

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу

На правах рукопису

СТАСЮК РОМАН БОГДАНОВИЧ

УДК 621.622

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИТОКІВ  
З ГАЗОВИХ МЕРЕЖ**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник

Грудз Володимир Ярославович

професор, доктор технічних наук

м Івано-Франківськ – 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ТРУБОПРОВОДАХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ.....	10
1.1. Втрати в газопроводах, пов'язані з тривалими термінами експлуатації.....	11
1.2. Комерційні втрати газу.....	12
1.3 Дистанційний контроль герметичності газопроводів.....	15
1.4 Теоретичні засади витікання газів під тиском.....	19
1.5 Аналіз досліджень витікання газу з газопроводу і його фільтрації в ґрунті.....	33
1.6 Формування задач досліджень.....	36
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗУ З ЄМНОСТЕЙ ПІД ТИСКОМ.....	39
2.1 Мета і завдання дослідження.....	40
2.2 Дослідні стенди та вимірювальна апаратура.....	41
2.3 Оцінка причин відхилення між теоретичними і практичними результатами визначення витрати газу при витіканні.....	46
2.4 Результати досліджень і їх аналіз.....	55
Висновки до розділу 2.....	69
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИТОКІВ ГАЗУ З ГАЗОПРОВОДІВ В НАВКОЛИШНЬОМУ ГРУНТІ.....	71
3.1 Аналіз математичних моделей фільтрації газу.....	72
3.2 Аналітичні дослідження першої фази нестационарного процесу формування ареалу загазованості.....	74
3.3 Друга фаза нестационарної фільтрації витоків газу в ґрунті.....	79
Висновки до розділу 3.....	91
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОПРОВОДАХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ.....	93
4.1 Характеристики газоспоживання.....	94

4.2	Вплив нерівномірності газоспоживання на нестационарний процес, викликаний появою витoku газу.....	98
4.3	Вплив буферних споживачів на нестационарний процес, викликаний появою витoku газу.....	105
4.4	Апробація результатів досліджень в умовах системи газопостачання Богородчанського УЕГГ.....	114
	Висновки до розділу 4.....	124
	Основні результати та підсумкові.....	128
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	128
	Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	138
	Додаток Б. Дані режим роботи системи газопостачання Богородчанського УЕГГ.....	139
	Додаток В. Розрахунок виробничо-технологічних втрат по Богородчанському УЕГГ.....	141

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- $\alpha$  коефіцієнт Морроу
- $\alpha_1$  коефіцієнт лінійного розширення металу труб;
- $\delta$  коефіцієнт зникання пружної хвилі
- $a$  швидкість звуку в газі.
- $(\partial p / \partial v)_s$  величина, зворотна адіабатній стисливості речовини
- $U$  внутрішня енергія;
- $v$  питомий об'єм.
- $U_{\text{геом}}$  геометричний об'єм ділянки.
- $V$  геометричний об'єм ємності;
- $R$  газова стала;  $T$  - абсолютна
- $z$  коефіцієнт стисливості.
- $F$  площа перерізу отвору витікання.
- $k$  показник адіабати процесу;
- $P_0, P_a$  тиски в середині ємності та назовні;
- $\rho_0$  густина газу при умовах всередині ємності.
- $P(x, t)$  тиск в трубопроводі;
- $\rho$  густина газу;
- $w$  лінійна швидкість;
- $d$  діаметр газопроводу;
- $\lambda$  коефіцієнт гідравлічного опору;
- $c$  швидкість звуку в газі.
- $\mu$  коефіцієнт витрати отвору;
- $d$  діаметр отвору в мм.;
- $R$  газова стала в Дж/кгК.;
- $T$  абсолютна температура в ресивері в К;
- $P$  тиск газу в бар.
- $n$  число дослідів;

- $X_{cp}, X_i$  середньоарифметичне і біжуче значення вимірюваної величини
- $t_{\alpha;n}$  коефіцієнт Стюдента.
- $\mu$  коефіцієнт витрати отвору;
- $T$  абсолютна температура в ресивері в К;
- $\omega$  швидкість фільтрації;
- $k$  коефіцієнт проникності пористого середовища;
- $\eta$  динамічна в'язкість рухомого неперервного середовища;
- $F$  площа перетину фільтрації.
- $h$  глибина закладення газопроводу в ґрунті.
- $\sigma(x - x_g)$  одинична функція Хевісайда
- $erfc(z)$  інтеграл імовірності
- $k$  проникливість ґрунту;
- $\delta(x - x_q)$  функція Дірака,
- $Q_{cp}$  величина середньодобового газоспоживання;
- $A$  амплітудну значення газоспоживання;
- $\varphi$  зміщення екстремального значення добового газоспоживання.
- $Q_{max}, Q_{cp}$  відповідно максимальна і середньодобова величини газоспоживання.
- $2a$  коефіцієнт лінеаризації;
- $P_j^k$  тиск у передостанньому вузлі агрегату
- МН магістральний нафтопровід
- НД нормативна документація
- ОК об'єкт контролю
- ПАЕ первинний перетворювач сигналів АЕ
- ПК персональний комп'ютер
- СЗП стандартний зразок підприємства
- ТД технічна діагностика
- ТО технічне обслуговування

## ВСТУП

**Актуальність проблеми.** Україна за ступенем газифікації населення займає перше місце в Європі. Така висока частка у в енергетичному балансі держави вимагає створення ірраціональної експлуатації розгалуженої газової мережі як для магістрального транспорту газу (в тому числі і транзитного), так і розподільчих і міських газопроводів високого, середнього та низького тисків. Великі обсяги перекачування газового пального по газопроводах різних категорій призводять до значних втрат енергоносіїв, що знижує економічну ефективність використання газу та призводить до зростання ціни на газове паливо. Крім того, мають місце несанкціоновані відбори газу з газових мереж, що також має негативний ефект.

Газова мережа є останньою ланкою у системі забезпечення споживачів природним газом. В зв'язку з цим вона характеризується розгалуженістю газопроводів і наявністю великої кількості обладнання та запірної арматури. Крім того, для газової мережі характерний процес постійного розвитку, пов'язаний з розбудовою міст та населених пунктів, необхідністю газифікації соціальних та промислових об'єктів газоспоживання. Наслідком структури газових мереж є підвищення фізичних та комерційних втрат газу. Адже кожна одиниця обладнання чи арматури є потенційним об'єктом газових втрат, пов'язаних з витокami в атмосферу, кожен елемент газоспоживання є потенційним об'єктом збільшення комерційних втрат.

Значні терміни експлуатації газопроводів викликають старіння металу внаслідок корозійних процесів, що обумовлює появу малих витоків з трубопроводів. Особливо це актуальне для газових мереж низького та середнього тиску, для яких виявлення витoku газу може тривати значний період часу експлуатації. Така ситуація є неприпустимою як з економічної, так і з екологічної точки зору, оскільки малий витік газу важко зауважити, внаслідок чого загазованість може обіймати значну територію, а деяких випадках призвести до утворення газоповітряної суміші і вибуху, в результаті якого виникають суттєві економічні збитки та небезпека для людського життя.

З сказаного очевидно, що діагностика малих витоків з газових мереж відноситься до першочергових завдань експлуатації газового господарства.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК «Нафтогаз України», спрямованих на підвищення надійності експлуатації газотранспортних мереж і окреслених Національною програмою «Концепція розвитку, модернізації і переоснащення газотранспортної системи України на 2009 – 2015 рр.».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення контролю за втратами газу в газових мережах середнього і низького тисків на основі встановлення закономірностей процесів витікання газу і його фільтрації в ґруні.

Для досягнення поставленої мети необхідна реалізація наступних задач досліджень:

- встановлення причин розбіжностей між величинами витрати витікання газу з газопроводу під тиском, визначеними на основі математичного моделювання процесу та шляхом проведення вимірювань;
- оцінювання впливу параметрів режиму процесу витікання газу на величину витрати і визначення коефіцієнту витрати;
- конкретизація закономірностей фільтрації витоків газу в навколишньому ґрунті та побудова ареалу загазованості;
- дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж для виявлення місць і величини витоків газу.

*Об'єкт дослідження.* Аварійні витoki газу з газопроводів та процеси, що їх супроводжують.

*Предмет дослідження.* Нестационарні газодинамічні процеси в газопроводах газових мереж, викликані появою малих витоків.

*Методи дослідження.* Аналітичні методи побудови і реалізації математичних моделей нестационарних процесів в газопроводах при виникненні витоків газу, експериментальні методи оцінки точності запропонованого

методу визначення координати витoku, аналітичні дослідження аварійних ситуацій в газопроводах.

**Положення, що захищаються:** удосконалення аналітичних методів визначення витрати витoku газу при квазістаціонарних та нестаціонарних режимах, та дослідження його фільтрації в ґрунті.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- на основі аналітичних і експериментальних досліджень дано наукове трактування розбіжностей в методах визначення витрати витoku газу;
- запропоновано корегування аналітичних методів визначення витрати витoku газу на основі експериментальних досліджень процесу;
- проведено дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті внаслідок появи витoku з газопроводу на протязі першої та другої фази нестаціонарної фільтрації і формування ареалу загазованості;
- досліджено вплив нерівномірності газоспоживання та підключення буферних споживачів на нестаціонарні процеси, викликані появою витоків газу з газопроводу.

#### **Практичне значення результатів дослідження.**

Внесення корективів в аналітичні методи розрахунку витрати витoku з газопроводу, формування ареалу загазованості та діагностування витоків за характером нестаціонарного процесу.

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

- дослідження впливу температурного режиму газопроводів на ефективність транспорту газу газопроводами газових мереж [ 39 ];
- дослідження процесу витікання газу з газопроводу і внесення корективів в аналітичні методи прогнозування [ 40 ];
- дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті при появі витоків з газопроводу і формування ареалу загазованості [ 41 ];



- оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання [ 42 ];
- на основі результатів дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж викликаних різними за характером збуреннями запропоновано класифікацію витоків газу [ 43 ];
- дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових [ 44].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались і обговорювались:

на 7 міжнародній науково-технічній конференції «Надійність і безпека трубопровідного транспорту» – Полоцк, 2011р ;

- на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовка кадрів галузі», м. Івано-Франківськ, 2-3 вересня 2012 року;
- на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2011-2013);
- на нараді НАК «Нафтогаз України» з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування газу» (Яремче, 2012 р.).

В повному обсязі результати досліджень доповідались і обговорювались на засіданні кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ та науковому семінарі факультету нафтогазопроводів в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 2014 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано шість наукових праць, з них шість у фахових наукових виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 117 найменування. Основний зміст роботи викладено на 128 сторінках машинописного тексту.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ВТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ТРУБОПРОВОДАХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

Проведені обстеження підземних газопроводів показали, що їх термін експлуатації головним чином залежить від корозійної стійкості основного металу та зварного з'єднання труб, а також характеру руйнування поверхні металу в місцях з порушеним ізоляційним покриттям.

Попереднє вивчення умов експлуатації підземних газопроводів [1] дозволило зробити висновок про необхідність комплексних досліджень деформівної системи „труба — ґрунтовий масив” сучасними методами механіки підземних споруд та механіки корозійного руйнування з метою попередження розгерметизації газопроводів.

В практиці будівництва питання взаємодії трубопроводів з ґрунтом вивчені недостатньо. Тому чітких і апробованих рішень щодо вибору чи визначення основних характеристик для розрахунку та аналізу роботи підземних трубопроводів немає.

Врахування корозійної активності ґрунту, яку прийнято оцінювати часом до появи на новому газопроводі першої каверни, складу і фізико-механічних властивостей ґрунтів та їх динаміки значно ускладнює розрахункову схему, оскільки з'являється багато додаткових, змінних в часі параметрів, які визначаються експериментально. Перелік самих лише істотних факторів, що визначають корозійну активність ґрунтів, якими є структура та гранулометричний склад, вологість, склад ґрунтового електроліту, загальна кислотність чи лужність ґрунту, концентрація водневих йонів, повітропроникність, окисно-відновний потенціал, електричний опір ґрунтів, вказує на складність математичного моделювання деформівної системи „труба — ґрунтовий масив” та, відповідно, прогнозування довговічності підземного газопроводу.

Вважається, що поведінка сталі газопроводу в ґрунтах у багатьох відношеннях аналогічна її поведінці при повному зануренні у розчини з відповідним рН.

При цьому переважає електрохімічний механізм корозії з утворенням мікрогальванічних елементів [5]. Проте на підземному газопроводі, за рахунок неоднорідності металу труби та гетерогенності ґрунту як за фізичними властивостями, так і за хімічним складом, а також різної аерації, виникають ділянки, на яких електродний потенціал помітно відрізняється, що зумовлює утворення макрогальванічних корозійних елементів. Ділянки труби з більш негативним потенціалом стають анодними, а ділянки з менш негативним потенціалом — катодними.

Можна констатувати, що особливістю підземної корозії металу газопроводу є прояв її у вигляді пітів та каверн (наскрізних отворів). Тому головну небезпеку становить не корозійна втрата металу, а місцева корозія, яка є основною причиною аварій на газопроводах.

### **1.1 Втрати в газопроводах, пов'язані з тривалими термінами експлуатації**

У 2012 р. втрати газу, пов'язані з витіканнями із газопроводів, становили в цілому в Україні 270,4 млн. м<sup>3</sup>, з яких 85,2 млн. м<sup>3</sup> — внаслідок неякісно виконаних зварювальних робіт, 21,6 млн. м<sup>3</sup> — внаслідок корозії. Приблизно такий самий рівень втрат спостерігався і в 2007 та 2008 роках. Після проведення реорганізації структури нафтогазового комплексу почали вживати рішучіших заходів щодо їх скорочення. Так, у 2009 р. вони становили вже 198,4 млн. м<sup>3</sup>, у 2011 р. — 188,4 млн. м<sup>3</sup> [31].

Найбільший вплив цього виду втрат газу на загальні показники спостерігається в західних регіонах України, газопроводи яких є найстарішими, а також у Донбаському регіоні, де значна частина газопроводів проходить по територіях гірничих виробок. Так, частка втрат газу у Львівській та Івано-Франківській областях сьогодні становить приблизно одну третину загальних

втрат газу в Україні, Показовим у цьому відношенні є той факт, що у Львівській області, де значна кількість газопроводів, термін експлуатації яких перевищує 25 років, втрати газу за 10 місяців 2012 р. порівняно з аналогічним періодом минулого року зменшились майже на 35%, чому, не в останню чергу, сприяла заміна 20,5 км аварійно небезпечних ділянок газопроводів. 20,2 км таких ділянок замінено також в Івано-Франківській області, подібні роботи проводились також у Дніпропетровській, Закарпатській, Чернівецькій, Миколаївській, Одеській, Луганській та Херсонській областях. Всього в Україні у 2002 р. спеціалістами газових господарств було обстежено на предмет виявлення можливих витікань газу 35,7 тис. км підземних газопроводів.

## 1.2 Комерційні втрати газу

Розглянемо споживання природного газу окремо промисловістю та населенням [26, 27].

Динаміка споживання природного газу в Україні окремо промисловістю і населенням протягом 1998-2012 років наведена на рис. 1.1.

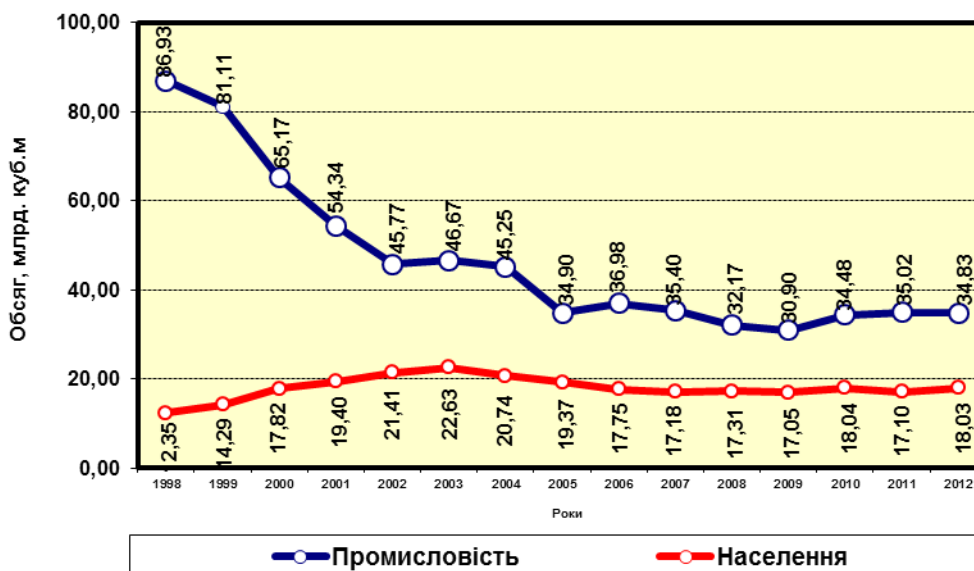


Рисунок 1.1 - Використання природного газу споживачами України  
впродовж 1998-2012 рр

Впродовж перших років незалежності обсяги споживання природного газу в Україні внаслідок загального згортання промислового виробництва, закриття нерентабельних підприємств та ряду інших чинників неухильно скорочувались. Так, якщо у 2004 році було спожито 118,1 млрд. м<sup>3</sup> газу, то у 2006 році — 70,4 млрд. м<sup>3</sup> або майже на 40% менше. В подальшому внаслідок якісних змін і поживлення національної економіки споживання газу зростало і у 2008 році загалом по Україні склало 76,4 млрд. м<sup>3</sup>.

Як видно з графіка, впродовж 1996-2009 років промисловість скорочувала використання газу з 86,9 млрд. м<sup>3</sup> до 30,9 млрд. м<sup>3</sup>. Надалі внаслідок розвитку малого підприємництва та поживлення ринкової кон'юнктури споживання газу почало зростати і досягло у 2012 році рівня 34,83 млрд. м<sup>3</sup>.

Населення ж навпаки збільшувало споживання газу, пік якого прийшовся на 2003 рік. Це пояснюється зростанням рівня газифікації житлового фонду, який у 2003 році становив близько 50%.

Процеси постачання природного газу, на жаль, супроводжуються його втратами (рис. 1.2) [28].

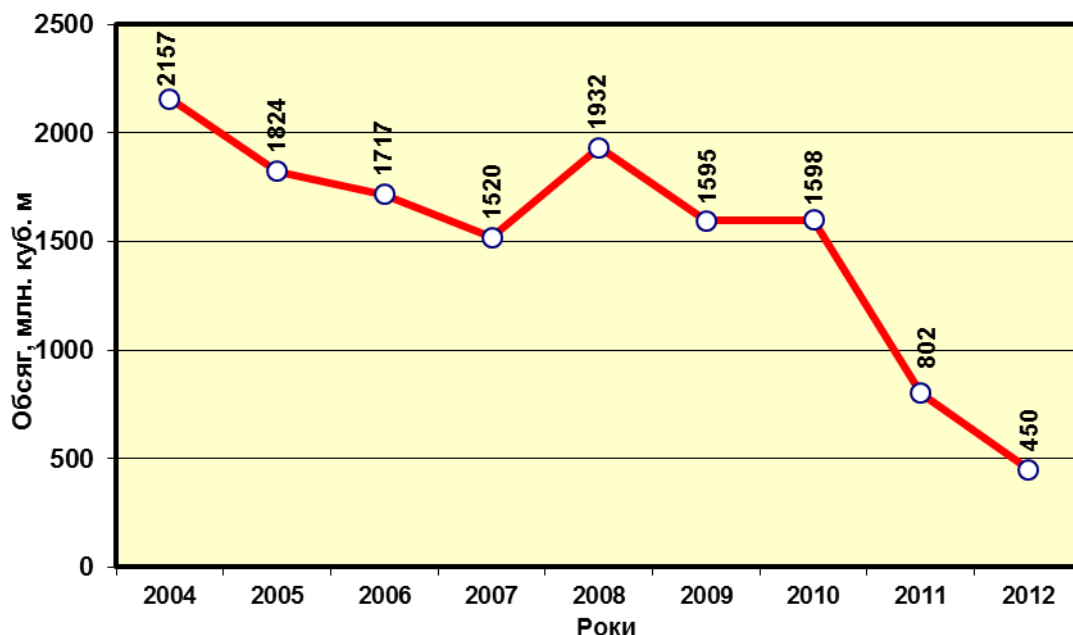


Рисунок 1.2 - Комерційні втрати природного газу в газорозподільних мережах впродовж 2004-2012 рр

Втрати газу зумовлені цілою низкою чинників, основними з яких є:

- недоліки засобів вимірювання витрати газу та методів, які реалізують ці засоби;
- похибки приладів обліку газу та приладів визначення фізико-хімічних параметрів газу;
- використання побутових газових плит для опалення та гарячого водопостачання внаслідок порушень в роботі систем централізованого теплопостачання та систем гарячого водопостачання;
- пошкодження та аварії на газопроводах за умов, коли витоки газу не обліковані;
- вимірювання побутовими лічильниками витрат у разі не приведення об'єму газу до стандартних умов;
- недоліки в інших аспектах організації обліку витрат газу;
- незадовільна робота централізованого тепло та гарячого водопостачання;
- фізична зношеність обладнання, що використовує газ.

Друга частина втрат газу не залежить від діяльності газових господарств і має об'єктивний характер.

Головними складовими цієї частини понаднормативних втрат є:

1. Незадовільна робота підприємств теплоенергетики, що забезпечують централізоване опалення житла та гаряче водопостачання.

Особливо це відчутно у тих місцевостях, де в опалювальний період централізоване опалення житла відсутнє або воно здійснюється з пониженою температурою теплоносія, а гаряче водопостачання здійснюється з великими перебоями. На жаль, такий режим роботи цих підприємств має місце практично у всіх регіонах України. Показовим є такий приклад: за даними ВАТ “Дніпропетровськгаз” в помешканнях, де встановлено будинкові лічильники газу, фактичне споживання природного газу у випадках незадовільної роботи підприємств теплокомуненерго зростає порівняно з нормами споживання у 4-7 разів.

2. Невідповідність норм споживання газу для населення його фактичному споживанню. Через вказаний фактор газові господарства постійно несуть значні втрати.

3. Використання лічильників газу роторного типу. Їх встановлено більше 950 тис. штук (або практично кожний п'ятий лічильник). Після 2-3 років роботи такі лічильники мають велику від'ємну похибку вимірювання об'єму спожитого газу. За розрахунками втрати газу з цієї причини становлять близько 100 млн. м<sup>3</sup> на рік.

4. Втрати газу внаслідок втручання в роботу приладів обліку газу та самовільного підключення споживачів до системи газопостачання.

З наведеного вище зрозуміло, що зменшенню понаднормативних втрат газу та скороченню споживання природного газу населенням значною мірою сприяє поліпшення стану обліку газу у споживачів за рахунок встановлення побутових лічильників газу [27].

Фізичні втрати пов'язані з тим, що мережа газопроводів досить часто прокладена на ділянках з агресивними або вологими ґрунтами, в місцях з підвищеним ризиком електрохімічної корозії тощо, внаслідок чого матеріал труб зазнає посиленого руйнування. Крім того, частина газопроводів, особливо у західних регіонах України, вже давно перевищила свій експлуатаційний термін. Так, наприклад, у 2008 році втрати газу, пов'язані з витокami із газопроводів, оцінювались на рівні 250 млн. м<sup>3</sup>.

### **1.3 Дистанційний контроль герметичності газопроводів**

Відомо, що в процесі експлуатації газопроводів виникають порушення герметичності, які проявляються у вигляді витікань газу різної інтенсивності в навколишньому середовищі, створюють загрозу забруднення навколишнього середовища і є потенційно небезпечними для виникнення відказів системи.

На поверхні ґрунту такі витікання мають прояв як температурні аномалії на природному температурному фоні та аномалії концентрацій вуглеводнів у

приповерхневому шарі Землі й атмосфері. На відміну від аномалій іншого походження, у зоні витікання вони практично не залежать від просторових координат і часу.

Викладені особливості стали підґрунтям для розвитку методів дистанційного (з літальних апаратів) виявлення ділянок порушення герметичності МТ. Дослідження провадилися у трьох напрямках: вимірювання радіаційних температур (Д. А. Абернати, США, 1991; Д. Пітер, США, 1984; К. Я. Казаков, Є. Н. Зеленов, Росія, 1993), вимірювання концентрацій метану в приповерхневому шарі повітря (П. Г. Філіппов, Росія, 1994; Г. Цвік, США, 1985), комплексного вивчення поля концентрацій і температур (В. В. Бабаєв, В. І. Холодов, Україна, 1991, 1994).

Незважаючи на певні успіхи у створенні методики й техніки вимірювань, пропонувані методи мали деякі невизначеності. Так, наприклад, у працях багатьох авторів відсутні були відомості про те, які мінімальні за інтенсивності в навколишньому середовищі витікання газу можна виявити пропонованим способом і чим це підтверджується. У випадку дослідження теплового поля поверхні Землі не вказувалося, як виокремлюється корисний сигнал із різноманітності завад, що нерідко перевищують його за амплітудою. Аналогічні питання виникали під час дослідження поля концентрацій метану в приземному шарі повітря. Теоретичні розрахунки положення газової хмари в залежності від напрямку вітру і характеру місцевості не мали практичного підтвердження через недосконалість математичної моделі та її неадекватність реальним умовам.

Враховуючи, що наявність аномалій температур чи концентрацій метану не є прямим свідченням місцезнаходження витікання газу, у зазначених працях не передбачено будь-яких методичних прийомів для ідентифікації витікань і визначення їх точного місця розташування. Те ж саме можна сказати і про координатну прив'язку аномальних ділянок магістральних газопроводів.

П. Г. Філіпповим та ін. [76,77] розроблено вертолітний лазернотепловізійний комплекс для контролю лінійної частини магістральних



газо- і продуктопроводів, принцип дії якого базується на спільному використанні двох методів дистанційної діагностики: пасивного тепловізійного та активного лазерного методу диференціального поглинання з відбиттям випромінювання від підстильної земної поверхні. Авторами зроблено наголос на розробці сканувального лазерного газоаналізатора, в якому використовується імпульсноперіодичний режим роботи, від чого потужність лазерного випромінювання зросла у- $10^5$  разів. Це дало можливість збільшити оптимальну висоту польоту вертольота для різних підстильних поверхонь (сніг, зораний ґрунт, водна поверхня) від 150 до 1000 м.

У працях В. В. Бабаєва і В. І. Холодова [ 4,36 ] детально вивчено процес формування поля температур і концентрацій метану над діючим газопроводом за наявності й відсутності витікання газу та розроблено технологію дистанційного виявлення витікань газу на лінійній частині магістральних газопроводів.

Для розв'язання поставленої задачі було використано методи фізичного й математичного моделювання. На спеціально створеному полігоні досліджено характер розподілу температур і концентрацій вуглеводнів у зоні витікання газу з дебітами 70, 150, 200, 225, 300, 350, 385, 500, 2000 і 4000 м<sup>3</sup>/добу з різних ділянок поверхні труби діючого газопроводу діаметром 1020 мм й у різні пори року. Вимірювання температур здійснено на рівні 1,5; 0,5; 0,2; 0,05 м і на поверхні Землі.

У результаті було встановлено час, за який порушення теплового поля досягає поверхні Землі для різних за інтенсивності в навколишньому середовищі витікань газу. Так, для витікання з дебітом 70 м<sup>3</sup> добу це становить 5 діб, а з дебітом 4000 м<sup>3</sup>/добу -16 год. Встановлено також геометричні розміри температурної аномалії, її амплітуду й співвідношення з фоновими ділянками.

Газометричні вимірювання показали, що при витіканнях близько 70 м<sup>3</sup>/добу вміст метану у ґрунтовому газі досягає 70% об'єму, при 350 м<sup>3</sup>/добу - 79 %, при 500 м<sup>3</sup>/добу - 83 - 87 % об'єму. У той же час за межами дії витікання вміст метану не перевищував  $3,2 \cdot 10^{-4}$  % об'єму

У приземному шарі повітря малі витікання газу (70 - 350 м<sup>3</sup>/добу) створюють концентрацію метану до 0,2 % об'єму.

