ^ 5.333 / NU ^ 0.333
580 GoTo 600
590 DPP(k, i) = (75.9 * (KE / D(k, i) + 1922 * NU * D(k, i) / Abs(Q(k, i))) ^ 0.25) * Q(k, i) * Q(k,
i) * ro * L(k, i) / D(k, i) ^ 5
600 If CheckBox1.Value = True Then DP(k, i) = DPP(k, i) + dPgs(k, i) Else DP(k, i) = DPP(k, i)
610 If (Q(k, i) > 0) Then GoTo 630
620 DP(k, i) = -DP(k, i)
630 SP(k) = SP(k) + DP(k, i)
640 SPA(k) = SPA(k) + Abs(DP(k, i))
650 Next i
660 Next k
670 For k = 1 To NK
680 DE(k) = 200 * SP(k) / SPA(k)
690 If (Abs(DE(k)) > EPS) Then GoTo 720
700 Next k
710 GoTo 1060
720 For k = 1 To NK
730 For i = 1 To NM(k)
740 PQ(k, i) = DP(k, i) / Q(k, i)
750 SPQ(k) = SPQ(k) + PQ(k, i)
760 Next i
770 SS(k) = 0
780 DQK(k) = -(SP(k)) / (1.75 * SPQ(k))
790 Next k
800 DQK(0) = 0

```



```

810 For k = 1 To NK
820 For i = 1 To NM(k)
830 For m = 1 To NK
840 If (m - J(k, i) = 0) Then GoTo 860
850 Next m
860 SS(k) = SS(k) + PQ(k, i) * DQK(m)
870 Next i
880 DQS(k) = SS(k) / SPQ(k)
890 DQ(k) = DQK(k) + DQS(k)
900 Next k
910 For k = 1 To NK
920 For i = 1 To NM(k)
930 Q(k, i) = Q(k, i) + DQ(k)
940 Next i
950 Next k
960 DQ(0) = 0
970 For k = 1 To NK
980 For i = 1 To NM(k)
990 For m = 1 To NK
1000 If (m - J(k, i) = 0) Then GoTo 1020
1010 Next m
1020 Q(k, i) = Q(k, i) - DQ(m)
1030 Next i
1040 Next k
1050 GoTo 470
1060 Worksheets(3).Activate
Worksheets(3).Range("A5:G100").Select
Selection.ClearContents
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
    nom = 0
For i = 1 To NK Step 1
For J2 = 1 To NM(i) Step 1
nom = nom + 1
For j1 = 1 To 6 Step 1
    Worksheets(3).Cells(4 + nom, j1).Select
If j1 = 1 Then Worksheets(3).Cells(4 + nom, 1) = "Контур " + Str(i)
    With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeTop)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic

```

```

End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
End With

Next j1
Next J2
Next i
nom = 4
For k = 1 To NK
    For i = 1 To NM(k)
        nom = nom + 1
        Worksheets(3).Cells(nom, 2) = Worksheets(2).Cells(nom, 2)
        For i1 = 1 To 13 Step 1
            If DS(i1) = D(k, i) Then If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then Worksheets(3).Cells(nom, 5) = Worksheets(1).Cells(2 + i1, 4)
            If DS(i1) = D(k, i) Then If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then Worksheets(3).Cells(nom, 5) = Worksheets(1).Cells(2 + i1, 6)
        Next i1
        Worksheets(3).Cells(nom, 4) = Q(k, i)
        Worksheets(3).Cells(nom, 3) = L(k, i)
        Worksheets(3).Cells(nom, 6) = DP(k, i)
    Next i
Next k
If CheckBox1.Value = True Then Worksheets(3).Cells(2, 1) = "Проектний розрахунок за нормативною методикою з врахуванням профілю траси" Else Worksheets(3).Cells(2, 1) = "Проектний розрахунок за нормативною методикою"
" експлуатаційний розрахунок
End Sub
Private Sub CommandButton3_Click()
60 Dim D(50, 50), L(50, 50), Q(50, 50), DP(50, 50), NM(50), DPP(50, 50), hp(50, 50), hk(50, 50), Qr(50, 50), w(50, 50)
70 Dim PQ(50, 50), SP(50), SPA(50), SPQ(50), SS(25), DE(25)
80 Dim DQK(50), DQS(50), DQ(50), J(50, 50), RE(50, 50), DS(50), dPgs(50, 50), dPgsb(50, 50)
100 For r = 1 To 13
    If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then DS(r) = Worksheets(1).Cells(r + 2, 5)
    If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then DS(r) = Worksheets(1).Cells(r + 2, 7)
120 Next r
ch4 = Worksheets(1).Cells(11, 2) / 100
c2h6 = Worksheets(1).Cells(12, 2) / 100
c3h8 = Worksheets(1).Cells(13, 2) / 100
c4h10 = Worksheets(1).Cells(14, 2) / 100
c5h12 = Worksheets(1).Cells(15, 2) / 100
co2 = Worksheets(1).Cells(17, 2) / 100
n2 = Worksheets(1).Cells(16, 2) / 100

```