На висоті 1 м від поверхні Землі насиченість атмосферного повітря вуглеводнями (через витікання) коливається у межах 0,01 - 0,09 % об'єму. Цей рівень концентрацій спостерігається у приземному шарі повітря в радіусі 12 м від місця витікання.

При моделюванні витікань газу здійснювалися заміри температури ґрунту на різних рівнях (1,5; 0,5; 0,2; 0,05 м) на дослідному полігоні по спеціально встановлених профілях і на фоновому майданчику, панорамна зйомка температурного поля й газометрична зйомка у ґрунті та приповерхневому шарі атмосфери.

При переході від одного об'єму витікання до іншого провадилося вистовування, під час якого температура ґрунту відновлювалася до температури непорушеної ділянки (контрольної), розташованої на відстані 15 м від місця витікання.

На глибинах 1,5; 0,5 і 0,2 м від поверхні ґрунту заміри температури виконувалися термоелектронними давачами, розробленими в УкрНДІгазі, а на глибині 0,05 м - ртутними термометрами ТЛ-4.

На початку експерименту вимірювання температури під час моделювання витікання газу здійснювали 6 разів на добу (кожні 4 години), а у режимі відстою двічі на добу (о 9 та 19-й год.). При наступних випусканнях газу температуру ґрунту вимірювали тричі на добу: до сходу сонця, у середині дня й після заходу сонця.

Перше випускання газу (витрата 70 м<sup>3</sup> .добу) з нижньої поверхні труби показало, що внаслідок витікання газу теплова хвиля досягає поверхні ґрунту на п'яту добу. Змінювання температури на глибині 0,2 м через 6 діб з початку витікання газу становило над місцем витікання 4,4°C, на відстані 0,2 м - 4,2°C, 1 м - 2,6°C, 2,5 м - 0,5°C. Дебіт другого й третього випускань газу дорівнював також 70 м<sup>3</sup>/добу, але витікання газу моделювалися з бічної та верхньої частини поверхні газопроводу, а четверте витікання об'ємом 200 м<sup>3</sup>/добу моделювалося з верхньої частини поверхні труби. За розрахунками зниження температури при

дроселюванні за температури газу в газопроводі 22 - 24°C та тиску 4,4 - 4,8 МПа мало б становити 18,7°C, але практично воно має менше значення, що пов'язане з втратою тепла на прогрівання шару ґрунту, який лежить над газопроводом.

#### 1.4 Теоретичні засади витікання газів під тиском

Закономірності процесу витікання реальних газів через отвори та насадки під тиском базуються на математичному моделюванні. Основні математичні моделі базуються на класичних рівняннях, що описують процес руху газу в трубопроводі, а саме рівнянні руху, рівнянні нерозривності і рівнянні енергії.

Рівняння руху побудоване на основі принципу суперпозиції сил, що діють на елемент речовини в газовому потоці (принцип д'Аламбера).

В загальному випадку для нестационарного процесу переміщення газу в трубопроводі, нахиленому під кутом до горизонту рівняння руху має вигляд [11].

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\lambda \rho w^2}{2d} + \rho g \cdot \sin \alpha = 0 \quad (1.1)$$

З енергетичної точки зору (1.1) є виразом закону збереження енергії. Градієнт тиску  $\frac{\partial P}{\partial x}$  відображає енергію, що забезпечує рух газу (рушійна сила).

Інші члени рівняння – це втрати енергії:  $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}$  – інерційні,  $\frac{\lambda \rho w^2}{2d}$  – на тертя,

$\rho g \cdot \sin \alpha = \rho g \frac{dh}{dx}$  – гравітаційні.

Рівняння нерозривності відображає закон збереження речовини стосовно газового потоку. Для одномірного нестационарного газового потоку воно має вигляд

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}, \quad (1.2)$$

де  $a$  – швидкість звуку в газі.

Як відомо, швидкістю звуку називають швидкість поширення в середовищі малих збурень(малими називаються такі збурення середовища, в яких місцева зміна тиску середовища в точці збурення, тобто амплітуда тиску, нехтує мало в порівнянні із загальним тиском). З'ясуємо, як пов'язана швидкість звуку в цьому середовищі з термодинамічними параметрами цього середовища. Для цього розглянемо процес поширення слабкого обурення в середовищі, що стискається. Нехай в трубу, в якій знаходиться нерухоме середовище(газ або рідина, що мають тиск  $p$  і щільність  $\rho$ ), що стискається, вводиться поршень. У деякий момент часу цей поршень починає рухатися із швидкістю  $dw$ . Оскільки даний газ стискається, він відразу ж не переміщатиметься по трубі із швидкістю поршня(як це було б, якби замість газу поршень проштовхував, наприклад, поміщений в трубу металевий циліндр). В даному випадку шар газу безпосередньо прилеглого до поршня, стискається і тиск газу в цьому шарі дещо підвищується до величини  $p + dp$ ; далі стискається шар газу, що прилягає до першого, і т.д. іншими словами, в газі поширюється так звана слабка хвиля стискування, яку можна уявити собі у вигляді газу перерізу AA, перед яким газ нерухомий і має тиск  $p$  і щільність  $\rho$  (незбурена область), що переміщається уподовж; позаду цього перерізу газ, що рухається із швидкістю  $dw$ , має тиск  $p + dp$  і щільність  $\rho + d\rho$  (збурена область). Швидкість переміщення цього перерізу уздовж газу, тобто швидкість поширення слабкого обурення, що розглядається нами, позначимо через  $a$ . За час  $d\tau$  переріз AA, що відділяє незбурену область від збуреної, переміститься на відстань  $ad\tau$ . Маса необуреного газу  $dM_n$ , яка буде захоплена цим перерізом за час  $d\tau$ , буде, очевидно, рівна:

$$dM_n = \rho \Sigma a d\tau , \quad (1.3)$$

тобто добутком шляху, пройденого перерізом АА, на площу перерізу труби  $\Sigma$  і на щільність незбуреного газу  $\rho$ . Маса збуреного газу  $dM_v$ , яку переріз АА залишить за собою буде, очевидно, рівна

$$dM_v = (\rho + d\rho)\Sigma a(a - dw)dt. \quad (1.4)$$

Важливо підкреслити, що замість швидкості  $a$  з рівняння (1.5) тут необхідно використати величину  $(a - dw)$ ; оскільки збурений газ переміщається із швидкістю  $dw$ , він прагне "наздогнати" переріз АА, який переміщається відносно цього обуреного газу зі швидкістю, рівною  $(a - dw)$ , а не  $a$ . З міркувань нерозривності поміщеної в трубу маси газу виходить, що  $dM_n = dM_v$ , звідси з врахуванням (1.4) і (1.5) отримуємо:

$$\rho a = (\rho + d\rho) (a - dw). \quad (1.5)$$

У цьому рівнянні дві невідомі величини:  $w$  і  $a$ . Для того, щоб визначити швидкість поширення слабого збурення, що цікавить нас, це рівняння необхідно доповнити ще одним рівнянням, що містить невідомі  $w$  і  $a$ . В якості такого рівняння зручно використати відоме з механіки рівняння імпульсів, відповідно до якого зміна кількості руху тіла з масою  $M$  дорівнює імпульсу, отриманому цим тілом під дією сили  $F$ .

За час  $dt$  захоплена перерізом АА маса незбуреного газу  $dM_n$ , визначена рівнянням(1.3), змінила свою швидкість від нуля до  $dw$ . Таким чином, зміна кількості руху цієї маси за час  $dt$  рівна  $dw a dM_n$ .

Сила, що діє на цю масу газу, дорівнює добутку площі поперечного перерізу труби  $\Sigma$  на різницю тисків ліворуч і праворуч від даної маси газу, тобто на величину  $d\rho$ . Отже, імпульс сили буде рівний  $\Sigma a d\rho a dt$ . Згадане вище рівняння імпульсів з врахуванням (1.3) виглядатиме таким чином:

$$\Sigma a d\rho a dt = \rho \Sigma a a dt a dw,$$

Звідси

$$dp = \rho a^2 dw. \quad (1.6)$$

Спільно вирішуючи рівняння (1.5) і (1.6) і нехтуючи при цьому нескінченно малими величинами другого порядку, отримуємо:

$$\begin{aligned} dp &= a^2 \\ d\rho. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Звідси витікає, що швидкість поширення малих збурень (швидкість звуку в середовищі) визначається співвідношенням

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}, \quad (1.8)$$

Для розрахунку швидкості звуку в газах це рівняння уперше було застосоване 1687 р. Ньютоном. Для того, щоб скористатися рівнянням (1.8), треба знати, як відбувається процес поширення звукових хвиль, тобто для яких умов слід обчислювати похідну  $dp/d\rho$ .

Ньютон вважав, що процес поширення звуку в газі відбувається в ізотермічних умовах. Скориставшись рівнянням Бойля-Маріотта для ізотермічного процесу в ідеальному газі  $p\nu = const$ , з якого витікає, що

$$\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_T = \frac{p}{\rho}. \quad (1.9)$$

Ньютон вичислив швидкість звуку в повітрі при атмосферному тиску кімнатній температурі (при цих параметрах повітря з хорошим наближенням можна розглядати як ідеальний газ). Проте в прямих вимірах швидкості звуку в повітрі було отримано значення  $a$ , приблизно на 20 % що перевершує швидкість, знайдену Ньютоном. Причина цих розбіжностей була встановлена П. Лапласом, який відмітив, що оскільки звукові коливання в середовищі

поширюються дуже швидко, скільки-небудь помітного теплообміну між зонами розрідження і стискування звукової хвилі і довкіллям не устигає статися, і тому коливання середовища при поширенні звукової хвилі можна вважати адіабатними. Тому похідну, що стоїть в рівнянні(1.7), слід брати за умови  $s = const$ , тобто

$$c = \sqrt{\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_s}, \quad (1.10)$$

Рівняння (1.10) носить назву рівняння Лапласа. Це рівняння дозволяє за відомою величиною  $T$  вчислити швидкість поширення звуку в середовищі. Величину  $c$ , вчислену по рівнянню Лапласа, іноді називають термодинамічною швидкістю звуку або швидкістю звуку нульової частоти. Річ у тому, що при поширенні в газі або рідині звукових коливань досить високих частот перестає бути справедливим припущення про ізоентропний характер звукових коливань; при цих частотах швидкість звуку вже залежить від частоти і дещо відрізняється від величини  $a$ , визначуваною рівнянням Лапласа. Проте для широкого інтервалу частот, що представляють практичний інтерес, рівняння Лапласа дає значення  $c$ , співпадаючі з експериментально виміряними в межах сотих доль відсотка.

З урахуванням того, що  $\rho = 1/v$ , запишемо рівняння Лапласа(1.10) у виді:

$$c = \sqrt{-v^2 \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_s}, \quad (1.11)$$

де  $(\partial p / \partial v)_s$  - величина, зворотна адіабатній стисливості речовини.

Оскільки величини  $v$  і  $(\partial p / \partial v)_s$  є функціями стану, швидкість звуку  $c$ , визначувана рівнянням Лапласа, також є термодинамічною функцією стану.

Відмітимо, що рівняння Лапласа справедливе для будь-яких однорідних середовищ, що стискаються, у тому числі і для твердих тіл, що мають малу в порівнянні з газами і рідинами, але проте цілком кінцеву стисливість.

Для абсолютно нестискуваного середовища

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T=0}.$$

і швидкість поширення звуку в такому середовищі дорівнює нескінченності.

Показник ізоентропи може бути визначений наступним чином:

$$k = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s,$$

Тоді

$$c = \sqrt{kp v}. \quad (1.12)$$

Рівняння (1.12) дозволяє визначити величину  $c$  по відомих значеннях тиску  $p$ , питомого об'єму середовища  $v$  і показника ізоентропи(адіабати)  $k$ .

З урахуванням рівняння Клапейрона  $p v = RT$  отримуємо для ідеального газу:

$$c = \sqrt{k p v}. \quad (1.13)$$

Звідси витікає, що для ідеального газу швидкість звуку пропорційна, причому коефіцієнт пропорційності різний для різних ідеальних газів (різні  $k$  і  $R$ ). Підкреслимо ще раз, що рівняння(1.10) справедливе і для ідеальних, і для реальних газів (у тому числі і для рідин), і для твердих тіл, тоді як рівняння (1.12) справедливо тільки для ідеальних газів.

Як видно з рівняння (1.12), швидкість звуку в ідеальному газі залежить для цього газу тільки від температури; для реального газу швидкість звуку залежить не лише від температури, але і від тиску. Прикладом такої залежності може служити приведений на рис. 1.3 графік  $c = f(p, T)$  для діоксиду вуглецю.



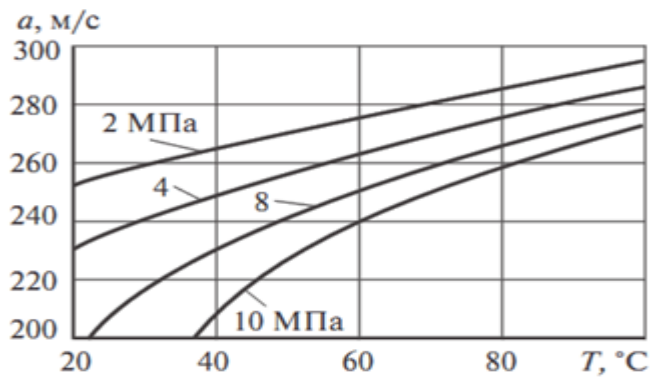


Рисунок 1.3 – Вплив температури і тиску на швидкість звуку в середовищі діоксиду вуглецю

В умовах стаціонарного руху газу параметри потоку постійні в часі, тому  $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ , отже,  $\rho w = const$ , тобто при стаціонарному русі газу масова швидкість газу постійна по довжині.

Рівняння енергіїє виразом закону збереження енергії в потоці суцільного середовища. Загальний принцип, покладений у його основу, може бути сформульований таким чином: сумарна енергія в газовому потоці (враховуючи підведення тепла і виконану роботу) не змінюється від перерізу до перерізу.

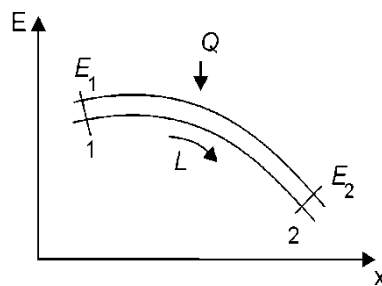


Рисунок. 1.4 - Баланс енергій в потоці

Розглянемо потік газу з непроникною бічною поверхнею і виділимо два перерізи, перпендикулярні осі потоку (рис. 1.4). Нехай на шляху від перерізу 1-1 до перерізу 2-2 до потоку підводиться теплова енергія  $Q$  і виконується робота  $L$  (вона вважається позитивною, якщо виконується газом):

$$E_1 = E_2 - Q + L.$$

Сумарна енергія газу в кожному перерізі може бути представлена у вигляді суми внутрішньої, кінетичної і потенційної енергії, причому остання складається з потенційної енергії положення перерізу над умовним рівнем і потенційної енергії тиску (взаємного розташування молекул газу). Таким чином,

$$U_1 + \frac{m_1 w_1^2}{2} + mgh_1 + P_1 Q = U_2 + \frac{m_2 w_2^2}{2} + mgh_2 + P_2 Q - Q_r \pm L, \quad (1.14)$$

де  $U$  – внутрішня енергія;  $\frac{mw^2}{2}$  – кінетична енергія;  $mgh + PQ$  – потенційна енергія.

По відношенню до одиниці маси газу рівняння енергії:

$$U_1 + \frac{w_1^2}{2} + gh_1 + \frac{P_1}{\rho_1} = U_2 + \frac{w_2^2}{2} + gh_2 + \frac{P_2}{\rho_2} - q - l, \quad (1.15)$$

де  $q = \frac{Q_r}{m}$  – питома підведене тепло;  $l = \frac{L}{m}$  – питома робота.

Величина  $\frac{P}{\rho} + U = i$  є ентальпією газу ( $i = C_p T$ ).

Вважаючи трубопровід горизонтальним, одержимо

$$i_1 + \frac{w_1^2}{2} = i_2 + \frac{w_2^2}{2} - q \pm l. \quad (1.16)$$

Якщо знехтувати теплообміном, то для випадку, коли на шляху газ не виконує роботу можна записати:

$$T_1 + \frac{w_1^2}{2C_p} = T_2 + \frac{w_2^2}{2C_p}. \quad (1.17)$$

Нехай газовий потік набігає на нерухому стінку. У цьому випадку швидкість у перерізі 2-2 дорівнює нулю. Якщо відома температура в перерізі 1-1, то для перерізу 2-2 маємо

$$T^* = T + \frac{w_1^2}{2C_p}. \quad (1.18)$$

Ця температура називається температурою гальмування. Вона завжди більша за температури в газовому потоці.

Розглянемо процес витікання газу з ресивера в атмосферу через малий отвір. Якщо відомі ентальпії газу в кожному перерізі, то нехтуючи швидкістю руху газу в ресивері, будемо мати

$$w_2 = \sqrt{2(i_0 - i_a)}.$$

Враховуючи ентальпію газу  $i_0 = C_p T_0 = (C_v + R)T_0$  та рівняння стану газу  $RT_0 = P_0 v_0$ , одержимо

$$w_2 = \sqrt{\frac{2}{k-1} (P_0 v_0 - P_a v_a)}, \quad (1.19)$$

де  $v$  – питомий об'єм.

Виражаючи масову витрату газу у вигляді добутку лінійної швидкості, густини і площі перерізу отвору, одержимо

$$m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[ \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (1.20)$$

де  $k = \frac{C_p}{C_v}$  – показник адіабати [9].

Отримане нами рівняння зв'язує між собою масову витрату ідеального газу при оборотній адіабатній течії через сопло, площу вихідного перерізу і величини тисків в середині і зовні ємності. За допомогою цього рівняння можна вирішити і зворотне завдання знайти, якій має бути площа вихідного перерізу сопла, для того, щоб забезпечити задану витрату газу через сопло при заданих параметрах газу на вході в сопло і на виході з нього.

Аналіз характеру залежності витрати  $m$  від відношення тиску газу на виході з сопла до тиску перед соплом  $p_2 / p_1$ , що дається рівнянням (1.20), (позначимо цю величину  $\psi$ ) показує, що ця залежність має вигляд, представлений на рис. 1.5 (крива 1 - К - 0). Очевидно, що  $m = 0$  при  $\psi = 1$ . При подальшому зменшенні  $\psi$  значення  $G$  починає зростати, досягаючи максимуму при деякому  $\psi$ . При подальшому зменшенні  $\psi$  значення  $G$  відповідно до рівняння (1.20) зменшується, перетворюючись на нуль при  $\psi = 0$ . Порівняння описаної залежності  $m = f(\psi)$  з експериментальними даними по витіканню газів з сопел виявило цікаву картину. У інтервалі значень  $\psi$  від одиниці до значення, що відповідає максимальній витраті, результати розрахунку по рівнянню (1.20) добре співпадають з експериментальними даними (права гілка кривої на рис.1.5). Що ж до області значень  $\psi$  між значенням, що відповідає максимальній витраті, і нулем, то був виявлений дивовижний результат зменшення тиску середовища за соплом ніяк не впливало на витрату газу через сопло; витрата  $m$  залишалася постійною для усього цього інтервалу змін  $\psi$  (аж до  $\psi = 0$ ). Крива залежності  $m = f(\psi)$ , що відповідає реальному протіканню процесу, зображена на рис. 1.5 жирною лінією. Для того, щоб пояснити цю розбіжність теорії з експериментом, в 1839 р. А. Сен-Венаном була висунена гіпотеза про те, що при розширенні газу в соплі, що звужується, неможливо отримати тиск газу нижче деякого критичного значення витікання  $p^*$ , газу, що відповідає максимальній витраті, через сопло. Отже, при скільки завгодно низьких тисках середовища за соплом, менших  $p^*$ , тиск газу у вихідному перерізі сопла, що звужується, залишається постійним і рівним  $p^*$ . Таким чином, прямолінійна частина залежності  $m = f(\psi)$  на рис. 1.5 відповідає просто постійному значенню  $p_2 = p^*$ . Подальші дослідження показали, що ця гіпотеза

була правильною. Тому зроблене раніше твердження про те, що швидкість газу на виході з сопла  $w$  росте зі зменшенням  $\psi$ , потребує істотного уточнення : це зростання має місце лише до тих пір, поки  $p_2$  не зменшиться до  $p^*$ . Подальше зниження тиску за соплом не призводить до зростання  $w$ . Сказане ілюструється графіком, представленим на рис. 1.6, де зображена залежність тиску у вихідному перерізі сопла  $p_2$  від тиску середовища  $p_0$ . Як видно з графіку, при  $p_2 > p^*$  тиск газу у вихідному перерізі сопла дорівнює тиску середовища, в яке витікає газ з сопла. При  $p_0 < p^*$  тиск газу у вихідному перерізі сопла  $p_2$  залишається постійним і рівним критичному тиску  $p^*$ .

З'ясуємо, що ж відбувається в соплі при зниженні тиску середовища до 0. З цією метою досліджуємо рівняння (1.20) на максимум. Величина  $m$  досягає максимуму тоді, коли максимального значення досягає різниця в квадратних дужках правої частини цього рівняння. Диференціюючи різниця по  $\psi$  і прирівнюючи (відповідно до правил відшукування екстремуму) отриману величину нулю, маємо:

$$\frac{2}{k} \psi^{\frac{2}{k}-1} - \frac{k+1}{k} \psi^{\frac{1}{k}} = 0$$

Означаючи величину  $\psi$  для  $m = m_{max}$  (і, отже, для  $p_2 = p^*$ ) через  $\psi_{кр}$ , отримуємо:

$$\psi = \left( \frac{k+1}{k} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Це співвідношення показує, що значення критичного відношення тисків  $\psi_{кр} = p^*/p_1$  залежить від  $k$ , проте ця залежність слабка : так, для  $k = 1,4$   $\psi_{кр} = 0,53$ , а для  $k = 1,3$   $\psi_{кр} = 0,55$ , таким чином, зміна  $\psi$  не занадто велика. Для різного роду оцінних розрахунків можна в першому наближенні нехтувати залежністю  $\psi_{кр}$  від  $k$  і рахувати  $\psi_{кр} \approx 0,5$ .

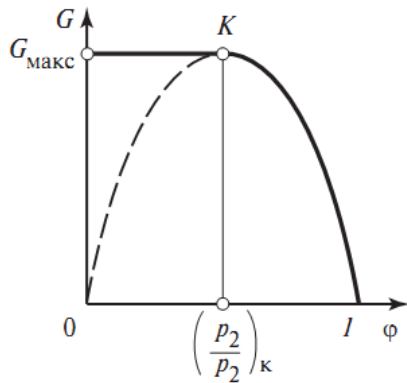


Рисунок 1.5 – Залежність масової витрати

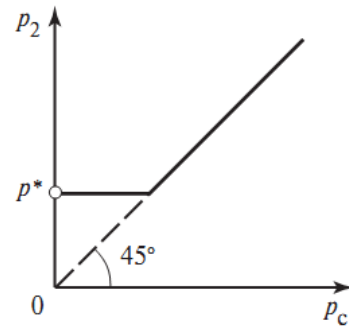


Рисунок 1.6 – Критичний тиск витікання від перепаду тисків

Вираз для швидкості витікання газу з сопла при максимальній витраті (позначимо цю швидкість  $w^*$ ), можна отримати на основі знайденого виразу для  $\psi_{кр}$ :

$$w^* = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1} .$$

Відповідно вираз для максимальної витрати через сопло

$$G_{max} = \Sigma \sqrt{\frac{k}{k+1} \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{k2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}} . \quad (1.21)$$

Виразимо тепер величини  $p_1$  і  $v_1$  через параметри газу у вихідному перерізі сопла  $p^*$  і  $v^*$ . З рівняння адиабати виходить, що

$$v_1 = v^* \left(\frac{p^*}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}},$$

або з урахуванням значення  $\psi_{кр}$ :

$$v_1 = v^* \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} .$$

Що ж до величини  $p_1$ , то вона виражається через  $p^*$  за допомогою того ж рівняння:

$$p_1 = p^* \left( \frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{1}{k-1}}.$$

Отримані значення  $v$  і  $p$  дозволяють знайти критичну швидкість у виді:

$$w^* = \sqrt{kp^*v^*}.$$

Як видно з порівняння отриманого нами вираження для  $w^*$  з рівнянням (1.13) величина  $w^*$  дорівнює місцевій швидкості звуку у вихідному перерізі сопла :

$$w^* = c.$$

Саме цим пояснюються відмічені вище "дивності" в характері залежності  $m = f(\psi)$ . Насправді, як вказано при виведенні рівняння Лапласа для швидкості звуку, будь-яке слабке збурення, у тому числі і зміна тиску, поширюється в середовищі, що стискається, із звуковою швидкістю. Якщо в деякий момент часу тиск газу за соплом  $p_2$  дещо зменшити, то хвиля розрідження пошириться уздовж потоку в напрямі, протилежному до напрямку витікання потоку; уздовж сопла встановиться новий розподіл тисків(при тому ж, що і раніше, значенні тиску газу перед соплом  $p_1$ ), і швидкість витікання зросте. При цьому слід зазначити, що хвиля розрідження поширюватиметься уздовж сопла з відносною швидкістю  $c - w$ .

Розглянемо тепер випадок, коли тиск середовища, в яке витікає газ,  $p_2$  рівний  $p^*$  і швидкість витікання відповідно дорівнює місцевій швидкості звуку; при подальшому зниженні тиску середовища нижче  $p^*$  хвиля розрідження не зможе поширитися уздовж сопла, оскільки її відносна швидкість  $c - w$  дорівнюватиме нулю внаслідок того, що в цьому випадку

$w = c$ . Ніякого перерозподілу тиску уздовж сопла не станеться, і попри те, що тиск середовища за соплом знизився. Тому при  $0 \leq \psi \leq \psi_{кр}$  витрата газу через сопло зберігається постійною, рівною  $m_{max}$ .

В [13] приведено методику розрахунку часу спорожнення ділянки газопроводу, яка базується на результатах досліджень витоків газу.

Нехай у початковий момент часу в зупиненій ділянці газопроводу параметри стану газу складали  $P_0, T_0$ . Тоді маса газу в газопроводі

$$M_0 = \frac{P_0 \cdot U_{теор}}{z_0 R T_0},$$

де  $U_{теор}$  – геометричний об'єм ділянки.

Задаємо проміжок  $\Delta t$ , протягом якого всі параметри можна вважати постійними. Якщо

$$\frac{P_a}{P_0} < 0,528,$$

то масова витрата визначається за виразом (1.21), в інших випадках – за (1.20).

Кількість газу, що витекла за проміжок  $\Delta t$

$$\Delta M = m \cdot \Delta t.$$

Кількість газу, що залишилася в газопроводі

$$M_1 = M_0 - \Delta M.$$

Тоді тиск і температура газу на кінець проміжку часу  $\Delta t$  пов'язані рівнянням



$$P_1 \cdot U_{\text{геом}} = M_1 R T_1 z_1.$$

Вважаючи температуру газу незмінною, знайдемо тиск на кінець проміжку часу  $\Delta t$

$$P_1 = \frac{M_1 R T_0 z_1}{U_{\text{геом}}}.$$

Додержуючись наведеного алгоритму, визначаємо тиск доти, поки він не зрівняється з атмосферним. Сумуючи всі розглянуті проміжки часу, визначимо час повного спорожнення газопроводу.