```

t = Worksheets(1).Cells(4, 2)
Pn = Worksheets(1).Cells(2, 2)
dzlo = Worksheets(1).Cells(18, 2)
LO = Worksheets(1).Cells(7, 2)
WM = Worksheets(1).Cells(5, 2)
QN = Worksheets(2).Cells(2, 6)
dps = Worksheets(1).Cells(3, 2)
mu = 16.04 * ch4 + 30.07 * c2h6 + 44.1 * c3h8 + 58.12 * c4h10 + 72.15 * c5h12 + n2 * 28.01 +
co2 * 44.01
ro = mu / 22.41
NU = (10.3 * ch4 + 8.46 * c2h6 + 7.36 * c3h8 + 6.29 * c4h10 + 6.99 * c5h12 + 16.59 * n2 + co2 *
13.8) * 0.000001 / ro
delta = ro / 1.293
r = 287.1 / delta
psr = Pn - dps / 2
zsr = 1 - 5.5 * psr * delta ^ 1.3 / (t ^ 3.3)
ror = psr / zsr / r / t
etach4 = 10.3 * (273 + 198) / (t + 198) * (t / 273) ^ 1.5
etac2h6 = 8.46 * (273 + 287) / (t + 287) * (t / 273) ^ 1.5
etac3h8 = 7.36 * (273 + 324) / (t + 324) * (t / 273) ^ 1.5
etac4h10 = 6.29 * (273 + 349) / (t + 349) * (t / 273) ^ 1.5
etac5h12 = 6.99 * (273 + 368) / (t + 368) * (t / 273) ^ 1.5
etaco2 = 13.8 * (273 + 274) / (t + 274) * (t / 273) ^ 1.5
etan2 = 16.59 * (273 + 103) / (t + 103) * (t / 273) ^ 1.5
nut = (etach4 * ch4 + etac2h6 * c2h6 + etac3h8 * c3h8 + etac4h10 * c4h10 + etac5h12 * c5h12 +
etan2 * n2 + co2 * etaco2) * 0.000001 / ror
EPS = Worksheets(1).Cells(6, 2)
NK = Worksheets(1).Cells(19, 2)
If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then KE = Worksheets(1).Cells(17, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then KE = Worksheets(1).Cells(17, 7)
nom = 4
190 For k = 1 To NK
NM(k) = Worksheets(1).Cells(23 + k, 2)
230 For i = 1 To NM(k)
nom = nom + 1
Q(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 3)
L(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 4)
J(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 5)
hp(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 6)
hk(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 7)
270 Next i
280 Next k
ig = dps / LO
nd = 1
For k = 1 To NK
For i = 1 To NM(k)
340 If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then dn = Worksheets(1).Cells(2 + nd, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then dn = Worksheets(1).Cells(2 + nd, 7)
Qr(k, i) = Q(k, i) * 101325 * t * zsr / psr / 273.15 / 3600
RE(k, i) = 4 * Abs(Qr(k, i)) / 3.14 / (dn / 100) / nut
w(k, i) = 4 * Abs(Qr(k, i)) / (3.14 * dn / 100 * dn / 100)

```