### **1.5 Аналіз досліджень витікання газу з газопроводу і його фільтрації в ґрунті**

Необхідно відмітити, що в літературних джерелах кількість експериментальних досліджень процесу витікання газу через отвори і сопла під тиском в порівнянні з теоретичними методами сильно обмежена. Це пов'язано з технічними забрудненнями вимірювання витрати газу в нестационарному процесі втравлювання газу. В [10] приведено результати натурних вимірювань при стравлюванні газу з ділянок магістрального газопроводу Долина-Пасічна в процесі проведення підготовки до аварійно-відновлювальних робіт. Процес випорожнення посудини під тиском (якою є ділянка магістрального газопроводу) характеризується відомою формулою Сен-Венана – Ванцеля, в якій введено емпірично коефіцієнт витрати отвору. На сьогодні немає чітко розробленої теорії для оцінки даного коефіцієнту тому його значення встановлюється на основі виконання експериментальних досліджень для конкретних сопел. Для оцінки коефіцієнту витрати газу через продувну свічу в діапазоні надлишкових тисків в газопроводі від 0,4 МПа до 0,0005 МПа проведено натурні вимірювання динаміки зміни надлишкового тиску в

газопроводі під час випорожнення ділянки. Вимірювання проводились за допомогою зразкових манометрів з максимальним показом 0,25 МПа і класом точності 0,25, та фіксувались за допомогою цифрових фотокамер, переключених на режим відео знімання. Даний процес був відтворений за допомогою математичної моделі нестационарного руху газу за допомогою формули Сен-Венана-Ванцеля, яка відображала процес витікання газу через продувну свічу в атмосферу. У результаті співставлення експериментальних даних з результатами моделювання встановлено, що сукупність нестационарної моделі руху газу на ділянці трубопроводу з моделлю витікання газу через продувну свічу адекватно відображає процес пониження тиску на ділянці газопроводу при значенні коефіцієнта витрати рівного 0,35. Даний результат підтверджується обома процесами випорожнення ділянок газопроводу.

Зважаючи на аномально низьке значення отриманого коефіцієнту витрати та відсутність в літературних даних відомостей щодо визначення коефіцієнту витрати газу в приведеному діапазоні надлишкового тиску, було проведено додаткове дослідження процесу витікання природного газу з ємності об'ємом 8 м<sup>3</sup>. Метод фіксування зміни надлишкового тиску в посудині аналогічний тому, який використано на лінійній частині магістрального газопроводу. За результатами визначено, що процес адекватно відображається формулою Сен-Венана-Ванцеля, якщо коефіцієнт витрати отвору в посудині прийняти рівним 0,42.

Отже, суттєво різні значення коефіцієнтів витрати отвору вказують на необхідність проведення додаткових експериментальних досліджень в даному напрямку. Встановлено, наприклад [15], що для ділянки газопроводу з пересіченим профілем траси зменшення тиску в діапазоні допустимих для виконання вогневих робіт значень відбувається до 20 % швидше, ніж на рівнинному газопроводі.

В [18] приведено дистанційний метод дослідження герметичності газопроводів. Мета роботи – розробка методу високо надійного контролю стану герметичності газотранспортної системи для запобігання великих техногенних катастроф. Для досягнення поставленої мети реалізуються задачі моделювання

двовимірного стаціонарного температурного поля у ґрунті навколо газопроводу без витoku газу та тривимірного нестаціонарного температурного поля у ґрунті навколо газопроводу з витokом газу; експериментальні дослідження процесу формування температурного поля над газопроводом без порушення герметичності та за наявності витoku газу; газометричні дослідження приповерхневого шару ґрунту та атмосфери за наявності витoku газу. Оцінка величини витoku газу за витратою не приводиться.

В [19] запропоновано метод виявлення витokів природного газу із ділянок газорозподільних мереж без припинення газопостачання та виконано аналіз можливості застосування цього методу на ділянках газорозподільних мереж низького та середнього тисків. Для виявлення витokів запропоновано застосування мобільного витратовимірювального комплексу, що не потребує припинення газопостачання та його застосування є менш трудомістким порівняно із існуючими методами. Вказується на технічні труднощі практичного визначення величини витрати витoku газу.

В працях [20,23] описано результати експериментальних досліджень додаткової похибки вимірювання температури потоку природного газу, а також виконано порівняння цих результатів із значеннями, отриманими на основі розроблених математичних моделей. Контроль за величиною витрати газу при витіканні не приводиться. Наведено опис розробленої установки та представлено результати експериментальних досліджень коефіцієнта газопроникності ґрунтів, які застосовують для засипання газопроводів. Показано, що точне визначення об'єму газу, втраченого із підземного газопроводу, можливе тільки на основі результатів експериментальних досліджень газопроникності ґрунту у місці витoku газу.

Дослідження фільтрації витokів газу з газопроводів в ґрунті проводилися, в основному, аналітичними методами. Так, в [24] розглядається фільтрація газу в пористому середовищі (ґрунті), обумовлена витokами транспортованого продукту з трубопроводу внаслідок появи у стінках труб наскрізних отворів, викликаних корозійними процесами. Створена математична модель базується на законі лінійної фільтрації у формі Дарсі, рівнянні нерозривності у

двовимірній формі, в якій витік із трубопроводу моделюється функцією джерела Дірака. Реалізація моделей здійснюється методами функції Гріна, а також інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа. Отримані результати уможливають побудову нестационарного розподілу тиску і швидкостей фільтрації в ґрунті, на основі яких робиться висновок про формування ареалу забруднення довкілля рідкими витоками і ареалу загазованості. Однак, вплив фільтраційного опору ґрунту на величину витоку газу не досліджено.

## **1.6 Формування задач досліджень**

Аналіз літературних джерел з питань дослідження процесів витікання газів під тиском показав, що основні математичні моделі процесу базуються на законах класичної газодинаміки, зокрема законі збереження енергії та законі нерозривності потоку. Важливу роль в дослідженнях відіграють основні термодинамічні принципи (наприклад, перше начало термодинаміки) та закономірності газового стану (для ідеальних та реальних газів). Реалізація складних нестационарних неізотермічних моделей вимагає їх певного спрощення, що в кінцевому випадку може призвести до спотворення реальної картини фізичного процесу. Між тим в літературних джерелах відсутня оцінка ряду припущень (наприклад, впливу не ідеальності природного газу, відхилення процесу витікання від адіабатного та ін.), що може бути причиною серйозних похибок в кінцевому результаті досліджень.

Результати експериментальних досліджень, що приводяться в літературі, здебільшого одержані в промислових чи напівпромислових умовах при стравлюванні газу з ділянок магістральних газопроводів і тому не вирізняються строгим науковим підходом з урахуванням конкретних умов та відповідно похибок експерименту.

Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесу витікання газу під тиском показує суттєву відмінність результатів, зокрема витрати стравлюваного газу. При цьому вводиться поняття коефіцієнту втрати отвору, який є відношенням теоретично розрахованої

витрати газу через отвір до її фактичної (вимірної) величини (по аналогії з процесом витікання рідин через отвори). Однак, числові значення цього коефіцієнта різні автори ( а також один автор в різних серіях досліджень) приводять суттєво різними. Це дає підстави стверджувати, що коефіцієнт витрати залежить від ряду параметрів, які різними авторами в різних серіях експериментів або не враховувалися, або враховувалися не коректно. Цей факт вимагає планування і проведення дослідів з оцінювання впливу різноманітних факторів на величину витрати газу, який витікає через отвір під тиском.

Слід приділити також увага впливу насадок (сопел) на характер і параметри процесу витікання газу. Результати таких експериментальних досліджень в літературі також відсутні. Між тим, продув очні свічки, що служать для стравлювання газу з газопроводів в атмосферу, власне являють собою насадки.

Зауважимо, що в результаті корозійних пошкоджень газопроводів газових мереж витоки газу внаслідок фільтрації в навколишньому ґрунті утворюють ареал загазованості. При цьому фільтраційний опір ґрунту має вплив на процес витікання газу через корозійний отвір і впливає на величину витрати витікання. В літературних джерелах процес фільтрації газу в ґрунті розглядається лише частково: до моменту виходжу газу на поверхню. Однак, для визначення величини втрат газу в результаті витікання через корозійні отвори суттєве значення має подальший процес, який починається від моменту появи газу на поверхні і триває практично до ліквідації витоку

За літературними даними витоки газу з газопроводів поділяють на великі та малі. Великі витоки газу мають вплив на технологічні параметри роботи газової мережі, і їх появу можна від слідкувати за замірами тиску і витрати газу в мережі. Малі витоки на параметри роботи газопроводів не впливають (внаслідок недостатньої чутливості вимірювальної техніки) і тому за зміною параметрів режиму встановлені бути не можуть. Для газових мереж, параметри режиму роботи яких безперервно змінюються в часі в залежності від величини споживання газу, відслідкувати появу витоку газу надзвичайно складно. Тому актуальною є задача оцінки величини витоку газу (великий чи малий) за

параметрами режиму. Іншими словами, необхідно встановити для газопроводів газових мереж з якої відносної величини витік газу почне впливати на режим роботи системи.

Проведений аналіз літературних джерел дозволив сформулювати мету досліджень: удосконалення контролю за втратами газу в газових мережах середнього і низького тисків на основі встановлення закономірностей процесів витікання газу і його фільтрації в ґрунті.

Для досягнення поставленої мети необхідна реалізація наступних задач досліджень:

- встановлення причин розбіжностей між величинами витрати витікання газу з газопроводу під тиском, визначеними на основі математичного моделювання процесу та шляхом проведення вимірювань;
- оцінювання впливу параметрів режиму процесу витікання газу на величину витрати і визначення коефіцієнту витрати;
- конкретизація закономірностей фільтрації витоків газу в навколишньому ґрунті та побудова ареалу загазованості;
- дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж для виявлення місць і величини витоків газу.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗУ З ЄМНОСТЕЙ ПІД ТИСКОМ

Теоретичні дослідження процесів, що супроводжують витікання газу з ємностей, які знаходяться під надлишковим тиском, базуються на основних законах газової динаміки і описуються складними математичними моделями, реалізація яких в аналітичній формі вимагає внесення певних припущень і відкидання несуттєвих взаємозв'язків між параметрами процесу з метою спрощення математичних моделей. Очевидно, така процедура спрощення моделей припустима лише у випадку отримання результату, який за певними критеріями адекватно відображає модельований технологічний процес. В інших випадках використанні спрощення моделей є неприпустимими.

Критерієм адекватності спрощених математичних моделей являється практика. Якщо отримані розрахункові формули та методики відображають модельований процес з достатньою для інженерних розрахунків точністю і не спотворюють реальних взаємозв'язків між параметрами процесу, то такі спрощення припустимі. В протилежному випадку необхідно оцінити припустимість кожного спрощення і відкинути такі з них, які призводять до грубих помилок.

Класичні дослідження процесу витікання газів з ємностей під тиском були проведені в першій половині XIX сторіччя. Вони дозволили встановити існування докритичного та критичного витікання газу, виділити критерії зміни режимів витікання та створити уявлення про якісну загальну картину процесу. Про точність визначення витрати газу при докритичному та критичному витіканні газу на цей час питання не стояло. Це пов'язано з відсутністю відповідної вимірювальної техніки з одного боку та з задоволенням потреб технічного використання результатів з іншого.

В останній час в зв'язку з подорожчанням енергоносіїв та зростаючими вимогами до чистоти довкілля результати розрахунків витрати газу за класичними формулами та методиками перестали задовольняти вимоги

користувачів. В літературі появляються порівняння результатів прогнозу з фактичними даними, які свідчать про серйозні відхилення між ними.

В зв'язку з сказаним виникає проблема оцінювання величини витоків газу з технологічних трубопроводів і обладнання з внесенням корективів в результати класичних досліджень і адаптацією їх до реальних умов. Важливим напрямком досліджень є встановлення причин суттєвих відхилень між результатами теоретичних прогнозів і фактичними даними.

## **2.1 Мета і завдання дослідження**

Прогнозування витрати газу при його витіканні з технологічних трубопроводів та ємностей під тиском, а також розрахунки втрат газу через корозійні пошкодження газопроводів газових мереж зазвичай здійснюються на основі відомої формули Сен-Венана-Вентцеля, теоретично отриманої на основі відомого в газодинаміці рівняння – рівняння енергії. Всі галузеві нормативні документи, пов'язані з втратами газу, побудовані на основі власне цієї залежності.

Останнім часом в зв'язку з подорожчанням енергоносіїв почали появлятися публікації з результатами досліджень, які свідчать про те, що формула Сен-Венана-Вентцеля дає суттєво завищені результати у визначенні масової витрати витікання газу. Це вносить похибки в плани виконання аварійно-відновлювальних робіт, пов'язаних з втручанням в газові мережі, і завищує величину допустимих втрат при експлуатації газових мереж.

Вказана картина вимагає проведення наукових досліджень для коректування методів прогнозування витрати витоків при стравлюванні газу та величини допустимих втрат при експлуатації.

Метою проведених досліджень є удосконалення методів прогнозування витрати витоків газу з технологічних об'єктів, встановлення причин розбіжностей у визначенні витрати газу аналітичними та витратомірними методами та внесення корективів в розрахункові залежності для адаптації прогнозних та фактичних даних.



Для досягнення поставленої мети планується реалізація наступних завдань дослідження:

Необхідно оцінити суть і характер припущень, внесених в рівняння енергії при одержанні аналітичної залежності витрати витікання газу від технологічних параметрів процесу, і на їх основі встановити причини виникнення розбіжностей між прогнозом витрати і фактом.

Встановити перелік фізичних величин (параметрів), які можуть мати вплив на характер процесу витікання газу і його витрату.

Виконати серії експериментальних досліджень з метою встановлення закономірностей впливу кожного з параметрів процесу витікання газу на величину витрати в умовах критичного і до критичного витікання.

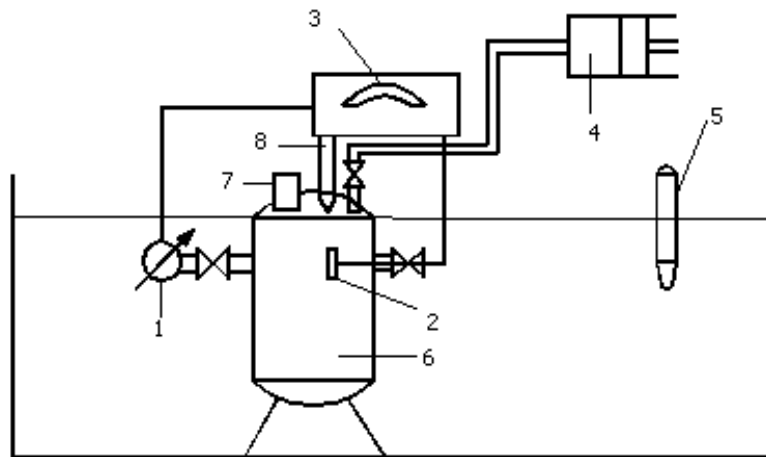
Провести обробку експериментальних даних і на цій основі побудувати емпіричні залежності для адаптації розрахункових результатів з фактичними даними.

Слід зауважити, що проведення вказаних досліджень не виключає аналітичних методів, але повинно базуватися на обов'язковій їх перевірці практикою.

Очевидно, що категорично відкинути теоретичні дослідження попередників і відмовитися відомої формули Сен-Венана-Вентцеля недоцільно, оскільки на цій основі отримано ряд важливих результатів (зокрема, твердження про існування критичного і до критичного режимів витікання газу) і вона є загально визнаною. Тому доцільно внести поправки до відомої класичної залежності для адаптації її до реальних умов і корективи до існуючих методик визначення витрати газу при витіканні.

## **2.2 Дослідні стенди та вимірювальна апаратура**

Для проведення експериментальних досліджень процесу витікання газу з ємностей під тиском запроектовано і створено лабораторний стенд, технологічна схема якого приведена на рисунку 2.1.



1 - манометр Н08ЕМ011ШТ 3051С, 2 – термометр опору ПММ, 3 - автоматичні урівноважені мости, 4 – компресор, 5 – шкальний термометр, 6 – ресивер, 7 – сопло, 8 – термопара.

Рисунок 2.1 – Схема дослідного стану



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд дослідного стану

Циліндрична ємність, розміщена у водяному термостаті, заповнювалась повітрям чи іншим газом за допомогою компресора до максимального тиску  $1,0\text{МПа}$ . Тиск в ємності контролювався і реєструвався за допомогою манометра Н08ЕМ011ШТ 3051С з діапазоном вимірювання 25 Па до  $13,8\text{МПа}$



Рисунок 2.3 – Первинний перетворювач тиску



Рисунок 2.4 – Термінал зовнішнього зв'язку з об'єктами

#### Технічна характеристика Н08ЕМО11ШТ 3051С

1. Вимірювання різниці тисків;
2. Діапазон вимірювання абсолютного та відносного тиску від 25 Па до 13,8 МПа
3. Межі допустимої приведеної похибки — 0,075% при діапазоні вимірювань 1:10.
4. Витримує статичний тиск — до 25 МПа
5. Маса давача без додаткового обладнання — 2,8 кг.

Для вимірювання і запису температури в газовому середовищі використано термометр опору ТСП-1088. Для витоку газу в ємність вмонтовано змінні насадки з отворами в тонкій стінці площею  $0,2\text{см}^2$  різної форми. Температура стіни на відстані 12мм від насадки вимірювалось і записувалось з

допомогою термопары ТХА-2088. Зв'язок фізичних об'єктів з комп'ютером здійснювався через термінал ТВСО Ф4223.



Рисунок 2.5 – Змінні насадки для витокy газу

Вимірювання витрати витікання газу здійснювалося об'ємним методом на основі картограми запису падіння тиску в ресивері в процесі проведення досліду.

Об'єм ресивера вибрано таким чином, щоб при діапазоні зміни витрати газу  $10 - 20 \text{ см}^3/\text{хв.}$  на протязі незначного періоду часу процес витікання можна було б вважати квазістаціонарним. Для цієї мети визначався критерій нестационарності [24 ]

$$N_t = \frac{\delta Q d}{\lambda w \tau},$$

де  $\delta Q$  - відносна зміна витрати газу за проміжок часу  $\tau$  .

Для квазістаціонарного режиму витікання величина критерію нестационарності не повинна перевищувати  $N_t < 1,4 \cdot 10^{-6}$ .

На картограмі падіння тиску в ресивері в процесі витікання газу вибирався довільний проміжок часу  $\Delta t$  і фіксувалися тиски на початку проміжку  $P_1(t)$  і в кінці  $P_2(t + \Delta t)$ . Тоді масова витрата газу за проміжок часу  $\Delta t$  (середня) знаходилась на основі рівняння газового стану

$$m_0 = \frac{\Delta M}{\Delta t} = (P_1^*(t) - P_2^*(t + \Delta t)) \frac{V}{RT}, \quad (2.1)$$

де  $V$  - геометричний об'єм ємності;  $R$  - газова стала;  $T$  - абсолютна температура газу на проміжок часу  $\Delta t$ , яка вважалась сталою;  $P_1^*(t)$ ,  $P_2^*(t + \Delta t)$  - приведені тиски в ресивері на початку і в кінці проміжку часу  $\Delta t$

$$P^* = \frac{P}{z},$$

де  $z$  - коефіцієнт стисливості.

Для отримання середньої теоретичної масової витрати газу за вибраний проміжок часу  $\Delta t$  визначалася його густина на початку і в кінці вибраного проміжку часу

$$\rho_{1,2} = \frac{P_{1,2}}{zRT}.$$

Тоді на основі формули Сен-Венана-Вентцеля визначалися масові витрати витікання повітря на початку  $m_t$  і в кінці  $m_{t+\Delta t}$  проміжку часу  $\Delta t$ . Оскільки величина проміжку часу  $\Delta t$  вибиралась невеликою, то характер зміни витрати за цей час можна вважати близьким до лінійного. Тому середня теоретична масова витрата газу за проміжок часу  $\Delta t$  знаходилась як середнє арифметичне

$$m_{cp} = \frac{1}{2}(m_t + m_{t+\Delta t}). \quad (2.2)$$

Результати, отримані по (2.2) які вважались теоретичними, порівнювались з результатами, отриманими по (2.1), які вважались фактичними. В результаті отримано коефіцієнт витрати витікання

$$\mu = \frac{m_0}{m_{cp}}. \quad (2.3)$$

В процесі проведення серій дослідів в якості робочого тіла використовувалося повітря з домішками, які вводилися з метою підфарбовування. Тому для визначення фізичних властивостей відбиралися проби робочого тіла для проведення аналізів в хімфізлабораторії. Фізичні властивості робочого тіла (молекулярна маса, відносна густина, газова стала) визначалися розрахунковим шляхом на основі визначеної в процесі аналізів концентрації компонентів.

### **2.3 Оцінка причин відхилення між теоретичними і практичними результатними визначення витрати газу при витіканні**

Аналіз причин розбіжності між величинами витрат газу при його витіканні з ємності під тиском доцільно розпочати з класичного дослідження витікання рідини через отвір.

Вихідним рівнянням для визначення витрати рідини при її витіканні через отвір є рівняння Бернуллі, яке представляє вираз закону збереження енергії

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} . \quad (2.4)$$

Суміщаючи перерізи з нерухомим рівнем рідини в посудині і з отвором для витікання, одержимо для швидкості витікання і витрати витікання вирази

$$v = \sqrt{2gH}; Q = F\sqrt{2gH} ,$$

де  $F$  – площа перерізу отвору витікання.

Аналіз фізичної картини процесу витікання рідини показав, що має місце стиснення струмини при витіканні до певної площі  $f$ , і відношення площ  $f/F = \varepsilon$  називають ступенем стиснення струмини. Гідравлічний опір отвору як місцевого опору враховують коефіцієнтом швидкості  $\varphi = 1/\sqrt{1+\varepsilon}$

Тоді добуток

$$\mu = \varphi \rho . \quad (2.5)$$

називають коефіцієнтом витрати отвору і використовують для адаптації розрахункових результатів до фактичних.

Класичними принципами в сфері дослідження процесу витікання газу під тиском слід вважати дослідження Чарного І.А. [1] в яких запропоновано аналітичну основу математичного моделювання процесу, яка базується на рівнянні енергії. До видатних досліджень слід також віднести праці Ландау Л.Д. [2], Лойцяньського Л. Г.[3], Степанова Г.Ю.[4], Черного Г.Г.[5], Щербакова С. Г.[6], Яковлева Е.И. [7], Абрамовича Г.Н. [8], Campbell J.L. [9], Kantola R. [11], Lang F. A. [12], Zielke W. [13]. У вказаних працях приведено результати досліджень термогазодинаміки процесу витікання, дано аналіз факторів, що мають вплив на протікання процесу, визначено границі критичного та докритичного витікання, запропоновано розрахункові формули та методики.

Однак, реальний вплив параметрів процесу на витрату газу виявляється складнішим в порівнянні з прогнозованим теоретично. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозовані розрахунки. Тому важливим завданням для практики дослідження процесу витікання є приведена у відповідність фактичних і прогнозованих результатів.

Як відомо з [1], в основу розрахунку процесу витікання газу з ємності під тиском покладено рівняння енергії газового потоку, яке називають узагальненим рівнянням Бернуллі і яке в даному випадку можна звести до вигляду

$$i_1 - i_2 = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}, \quad (2.6)$$

де  $i_1, i_2$  - ентальпія газу в ємності і в потоці через отвір діаметром  $d$  відповідно;  $w_1, w_2$  - лінійні швидкості газу в ємності і отворі.

Для отримання розрахункової залежності витрати газу при витіканні від параметрів процесу приймаються наступні припущення:

- процес витікання газу вважається стаціонарним і адіабатичним, тобто таким, що протікає без теплообміну з довкіллям;
- лінійна швидкість газу в ємності в порівнянні з швидкістю витікання газу є несуттєвою, і нею нехтують;
- діаметр отвору в тонкій стінці вважається суттєво більшим від товщини стінки, внаслідок чого нехтують втратами енергії при витіканні.
- газ вважається ідеальним, внаслідок чого нехтують явищем нестисливості.

В результаті нескладних математичних перетворень з [1] отримано залежність, що зв'язує масову витрату з параметрами процесу витікання, яка отримала назву формули Сен-Венана-Вентцеля



$$m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[ \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}, \quad (2.7)$$

де  $k$  - показник адіабати процесу;  $P_0, P_a$  - тиски в середині ємності та назовні;  $\rho_0$  - густина газу при умовах всередині ємності.

Виходячи з аналогій при витіканні рідин і газів, в (2.7) доцільно було б ввести коефіцієнт витрати отвору для адаптації результатів розрахунку з фактичними даними і тоді записувати (2.7) у вигляді

$$m = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[ \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}. \quad (2.8)$$

На основі проведених серій експериментів, які відрізнялись значеннями температури газу в ресивері, були побудовані графічні залежності температури газу в ємності і на поверхні стінки за час випорожнення акумулятора газу. Характер зміни температури в газовому середовищі, а також зміни температури стінки подані на рисунку 2.6.

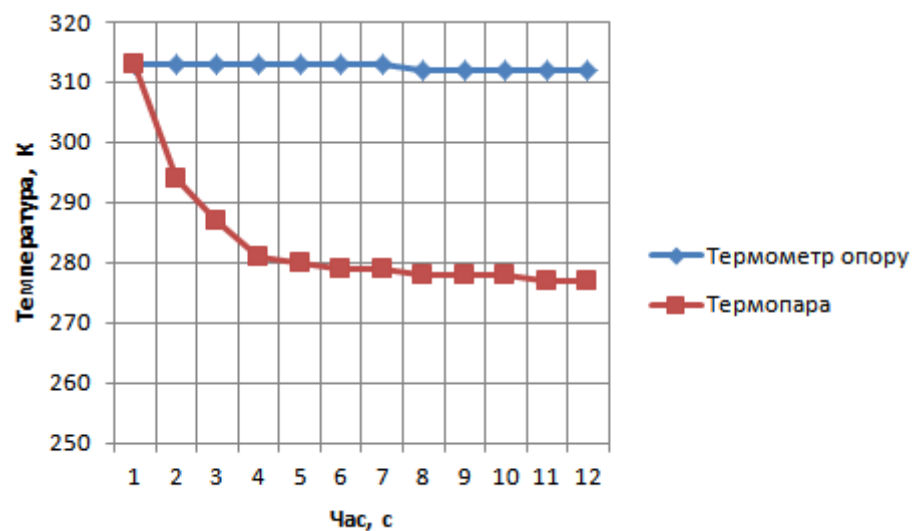


Рисунок 2.6 – Зміна температури газу в процесі витікання

Для встановлення фізичної суті коефіцієнта витрати отвору  $\mu$  і оцінки його залежності від параметрів процесу витікання необхідний аналіз суттєвості припущень для отримання формули Сен-Венана-Вентцеля.

Їх аналіз показує, що не дивлячись на практично сталу температуру газу в ресивері температура стінки суттєво змінюється протягом навіть короткого часу випорожнення. Тому припущення про адіабатний характер процесу не є адекватним, що, очевидно, відображається на результатах прогнозування.

Для оцінки наступного припущення про те, що швидкість газу в ємності практично рівна нулю, створено математичну модель процесу витікання.

Математична модель створена для лінійної ділянки трубопроводу довжиною  $L = 12\lambda$ , на початку якої здійснюється відбір газу з сталою масовою витратою  $m = 50 \frac{kg}{c}$ . Метою дослідження було встановлення характеру розподілу швидкостей газу в трубопроводі. В основу математичної моделі покладено рівняння руху і нерозривності у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda \rho w^2}{2d} &= 0, \\ -\frac{\partial P}{\partial t} &= c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $P(x,t)$  - тиск в трубопроводі;  $\rho$  - густина газу;  $w$  - лінійна швидкість;  $d$  - діаметр газопроводу;  $\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного опору;  $c$  - швидкість звуку в газі.