```

If RE(k, i) >= 2400 Then DP(k, i) = (1.1 * 4.21 * RE(k, i) ^ (-0.552)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / (dn / 100) / 2
If (RE(k, i) >= 2150) And (RE(k, i) < 2400) Then DP(k, i) = (1.1 * (0.00003185 * RE(k, i) - 0.0199)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / (dn / 100) / 2
If RE(k, i) < 2150 Then DP(k, i) = (1.1 * 41.05 * RE(k, i) ^ (-0.879)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / (dn / 100) / 2
a = -0.0000578 * (hp(k, i) - hk(k, i)) - 0.313
b = 0.009336 * (hp(k, i) - hk(k, i)) - 4.28
bi = a * (t - 273) + b
If CheckBox1.Value = True Then dPgsb(k, i) = (1 + bi / 100) * (9.81 * (hp(k, i) - hk(k, i)) * (1.293 - ro)) Else dPgsb(k, i) = 0
ir = (DP(k, i) + dPgsb(k, i)) / L(k, i)
If ir > ig Then nd = nd + 1: GoTo 340
nd = 1
D(k, i) = dn / 100
" DN i DZ
Next i
Next k
470 For k = 1 To NK
480 SP(k) = 0
490 SPA(k) = 0
500 SPQ(k) = 0
510 For i = 1 To NM(k)
Qr(k, i) = Q(k, i) * 101325 * t * zsr / psr / 273.15 / 3600
RE(k, i) = 4 * Abs(Qr(k, i)) / 3.14 / D(k, i) / nut
w(k, i) = 4 * Abs(Qr(k, i)) / (3.14 * D(k, i) * D(k, i))
If RE(k, i) >= 2400 Then DPP(k, i) = (1.1 * 4.21 * RE(k, i) ^ (-0.552)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / D(k, i) / 2
If (RE(k, i) >= 2150) And (RE(k, i) < 2400) Then DPP(k, i) = (1.1 * (0.00003185 * RE(k, i) - 0.0199)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / D(k, i) / 2
If RE(k, i) < 2150 Then DPP(k, i) = (1.1 * 41.05 * RE(k, i) ^ (-0.879)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / D(k, i) / 2
a = -0.0000578 * (hp(k, i) - hk(k, i)) - 0.313
b = 0.009336 * (hp(k, i) - hk(k, i)) - 4.28
bi = a * (t - 273.15) + b
If CheckBox1.Value = True Then dPgsb(k, i) = (1 + bi / 100) * (9.81 * (hp(k, i) - hk(k, i)) * (1.293 - ro)) Else dPgsb(k, i) = 0
DP(k, i) = DPP(k, i) + dPgsb(k, i)
610 If (Q(k, i) > 0) Then GoTo 630
620 DP(k, i) = -DP(k, i)
630 SP(k) = SP(k) + DP(k, i)
640 SPA(k) = SPA(k) + Abs(DP(k, i))
650 Next i
660 Next k
670 For k = 1 To NK
680 DE(k) = 200 * SP(k) / SPA(k)
690 If (Abs(DE(k)) > EPS) Then GoTo 720
700 Next k
710 GoTo 1060
720 For k = 1 To NK
730 For i = 1 To NM(k)
740 PQ(k, i) = DP(k, i) / Q(k, i)

```

```

750 SPQ(k) = SPQ(k) + PQ(k, i)
760 Next i
770 SS(k) = 0
780 DQK(k) = -(SP(k)) / (1.75 * SPQ(k))
790 Next k
800 DQK(0) = 0
810 For k = 1 To NK
820 For i = 1 To NM(k)
830 For m = 1 To NK
840 If (m - J(k, i) = 0) Then GoTo 860
850 Next m
860 SS(k) = SS(k) + PQ(k, i) * DQK(m)
870 Next i
880 DQS(k) = SS(k) / SPQ(k)
890 DQ(k) = DQK(k) + DQS(k)
900 Next k
910 For k = 1 To NK
920 For i = 1 To NM(k)
930 Q(k, i) = Q(k, i) + DQ(k)
940 Next i
950 Next k
960 DQ(0) = 0
970 For k = 1 To NK
980 For i = 1 To NM(k)
990 For m = 1 To NK
1000 If (m - J(k, i) = 0) Then GoTo 1020
1010 Next m
1020 Q(k, i) = Q(k, i) - DQ(m)
1030 Next i
1040 Next k
1050 GoTo 470
1060 Worksheets(3).Activate
Worksheets(3).Range("A5:G100").Select
Selection.ClearContents
    Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
    Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
    nom = 0
For i = 1 To NK Step 1
For J2 = 1 To NM(i) Step 1
nom = nom + 1
For j1 = 1 To 6 Step 1
Worksheets(3).Cells(4 + nom, j1).Select
If j1 = 1 Then Worksheets(3).Cells(4 + nom, 1) = "Конгуп " + Str(i)
    With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin

```

```

    .ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
End With
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
    .LineStyle = xlContinuous
    .Weight = xlThin
    .ColorIndex = xlAutomatic
End With
Next j1
Next J2
Next i
nom = 4
For k = 1 To NK
    For i = 1 To NM(k)
        nom = nom + 1
        Worksheets(3).Cells(nom, 2) = Worksheets(2).Cells(nom, 2)
        For i1 = 1 To 13 Step 1
            If Round(DS(i1), 2) = Round(D(k, i) * 100, 2) And Worksheets(2).OptionButton1.Value = True
                Then Worksheets(3).Cells(nom, 5) = Worksheets(1).Cells(2 + i1, 4)
            If Round(DS(i1), 2) = Round(D(k, i) * 100, 2) And Worksheets(2).OptionButton2.Value = True
                Then Worksheets(3).Cells(nom, 5) = Worksheets(1).Cells(2 + i1, 6)
            Next i1
            Worksheets(3).Cells(nom, 4) = Q(k, i)
            Worksheets(3).Cells(nom, 3) = L(k, i)
            Worksheets(3).Cells(nom, 6) = DP(k, i)
        Next i
    Next k
    If CheckBox1.Value = True Then Worksheets(3).Cells(2, 1) = "Проектний розрахунок за уточ-
        неною методикою з врахуванням профілю траси" Else Worksheets(3).Cells(2, 1) = "Проектний
        розрахунок за уточненою методикою"
End Sub
Private Sub OptionButton1_Click()
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()
60 Dim D(50, 50), L(50, 50), Q(50, 50), DP(50, 50), NM(50), DPP(50, 50), hp(50, 50), hk(50, 50),
Qr(50, 50), w(50, 50)
70 Dim PQ(50, 50), SP(50), SPA(50), SPQ(50), SS(25), DE(25)
80 Dim DQK(50), DQS(50), DQ(50), J(50, 50), RE(50, 50), DS(50), dPgs(50, 50), dPgsb(50, 50)
100 For r = 1 To 13
If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then DS(r) = Worksheets(1).Cells(r + 2, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then DS(r) = Worksheets(1).Cells(r + 2, 7)
120 Next r
ch4 = Worksheets(1).Cells(11, 2) / 100

```

```

c2h6 = Worksheets(1).Cells(12, 2) / 100
c3h8 = Worksheets(1).Cells(13, 2) / 100
c4h10 = Worksheets(1).Cells(14, 2) / 100
c5h12 = Worksheets(1).Cells(15, 2) / 100
co2 = Worksheets(1).Cells(17, 2) / 100
n2 = Worksheets(1).Cells(16, 2) / 100
t = Worksheets(1).Cells(4, 2)
Pn = Worksheets(1).Cells(2, 2)
dzlo = Worksheets(1).Cells(18, 2)
LO = Worksheets(1).Cells(7, 2)
WM = Worksheets(1).Cells(5, 2)
QN = Worksheets(2).Cells(2, 6)
dps = Worksheets(1).Cells(3, 2)
mu = 16.04 * ch4 + 30.07 * c2h6 + 44.1 * c3h8 + 58.12 * c4h10 + 72.15 * c5h12 + n2 * 28.01 +
co2 * 44.01
ro = mu / 22.41
NU = (10.3 * ch4 + 8.46 * c2h6 + 7.36 * c3h8 + 6.29 * c4h10 + 6.99 * c5h12 + 16.59 * n2 + co2 *
13.8) * 0.000001 / ro
delta = ro / 1.293
r = 287.1 / delta
psr = Pn - dps / 2
zsr = 1 - 5.5 * psr * delta ^ 1.3 / (t ^ 3.3)
ror = psr / zsr / r / t
etach4 = 10.3 * (273 + 198) / (t + 198) * (t / 273) ^ 1.5
etac2h6 = 8.46 * (273 + 287) / (t + 287) * (t / 273) ^ 1.5
etac3h8 = 7.36 * (273 + 324) / (t + 324) * (t / 273) ^ 1.5
etac4h10 = 6.29 * (273 + 349) / (t + 349) * (t / 273) ^ 1.5
etac5h12 = 6.99 * (273 + 368) / (t + 368) * (t / 273) ^ 1.5
etaco2 = 13.8 * (273 + 274) / (t + 274) * (t / 273) ^ 1.5
etan2 = 16.59 * (273 + 103) / (t + 103) * (t / 273) ^ 1.5
nut = (etach4 * ch4 + etac2h6 * c2h6 + etac3h8 * c3h8 + etac4h10 * c4h10 + etac5h12 * c5h12 +
etan2 * n2 + co2 * etaco2) * 0.000001 / ror
EPS = Worksheets(1).Cells(6, 2)
NK = Worksheets(1).Cells(19, 2)
If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then KE = Worksheets(1).Cells(17, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then KE = Worksheets(1).Cells(17, 7)
nom = 4
190 For k = 1 To NK
NM(k) = Worksheets(1).Cells(23 + k, 2)
230 For i = 1 To NM(k)
nom = nom + 1
Q(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 3)
L(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 4)
J(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 5)
hp(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 6)
hk(k, i) = Worksheets(2).Cells(nom, 7)
270 Next i
280 Next k