Реалізація приведеної системи рівнянь здійснювалась при наступних початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned} P(x,0) &= P_0, \\ \left. \frac{\partial P^2}{\partial x} \right|_{x=0} &= -\mu m^2, \\ \left. \frac{\partial P^2}{\partial x} \right|_{x=L} &= 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Система рівнянь (2.9) шляхом диференціювання по часу може бути зведена до рівняння типу теплопровідності відносно масової швидкості газу

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2(\rho w)}{\partial x^2}. \quad (2.11)$$

Краєву задачу для цього рівняння вибираємо з наступних міркувань: в початковий момент часу ( $t = 0$ ) в газопроводі спостерігається рівновага, тому  $\rho w(x, 0) = 0$ . З деякого моменту часу ( $t > 0$ ) на лівому кінці починається відбір газу з сталою масовою витратою  $m = const$ , внаслідок чого  $\rho w(0, t) = \frac{m}{F}$  (де  $F$  - площа перерізу газопроводу) і правий кінець газопроводу залишається ізольованим, тому  $\rho w(L, t) = 0$ .

Для отримання розв'язку рівняння (2.11) зведемо поставлену краєву задачу до однорідної, для чого введемо нову функцію  $\varphi(x, t)$ , зведену з шуканою  $\rho w(x, t)$  співвідношенням

$$\rho w(x, t) = \varphi(x, t) + \gamma + \gamma_1 x. \quad (2.12)$$

Де  $\gamma, \gamma_1$  - сталі коефіцієнти, які підлягають визначенню. Функція  $\varphi(x, t)$  повинна задовольняти рівняння (2.11) при однорідних граничних умовах  $\varphi(0, t) = 0$  та  $\varphi(L, t) = 0$ .

Тоді з (2.12) сталі коефіцієнти матимуть значення

$$\gamma_1 = \frac{m}{f},$$

$$\gamma = -\frac{m}{FL}.$$

Початкова умова

$$\varphi(x,0) = -\frac{m}{F}\left(1 - \frac{x}{L}\right).$$

Реалізацію однорідної граничної задачі здійснюємо методом Фур'є, для чого розділимо змінні

$$\varphi(x,t) = X(x) \cdot T(t).$$

Тоді рівняння (2.11) запишеться у вигляді

$$\frac{1}{X} \frac{X''}{X} = \frac{T'}{T} = -\lambda_n^2.$$

На основі (7) отримаємо два лінійних диференціальних рівняння

$$\begin{aligned} X'' + \lambda^2 X &= 0, \\ \frac{dT}{T} &= \lambda^2 \alpha dt. \end{aligned} \tag{2.13}$$

З першого рівняння системи (2.13) знаходимо

$$\lambda_n = \frac{\pi n}{L}.$$

Тоді загальний розв'язок однорідної задачі матиме вигляд

$$\varphi_n(x, t) = a_n \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}}.$$

Інтегруючи сталу отримаємо

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi(x, 0) \sin \frac{\pi n x}{L} dx.$$

Тоді кінцевий вигляд розв'язку

$$\varphi(x, t) = \frac{2m}{F\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1 - (-1)^n}{n} + (-1)^n \right] \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}}.$$

Для масової швидкості отримаємо

$$\rho w(x, t) = \frac{m}{F} \left\{ \left( 1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1 - (-1)^n}{n} + (-1)^n \right] \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}} \right\}. \quad (2.14)$$

Розподіл тиску в газопроводі знайдемо з першого рівняння системи (2.10) у вигляді

$$- \int_{P_0}^P \frac{\partial P}{\partial x} dx = 2a \int_0^x \rho w(x, t) dx.$$

Де  $2a = \frac{\lambda \bar{w}}{2d}$  - коефіцієнт лінеаризації. В кінцевому вигляді розподіл тиску

в газопроводі як функція лінійної координати і часу виразиться залежністю

$$P^2(x,t) = P_0 - \frac{\lambda \bar{w} m}{2df} \left\{ x \left( 1 - \frac{x}{2L} \right) + \frac{2L}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + (n-1)(-1)^n}{n} \left( 1 - \cos \frac{\pi n x}{L} \right) e^{-\frac{\pi^2 n^2 x t}{L^2}} \right\}. \quad (2.15)$$

Тоді для лінійної швидкості газу на основі рівняння нерозривності отримаємо

$$w(x,t) = \frac{2m}{\pi f \rho(x,t)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1 - (-1)^n}{n} + (-1)^n \right] \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 x t}{L^2}}. \quad (2.16)$$

$$\text{де } \rho(x,t) = \frac{P(x,t)}{zRT}.$$

На основі останньої залежності побудовано характер зміни лінійної швидкості газу в ресивері на різних відстанях від джерела витікання.

Аналіз результатів, приведених у вигляді графіків на рисунку 2.7, показує, що за умов критичного витікання газу через отвір діаметром 50 мм з трубопроводу діаметром 500 мм лінійна швидкість газу в трубопроводі в умовах нестационарного процесу змінюється по довжині і в часі в межах до  $29 \frac{M}{c}$ . Якщо критичну швидкість витікання газу вважати рівною швидкості

звуку в повітрі  $c = \sqrt{kRT}$ , яка при температурі 313K складає  $355 \frac{M}{c}$ , то співвідношення лінійних швидкостей газу складе понад 8 %. Це значить, що нехтування величиною швидкості газу в трубопроводі обумовлює певну похибку в результаті розрахунку масової витрати витікання газу.

Два наступних припущення, при яких отримано залежність (2.9), можуть бути підтвержені або спростовані тільки дослідним шляхом. В зв'язку з чим проводились серії дослідів на експериментальному стенді.

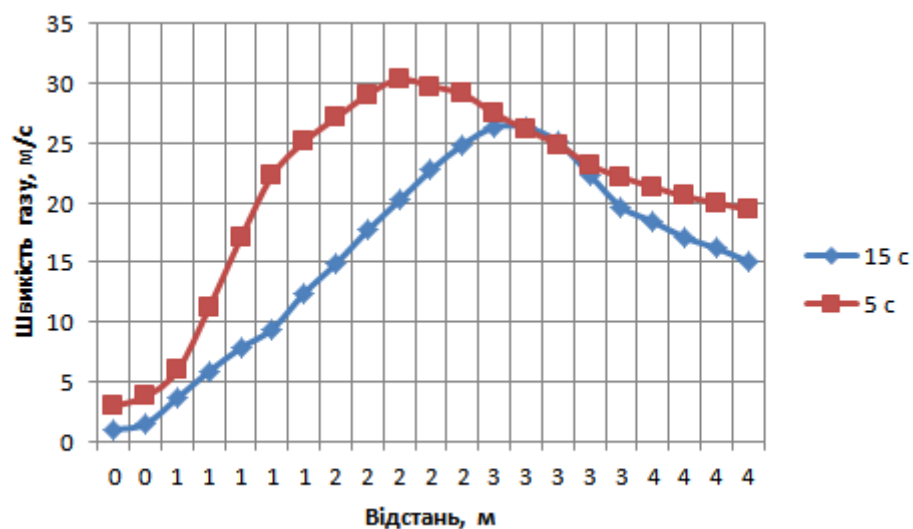


Рисунок 2.7 – Зміна лінійної швидкості газу в трубопроводі в процесі витікання

В процесі стравлювання повітря з ємності через отвори з однаковою площею перерізу і різною формою (круг, квадрат, щілина) фіксувався в часі процес падіння тиску в ресивері.

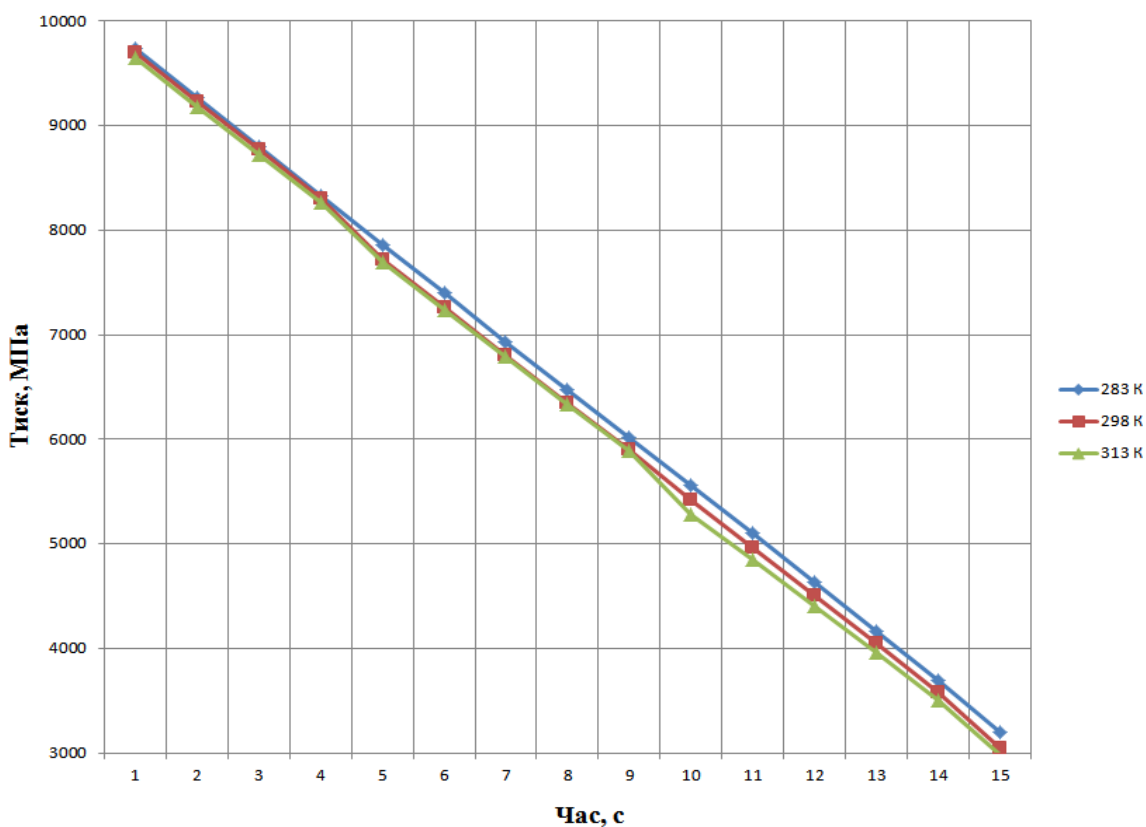


Рисунок 2.8 – Зміна тиску в ресивері в процесі витікання газу

Як показали результати дослідів, зміна форми отвору, через який відбувається витікання, в умовах критичного процесу суттєвого значення не має.

## 2.4 Результати досліджень і їх аналіз

За результатами досліджень, виконаних і опрацьованих за приведенню методикою, побудовано графічні залежності коефіцієнта витрати отвору від тиску в ресивері і температури (при сталих параметрах середовища), які подано на рисунку 2.9.

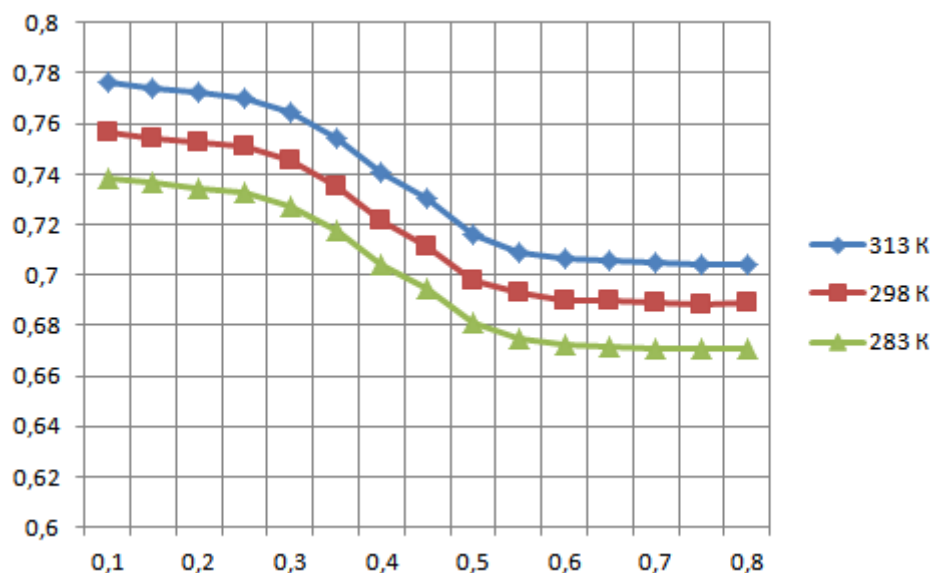


Рисунок 2.9 – Зміна коефіцієнта витрати витікання в залежності від тиску і температури

Аналізуючи графіки, що показані на рисунку 2.6 можна зробити наступні висновки.

Припущення, покладені в основу отримання залежності масової витрати при витіканні газу з ємності через отвір в тонкій стінці, мають суттєвий вплив на результати моделювання процесу, оскільки реальна масова витрата значно відрізняється від розрахункової. При зміні абсолютного тиску в ресивері від



1,0МПа до 0,54МПа (кінець зони критичного витікання) коефіцієнт витрати змінюється від 0,776 до 0,709 при температурі в ресивері 288К. Збільшення температури газу в ресивері приводить до більш суттєвого відхилення фактичної витрати від теоретичної. Тоді при температурі в ресивері 283К і тиску 1,0МПа коефіцієнт витрати складає 0,776, а при збільшенні температури до 298К знижується до 0,756 і при подальшому зростанні температури до 313К - зменшується до 0,738. При тиску 0,54МПа за температури 283К коефіцієнт витрати складає 0,709, а при зростанні температури до 298К зменшується до 0,696 і в подальшому при зростанні температури до 313К знижується до 0,678.

Для встановлення функціональної емпіричної залежності коефіцієнта витрати отвору від параметрів процесу витікання проводились серії дослідів на описаному вище дослідному стенді і здійснювалась їх обробка.

У серіях проведених експериментів оцінювався вплив тиску і температури в ресивері, фізичних властивостей газу і діаметру отвору в заданих межах на величину коефіцієнта витрати отвору в умовах критичного та до критичного режимів витікання.

Серед незалежних факторів, які мають вплив на величину коефіцієнта витрати отвору, були вибрані наступні:

- абсолютний тиск газу в ресивері,  $P_0$ ;
- абсолютна температура газу в ресивері,  $T_0$ ;
- газова стала робочого тіла  $R$ ;
- діаметр отвору  $d$ ;

Кожен із незалежних параметрів міг приймати в даній серії дослідів 5 конкретних значень.

В якості функції-відгуку вибрано коефіцієнт витрати отвору  $\mu$ .

Таким чином, функціональні залежності функції-відгуку від незалежних параметрів будувались по п'яти рівнях з метою отримання формули вигляду

$$\mu = F(P_0, T_0, R, d).$$

Умови проведення серій дослідів приведено в таблиці 2.1.

На основі комбінаційного квадрату складаються матриці

		Po1					Po2					Po3					Po4					Po5				
		Ro1					Ro2					Ro3					Ro4					Ro5				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
To 1	d 1	1	■																							
		2																							■	
		3																		■						
		4													■											
		5									■															
To 2	d 2	1						■																		
		2				■																				
		3																						■		
		4													■											
		5												■												
To 3	d 3	1												■												
		2				■		■																		
		3																								
		4																						■		
		5																					■			
To 4	d 4	1																								
		2												■												
		3												■												
		4												■												
		5																						■		
To 5	d 5	1																						■		
		2																								
		3													■											
		4													■											
		5																								

Рисунок 2.10 – Комбінаційний квадрат

Таблиця 2.1 – Умови проведення експерименту при критичному витіканні

№ п/п	ПАРАМЕТРИ				Функція- відгук,
	$P_0$ , бар	$T_0$ , К	$R$ , Дж/кгК	$d$ , мм	
1	10	313	287	6	0,635
2	8	303	275	6	0,668
3	6	293	264	6	0,695
4	4	283	252	6	0,714
5	2	273	239	6	0,726
6	10	303	239	5	0,581
7	8	293	287	5	0,616
8	6	283	275	5	0,641
9	4	273	264	5	0,659
10	2	313	252	5	0,673
11	10	293	252	4	0,526
12	8	283	239	4	0,553
13	6	273	287	4	0,580
14	4	313	275	4	0,599
15	2	303	264	4	0,609
16	10	283	264	3	0,462
17	8	273	252	3	0,486
18	6	313	239	3	0,508
19	4	303	287	3	0,527
20	2	293	275	3	0,535
21	10	273	275	2	0,385
22	8	313	264	2	0,408
23	6	303	252	2	0,424
24	4	293	239	2	0,436
25	2	283	287	2	0,446

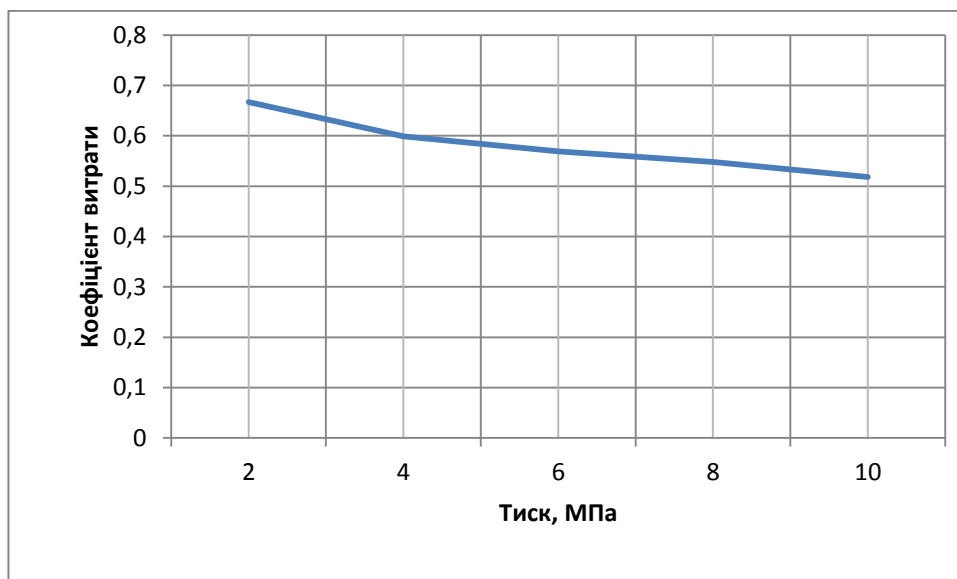
Таблиця 2.2 – Обробка результатів дослідів за параметрами  $P_0$ ,  $T_0$ 

$P_0$ , бар $T_0$ ,К	10	8	6	4	2	$\sum \varphi_i$	$F_1(T_0)$
273	0,385	0,486	0,580	0,659	0,726	2,836	0,587
283	0,462	0,553	0,641	0,714	0,446	2,816	0,583
293	0,526	0,616	0,695	0,436	0,535	2,808	0,562
303	0,581	0,668	0,424	0,527	0,609	2,723	0,544
313	0,635	0,408	0,508	0,599	0,673	2,699	0,540
$\sum \varphi_i$	2,589	2,740	2,848	2,989	3,335		
$F_2(P_0)$	0,518	9,548	0,569	0,599	0,607		

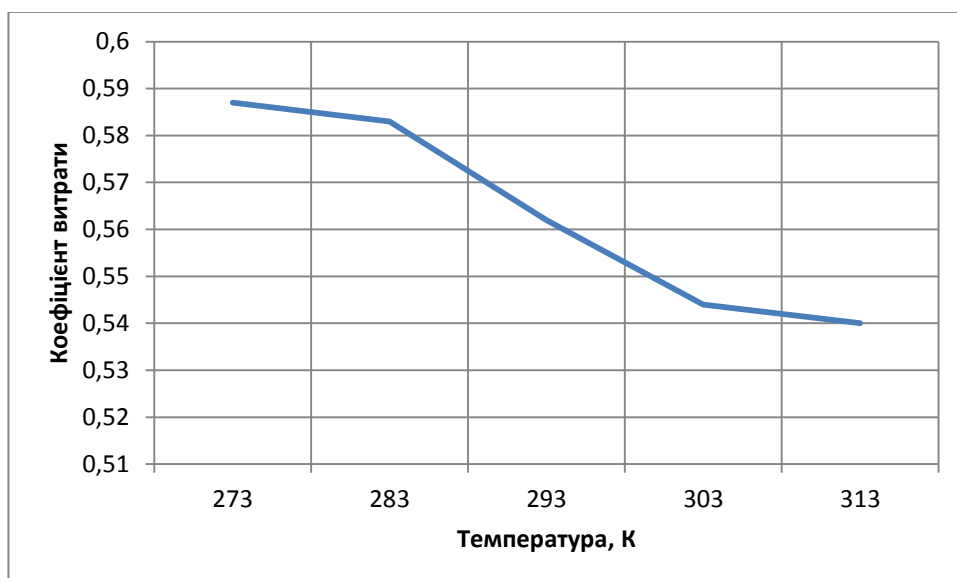
Таблиця 2.3 – Обробка результатів дослідів за параметрами  $R$  і  $d$ 

$R$ ,Дж/к гК $d$ ,мм	287	275	264	252	239	$\sum$	$F_3(d)$
6	0,635	0,668	0,695	0,714	0,726	3,438	0,688
5	0,616	0,641	0,659	0,673	0,581	3,170	0,634
4	0,580	0,599	0,609	0,526	0,553	2,867	0,573
3	0,527	0,535	0,462	0,486	0,508	2,457	0,491
2	0,446	0,385	0,408	0,424	0,436	2,099	0,420
$\sum \varphi_i$	2,763	2,804	2,828	2,833	2,864		
$F_4(R)$	0,553	0,561	0,566	0,567	0,573		

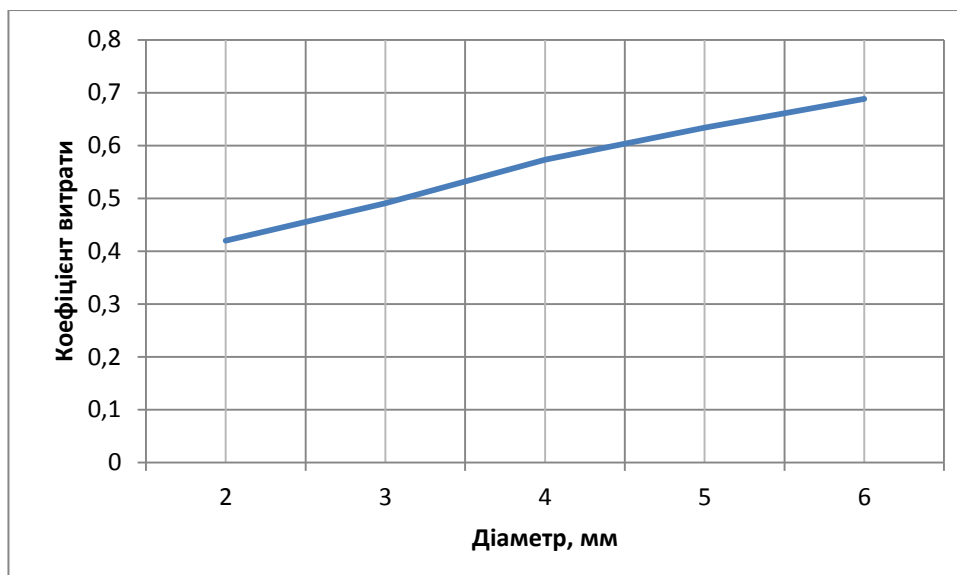
а)



б)



в)



г)

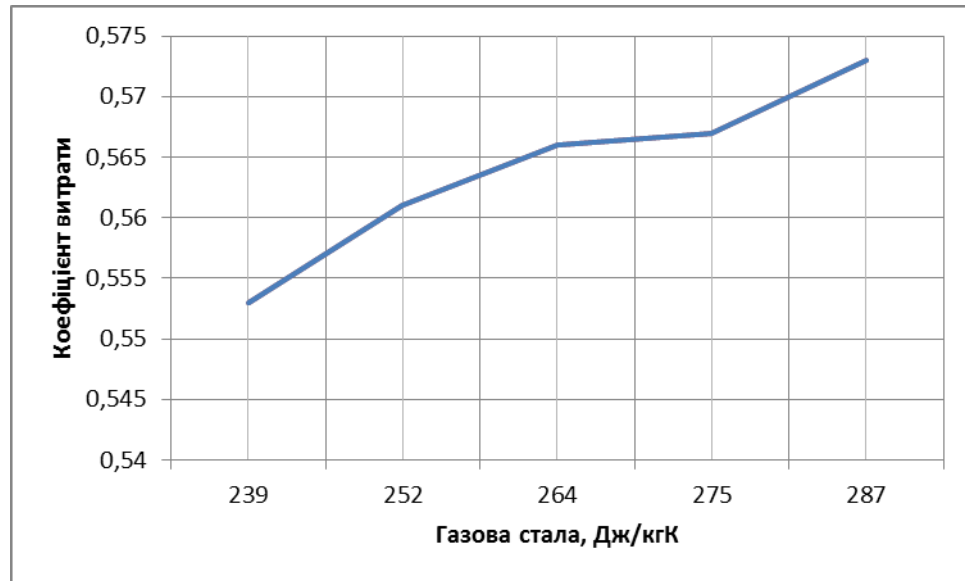


Рисунок 2.8 – Залежність функції-відгуку від параметрів:  
а – тиску; б – температури; в – діаметру; г – газової сталої.

Числові значення функції-відгуку усереднювались у горизонтальних рядках і вертикальних стовбцях і за результатами усереднення побудовано графіки, які оброблялися за методом найменших квадратів. У результаті кожна з залежностей була апроксимована відповідною формулою.

Для залежності коефіцієнта витрати від тиску в ресивері на основі аналізу вигляду графіків (рисунок 2.8) вибрана формула закону нормального розподілу

$$\mu = \alpha_0 \exp(-\sigma P^2)$$

Решта залежності апроксимувалися степеневими залежностями

$$\mu = \alpha_1 T^{n_1},$$

$$\mu = \alpha_2 d^{n_2},$$

$$\mu = \alpha_3 R^{n_3}.$$

Загальна математична модель для багатофакторної функції знаходилась як добуток

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = \alpha f(x_1) \cdot f(x_2) \cdot f(x_3) \cdot f(x_4).$$

Усереднений коефіцієнт знаходився методом найменших квадратів за даними таблиці 2.1. У результаті отримано емпіричну залежність, що має вигляд

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} R^{0.033} T^{0.034} \exp(-0,0015P^2). \quad (2.17)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт витрати отвору;

$d$  – діаметр отвору в мм.;

$R$ - газова стала в Дж/кгК.;

$T$  – абсолютна температура в ресивері в К;

$P$ - тиск газу в бар.

Одержана залежність добре корегує з аналітичними виразами, одержаними на основі реалізації математичної моделі, що підтверджує достовірність проведених досліджень.

Оцінка точності розрахунків проводилася на основі даних, приведених у таблиці 2.1. Для цього визначалася середньоквадратична похибка за формулою

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_1^n (X_{cp} - X_i)^2},$$

де  $n$  – число дослідів;  $X_{cp}, X_i$  – середньоарифметичне і біжуче значення вимірюваної величини.

Ширина гарантійного інтервалу

$$\Delta X = \frac{\sigma_{\alpha;n}}{n-1},$$

де  $t_{\alpha;n}$  - коефіцієнт Стьюдента.

Тоді гарантійний інтервал складе  $(X_{cp} - \Delta X \leq X \leq X_{cp} + \Delta X)$ . Результати розрахунків для різних показників у (2.17) подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення гарантійних інтервалів

Показник	Гарантійний інтервал
$\alpha$	(0,275;0,295)
$n_1$	(0,44;0,46)
$n_2$	(0,031;0,035)
$n_3$	(0,031;0,035)
$\sigma$	(0,0012;0,0017)

Як видно з таблиці 2.4, для показників  $n_3$  та  $n_2$  гарантійні інтервали перетинаються. Це дозволяє замінити розмірні величини  $R$  та  $T$  їх добутком.

Тоді емпірична залежність (2.17) матиме вигляд

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} (R T)^{0.034} e^{(-0,0015P^2)} \quad (2.18)$$

Слід відзначити, що створена математична модель отримана і справедлива тільки для умов критичного режиму витікання газу.

В зв'язку з цим проведені розрахунки з визначення коефіцієнта витрати отвору для умов докритичного режиму витікання за результатами дослідів, приведеними в таблиці 2.5.