ig = dps / LO
nd = 1
For k = 1 To NK

```

```

For i = 1 To NM(k)
340 If Worksheets(2).OptionButton1.Value = True Then dn = Worksheets(1).Cells(2 + nd, 5)
If Worksheets(2).OptionButton2.Value = True Then dn = Worksheets(1).Cells(2 + nd, 7)
RE(k, i) = 0.0354 * Abs(Q(k, i)) / dn / NU
If RE(k, i) >= 4000 Then DP(k, i) = (75.9 * (KE / dn + 1922 * NU * dn / Abs(Q(k, i))) ^ 0.25) *
Q(k, i) * Q(k, i) * ro * L(k, i) / dn ^ 5
If (RE(k, i) >= 2000) And (RE(k, i) < 4000) Then DP(k, i) = 0.567 * Abs(Q(k, i)) ^ 2.333 * ro *
L(k, i) / dn ^ 5.333 / NU ^ 0.333
If RE(k, i) < 2000 Then DP(k, i) = 1245000! * Abs(Q(k, i)) * NU * ro * L(k, i) / dn ^ 4
If CheckBox1.Value = True Then dPgs(k, i) = 9.81 * (hp(k, i) - hk(k, i)) * (1.293 - ro) Else dPgs(k,
i) = 0
ir = (DP(k, i)) / L(k, i)
If ir > ig Then nd = nd + 1: GoTo 340
nd = 1
D(k, i) = dn / 100
" DN i DZ
Next i
Next k
470 For k = 1 To NK
480 SP(k) = 0
490 SPA(k) = 0
500 SPQ(k) = 0
510 For i = 1 To NM(k)
Qr(k, i) = Q(k, i) * 101325 * t * zsr / psr / 273.15 / 3600
RE(k, i) = 4 * Abs(Qr(k, i)) / 3.14 / D(k, i) / nut
w(k, i) = 4 * Abs(Qr(k, i)) / (3.14 * D(k, i) * D(k, i))
If RE(k, i) >= 2400 Then DPP(k, i) = (1.1 * 4.21 * RE(k, i) ^ (-0.552)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror
/ D(k, i) / 2
If (RE(k, i) >= 2150) And (RE(k, i) < 2400) Then DPP(k, i) = (1.1 * (0.00003185 * RE(k, i) -
0.0199)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror / D(k, i) / 2
If RE(k, i) < 2150 Then DPP(k, i) = (1.1 * 41.05 * RE(k, i) ^ (-0.879)) * L(k, i) * (w(k, i) ^ 2) * ror
/ D(k, i) / 2
a = -0.0000578 * (hp(k, i) - hk(k, i)) - 0.313
b = 0.009336 * (hp(k, i) - hk(k, i)) - 4.28
bi = a * (t - 273.15) + b
If CheckBox1.Value = True Then dPgsb(k, i) = (1 + bi / 100) * (9.81 * (hp(k, i) - hk(k, i)) * (1.293
- ro)) Else dPgsb(k, i) = 0
DP(k, i) = DPP(k, i) + dPgsb(k, i)
610 If (Q(k, i) > 0) Then GoTo 630
620 DP(k, i) = -DP(k, i)
630 SP(k) = SP(k) + DP(k, i)
640 SPA(k) = SPA(k) + Abs(DP(k, i))
650 Next i
660 Next k
670 For k = 1 To NK
680 DE(k) = 200 * SP(k) / SPA(k)
690 If (Abs(DE(k)) > EPS) Then GoTo 720
700 Next k
710 GoTo 1060
720 For k = 1 To NK
730 For i = 1 To NM(k)
740 PQ(k, i) = DP(k, i) / Q(k, i)

```