У результаті кожна з залежностей була апроксимована відповідною степеневою формулою. Залежність коефіцієнта витрати від діаметра отвору виявилася несуттєвою, тому нею знехтувано. Решта залежності шукалися у вигляді

$$\mu = \alpha_1 P^{n_1},$$

$$\mu = \alpha_2 T^{n_2},$$

$$\mu = \alpha_3 R^{n_3}.$$

Загальна математична модель для багатofакторної функції знаходилась як добуток



$$F(x_1, x_2, x_3) = af(x_1) \cdot f(x_2) \cdot f(x_3).$$

Усереднений коефіцієнт знаходився методом найменших квадратів за даними таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Умови проведення експерименту при докритичному витіканні

№ п/п	ПАРАМЕТРИ				Функція-відгук,
	P <sub>0</sub> , бар	T <sub>0</sub> ,К	R, Дж/кгК	d, мм	
1	0.9	313	287	6	0,783
2	0.7	303	275	6	0,803
3	0.5	293	264	6	0,832
4	0.3	283	252	6	0,878
5	0.1	273	239	6	0,989
6	0.9	303	239	5	0,779
7	0.7	293	287	5	0,804
8	0.5	283	275	5	0,832
9	0.3	273	264	5	0,878
10	0.1	313	252	5	0,994
11	0.9	293	252	4	0,779
12	0.7	283	239	4	0,799
13	0.5	273	287	4	0,832
14	0.3	313	275	4	0,883
15	0.1	303	264	4	0,994
16	0.9	283	264	3	0,779
17	0.7	273	252	3	0,800
18	0.5	313	239	3	0,831
19	0.3	303	287	3	0,883
20	0.1	293	275	3	0,995
21	0.9	273	275	2	0,779
22	0.7	313	264	2	0,803

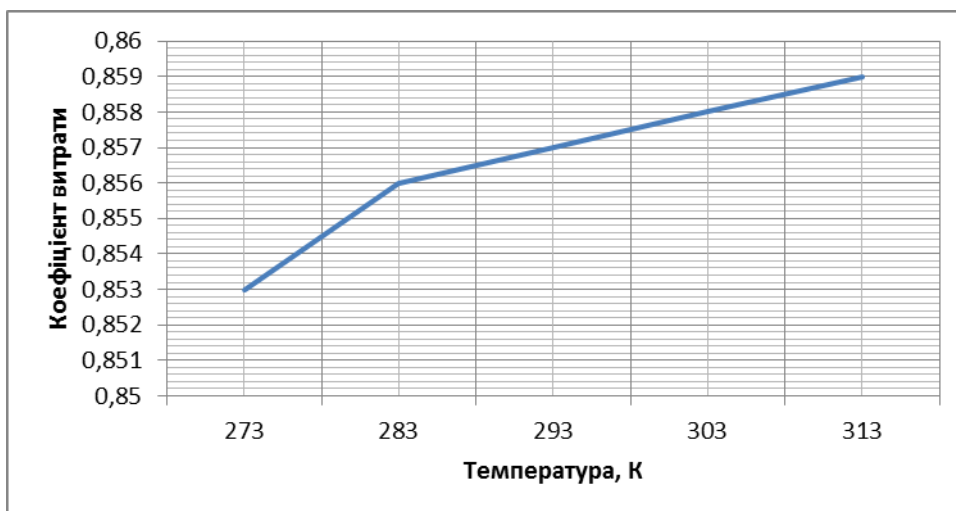
Таблиця 2.6 – Обробка результатів дослідів за параметрами  $P_0, T_0$ 

$P_0,$ бар $T_0, K$	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	$\sum \varphi_i$	$F_1(T_0)$
313	0,783	0,803	0,831	0,883	0,994	4,294	0,859
303	0,779	0,803	0,832	0,883	0,994	4,291	0,858
293	0,779	0,804	0,832	0,883	0,995	4,288	0,857
283	0,779	0,799	0,832	0,878	0,995	4,278	0,856
273	0,779	0,800	0,832	0,878	0,989	4,263	0,853
$\sum \varphi_i$	3,899	3,989	4,159	4,400	4,967		
$F_2(P_0)$	0,780	0,798	0,832	0,880	0,993		

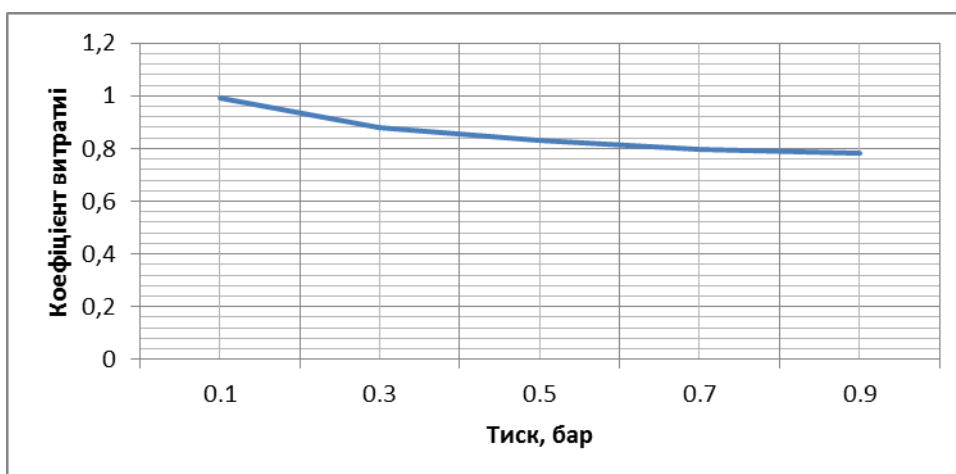
Таблиця 2.7. Обробка результатів дослідів за параметрами  $R i d$ 

$R, Дж/к$ гК $d, мм$	287	275	264	252	239	$\sum$	$F_3(d)$
6	0,783	0,803	0,832	0,878	0,989	4,285	0,856
5	0,779	0,804	0,832	0,878	0,994	4,287	0,857
4	0,779	0,799	0,832	0,883	0,994	4,287	0,857
3	0,779	0,800	0,831	0,883	0,995	4,287	0,857
2	0,779	0,803	0,832	0,878	0,995	4,287	0,857
$\sum \varphi_i$	3,899	4,009	4,159	4,400	4,967		
$F_4(R)$	0,780	0,802	0,832	0,880	0,993		

а)



б)



в)

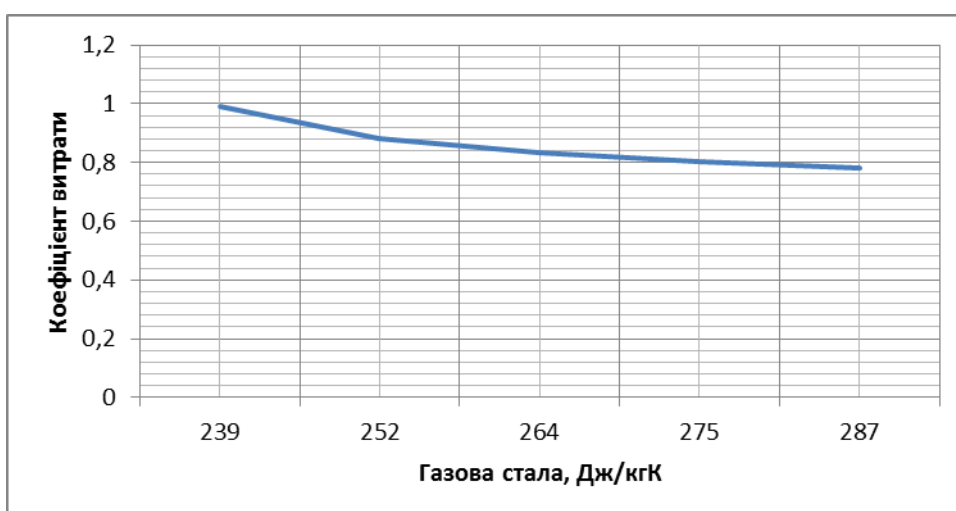


Рисунок 2.9 – Залежність функції-відгуку від параметрів:  
а – тиску; б – температури; в – газової сталої.

У результаті отримано емпіричну залежність, що має вигляд

$$\mu = 0.582 \cdot (R T)^{0.025} P^{-0.11} \quad (2.19)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт витрати отвору;

$R$ - газова стала в Дж/кгК.;

$T$  – абсолютна температура в ресивері в К;

$P$ - тиск газу в ресивері, бар.

Суттєво різні результати, отримані для області докритичного та критичного режиму витікання газу мають своє фізичне трактування.

Формула Сен-Венана-Вентцеля отримана на основі класичного рівняння енергії, яке є виразом загального закону природи – закону збереження енергії - строго виведена для умов докритичного режиму витікання газу. В цих умовах вона має несуттєві розбіжності з практикою.

У відповідності до методики раціонального планування експерименту побудовано комбінаційний квадрат для обробки результатів дослідів і отримання емпіричної залежності.

Обробка результатів досліджень проводилась за методикою, яка базується на розробці І. І. Протодьяконова і М. О. Тедера [83] . В основу її покладено поняття про комбінаційний квадрат, заповнення якого є результатами експериментів і дозволяє скоротити число дослідів (при п'яти рівнях реалізації кожної залежності) з 625 до 25.

Припущення Сен-Венана про те, що тиск у вихідному перерізі сопла не може падати нижче критичного і, відповідно, поширення збурення у вигляді зменшення тиску довкілля не може перетнути бар'єр звукової швидкості, оскільки поширюється з швидкістю  $c-w$ , є правомірним і підтверджується практикою. Однак, при критичному режимі витікання струмина газу в навколишньому середовищі (за соплом) зазнає різкого розширення. Виходячи з рівняння нерозривності, можна стверджувати, що швидкість газу в напрямку потоку різко падає і, у відповідності до закону Бернуллі, викликає зростання тиску середовища, тобто сприяє зростанню гідравлічного опору середовища. З

іншого боку розширення перерізу струмини газу спричиняє зменшення його густини, що призводить до зниження масової витрати газу. Методика, побудована на основі теорії Сен-Венана, для критичного режиму витікання не враховує цього ефекту, що призводить до завищених результатів визначення масової витрати.

Таким чином, однією з причин неадекватності математичної моделі слід вважати неврахування зростання газодинамічного опору середовища руху газової струмини з великою лінійною швидкістю та зменшення густини газу в струмині внаслідок її розширення.

Крім того, слід зауважити, що модель Сен-Венана-Вентцеля отримана для ідеального газу, що спрощує рівняння газового стану. Залежність густини газу від тиску і температури дає завищений результат, оскільки не враховується над стисливість реального газу (коефіцієнт стисливості  $z < 1$ ). В умовах до критичного режиму витікання газу внаслідок невисоких надлишкових тисків стан реального газу мало відхиляється від стану реального газу і коефіцієнт стисливості можна вважати  $z = 1$ .

Зауважимо також, що припущення про відсутність теплообміну з довкіллям та нульовим значенням швидкості газу в ресивері (на деякій відстані від отвору) також вносять похибку в результат визначення витрати газу.

Отримані на основі порівняння результатів теоретичних і фактичних досліджень поправки до формули Сен-Венана-Вентцеля дозволяють адаптувати модель до реальності в умовах докритичного та критичного режимів витікання газу.

## Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що причинами неадекватності математичної моделі слід вважати неврахування зростання газодинамічного опору середовища руху газової струмини з великою лінійною швидкістю та зменшення густини газу в струмині внаслідок її розширення, а також припущення про ідеальність робочого тіла (газу), відсутність теплообміну в процесі витікання.

2. Для адекватності математичної моделі запропоновано ввести коефіцієнт витрати отвору, який є функцією параметрів процесу. Показано, що в умовах критичного режиму витікання газу коефіцієнт витрати змінюється від 0,776 до 0,709, збільшення температури газу в ресивері приводить до більш суттєвого відхилення фактичної витрати від теоретичної: при температурі в ресивері  $283K$  і тиску  $1,0MPa$  коефіцієнт витрати складає 0,776, а при збільшенні температури до  $298K$  знижується до 0,756 і при подальшому зростанні температури до  $313K$  - зменшується до 0,738.

3. Отримані на основі порівняння результатів теоретичних і фактичних досліджень поправки до формули Сен-Венана-Вентцеля дозволяють адаптувати модель до реальності в умовах до критичного та критичного режимів витікання газу.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИТОКІВ ГАЗУ З ГАЗОПРОВІДІВ В НАВКОЛИШНЬОМУ ГРУНТІ

Аварійні витоки газу з газопроводів газових мереж через корозійні пошкодження стінок труб попадають в навколишнє середовище, яким найчастіше являється ґрунт, утворюючи ареал загазованості, і в подальшому досягають поверхні, забруднюючи атмосферу.

Очевидно, що в залежності від величини витоку, його інтенсивності та глибини залягання газопроводу залежить процес та термін формування зони загазованості. З іншого боку, фільтраційний опір ґрунту як пористого середовища, зокрема його проникність, мають суттєвий вплив на величину витоку газу через корозійний отвір. Тому існує певний взаємозв'язок між величиною втрат газу, пов'язаних з корозійними витоками, та закономірностями його фільтрації в навколишньому ґрунті.

Окрім втрат газу, тобто матеріальних збитків, витоки газу призводять також до забруднення ґрунту і атмосфери, а при певних умовах можуть створити вибухонебезпечну ситуацію.

В літературі приведено ряд досліджень, пов'язаних з діагностикою витоків за зниженням температури ґрунту, визначенні фільтраційних характеристик різних типів ґрунтів, моделюванні нестационарного процесу фільтрації для умов досягнення поверхні ґрунту. Відзначається, що особлива складність досліджень полягає в тому, що невідомою являється площа перерізу корозійного пошкодження і її зміною в часі. Дослідженням витікання газу з газопроводу присвячено роботи Капцова І.І., Щербакова С.Г., Яковлева Є.І., в яких приведено методику визначення втрат газу при витіканні, дано оцінку втрат газу при транспортуванні, запропоновано методи діагностування витоків. Закономірності фільтрації газу в пористому середовищі висвітлено в працях Бузинова С.Н., Левикина Е.В., Хейна А.Л. та ін. Приведені залежності швидкості фільтрації від розподілу тисків та характеристики пористого середовища. Однак, сумісні дослідження процесів витікання газу з

трубопроводу і формування при цьому ареалу забруднення ґрунту в літературі відсутні.

Метою дослідження є проведення аналітичних досліджень витікання газу з газопроводу і формування ареалу забруднення ґрунту при цьому. Завдання створення і реалізації математичної моделі полягають в тому, щоб на основі аналітичних досліджень встановити час, за який фільтрація газу в ґрунті, що виникне в результаті появи свища в газопроводі, досягне поверхні ґрунту, і який при цьому обсяг в ґрунті займатиме сформований ареал забруднення.

### 3.1 Аналіз математичних моделей фільтрації газу

Для моделювання одномірної лінійної фільтрації неперервного середовища в пористому середовищі у відповідності до методів класичної підземної гідро-газодинаміки здійснюється на основі рівняння Дарсі

$$\omega = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3.1)$$

де  $\omega$  - швидкість фільтрації;  $k$  - коефіцієнт проникності пористого середовища;  $\eta$  - динамічна в'язкість рухомого неперервного середовища;

$\frac{\partial P}{\partial x}$  - градієнт тиску.

Другим класичним рівнянням, що виражає принцип збереження маси при русі неперервного середовища в пористому середовищі, є рівняння нерозривності

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}. \quad (3.2)$$

Для замикання системи, як правило, використовується рівняння газового стану, яке може бути представлено на основі закону Менделєєва-Клапейрона у вигляді



$$\frac{P}{\rho} = zRT, \quad (3.3)$$

де  $\rho$  - густина газу;  $R$  – газова стала;  $z$  – коефіцієнт стисливості реального газу.

В основу математичних моделей покладено рівняння нестационарної плоскої фільтрації рідини в пористому середовищі, в якій джерело витоків розглядається як точкове джерело і моделюється за допомогою функції Дірака. Лінійна фільтрація неперервного середовища в ґрунті описується законом Дарсі, згідно з яким швидкість фільтрації з урахуванням джерела

$$\omega = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{q}{F} \delta(x - x_g). \quad (3.4)$$

Рівняння нерозривності лінійної фільтрації з урахуванням зв'язку між тиском і густиною у формі  $c^2 = dP/d\rho$  має вигляд

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}. \quad (3.5)$$

Диференціюючи (3.4) за часом і (3.5) за лінійною координатою та переходячи до плоскої задачі, отримаємо математичну модель у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{kc^2\rho}{\eta} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{kc^2\rho}{\eta} \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (3.6)$$

де:  $\omega$  - швидкість фільтрації як функція часу  $t$  і просторових декартових координат  $x, y$ ;  $x_g, y_g$  - координати точкового джерела інтенсивністю  $q$ ;  $\delta(x - x_g), \delta(y - y_g)$  - функції Дірака;  $F$  - площа перетину фільтрації.

Позначимо

$$\alpha = \frac{kc^2 \rho}{\eta},$$

$c$  - швидкість розповсюдження звуку в середовищі;

$\rho$  - густина газу;

Тоді на основі (3.6) отримаємо диференціальне рівняння плоскої фільтрації газу в пористому середовищі у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \alpha \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g). \quad (3.7)$$

Для реалізації приведенного рівняння і отримання розв'язку необхідно задати краєву задачу, яка полягає у визначенні початкових і граничних умов.

Початкові умови полягають в заданні шуканої функції для моменту часу  $t=0$ . Граничні умови задають зміну функції в часі на границях заданої плоскої області, в якій шукається вигляд функції.

### **3.2 Аналітичні дослідження першої фази нестационарного процесу формування ареалу загазованості**

Корозійні процеси призводять до утворення свищів в трубопроводі. Витоки газу формують в ґрунті ареал загазованості, який характеризується геометричними розмірами та тривалістю. При цьому в газопроводах низького та середнього тисків внаслідок незначної витрати і малих перепадів тисків витоки можуть існувати тривалий період часу до моменту їх виявлення. Це викликає суттєві втрати газу з одного боку і створює небезпеку в

обслуговуванні газопроводу. Тому з практичної точки зору важливо прогнозувати тривалість процесу фільтрації газу до появи його на поверхні ґрунту і радіус ареалу загазованості території, а також характер і величину витрати газу в атмосферу.

Загальний процес формування ареалу загазованості може бути розділений на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витоків і закінчується досягненням газом поверхні ґрунту. Для першої фази швидкість фільтрації на поверхні ґрунту за весь період рівна нулю. Друга фаза нестационарної фільтрації починається з моменту досягнення газом поверхні ґрунту і закінчується (при умові сталості інтенсивності джерела) переходом до стаціонарного процесу витікання газу через ґрунт в атмосферу.

При створенні математичної моделі формування ареалу забруднення ґрунту газу, що витікає з газопроводу, прийнято такі наступні припущення:

- інтенсивність витікання газу в ґрунті постійна в часі;
- фільтрація рідини в ґрунті лінійна і підпорядковується закону Дарсі;
- фільтрація ґрунтових вод у середовищі відсутня.

В основу математичної моделі покладено рівняння нестационарної плоскої фільтрації рідини в пористому середовищі, в якій джерело витоків розглядається як точкове джерело і моделюється за допомогою функції Дірака (3.7).

При виборі початкових і граничних умов вважалося, що в початковий момент часу фільтрація газу в ґрунті відсутня, поверхня ґрунту газу непрониклива, а на безмежному віддаленні від джерела швидкість фільтрації дорівнює нулю, тобто

$$\omega(x, y, 0) = 0; \omega(0, h, t) = 0; \omega(\infty, h, t) = 0, \quad (3.8)$$

де  $h$  - глибина закладення газопроводу в ґрунті.

Поставлена задача розв'язувалась із застосуванням інтегральних перетворень. На першому етапі було використане синус-перетворення Фур'є, згідно з яким

$$W = \int_0^{\infty} \omega(x, y, t) \sin \lambda y dy. \quad (3.9)$$

Таким чином, рівняння (3.7) зводилось до вигляду

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \mathfrak{a} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \lambda^2 W \right) - \mathfrak{a} \frac{q}{F} \sin \lambda y_g \delta(x - x_g). \quad (3.10)$$

В подальшому було використано перетворення Лапласа

$$\bar{W} = \int_0^{\infty} W(x, \lambda, t) e^{-st} dt. \quad (3.11)$$

Тепер на основі (3.10) одержано

$$\frac{d^2 \bar{W}}{dx^2} - \left( \frac{s + \mathfrak{a} \lambda^2}{\mathfrak{a}} \right) \bar{W} = \frac{q}{Fs} \sin \lambda y_g \delta(x - x_g). \quad (3.12)$$

Розв'язок (3.12) з використанням початкових умов, одержаних на основі (3.8), має вигляд

$$\begin{aligned} \bar{W} = & \frac{q \sin \lambda y_g}{2F} \left[ \sigma(x - x_g) - 1 \right] \frac{\mathfrak{a} e^{\frac{\sqrt{s + \mathfrak{a} \lambda^2} (x - x_g)}{\sqrt{\mathfrak{a}}}}}{s \sqrt{s + \mathfrak{a} \lambda^2}} - \\ & - \frac{q \sin \lambda y_0}{2F} \sigma(x - x_g) \frac{\sqrt{\mathfrak{a}} e^{-\frac{\sqrt{s + \mathfrak{a} \lambda^2} (x - x_g)}{\sqrt{\mathfrak{a}}}}}{s \sqrt{s + \mathfrak{a} \lambda^2}}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Застосування до (3.13) оберненого перетворення Лапласа дозволило отримати

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{q \sin \lambda y_g}{4F\lambda} [\sigma(x - x_g) - 1] \times \\
 &\times \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha t}} \left[ e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
 &\quad \left. - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \\
 &\quad - \frac{q \sin \lambda y_g}{4\lambda F} \sigma(x - x_0) \left[ e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
 &\quad \left. - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right].
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Використовуючи обернене синус-перетворення Фур'є, одержимо розв'язок поставленої задачі у вигляді

$$\begin{aligned}
 \omega(x, y, t) &= \frac{q}{2\pi F} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
 &\times \left\{ [\sigma(x - x_g) - 1] \left[ e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\
 &\quad \left. - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \\
 &\quad - \sigma(x - x_g) \left[ e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
 &\quad \left. \left. - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda,
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

де  $\sigma(x - x_g)$  - одинична функція Хевісайда

$$\sigma = \begin{cases} 1, & x > x_g \\ 0, & x \leq x_g \end{cases},$$

$erfc(z)$  - інтеграл імовірності

$$erfc(z) = \int_0^{\infty} e^{-z^2} dz.$$

Рівняння (3.15) дозволяє отримати в кожній точці площини з координатами  $(x_i, y_i)$  значення швидкості фільтрації  $w_i$  в певний момент часу, обумовлене дією одного точкового джерела інтенсивністю  $q$ .

Реалізація (3.15) із застосуванням числових методів дозволила отримати характер розподілу швидкостей фільтрації газу в ґрунті при появі витoku газу з газопроводу різної інтенсивності. Слід зауважити, що математичне моделювання у формулі (3.15) справдилося для проміжку часу, коли витік газу не досягне поверхні ґрунту.

Для встановлення закономірностей формування поля швидкостей фільтрації газу в ґрунті проведено обчислювальний експеримент на основі створеної моделі. В умовах експерименту вважалося, що на глибині 1 м знаходиться точковий малий витік газу інтенсивністю  $20 \text{ мм}^3/\text{с}$  через корозійний отвір в стінці труби круглої форми діаметром 2 мм. При цьому лінійна швидкість витoku газу через отвір складає  $6,37 \text{ мм/с}$  ( $382 \text{ мм/хв}$ ). Проникність середовища (ґрунту в непорушеному стані) прийнято рівною  $0,5 \text{ дарсі}$ . Вздовж осі трубопроводу (засипка траншеї) проникність вважається в 1,5 рази більшою.

При виникненні малих витоків газу з газопроводів низького тиску індикація їх на поверхні ґрунту можлива через короткий проміжок часу (5-10хв) в залежності від властивостей ґрунту.

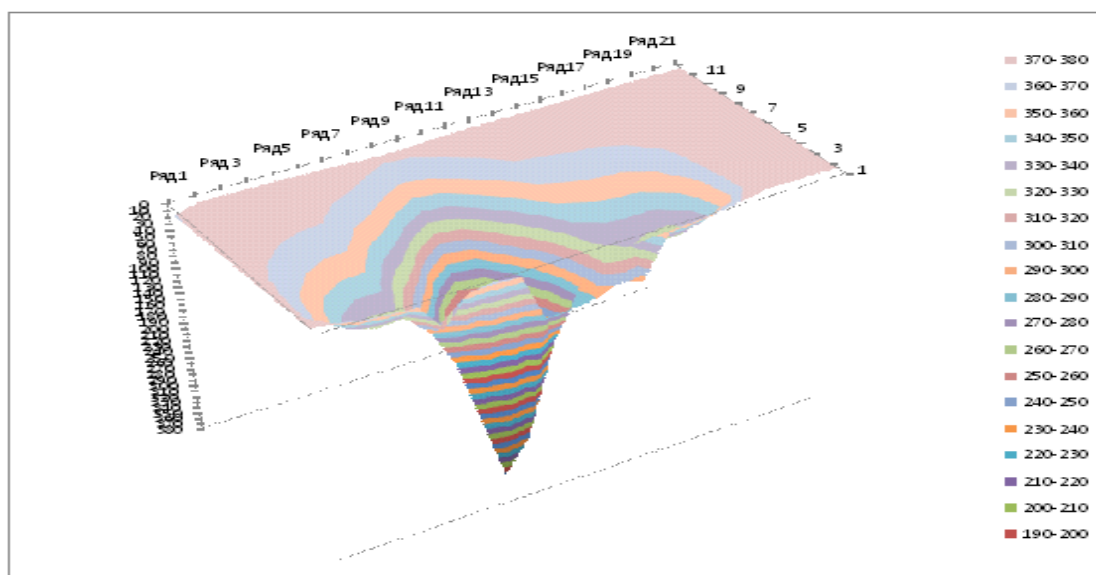


Рисунок 3.1-Результати математичного моделювання поля швидкостей фільтрації при появі витoku з газопроводу

Ареал загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї. З наближенням до поверхні трубопроводу форма ареалу загазованості наближається до еліпса, велика вісь якого спрямована вздовж осі трубопроводу, а площа складає близько  $40 \text{ м}^2$ .

Запропонована математична модель дозволяє підвищити ефективність діагностування малих витоків з газопроводів і оцінити розміри ареалів загазованості при цьому.

### 3.3 Друга фаза нестационарної фільтрації витоків газу в ґрунті

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витокami з газопроводу важливо оцінити характер закінчення формування ареалу загазованості ґрунту і величину витoku газу в атмосферу.

Розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі при виникненні точкового джерела, яким являється витік газу з газопроводу.

Фільтрація рідини і газу в пористому середовищі описується лінійним рівнянням Дарсі

$$\begin{aligned} \omega &= -\frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ -\rho\omega &= \frac{k\rho}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}, \\ q &= -\frac{k}{\nu} \frac{\partial P}{\partial x}, \\ -\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} &= \frac{k}{\nu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}. \end{aligned} \tag{3.16}$$

Для визначення швидкості фільтрації використовується рівняння нерозривності, яке в одномірній постановці має вигляд

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}, \tag{3.17}$$

де  $\omega$  - швидкість фільтрації;  $\frac{\partial p}{\partial x}$  - градієнт тиску;  $k$  - проникливість ґрунту;  $\eta$  - в'язкість рідини або газу (абсолютна);  $c$  - швидкість розповсюдження звуку в середовищі.

Шляхом диференціювання приведених рівнянь можна перейти до рівняння типу теплопровідності

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{c^2 k}{\nu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{3.18}$$

$$\left( \alpha = \frac{c^2 k}{\nu}; \nu = \frac{\eta}{\rho} \right).$$



Це рівняння для плоскої системи може бути записане у вигляді

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right). \quad (3.19)$$

Активне джерело, яке створює умови загазованості, може бути модельоване точковим джерелом, розміщеним на поверхні газопроводу. В такому випадку задача визначення швидкостей нестационарної фільтрації рідини чи газу може розглядатися як двовимірною нестационарною задачею побудови поля швидкостей фільтрації, викликаних точковим джерелом. Отже, задача зведена до визначення впливу точкового джерела на процес нестационарної фільтрації.

Рівняння нерозривності в лінійній постановці з врахуванням точкового джерела, що має питому інтенсивність  $P$ , може бути записане у вигляді

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (3.20)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = c^2 - \frac{k}{v} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - qc^2 \delta(x - x_q),$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + qc^2 \delta(x - x_q),$$

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} - qc^2(x - x_q),$$

де  $\delta(x - x_q)$  - функція Дірака,  $x_q$  - координата джерела.

Розв'язуючи його разом з рівнянням Дарсі і переходячи до плоскої системи, одержимо

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial P}{\partial t} - q \frac{c^2}{\alpha} \delta(y - H) \delta(x - l) - q \xi \sigma (y - H) \delta(x - l), \quad (3.21)$$

де  $H$  - глибина розміщення витoku від поверхні;  $l$  - віддаль до джерела по горизонталі від початку координат.

Будемо вважати, що на значній віддалі від джерела в ґрунті швидкості руху середовища відсутні.

Припустимо, що до початку дії джерела ( $t=0$ ) система знаходиться в спокої і тиск повітря у всіх точках площини внаслідок незначної глибини залягання був атмосферним

$$\frac{c^2}{\alpha} = \frac{\tilde{n}^2}{\tilde{n}^2 \frac{k}{v}} = \frac{v}{k} = \xi,$$

$$P(x, y, 0) = P_a.$$

Нехай в процесі дії джерела на поверхні ґрунту і на значній віддалі від джерела тиск залишається атмосферним, тобто при  $t > 0$  маємо  $P(x, 0, t) = P_a$ ,

$$P(\omega, y, t) = P_a.$$

Тоді поставлена задача такого вигляду знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) - \alpha q \xi \delta(x - x_0) \delta(y - y_0),$$

при наступних початкових і граничних умовах

$$w(x, 0, t) = 0; w(x, y, 0) = 0,$$

$$t = 0 \rightarrow P(x, 0, t) = P_a, P(x, y, t) = P_a,$$

$$t > 0 \rightarrow P(x, U_0, t) = P_a, P(\infty, Y, t) = P_a.$$

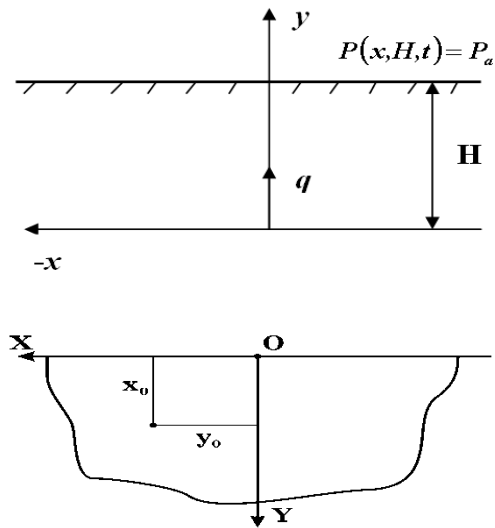


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема

Якщо перенести початок координат таким чином щоб джерело знаходилося на осі ординат ( $x_0 = 0$ ), то задача спрощується і стає асиметричною.

Щоб перейти до однорідної крайової задачі введемо нову змінну

$$W(x, y, t) = P(x, y, t) - 1a .$$

Тоді поставлена задача зводиться до наступного виду знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) - q \xi \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (3.22)$$

- при наступних початкових і граничних умовах

$$t = 0 \rightarrow W(x, 0, t) = 0, W(0, y, t) = 0, \quad (3.23)$$

$$t > 0 \rightarrow W(x, H, t) = 0, W(\infty, y, t) = 0$$

Математична модель реалізується методом інтегральних перетворень.

Для розв'язку задачі використовуємо синус-перетворення Фур'є по змінній  $y$  і перетворення Лапласа по часу  $t$

$$W = \int_0^{\infty} W(x, y, t) \sin \lambda y dy. \quad (3.24)$$

$$\bar{W} = \int_0^{\infty} W(x, \lambda, t) e^{-St} dt. \quad (3.25)$$

Застосовуємо перетворення (3.24) до задачі (3.23), (3.22) і отримуємо

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \varkappa \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \lambda^2 W \right) - \varkappa q \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0), \quad (3.26)$$

$$W(x, \lambda, 0) = 0. \quad (3.27)$$

До задачі (3.26), (3.27) застосовуємо перетворення Лапласа

$$S\bar{W} = \varkappa \left( \frac{d^2 \bar{W}}{dx^2} - \lambda^2 \bar{W} \right) - \varkappa \frac{g}{S} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0), \quad (3.28)$$

або

$$\frac{d^2 \bar{W}}{dx^2} - \left( \frac{S + \varkappa \lambda^2}{\varkappa} \right) \bar{W} = \frac{g}{S} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0).$$

Неоднорідне рівняння (3.28) розв'язуємо методом варіації довільних змінних. Розв'язок однорідного рівняння, що відповідає рівнянню (3.28), має вигляд

$$\bar{W} = C_1 e^{\sqrt{\frac{S+\mathfrak{a}\lambda^2}{\mathfrak{a}}} x} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{S+\mathfrak{a}\lambda^2}{\mathfrak{a}}} x}. \quad (3.29)$$

Позначимо  $\alpha = \sqrt{\frac{S+\mathfrak{a}\lambda^2}{\mathfrak{a}}}$ .

Величини  $C_1$  і  $C_2$ , що відповідають розв'язку неоднорідного рівняння (3.28), знаходимо із такої системи рівнянь

$$\begin{aligned} C_1' e^{\alpha x} + C_2' e^{-\alpha x} &= 0, \\ C_1' e^{\alpha x} - C_2' e^{-\alpha x} &= \frac{q}{S} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Із рівнянь (3.30) отримуємо

$$\begin{aligned} C_1' &= \frac{q e^{-\alpha x}}{2S\alpha} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0) \\ \text{і } C_1' &= \frac{q}{2FS\alpha} \sin \lambda y_0 \int_0^x e^{-\alpha x} \delta(x - x_0) + B_1. \end{aligned}$$

З останнього рівняння маємо

$$C_1 = \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{-\alpha x_0} \sigma(x - x_0) + B_1. \quad (3.31)$$

В (3.31)  $\sigma(x - x_0)$  є функцією Хевісайда.

Якщо верхнє рівняння (3.31) помножити на  $\alpha$  і від нижнього рівняння відняти верхнє, то одержимо

$$C_2' = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{\alpha x} \delta(x - x_0).$$

Тому

$$C_2 = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} \int_0^x e^{\alpha x} \delta(x - x_0) + B_2, \quad (3.32)$$

або

$$C_2 = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{\alpha x_0} \sigma(x - x_0) e^{\alpha x} + B_2.$$

Підставляємо (3.31) і (3.32) в (3.29) отримуємо розв'язок диференціального рівняння (3.28)

$$\begin{aligned} \bar{W} &= \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{\alpha(x-x_0)} \sigma(x - x_0) + B_1 e^{\alpha x} - \\ &- \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{-\alpha(x-x_0)} \sigma(x - x_0) + B_2 e^{-\alpha x}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Оскільки з фізичної суті задачі  $\lim_{x \rightarrow \infty} w = 0$  і  $\lim_{x \rightarrow -\infty} w = 0$ , то і справедливі рівності

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \bar{W} = 0, \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} \bar{W} = 0.$$

Враховуючи це отримаємо

$$\begin{aligned} B_1 &= -\frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} e^{-\alpha x_0}, \\ B_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Підставляємо (3.34) в (3.33)

$$\bar{W} = \frac{q \sin \lambda y_0}{2S\alpha} [\sigma(x - x_0) - 1] e^{\alpha(x-x_0)} - \frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} [\sigma(x - x_0)] e^{-\alpha(x-x_0)}. \quad (3.35)$$

Підставимо (3.35) в дифрівняння (3.34) і переконаємося, що (3.34) задовольняє цьому рівнянню.

Знаходимо перетворення Лапласа від (3.34). Перепишемо (3.34) у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{W} = & \frac{q \sin \lambda y_0}{2} [\sigma(x-x_0)-1] \frac{e^{\frac{\sqrt{S+\alpha\lambda^2}(x-x_0)}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}} - \\ & - \frac{q \sin \lambda y_0}{2} [\sigma(x-x_0)] \frac{e^{-\frac{\sqrt{S+\alpha\lambda^2}(x-x_0)}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}. \end{aligned}$$

Користуючись таблицями перетворень Лапласа, маємо

$$\begin{aligned} & \frac{e^{-\frac{(x_0-x)\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}{\sqrt{\alpha}}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}} \rightarrow \\ \rightarrow & \frac{1}{2\sqrt{\alpha\lambda^2}} \left[ e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfi} \left( \frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right]; \\ & \frac{e^{-\frac{(x_0-x)\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}{\sqrt{\alpha}}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}} \rightarrow \\ \rightarrow & \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \left[ e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfi} \left( \frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Таким чином, перетворення Лапласа функції (3.35) буде

$$\begin{aligned} W = & \frac{q\sqrt{\alpha} \cdot \sin \lambda y_0}{2} [\sigma(x-x_0)-1] \cdot \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \times \\ & \times \left[ e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfi} \left( \frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \\ & - \frac{q\sqrt{\alpha} \cdot \sin \lambda y_0}{2} \sigma(x-x_0) \cdot \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \times \\ & \times \left[ e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left( \frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfi} \left( \frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right], \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned}
W &= \frac{q \sin \lambda y_0}{4\lambda} [\sigma(x-x_0)-1] \times \\
&\times \left[ e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right] - \\
&- \frac{q \sin \lambda y_0}{4\lambda} \sigma(x-x_0) \times \\
&\times \left[ e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right].
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Виконуємо обернене синус-перетворення Фур'є  $W = \frac{\pi}{2} \int_0^\infty \bar{W} \sin \lambda y dy$  і

отримуємо

$$\begin{aligned}
W &= \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \left\{ [\sigma(x-x_0)-1] \left[ e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \right. \\
&- e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \left. \right] - \sigma(x-x_0) \left[ e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \\
&- \left. \left. e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right] \right\} d\lambda.
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в паровому середовищі має вигляд

$$\begin{aligned}
P(x, y, t) &= P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
&\times \left\{ [\sigma(x-x_0)-1] \left[ e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \right. \\
&- e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \left. \right] - \sigma(x-x_0) \times \\
&\times \left[ e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t}\right) - \right. \\
&- \left. \left. e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t}\right) \right] \right\} d\lambda.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Рівність (3.39) дозволяє отримати в кожній точці площини з координатами  $(x_i, y_i)$  значення тиску в певний момент часу, обумовлене дією точкового джерела інтенсивністю  $q$ .



Для знаходження швидкості фільтрації газу в ґрунті як функції просторових координат і часу скористаємось плоским рівнянням Дарсі

$$w(x, y, t) = \frac{k}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right). \quad (3.40)$$

В (3.40) градієнти тиску  $\frac{\partial P}{\partial x}$  і  $\frac{\partial P}{\partial y}$  знаходиться шляхом диференціювання (3.39) по лінійних координатах.

В [56] приведено результати реалізації математичної моделі формування ареалу загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу, створеної фази нестационарного процесу фільтрації, впродовж якої витік газу досягає поверхні ґрунту. Аналіз результатів розрахунків показав, що площа поверхні загазованості ( на поверхні ґрунту) складає близько  $40\text{ м}^2$ , а тривалість першої фази перевищує  $10\text{ хв}$ . При цьому різне зростання ареалу загазованості спостерігається близько поверхні ґрунту ( на останніх 10% глибини площа загазованості зростає на 32,2%). Показано також, що на характер формування ареалу забруднень мало впливає величина витрати витоку газу (для газопроводів низького і середнього тиску) і залежності параметрів ареалу загазованості від величини витоку є нелінійними.

Створена нами математична модель фільтрації газу в пористому середовищі (ґрунті) є більш земельною і справедливою для першої фази нестационарної фільтрації (досягнення поверхні ґрунту), другої фази нестационарної фільтрації (нестационарне витікання газу в атмосферу) і стаціонарного витікання газу через ґрунт в атмосферу. Слід зауважити, що не дивлячись на різний підхід до побудови математичних моделей, результати реалізації моделі [57] співпадають з аналогічними результатами нашої моделі, одержаними для ідентичних умов першої фази нестационарної фільтрації.

На основі результатів досліджень поданих в [59], з урахуванням реалізації запропонованої математичної моделі побудовано графіки, які обмежують

границі ареалу загазованості для першої і другої фаз процесу нестационарної фільтрації газу. Вказані графіки для напрямку вздовж і поперек трубопроводу приведені на рисунку 3.3

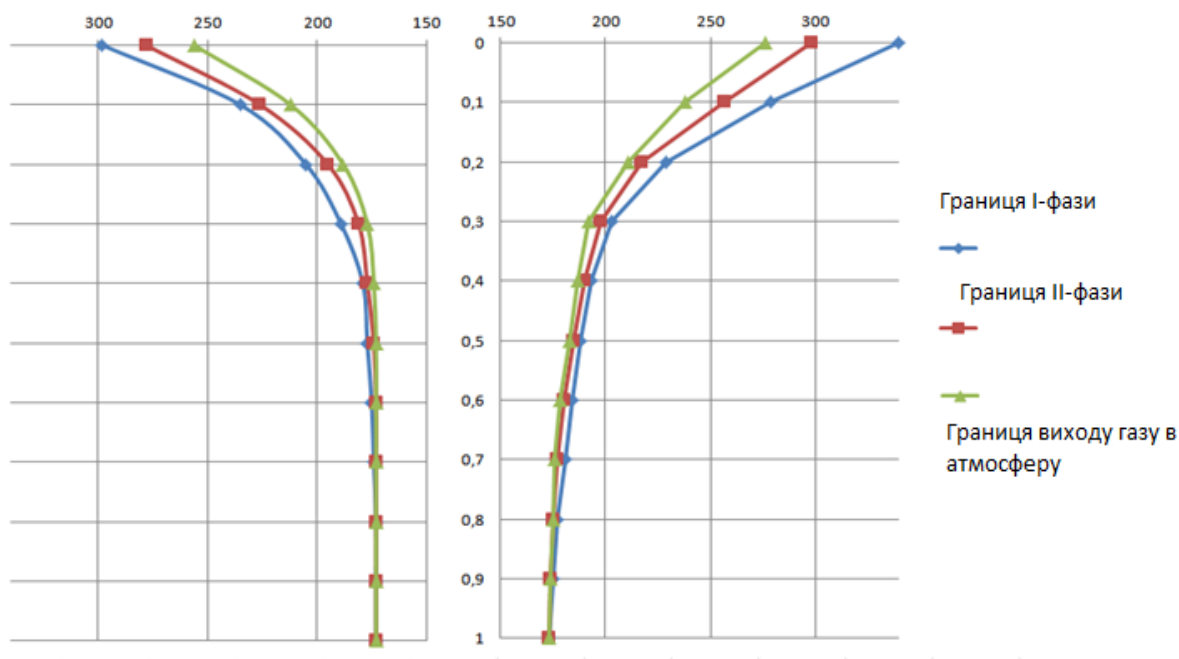


Рисунок 3.3 – Друга фаза нестационарної фільтрації газу

Аналіз результатів показує, що найбільший об'єм ареал загазованості ґрунту займає на кінець першої фази нестационарної фільтрації газу в ґрунті.

Це пояснюється наявністю певного фільтраційного опору ґрунту в період досягнення газом поверхні ґрунту. З наближенням до поверхні величина фільтраційного опору зменшується, що призводить до зростання поверхні ареалу загазованості.

Після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу. Внаслідок цього площа поверхні загазованості повинна зменшитися, а відповідно до принципу нерозривності, швидкості виходу газу в атмосферу – зрости. Побудована нами математична модель підтверджує це положення. Таким чином, в період першої, другої нестационарної фази площа поверхні загазованості повинна зменшуватися, а швидкість виходу газу в атмосферу – зростати.

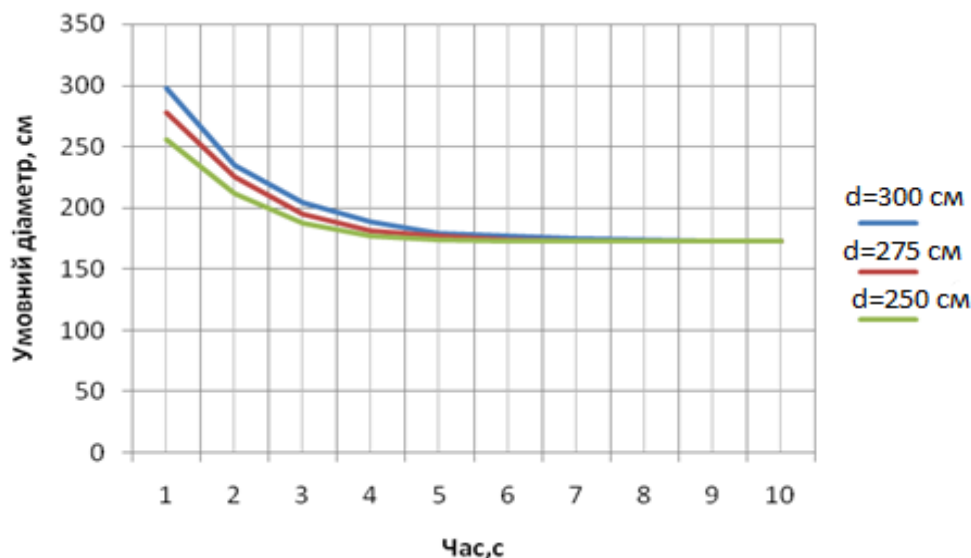


Рисунок 3.4 – Зменшення розмірів ареалу загазованості в процесі другої фази нестационарної фільтрації

Такий нестационарний процес триватиме до встановлення енергетичної рівноваги, яка забезпечить стаціонарний процес витікання газу з газопроводу, його фільтрацію через шар ґрунту і витікання з поверхні ґрунту в атмосферу. Очевидно, що при цьому масова витрата витоку газу з газопроводу повинна бути рівна масовій витраті виходу газу з поверхні ґрунту в атмосферу внаслідок стаціонарності процесу. Це встановлює взаємозв'язок між величиною витоку газу з газопроводу і величиною його виходу з поверхні ґрунту в атмосферу. Такий підхід дає можливість оцінити втрати газу через корозійні пошкодження трубопроводів при транспортуванні та розподіленні з одного боку і вести діагностичні спостереження і контроль за пошкодженнями газопроводів.

### Висновки до розділу 3

1. Показано, що процес формування ареалу загазованості ґрунту витоками з газопроводу можна розділити на дві фази нестационарної фільтрації газу, перша з яких починається з моменту появи витоку і закінчується досягненням поверхні ґрунту, і з цього моменту починається друга фаза, яка

триває до встановлення стаціонарного витікання газу через ґрунт в атмосферу.

2. При виникненні малих витоків газу з газопроводів низького тиску індикація їх на поверхні ґрунту можлива через короткий проміжок часу (5-10хв) в залежності від властивостей ґрунту .

3. Ареал загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї. З наближенням до поверхні трубопроводу форма ареалу загазованості наближається до еліпса, велика вісь якого спрямована вздовж осі трубопроводу, а площа складає близько  $40 \text{ м}^2$  .

4. Після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу, внаслідок чого площа поверхні загазованості повинна зменшитися, а відповідно до принципу нерозривності, швидкість виходу газу в атмосферу – зростає.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОПРОВОДАХ ГАЗОВИХ МЕРЕЖ

Загальновідомо, що поява витoku газу з газопроводу викликає нестационарний процес, за характером протікання якого можна оцінити величину витoku і його лінійну координату. Поставлена задача не викликає особливих труднощів при умові, що до появи витoku газопровід працював в стаціонарному чи квазістаціонарному режимі. Якщо газопровід перед появою витoku працював в нестационарному режимі, то поява витoku внесе збурення в протікання нестационарного процесу, проте вирішення задач діагностування витoku при цьому ускладнюється.

Газопроводи газових мереж, до яких також слід віднести підвідні газопроводи і газопроводи-колектори, як правило працюють в умовах нестационарного режиму внаслідок нерівномірності газоспоживання. Тому діагностичні задачі, які з успіхом вирішуються для умов магістральних газопроводів, в умовах газових мереж суттєво ускладнюються.

Враховуючи просторову щільність газопроводів газових мереж і умови їх обслуговування, значним діагностичним успіхом слід вважати не стільки виявлення точної координати витoku газу, але навіть момент його появи за параметрами режиму. Це дозволить застосувати спеціальні методи діагностування на другому етапі обслуговування з метою конкретизації діагностичної задачі.

Очевидно, що для виявлення малих витоків, поява яких не впливає на параметри режиму роботи газової мережі внаслідок недостатньої чутливості вимірювальних систем і приладів, такий підхід не прийнятний. При цьому для газової мережі важливим виникає запитання: який витік газу слід вважати великим? Це питання стосується не тільки відносної величини аварійного витoku, але й характеру нестационарного процесу, в умовах якого появилася даний витік газу. Одинакові за величиною витoki газу, які виникли в умовах різних за характером нестационарних процесів, можуть бути віднесені як до

великих, так і до малих. Тому задача діагностування витоків газу з газопроводів газових мереж є актуальною і має практичне застосування.

#### **4.1 Характеристики газоспоживання**

Характер споживання газу певним регіоном залежить від споживачів, які поділяються на промислові, побутові та буферні.

Промислові споживачі газу використовують його як енергоносії чи сировину. В обох випадках споживання газу на протязі певного періоду часу є стабільним. Побутові споживачі використовують газ виключно як енергоносії з метою опалення і приготування їжі. Тому характер газоспоживання міняється на протязі доби і сезону. Буферні споживачі можуть споживати газ в періоди часу, коли є його надлишок, і переходити на інший вид пального в моменти дефіциту газу.

Загальна картина газоспоживання залежить від співвідношення між категоріями споживачів газу в даному регіоні. Але при всякій структурі споживання газу для кожного регіону характерна нерівномірність газоспоживання.

Розрізняють добову і сезонну нерівномірності газоспоживання. Добова нерівномірність газоспоживання характеризується зміною обсягів споживання газу погодинно на протязі доби.

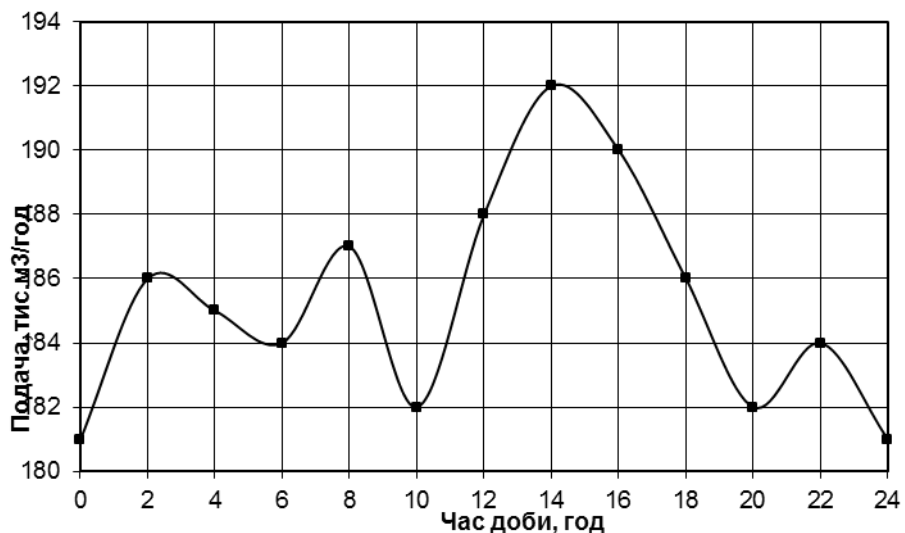
Науково обґрунтоване визначення планових задач подачі газу в умовах нестаціонарності полягає в необхідності отримання достовірної інформації про добову, сезонну та інші види нерівномірності споживання газу. На даний час формуються два основних напрямки прогнозування: зазначивши нерівномірність споживання газу в задачах проектування та розвитку (перспективне прогнозування) систем газопостачання; прогноз графіків споживання для керування режимами в реальних системах транспорту газу (оперативне прогнозування).

Вважається, що промислові споживачі газу рівномірно споживають газ протягом доби. Це твердження не завжди вірне, оскільки кількість спожитого

газу як пального в промисловості визначається багатьма факторами, як, наприклад, нерівномірність поступлення сировини, вимоги технологічного процесу до якості продукції та інше. Тому для промислових споживачів газу також існує добова нерівномірність газоспоживання, що може суттєво відрізнятися від нерівномірності споживання газу побутовими споживачами, яка визначається в основному укладом життя суспільства і пов'язаним із цим характером енергоспоживання.

Буферні споживачі можуть використовувати різні види енергоносіїв ( в т.ч. і природній газ), їх використання в регіоні призводить до згладжування нерівномірності газоспоживання.

Коливання добового споживання газу для різних регіонів зображено на рисунку 4.1. Як видно з графіків зміна споживання газу протягом доби носить періодичний характер, причому частота коливань може бути різною як для одного і того ж регіону в різні дні року, так і для різних регіонів.



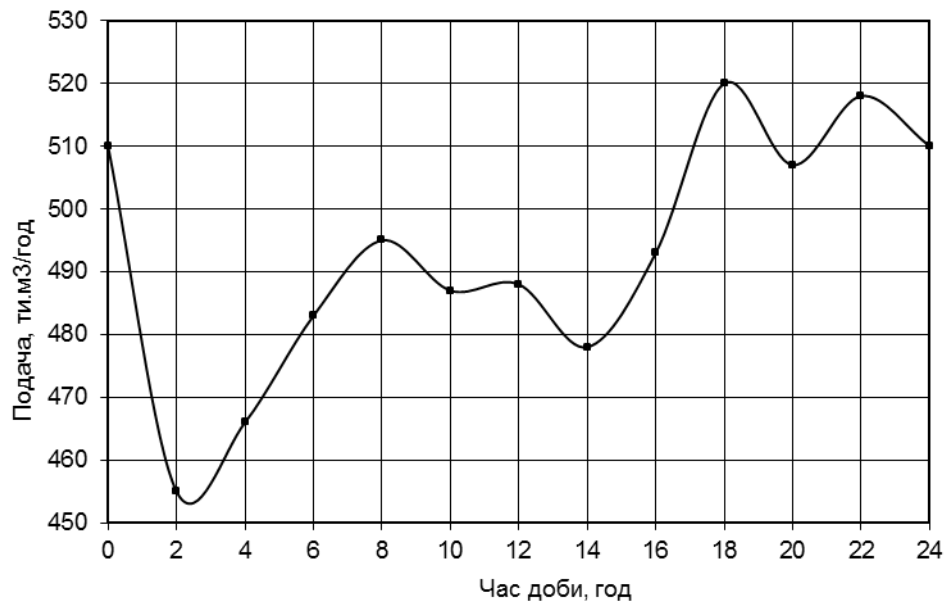
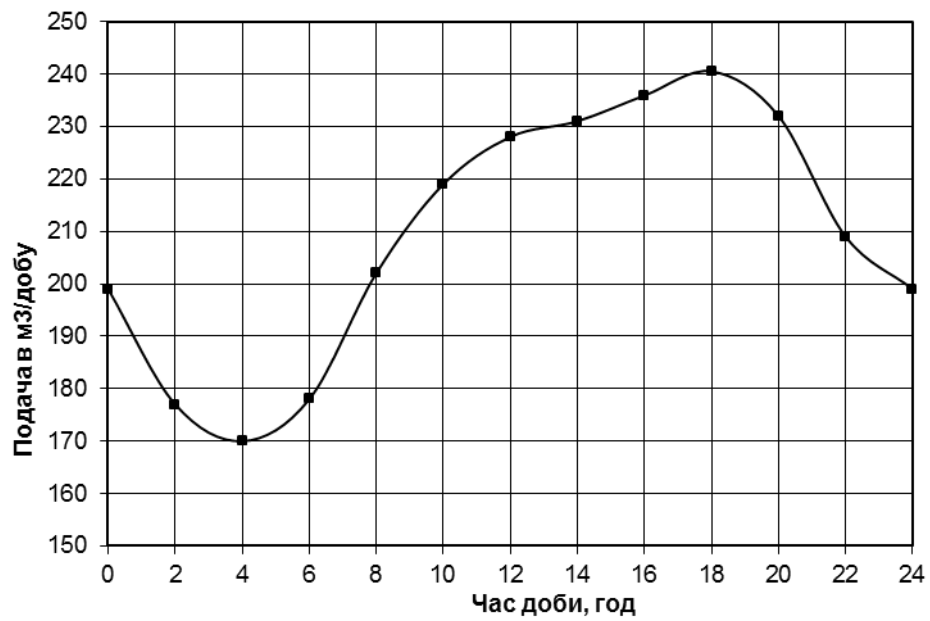


Рисунок 4.1 – Характер добового споживання газу

Різні автори пропонують різноманітні методи апроксимації кривої добового газоспоживання. Так, в [74] запропонована модель виду

$$Q(t) = Q_{cp} + A \sum_1^5 \sin(\omega_i t + \varphi) \quad , \quad (4.1)$$



де  $Q_{cp}$  - величина середньодобового газоспоживання;  $A$  – амплітудну значення газоспоживання;  $\omega_i$  - циклічна частота  $i$ -тої гармоніки кривої газоспоживання;

$\varphi$  - зміщення екстремального значення добового газоспоживання.