```

750 SPQ(k) = SPQ(k) + PQ(k, i)
760 Next i
770 SS(k) = 0
780 DQK(k) = -(SP(k)) / (1.75 * SPQ(k))
790 Next k
800 DQK(0) = 0
810 For k = 1 To NK
820 For i = 1 To NM(k)
830 For m = 1 To NK
840 If (m - J(k, i) = 0) Then GoTo 860
850 Next m
860 SS(k) = SS(k) + PQ(k, i) * DQK(m)
870 Next i
880 DQS(k) = SS(k) / SPQ(k)
890 DQ(k) = DQK(k) + DQS(k)
900 Next k
910 For k = 1 To NK
920 For i = 1 To NM(k)
930 Q(k, i) = Q(k, i) + DQ(k)
940 Next i
950 Next k
960 DQ(0) = 0
970 For k = 1 To NK
980 For i = 1 To NM(k)
990 For m = 1 To NK
1000 If (m - J(k, i) = 0) Then GoTo 1020
1010 Next m
1020 Q(k, i) = Q(k, i) - DQ(m)
1030 Next i
1040 Next k
1050 GoTo 470
1060 Worksheets(3).Activate
Worksheets(3).Range("A5:G100").Select
Selection.ClearContents
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
nom = 0
For i = 1 To NK Step 1
For J2 = 1 To NM(i) Step 1
nom = nom + 1
For j1 = 1 To 6 Step 1
Worksheets(3).Cells(4 + nom, j1).Select
If j1 = 1 Then Worksheets(3).Cells(4 + nom, 1) = "Контыр " + Str(i)
With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
.LineStyle = xlContinuous
.Weight = xlThin

```