В [75] приводять апроксимацію кривої газоспоживання у вигляді

$$Q(t) = Q_{cp} + a \sin \omega t + b \cos \omega t . \quad (4.2)$$

В роботі [76] автори вказують, що внаслідок періодичності вказана функція може бути апроксимована синусоїдою, параметри якої можна вибрати в залежності від фактичних величин газоспоживання та динаміки їх зміни для конкретного регіону, тобто

$$Q(t) = Q_{cp} + Q_a \sin \omega t . \quad (4.3)$$

Для характеристики газоспоживання кожним регіоном вводиться поняття коефіцієнта добової нерівномірності газоспоживання

$$k = Q_{cp} / Q_{\max} , \quad (4.4)$$

де  $Q_{\max}, Q_{cp}$  - відповідно максимальна і середньодобова величини газоспоживання.

Як видно з (4.3),  $Q_{\max} = Q_{cp} + Q_a$ . Тоді

$$k = Q_{cp} / Q_{\max} = Q_{cp} / (Q_{cp} + Q_a) = (1 + Q_a / Q_{cp})^{-1}$$

Звідки

$$Q_a = Q_{cp} (1/k - 1) \quad (4.5)$$

Добова циклічна частота

$$\omega = 2\pi/24 = \pi/12 \quad (4.6)$$

Тоді апроксимаційна крива може бути представлена у вигляді

$$Q(t) = Q_{cp} (1 + (1/k - 1) \sin \frac{\pi}{12} t) \quad (4.7)$$

Таким чином, якщо для даного регіону відома середньодобова величина газоспоживання та коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання то запропонована залежність у вигляді (4.7) дозволяє відтворити погодинний характер газоспоживання.

#### **4.2 Вплив нерівномірності газоспоживання на нестационарний процес, викликаний появою витоку газу**

В момент появи витоку газу з газопроводу газової мережі, нестационарний процес, викликаний цим збуренням, накладається на нестационарний процес, викликаний нерівномірністю газоспоживання. Тому математична модель повинна враховувати всі причини виникнення не стаціонарності.

Дослідженням нестационарних процесів у газопроводах присвячено праці відомих вчених Бобровського С.А.[1], Грудза В.Я., Тимківа Д.Ф.[2], Щербакова С.А.[3], в яких наведено математичні моделі нестационарних режимів, методи їх реалізації, аналіз технологічних обмежень. Відомі також роботи Поршаківа Б.П.[4], Яковлєва Є.І.[5], в яких аналізується коефіцієнт корисної дії елементів газотранспортної системи та затрати енергії на транспортування газу. Однак, в літературі відсутні дослідження комплексного впливу на не стаціонарність нерівномірності газоспоживання і появи аварійного витоку газу.

Як відомо, нестационарний процес руху газу в лінійній ділянці газопроводу описується рівняннями руху і нерозривності

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\lambda \rho w^2}{2d}, \quad \frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \quad (4.8)$$

де  $P$  - тиск газу;  $\rho$  - густина газу;  $w$  - лінійна швидкість;  $d$  - внутрішній діаметр труби;  $x$  - лінійна координата;  $c$  - швидкість газу;  $t$  - час.

З першого рівняння (4.8) маємо

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\lambda w}{2d} \rho w = \frac{2a}{F} M = \frac{2a}{F \rho_{ст}} Q \quad (4.9)$$

де  $2a$  – коефіцієнт лінеаризації;  $F$  – площа поперечного перерізу газопроводу;  $M$  – масова витрата газу;  $Q$  – об’ємна витрата газу за стандартних умов;  $\rho_{CT}$  – густина газу за стандартних умов.

Використовуючи залежність (4.7) на основі (4.9) можна записати

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{2a}{F\rho_{CT}} Q_{cp} (1 + (1/k - 1) \sin \frac{\pi}{12} t) \quad (4.10)$$

Якщо на ділянці  $(x_1; x_2)$  магістралі має місце шляховий відбір газу з масовою витратою  $q$ , то рівняння нерозривності газового потоку може бути записане у вигляді

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \mp \frac{q}{F} [\sigma(x - x_1) - \sigma(x - x_2)] / (x_1 - x_2), \quad (4.11)$$

де  $\sigma(x - x_1)$  – одинична функція Хевісайда.

Рівняння руху в формі (4.11) і рівняння нерозривності шляхом сумісного розв’язку можна звести до одного рівняння, яке в математичній фізиці відноситься до класу неоднорідних рівнянь теплопровідності

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \mp \frac{2aq}{F} [\sigma(x - x_1) - \sigma(x - x_2)] / \Delta x, \quad (4.12)$$

де  $\Delta x = (x_1 - x_2)$

Тепер для отримання диференційного рівняння газопроводу з зосередженим відбором газу в точці  $x_1$  достатньо в (4.12) перейти до границі  $x_2 \rightarrow x_1$ , тобто  $\Delta x \rightarrow 0$ .

Як відомо,

$$\lim [\sigma(x - x_1) - \sigma(x - x_2)] / \Delta x = \delta(x - x_1),$$

де  $\delta(x - x_1)$  є функцією джерела Дірака.

Тепер рівняння (4.12) має вигляд

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \mp \frac{2aq}{F} \delta(x - x_1). \quad (4.13)$$

Дане рівняння можна вважати найбільш узагальненою моделлю газопроводу газової мережі з шляховим відбором.

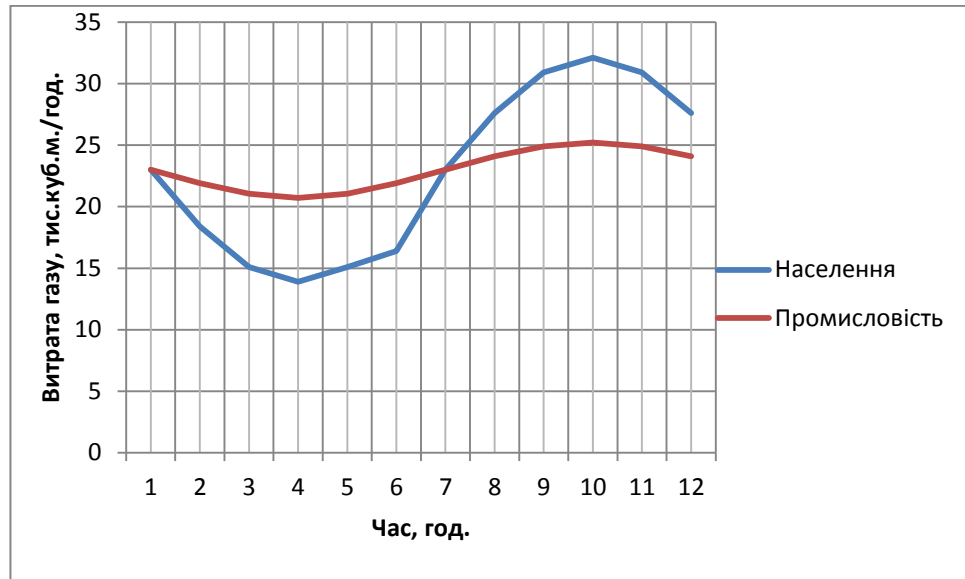
В роботах [3,5] подано результати досліджень режимів роботи газопроводів з шляховими відборами, і показано, що для моделювання нестационарного ізотермічного процесу, викликаного нерівномірністю газоспоживання, точність визначення діагностичної ознаки не виходитиме за межі 5% у випадку лінеаризації рівняння руху. З цією метою вводиться поняття осередненої в часі лінійної швидкості  $\bar{w}$ , яка входить до виразу коефіцієнта лінеаризації  $2a = \lambda \bar{w} / 2d$ . Тож для визначення розподілу тисків скористаємося рівнянням (6). Дане рівняння може бути покладене в основу створення діагностичної моделі розгалуженої газової мережі, в якій діагностичною ознакою слід вважати коефіцієнт лінеаризації  $2a$ .

Доповнюють рівняння (4.13) початкові та граничні умови. Для довільного нестационарного процесу як початкові умови можуть бути використані параметри стаціонарного режиму системи як передісторія

$$P(x,0) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x, \quad M(x,0) = M_0 = const. \quad (4.14)$$

Як граничні умови використовуються значення тиску на початку газової мережі та витрати тиску в її кінці. На практиці початковий тиск, як правило, підтримується сталим, однак витрата в кінці магістралі є переважно величиною змінною в часі. Внаслідок цього модель (4.13) не має розв'язку в аналітичній формі. Можлива реалізація поставленої задачі числовими методами, серед яких найбільш ефективним кінцево-різницевої. Так, для реальної газової мережі, що містить 24 шляхових відбори, час реалізації загальної моделі, побудованої на основі кінцево-різницевої схеми, складає 20 хвилин і залежить від характеру вихідних даних.

а)



б)

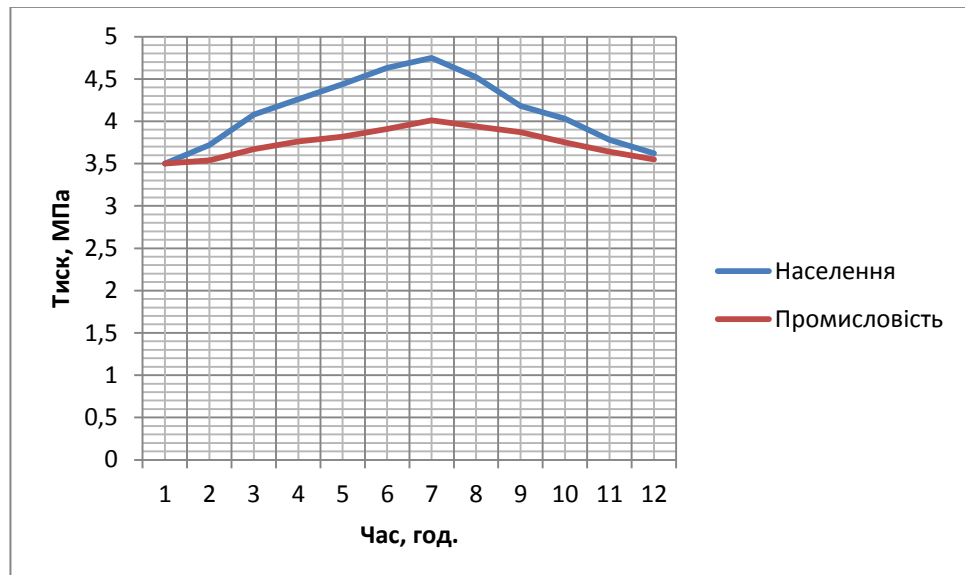


Рисунок 4.2 – Добова нерівномірність газоспоживання (а), та характер коливання тиску (б).

Щоб оцінити точність спрощеної (лінеаризованої) моделі і вплив нерівномірності газоспоживання як збурюючого фактору на нестационарний процес проведено розрахунок газової мережі з одним відводом для початкових умов у вигляді (4.14) та граничних умов, що виражають сталість тиску на початку системи і реальний графік газоспоживання в її кінці. Розрахунки проводились для умови, коли графік газоспоживання апроксимувався

неперервною гладкою функцією часу (4.7), а для реалізації використовувалась загальна модель, побудована за кінцево-різницевою схемою.

З метою математичного опису режиму роботи газопроводу у випадку появи аварійного витіку з трубопроводу розглянемо ділянку трубопроводу довжиною  $L$  і діаметром  $d$ , в точці  $x_1$  якої має місце аварійний витік з масовою витратою  $q$ , яку вважатимемо сталою в часі. Зв'язок між зміною тиску  $P(x, t)$  та масовою витратою  $Q(x, t)$  в магістралі за наявності шляхового витіку продукту визначається системою рівнянь (4.8).

Нехай до появи аварійного витіку трубопровід працював в умовах стаціонарного руху середовища, і розподіл тисків по довжині визначався лінійним законом, що для газопроводів газових мереж припустимо

$$P(x,0) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x . \quad (4.15)$$

В момент виникнення аварійного витіку тиск на початку трубопроводу змінився до величини  $P(0, t) = P_1$ , а в кінці витрата є сталою в часі. Тоді на основі (4.9) гранична умова для кінцевого перерізу має вигляд

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{2a}{F\rho_{CT}} Q . \quad (4.16)$$

Математична постановка задачі може бути сформульована у вигляді: знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aq}{F} \delta(x - x_1) . \quad (4.17)$$

при початкових умовах(4.15) і граничних умовах

$$P(0, t) = P_1, -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{2a}{F\rho_{CT}} Q . \quad (4.18)$$

Розв'язок шукаємо кінцево-різницевим методом.

При реалізації моделі для газової мережі як розгалуженої системи використано агрегативний метод побудови моделі. Технологічна схема газопроводів розбивалася на ряд кусочно-лінійних агрегатів (КЛА). Кожен КЛА є ділянкою простого газопроводу з постійними значеннями коефіцієнта гідравлічного опору, геометричного ухилу, обмежений точками підключення перемичок.

Усередині кожного КЛА взаємозв'язок між технологічними параметрами потоку газу визначають системою рівнянь (4.8), що реалізується методом сіток з тимчасовим кроком  $h$ . Для цього будуються вузлові точки, у яких знаходяться значення тиску, температури та масової витрати. Якщо число вузлових точок по довжині газопроводу  $N_x$ , то стани агрегатів можуть бути представлені у виді  $Z = (Z)$ , де  $Z(t)$  – номер інтервалу часу довжиною  $h$ ;  $Z_v = \{z_{v_1}, z_{v_2} \dots z_{v_4(N_x+4)}\}$ , тут  $Z_{v_1}$  – час, що залишився до закінчення інтервалу;  $z_{v_{i+1}}; P_i$  – тиск в  $i$ -му вузлі сітки ( $i = 1, \dots, N_x$ );  $z_{v_{i+N+1}} = M_i$  – масова витрата в  $i$ -му вузлі сітки.

Для визначення вхідного сигналу  $x_4$  після нескладних перетворень рівняння руху з закону Кірхгофа одержимо

$$x_{\mu 4} = \frac{y_\lambda + \sum_{k=1}^R B_{N-1}^{k_j p}}{\sum_j^R B_j^{k_j}}, \quad B_j^k = -(a_2/a_3 \Delta x)_{N-1}^{k_j},$$

де  $R, K_j$  – відповідно число та номер агрегатів, на які видає вхідний сигнал  $j$ -й агрегат;

$P_j^k$  – тиск у передостанньому вузлі агрегату  $k_j$ .

Розрахунки, проведені для різних умов, дозволили побудувати графіки коливного процесу в газопроводі, викликаного стрибком витрати газу в кінці ділянки та появою шляхового відбору у визначеній точці траси. Аналіз результатів свідчить, що коливання тиску в газопроводі мають згасаючий

характер. Якщо прийняти  $q = 0$ , то одержимо нестационарний процес, викликаний нерівномірністю газоспоживання.

Поява витoku газу з газопроводу вносить корективи в характер протікання нестационарного процесу, які характеризуються зміною амплітуди, частоти коливань та зміщення фази процесу.

В процесі числового моделювання розглядалися варіанти розміщення витoku з масовою витратою від 1% до 15% від витрати газу по магістралі з кроком 1%, причому витік розміщався на віддалі 20% від початку і кінця ділянки. В обох варіантах витік газу включався на 4 годині від початку нестационарного процесу, викликаного нерівномірністю газоспоживання в кінці ділянки, і на протязі 15 секунд моделювалася зміна тиску на початку ділянки.

Метою моделювання була оцінка величини витoku, починаючи з якої його поява впливатиме на характер нестационарного процесу і встановлення впливу нерівномірності газоспоживання на цю величину.

Розрахунки проводились для величини коефіцієнта нерівномірності газоспоживання  $k=1$  (нерівномірність відсутня),  $k=0,9$  та  $k=0,7$ . Фрагменти результатів розрахунків подані в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Відношення тисків  $P(0,t)/P(0,0)$  при виникненні витoku з газопроводу і різних значеннях коефіцієнта нерівномірності газоспоживання

k	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7
t,c\	0,05	0,07	0,09	0,05	0,07	0,09	0,05	0,07	0,09
q/Q									
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	0,998	0,911	0,889	0,997	0,910	0,890	0,997	0,910	0,890
4	0,999	0,924	0,909	0,999	0,923	0,908	0,999	0,925	0,907
6	1,0	0,956	0,931	1,0	0,955	0,932	1,0	0,957	0,931
8	1,0	0,988	0,974	1,0	0,983	0,977	1,0	0,989	0,970
10	1,0	0,999	0,991	1,0	0,998	0,934	1,0	0,999	0,995



Аналіз результатів розрахунків дозволив встановити наступне:

1. Нерівномірність газоспоживання в межах зміни коефіцієнта нерівномірності від 0,7 до 1,0 практично не впливає на нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою витoku газу, оскільки коливання тиску, викликані зазначеними збуреннями, відбуваються з суттєво різною частотою.
2. При низьких значеннях величини витрати витoku газу (до 7% від величини витрати газу в газопроводі) його поява практично не викликає збурення технологічного режиму, тому такі витoki слід вважати малими. Починаючи з відносної величини витрати витoku 8% його поява викликає коливання тиску на початку газопроводу, які можуть бути зафіксовані вимірювальними засобами, тому такі витoki слід віднести до великих.
3. Лінійна координата витoku відносно початку газопроводу не має суттєвого впливу на характер нестационарного процесу, викликаного його появою.

#### **4.3 Вплив буферних споживачів на нестационарний процес, викликаний появою витoku газу**

Окрім нерівномірності добового споживання газу, нестационарні процеси в газопроводах газових мереж можуть бути викликані також стрибкоподібною зміною витрати газу внаслідок включення або відключення буферних споживачів. Буферні споживачі можуть використовувати різні види енергоносіїв ( в т.ч. і природній газ), їх використання в регіоні призводить до згладжування нерівномірності газоспоживання. Проте момент переходу з одного виду палива на інший супроводжується стрибком витрати газу в газопроводі, яка є причиною не стаціонарності. Тому поставлену задачу оцінки величини витoku за характером його впливу на нестационарний процес необхідно вирішити для збурення у вигляді стрибкоподібної зміни витрати газу за рахунок підключення чи відключення буферних споживачів.

З математичної точки зору задача має аналогічний підхід.

Знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aq}{F} \delta(x-x_1),$$

при наступних початкових умовах

$$P(x,0) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x,$$

$$Q(x,0) = Q_0 = \text{const.}$$

і граничних умовах

$$P(0, t) = P_1, \quad -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{2a}{F\rho_{CT}} Q_1.$$

Якщо  $Q_0 \neq Q_1$ , то має місце стрибок витрати газу, який сумісно з появою витоку газу викличе нестационарний процес коливання тиску.

Поставлена задача реалізована методом інтегральних перетворень. Використаємо синус-перетворення Фур'є

$$P_s = \frac{2}{L} \int_0^L P(x,t) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) dx. \quad (4.19)$$

Множимо вихідне рівняння на  $\frac{2}{L} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$  і отримуємо після інтегрування

$$\begin{aligned} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) dx &= \frac{2a}{c^2} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial P}{\partial t} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) dx + \frac{1}{c^2} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) dx \\ &+ \frac{2}{L} \int_0^L \frac{2aq}{F} \delta(x-x_1) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) dx \end{aligned}$$

Для кожної з складових отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx &= \frac{2}{L} \left[ \frac{\partial P}{\partial x} \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \Big|_0^L - \left(\frac{\pi n}{L}\right) \int_0^L \frac{\partial P}{\partial x} \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx \right] = \\ &= -\frac{2}{L} \left(\frac{\pi n}{L}\right) \left[ P \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \Big|_0^L + \left(\frac{\pi n}{L}\right) \int_0^L \frac{\partial P}{\partial x} \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx \right] = \frac{2\pi n}{L^2} [P_2(-1)^n - P_1] - \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 P_s \end{aligned}$$

$$2a \frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial P}{\partial t} \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx = 2a \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{2}{L} \int_0^L P(x, t) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx \right] = 2a \frac{dP_s}{dt}$$

$$\frac{2}{L} \int_0^L \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \frac{2}{L} \int_0^L P(x, t) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx \right] = \frac{d^2 P_s}{dt^2}$$

$$\frac{2}{L} \int_0^L \frac{2aq}{F} \delta(x - x_1) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx = \frac{2}{L} \sin\left(\frac{\pi n x_1}{L}\right)$$

Підставивши отримані результати у вихідне рівняння, отримаємо

$$\frac{d^2 P_s}{dt^2} + 2a \frac{dP_s}{dt} + \left(\frac{\pi n}{L}\right)^2 P_s = \frac{2\pi n c^2}{L^2} [P_2(-1)^n - P_1] - \frac{4ac^2 q}{V} \sin\left(\frac{\pi n x_1}{L}\right),$$

де  $V=FL$  – геометричний об'єм газопроводу.

Для розв'язання одержаного лінійного рівняння другого порядку необхідно провести синус-перетворення початкової умови

$$\begin{aligned} P_s(0) &= \frac{2}{L} \int_0^L P(x, 0) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx = \frac{2}{L} \int_0^L \left( P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x \right) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) dx = \\ &= \frac{2}{\pi n} \left[ P_H (1 - (-1)^n) - (P_H - P_K) (-1)^n \right] \end{aligned}$$

Розв'язок рівняння представимо у вигляді

$$P_s = P_s^* + P_s^{**}$$

де  $P_s^*$  - загальний розв'язок відповідного однорідного рівняння;

$P_s^{**}$  - частковий розв'язок неоднорідного рівняння.

Однорідне рівняння

$$\frac{d^2 P_s}{dt^2} + 2a \frac{dP_s}{dt} + \left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 P_s = 0 .$$

має відповідне характеристичне рівняння

$$k^2 + 2ak + \left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 = 0 ,$$

розв'язки якого

$$k_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - (\pi n c / L)^2} .$$

Оскільки корені характеристичного рівняння комплексно-спряжені, то загальний розв'язок має вигляд

$$P_s^* = \exp(-at)(C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t) .$$

де  $\omega_n = \sqrt{(\pi n c / L)^2 - a^2}$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння шукаємо у вигляді

$$P_s^{**} = At^2 .$$

Використовуючи початковий вираз, отримаємо

$$A = C .$$

Тоді частковий розв'язок рівняння має вигляд

$$P_s^{**} = \frac{\frac{\pi mc^2}{2L^2} [P_1 - P_2(-1)^n] - \frac{4ac^2}{V} q \sin\left(\frac{\pi mx_1}{L}\right)}{1 + 2at + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi mc}{L}\right)^2 t^2} t^2$$

Загальний розв'язок задачі в синус-перетворенні Фур'є має вигляд

$$P_s = \exp(-at)(C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t) + \frac{\frac{\pi mc^2}{2L^2} [P_1 - P_2(-1)^n] - \frac{4ac^2}{V} q \sin\left(\frac{\pi mx_1}{L}\right)}{1 + 2at + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi mc}{L}\right)^2 t^2} t^2$$

Для визначення сталих інтегрування використаємо початкову умову і одержимо

$$C_1 = C_2 = \frac{2}{\pi i} [P_H (1 - (-1)^n) - (P_H - P_K)(-1)^n]$$

Тоді розв'язок задачі у синус-перетвореннях Фур'є має вигляд

$$P_s = \frac{2}{\pi i} [P_H (1 - (-1)^n) - (P_H - P_K)(-1)^n] \exp(-at)(\cos \omega_n t + \sin \omega_n t) + \frac{\frac{\pi mc^2}{2L^2} [P_1 - P_2(-1)^n] - \frac{4ac^2}{V} q \sin\left(\frac{\pi mx_1}{L}\right)}{1 + 2at + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi mc}{L}\right)^2 t^2}$$

Для переходу від синус-перетворення до оригіналу використаємо процедуру

$$P(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_s \sin\left(\frac{\pi n x_1}{L}\right)$$

Після нескладних алгебраїчних і тригонометричних перетворень отримуємо розв'язок задачі у вигляді

$$\begin{aligned} P(x, t) = & \left(1 - \frac{x}{L}\right) \sum_{n=1}^{\infty} [P_1 - P_2(-1)^n] + \frac{qL}{c^2} \left\{ \frac{x(L-l_a)/L^2 n \pi u x \leq l_a}{l_a(L-l_a)/L^2 n \pi u x > l_a} \right\} + \\ & + \frac{2}{c^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} [(P_H - P_1) - (P_K - P_2)(-1)^n] \frac{1}{\omega_n} (\sin \omega_n t + \cos \omega_n t) - \\ & - \frac{qL}{\pi c^2} e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \omega_n} \sin \frac{\pi n x}{L} [\cos(\omega_n t + \varphi) - \cos(\omega_n t - \varphi)] [\sin(\omega_n t + \varphi) - \sin(\omega_n t - \varphi)]. \end{aligned} \quad (4.20)$$

За одержаним розв'язком можна визначити тиск в кожній точці трубопроводу в умовах нестационарного режиму, викликаного зміною тисків на початку і в кінці ділянки та появою зосередженого витoku газу.

Реалізація математичної моделі у формі (4.20) здійснювалася методом ітерацій з порівнянням кожного наступного члена безмежного ряду з попереднім за умови абсолютної різниці між ними не менше  $10^{-6}$ . Якщо абсолютне значення різниці ставало меншим зазначеної величини, то всі наступні члени ряду відкидалися, і ітераційна процедура вважалася завершеною.

Розрахунки, проведені для різних умов на основі (4.20), дозволили побудувати графіки коливного процесу в газопроводі, викликаного стрибком тисків на початку і в кінці ділянки та появою шляхового відбору у визначеній точці траси. Графіки зображено на рисунку 4.3.