```

        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeTop)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    With Selection.Borders(xlEdgeRight)
        .LineStyle = xlContinuous
        .Weight = xlThin
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    Next j1
    Next J2
    Next i
    nom = 4
    For k = 1 To NK
        For i = 1 To NM(k)
            nom = nom + 1
            Worksheets(3).Cells(nom, 2) = Worksheets(2).Cells(nom, 2)
            For i1 = 1 To 13 Step 1
                If Round(DS(i1), 2) = Round(D(k, i) * 100, 2) And Worksheets(2).OptionButton1.Value = True
                    Then Worksheets(3).Cells(nom, 5) = Worksheets(1).Cells(2 + i1, 4)
                If Round(DS(i1), 2) = Round(D(k, i) * 100, 2) And Worksheets(2).OptionButton2.Value = True
                    Then Worksheets(3).Cells(nom, 5) = Worksheets(1).Cells(2 + i1, 6)
            Next i1
            Worksheets(3).Cells(nom, 4) = Q(k, i)
            Worksheets(3).Cells(nom, 3) = L(k, i)
            Worksheets(3).Cells(nom, 6) = DP(k, i)
        Next i
    Next k
    If CheckBox1.Value = True Then Worksheets(3).Cells(2, 1) = "Експлуатаційний розрахунок за
    уточненою методикою з врахуванням профілю траси" Else Worksheets(3).Cells(2, 1) =
    "Експлуатаційний розрахунок за уточненою методикою"
1170 End
End Sub

```

## ДОДАТОК Б

Матеріали щодо впровадження розробок з питань прогнозування пропускної здатності та енерговитратності поліетиленових газових мереж населених пунктів

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ  
ІНСТИТУТ “УКРГАЗПРОЕКТ”

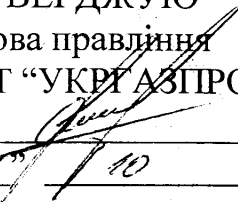
ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи  
ІФНТУНГ, д.т.н., проф.

  
Карпаш О.М.  
“04” 10 2010 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління  
ВАТ “УКРГАЗПРОЕКТ”

  
Чабанович Л.Б.  
“04” 10 2010 р.

**КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА  
РОЗРАХУНКУ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ  
ІЗ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ і СТАЛЕВИХ ТРУБ**

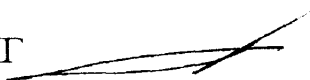
## МЕТОДИКУ РОЗРОБИЛИ

Д-р техн. наук, проф.,  
зав. кафедри транспорту  
і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ



М.Д. Середюк

канд. техн. наук,  
доцент кафедри транспорту  
і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ



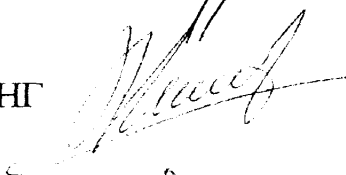
В.Б. Михалків

асистент кафедри транспорту  
і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ



Ю.І. Дорошенко

асистент кафедри транспорту  
і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ



А.І. Ксенич

асистент кафедри транспорту  
і зберігання нафти і газу ІФНТУНГ



Ю.Г. Мельниченко

Затверджую  
Проректор з наукової роботи  
ІФНТУНГ  
проф. Карпач О.М.

« 12 » 12 2011 р.

Затверджую  
Заступник голови правління,  
головний інженер ПАТ «Івано-Франківськгаз»  
Височанський Ігор Іванович

« 12 » 12 2011 р.

**АКТ**

**впровадження результатів дисертаційної роботи  
Ксенича Андрія Івановича  
«ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТА ГІДРАВЛІЧНОЇ  
ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ»**

Ми, які підписалися нижче, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Ксенича Андрія Івановича «Прогнозування пропускної здатності та гідравлічної енерговитратності поліетиленових газових мереж» передані для використання в ПАТ «Івано-Франківськгаз». Розробки включають:

- методику і програмне забезпечення гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж низького і середнього тиску з урахуванням впливу профілю траси та умов навколишнього середовища;
- метод коригування діаметрів поліетиленових газових мереж низького тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності;
- метод коригування діаметрів поліетиленових газових мереж середнього тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності;
- рекомендації щодо реконструкції підземних сталевих трубопроводів низького тиску шляхом протягування в них поліетиленових труб. Запропоновані значення діаметрів ділянок і величина робочого тиску, які забезпечують повне збереження пропускної здатності;
- номограми для виконання проектних та експлуатаційних розрахунків поліетиленових газових мереж низького і середнього тиску.

Очікуваний економічний ефект від використання розробок становить в середньому 2,8 тис. грн. на 1 км газової мережі низького тиску та 5,2 тис. грн. на 1 км газової мережі середнього тиску.

Зав. кафедри транспорту і зберігання  
нафти і газу ІФНТУНГ  
д.т.н., проф.

Середюк М.Д.

Дисертант

Ксенич А.І.

**Розрахунок очікуваного економічного ефекту від впровадження методів  
гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж  
низького і середнього тиску**

У розділі 4 роботи нами розроблені методи гідравлічного розрахунку поліетиленових газових мереж низького і середнього тиску з урахуванням їх фактичної енерговитратності, впливу профілю траси та умов навколишнього середовища.

Визначимо очікуваний економічний ефект від використання запропонованого методів. Спочатку розглянемо випадок проектування вуличного газопроводу низького тиску довжиною  $l=1$  км. Середній гідравлічний нахил у газовій мережі становить  $I=2$  Па/м. Виконуємо гідравлічний розрахунок за існуючою методикою і визначаємо необхідний діаметр поліетиленового газопроводу низького тиску  $D_1=7,96$  см (90x5,2 мм). Використовуючи рисунок 4.9, знаходимо відносне зменшення необхідного внутрішнього діаметра поліетиленової труби як функцію гідравлічного нахилу

$$\delta = 0,890 - 0,036 \ln 2 = 0,865.$$

Таким чином, з урахуванням фактичної енерговитратності поліетиленової труби для забезпечення зазначеного гідравлічного нахилу необхідний внутрішній діаметр має становити

$$D_k = 0,865 \cdot 7,96 = 6,88 \text{ см.}$$

Аналіз сортаменту труб показує, що найближчий менший внутрішній діаметр становить  $D_2=6,64$  см (75x4,3 мм).

Використовуючи формулу (4.28) знаходимо, для якої частини газопроводу можна передбачити зменшення внутрішнього діаметра

$$\delta_l = 0,0682 \cdot \ln 2 + 0,109 = 0,156;$$

$$x = 1000 \cdot 0,156 = 160 \text{ м.}$$

Таким чином, для випадку, що розглядається, можна укласти 840 м поліетиленової труби діаметром 90x5,2 мм і 160 м труби діаметром 75x4,3 мм.

Використовуючи формулу (4.38), знаходимо вартість 1 м труби для двох стандартних внутрішніх діаметрів

$$S_1 = -0,733 + 0,860 \cdot 7,96 + 0,786 \cdot 7,96^2 + 0,00142 \cdot 7,96^3 = 56,6 \text{ грн};$$

$$S_2 = -0,733 + 0,860 \cdot 6,64 + 0,786 \cdot 6,64^2 + 0,00142 \cdot 6,64^3 = 39,2 \text{ грн}.$$

Знайдемо економію коштів на придбання поліетиленових труб за формулою

$$E = x(S_1 - S_2),$$

$$E = 160 \cdot (56,6 - 39,2) \cdot 10^{-3} = 2,8 \text{ тис. грн./ км.}$$

Таким чином, тільки для однієї ділянки системи газопостачання населеного пункту економія коштів на придбання поліетиленових труб досягає 3 тис. грн. У системах газопостачання реальних населених пунктів число ділянок становить десятки або навіть сотні, що значно збільшує економічний ефект від впровадження запропонованого методу.

Використаємо запропонований метод при проектуванні одноступеневої систему газопостачання середнього тиску із поліетиленових труб для сільського населеного пункту. Аналіз технічних характеристик сучасного газового обладнання свідчить, що для сільських населених пунктів з метою реалізації господарсько-побутових потреб та опалення житлових приміщень максимально годинна витрата газу повинна становити  $Q_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$ . Питома шляхова витрата газу в газових мережах зазвичай не перевищує  $q = 0,2 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{м}$ .

Розглянемо сільський населений пункт з кількістю жителів  $N = 1000$ . Сумарна розрахункова витрата газу, на яку повинні бути розраховані газові мережі середнього тиску одноступеневої системи розподілу газу, дорівнює

$$Q = Q_1 \cdot N,$$

$$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Ураховуючи поняття питомої шляхової витрати газу знаходимо загальну довжину газових мереж населеного пункту  $L$



$$L = \frac{Q}{q},$$

$$L = 5000 \text{ м.}$$

Середнє значення параметра  $A$  у газовій мережі середнього тиску типових сільських населених пунктів становить  $A = 8 \cdot 10^{-3} \text{ (МПа)}^2/\text{км}$ . Виконуємо гідравлічний розрахунок за існуючою методикою і визначаємо необхідний діаметр поліетиленового газопроводу середнього тиску  $D_1 = 5,58 \text{ см}$ . Використовуючи рисунок 4.13, знаходимо відносне зменшення необхідного внутрішнього діаметра поліетиленової труби як функцію параметра завантаження  $A$

$$\delta = 0,691 - 0,038 \ln 8 \cdot 10^{-3} = 0,874.$$

Таким чином, з урахуванням фактичної енерговитратності поліетиленової труби середнього тиску для забезпечення зазначеного значення параметра  $A = 8 \cdot 10^{-3} \text{ (МПа)}^2/\text{км}$  необхідний внутрішній діаметр має становити

$$D_k = 0,874 \cdot 5,58 = 4,88 \text{ см.}$$

Аналіз сортаменту труб показує, що найближчий менший внутрішній діаметр становить  $D_2 = 4,42 \text{ см (50x2,9 мм)}$ .

Використовуючи формулу (4.42) знаходимо, для якої частини газопроводу можна передбачити зменшення внутрішнього діаметра

$$\delta_l = 0,235 \cdot \ln 8 \cdot 10^{-3} + 1,935 = 0,8;$$

$$x = 5000 \cdot 0,8 = 4000 \text{ м.}$$

Таким чином, для випадку, що розглядається можна укласти 4000 м поліетиленової труби діаметром 50x2,9 мм і 1000 м труби діаметром 63x3,6 мм.

Використовуючи формулу (4.38), знаходимо вартість 1 м труби для двох стандартних внутрішніх діаметрів

$$S_1 = -0,733 + 0,860 \cdot 5,58 + 0,786 \cdot 5,58^2 + 0,00142 \cdot 5,58^3 = 27,8 \text{ грн./м;}$$

$$S_2 = -0,733 + 0,860 \cdot 4,42 + 0,786 \cdot 4,42^2 + 0,00142 \cdot 4,42^3 = 21,3 \text{ грн./м.}$$

Знайдемо економію коштів на придбання поліетиленових труб за формулою

$$E = x(S_1 - S_2),$$

$$E_{\text{нп}} = 4000 \cdot (27,8 - 21,3) \cdot 10^{-3} = 26 \text{ тис. грн.}$$

Знайдемо питомий економічний ефект, зведений до 1 км газових мереж

$$E = \frac{E_{\text{нп}}}{L},$$

$$E = \frac{26}{5} = 5,2 \text{ тис.грн./км.}$$

Зменшення діаметра труби призводить також до зменшення вартості з'єднувальних деталей, запірної арматури тощо, помітно зменшує також затрати в будівельно-монтажні роботи. Тому економічний ефект більш точного оцінювання гідравлічної енерговитратності поліетиленових газопроводів буде більший за розрахований вище.

Зав. кафедри транспорту і зберігання  
нафти і газу ІФНТУНГ  
д.т.н., проф.

 Середюк М.Д.

Дисертант

 Ксенич А.І.

Начальник

планово-економічного управління  
ПАТ «Івано-Франківськгаз»

 Г. Я. Ваврик