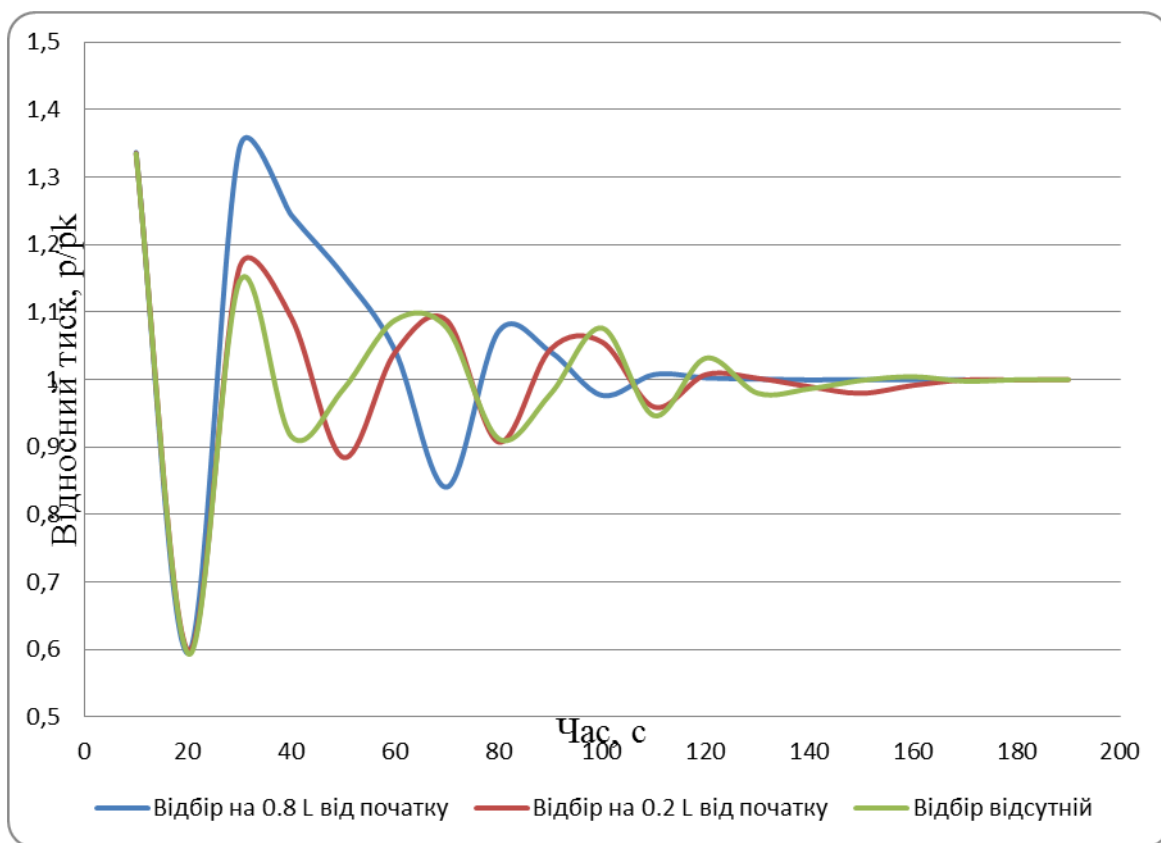


Рисунок 4.3– Характер коливання тиску в газопроводі, викликаного стрибком тисків на початку і в кінці ділянки та появою шляхового

Аналіз графіків свідчить, що коливання тиску в газопроводі мають згасаючий характер. Якщо в (4.20) прийняти  $q = 0$ , то одержимо нестационарний процес, викликаний стрибкоподібною зміною тисків на початку і в кінці ділянки газопроводу, який характеризується певною частотою і декриментом згасання.

Поява витoku газу з газопроводу вносить корективи в характер протікання нестационарного процесу, які характеризуються зміною амплітуди, частоти коливань та зміщення фази процесу.

В процесі числового моделювання розглядалися варіанти розміщення витoku з масовою витратою, яка змінювалася в діапазоні 5% - 20% від витрати газу по газопроводу, причому витік розміщався на віддалі 20% від початку і кінця ділянки. В обох варіантах витік газу включався на 70 секунді від початку нестационарного процесу, викликаного стрибкоподібною зміною тисків на початку і в кінці ділянки. Для варіанту розміщення витoku на віддалі 20% від

початку ділянки характерне зменшення частоти коливного процесу і зростання амплітуди коливань. Крім того в момент часу, що відповідає появі витоку, спостерігається зміщення характеристики процесу по фазі. Для варіанту розміщення витоку газу на віддалі 80% від початку ділянки газопроводу характерне зростання частоти коливного процесу і зростання амплітуди коливань, але в значно меншій мірі, ніж в першому варіанті. В момент часу, що відповідає появі витоку, спостерігається зміщення характеристики процесу по фазі, причому значно суттєвіше, ніж в першому варіанті.

З одержаного розв'язку видно, що за наявності аварійного витоку з трубопроводу повинен змінитися тиск в кожній точці. Однак, якщо витік  $q$  досить малий, то він впливає на загальний розподіл тисків у межах похибки вимірювання, отже зафіксувати зміну параметрів неможливо..

З вказаною метою проводився наступний числовий експеримент.

При різних значеннях відносної стрибкоподібної зміни витрати газу в точці підключення (відключення) буферного споживача газу  $\delta Q_0 = (Q_0 - Q_1) / Q_0$  і при умові відсутності витоку газу ( $q = 0$ ) за розв'язком (4.20) моделювався нестационарний процес, інтенсивність якого оцінювалася критерієм нестационарності

$$N_t = \frac{\delta Q d}{\lambda w \tau},$$

де  $\delta Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{сеп}}}$  – відносна зміна продуктивності;  $\tau$  – тривалість

нестационарного процесу по витраті;

$w = \frac{4Q_{\text{сеп}}}{\pi d^2} \cdot \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{ср}}} \cdot \frac{T_{\text{сеп}}}{T_{\text{ст}}}$   $z$  – середня по довжині й усереднена в часі швидкість газу.

Технологічний режим роботи газопроводу вважається квазістационарним у тому випадку, якщо величина критерію нестационарності складає  $N_t < 1,4 \cdot 10^{-6}$ . В іншому випадку режим руху газу вважається нестационарним і зі зростанням величини критерію нестационарності ступінь нестационарності потоку збільшується.



Після вказаної процедури проводилося моделювання нестационарного процесу в газопроводі, викликаного сумісним впливом стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі і появою аварійного витоку газу. При цьому величина витрати витоку варіювалася в межах вибраного діапазону 5%-20%. Описаний алгоритм дозволив побудувати графічну залежність величини граничної витрати витоку від критерій нестационарності.

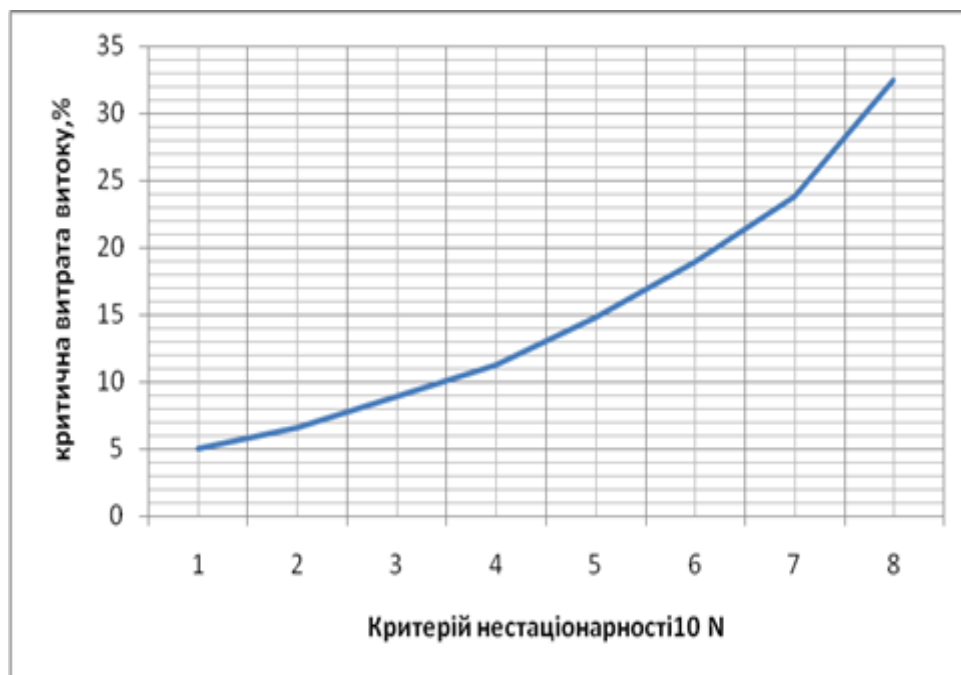


Рисунок 4.4 – Вплив нестационарності потоку газу на критичну величину витрати витоку

Як відомо [84], величина критерію нестационарності при стрибкоподібній зміні витрати газу за умови виникнення аварійних витоків для газових мереж складає  $N_c = (4,5 - 5,0)10^{-6}$ . Тому у відповідності до проведених досліджень критичну величину витрати витоку газу, перевищення якої суттєво вплине на характер нестационарного процесу, викликаного появою витоку за умови стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі можна вважати рівною 13% - 15% від початкової витрати газу.

#### **4.4 Апробація результатів досліджень в умовах системи газопостачання Богородчанського УЕГГ**

Богородчанське управління з експлуатації газового господарства (УЕГГ) створене в 1.09.1983 року і призначене для постачання газу споживачам Богородчанського району.

Серед основних споживачів газу слід відзначити (2013 рік, тис.куб.м за рік):

- промисловий сектор, в т.ч. 980,663 або 5,31%;
- компобут 235,038 або 1,27%;
- теплокомуненерго 416,367 2.25%;
- побутовий сектор, в т.ч. 15366,668 або 83,19%;
- населення 150,038 або 6,23%;
- бюджет 667,421 або 3,61%;
- релігійні організації 46,481 або 0,9%.

Характер газоспоживання на протязі 2013-2014 рр по місяцях подано в таблиці 4.2. Коефіцієнт сезонної нерівномірності газоспоживання складає 0,414, що характеризує суттєвий рівень нерівномірності споживання газу на протязі року за рахунок значної частки побутового сектору в загальному балансі спожитого газу.

Нормовані втрати газу складають 913,030 тис.м<sup>3</sup> за рік або 4,94%. Загалом, споживання газу промисловим і побутовим секторами з урахуванням нормованих втрат складає в сумі 93,44%. Таким чином, ненормовані втрати газу в рамках Богородчанського УЕГГ за 2013 рік складають 6,56% , що на 1,25% більше за газоспоживання промисловим сектором. Ці втрати обумовлені нещільністю трубопроводів і обладнання і визначаються величиною витоків газу через ці нещільності.

Протяжність газопроводів Богородчанського УЕГГ складає , км:

- високого тиску 129,368;

- середнього тиску 256,749;
- низького тиску 233,918;
- дворових відводів 414,514.

Загальна довжина газопроводів становить 1034,549 км. Середні втрати газу за 2013 рік в розрахунку на 1 км газопроводів (без врахування нормованих втрат) складають 1,71 тис.м<sup>3</sup>/км/

Динаміка втрат газу в розрізі діаметрів газопроводів і робочих тисків приведена в таблиці 4.3

Таблиця 4.3 Динаміка втрат газу газопроводи

№ п/п	Умовний прохід(діаметр)газопроводу	Богородчанське УЕГГ	
		Кількість	Витрати за місяць
Додаток 1. Газопроводи з тиском $12 \geq P > 3$ кгс/см <sup>2</sup>			
1	32	0,57	6,9426
2	40	0,28	3,99
3	50	2,346	43,00218
4	50*	0,245	5,613563
5	65	0,42	9,9792
6	80	2,13	60,1299
7	80*	0,779	75,16238
8	100	23,893	810,6895
9	100*	9,883	419,1627
10	125	3,332	141,2435
11	125*	16,164	856,49
12	150	7,678	390,4263
13	150*	20,138	1280,022
14	200	19,042	1321,896
14	200*	12,821	1112,542
16	300	1,343	141,4179
17	300*	8,304	1093,014
Всього		129,368	7771,723
Всього старіші 25 років		68,334	4842,007

Продовження таблиця 4.3

№ п/п	Умовний прохід(діаметр)газопроводу	Богородчанське УЕГГ	
		Кількість	Витрати за місяць
Додаток 1. Газопроводи з тиском $3 \geq P > 0,5$ кгс/см <sup>2</sup>			
15	25	0,435	3,9933
16	32	21,879	266,4862
17	40	13,31	189,6675
18	50	48,558	890,0681
19	50*	2,943	67,43149
20	65	68,865	1636,232
21	80	7,125	201,1388
22	80*	0,998	35,21693
23	100	46,153	1565,971
24	100*	9,191	389,8133
25	125	3,03	128,4417
26	125*	3,743	198,3322
27	150	10,642	541,1457
28	150*	6,577	418,0506
29	200	17,819	1236,995
30	200*	2,232	193,6818
Всього		263,5	7962,666
Всього старіші 25 років		25,684	1302,526
Додаток 1. Газопроводи з тиском $P \geq 0,5$ кгс/см <sup>2</sup> (дворові)			
54	25	45,835	420,7653
55	32	59,736	727,5845
56	40	2,873	40,94025
57	50	4,011	73,52163
121	65	0,386	9,17136
Всього		112,841	1271,983

Продовження таблиця 4.3

№ п/п	Умовний прохід(діаметр)газопроводу	Богородчанське УЕГГ	
		Кількість	Витрати за місяць
Додаток 1. Газопроводи з тиском $P \leq 0,5 \text{ кгс/см}^2$ (розподільчі)			
29	25*	0,105	0,240188
79	32	0,06	0,1458
30	40	0,097	0,27645
31	50	9,303	34,04898
32	50*	9,12	41,724
33	65	22,505	106,6595
34	80	11,057	62,02977
35	80*	9,809	68,78561
36	100	52,7	357,306
37	100*	58,408	495,0078
38	125	16,545	140,4671
39	125*	17,167	182,1848
41	150	12,582	127,9589
41	150*	9,562	121,5569
42	200	1,024	14,37696
43	200*	3,507	61,54785
44	250*	0,1	2,2125
45	300*	0,27	7,117875
Всього		233,918	1823,647
Всього старіші 25 років		108,048	980,378
Додаток 1. Газопроводи з тиском $P \leq 0,5 \text{ кгс/см}^2$ (дворові)			
46	25	11,39	69,7068
47	25*	0,78	5,967
48	32	66,161	535,9041
49	32*	14,52	147,015
50	40	96,899	921,5095
51	40*	76,061	904,1751
52	50	25,902	316,2634
53	50*	15,139	231,059
121	65	0,668	10,58112
125	100	0,021	0,47502
129	150	0,158	5,3562
Всього		307,699	3148,012
Всього старіші 25 років		106,5	1288,216

Продовження таблиця 4.3

№ п/п	Умовний прохід(діаметр)газопроводу	Богородчанське УЕГГ	
		Кількість	Витрати за місяць
Додаток 1. Газопроводи з тиском $P \leq 0,5 \text{ кгс/см}^2$ (внутрішньо будинкові)			
58	15	137,077	460,5787
59	15*	14,44	60,648
60	20	93,642	432,626
61	20*	36,1	208,4775
62	25	89,965	550,5858
63	25*	21,66	165,699
64	32	2,093	16,9533
65	40	0,212	2,06112
66	50	1,453	17,74113
67	80	0,461	8,64375
68	100	0,072	1,62864
Всього		397,175	1923,969
Всього старіші 25 років		72,2	434,8245
Всього по газопроводах		1444,501	23902
Всього старіші 25 років по газопроводах		380,766	8847,951
Додаток 2.ГРП, БК, ГРП, ШРП, ДКРТ			
68	ВТВ2-1-3		0
69	ВТВ2-2-3	39	18018
70	ВТВ2-2-3	123	56826
71	ВТВ2-4-3	4624	69360
Всього		4690	144204
Додаток 3. Газове обладнання, прилади			
72	ВТВ3-1-3	17969	9379,818
73	ВТВ3-1-3*	7885	3292,776
74	ВТВ3-2-3	2927	1501,551
75	ВТВ3-2-3*	504	206,8416
76	ВТВ3-3-3	20170	78663
77	ВТВ3-3-3*	17128	53439,36
Всього			146483,3
Всього по УЕГГ			314589,3
В звіт			314589

Таблиця 4.4 – Режим роботи системи газопостачання за 25.11.2014 р.

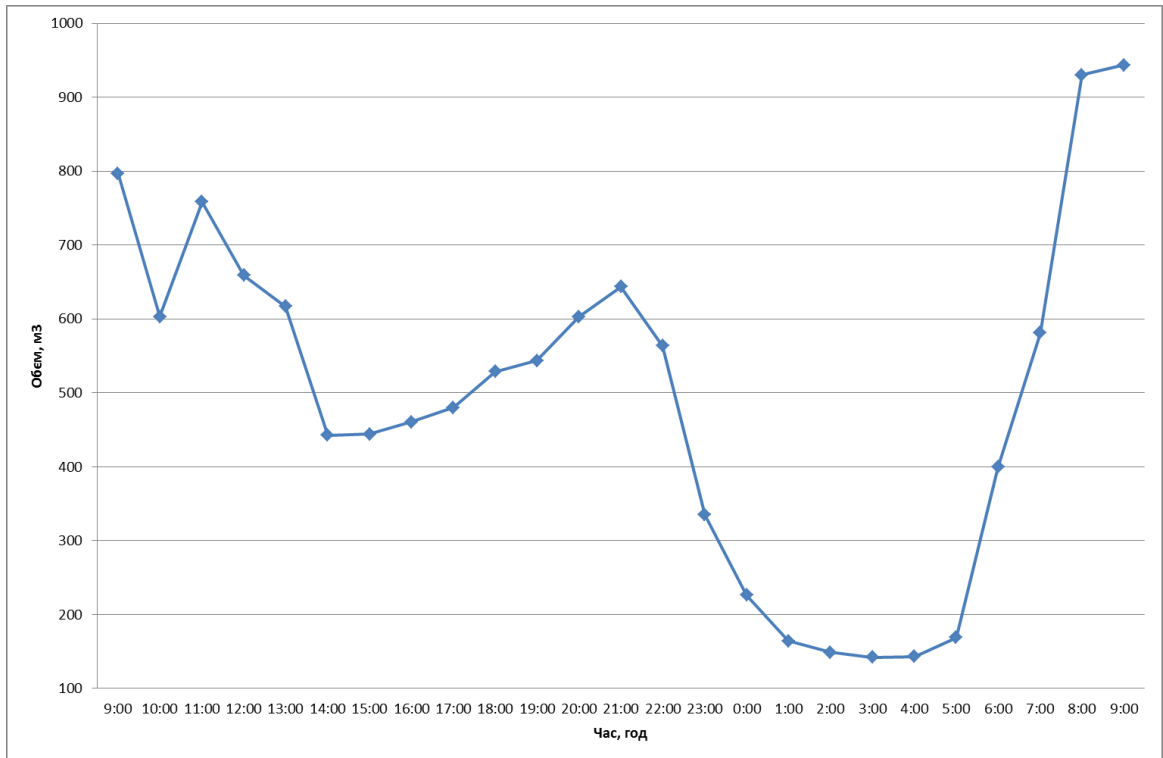
Час	V,м3	dP,кгс/м <sup>2</sup>	Рабс	T, °C
9:00	3168,1	86,805	61,1	35,06
10:00	3237,1	90,552	61,03	43,51
11:00	2966,8	75,648	60,97	32,65
12:00	3170	84,858	60,91	32,4
13:00	3136	86,128	60,86	32,29
14:00	3085,2	81,625	60,82	31,99
15:00	3219,6	88,962	60,77	32,11
16:00	3412,4	100,363	60,72	32,59
17:00	3692	117,912	60,67	33,26
18:00	3547,8	108,861	60,62	33,16
19:00	3485,5	105,038	60,58	32,96
20:00	3302,2	94,176	60,53	32,5
21:00	3119,7	83,951	60,49	32,03
22:00	2901	72,352	60,45	31,29
23:00	2692,1	62,122	60,41	30,45
0:00	2598,9	57,743	60,38	29,92
1:00	2529,2	54,614	60,34	29,53
2:00	2525,1	54,443	60,3	29,41
3:00	2526,9	54,537	60,27	29,33
4:00	2544,8	55,34	60,23	29,29
5:00	2656,9	60,484	60,19	29,55
6:00	3002,5	77,769	60,14	30,4
7:00	3418,2	101,462	60,09	31,68
8:00	3437,9	102,876	60,04	32,21
9:00	3326,5	98,4	60,1	30,07
Всього	73386,2	81,609	60,54	31,69

Таблиця 4.5 – Режим роботи системи газопостачання за 26.07.2013 р.

Час	V,мЗ	dP,кгс/м <sup>2</sup>	Рабс	T, °С
9:00	796,7	349,85	53,6	25,49
10:00	603	199,301	53,38	25,65
11:00	758,3	324,675	52,68	27,22
12:00	659,2	253,531	52,9	27,95
13:00	617	215,496	53,05	28,76
14:00	442,6	107,095	53,16	29,58
15:00	444	107,683	53,24	29,85
16:00	460,6	115,303	53,28	28,78
17:00	480,2	124,851	53,32	28,25
18:00	529	150,866	53,51	27,96
19:00	543,8	159,255	53,34	26,98
20:00	603,2	195,83	52,99	25,32
21:00	643,4	222,894	52,84	24,77
22:00	563,4	173,21	52,72	24,41
23:00	335	61,132	52,63	22,94
0:00	226,4	27,654	52,56	21,17
1:00	164,1	14,284	52,48	19,59
2:00	148,7	11,638	52,41	18,55
3:00	142	10,592	52,34	18
4:00	143,1	10,745	52,29	17,53
5:00	168,9	15,865	52,23	17,35
6:00	399,4	86,693	52,17	19,04
7:00	581,2	183,164	52,11	21,52
8:00	930,2	492,962	51,91	24,52
9:00	943,4	498,845	51,96	24,63
Всього	12326,8	164,5366	52,764	24,2324



а)



б)

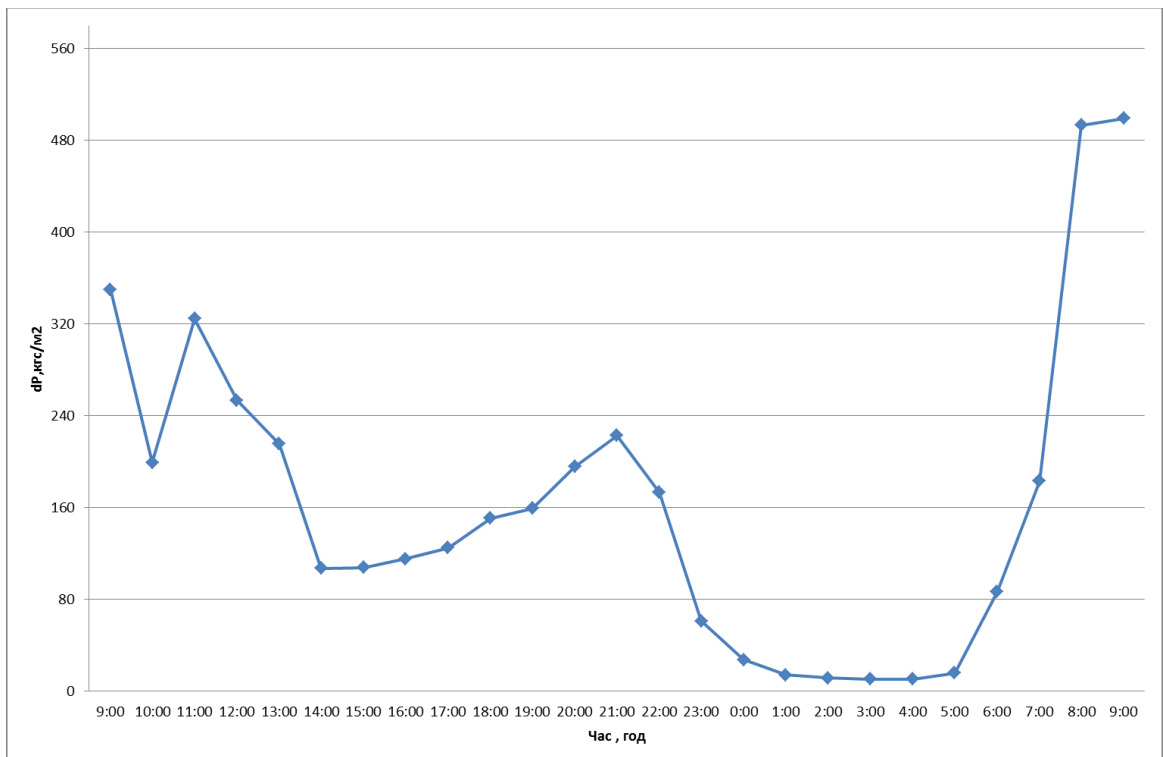


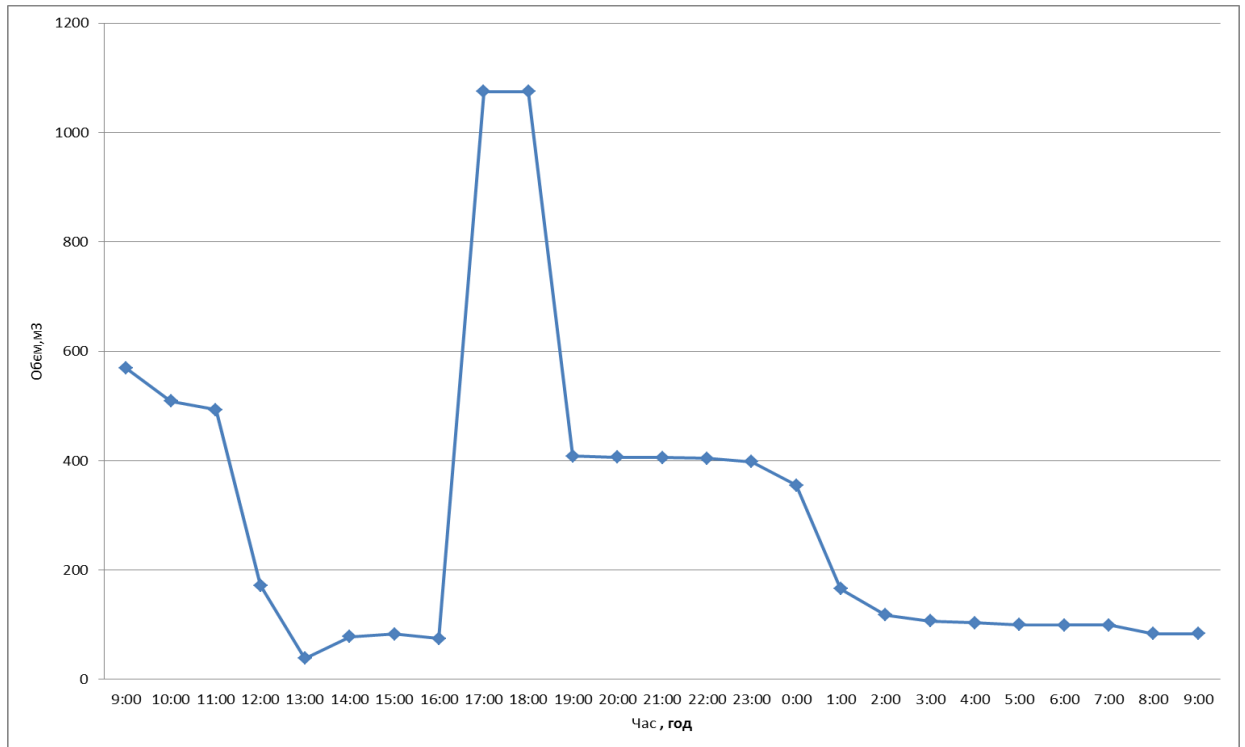
Рисунок 4.5 – Графік погодинного газоспоживання за добу, характер зміни витрати (а), характер зміни газу в системі (б)

Графіки добового газоспоживання (витрата, тиск) за опалювальний сезон подано в таблиці 4.3 і на рисунку 4.5,

Таблиця 4.6 – Режим роботи системи газопостачання при включені буферного споживача

Час	V,м3	dP,кгс/м <sup>2</sup>	Рабс	T, °C
9:00	569	194,904	61,1	35,06
10:00	508,6	155,076	61,03	43,51
11:00	493,2	146,162	60,97	32,65
12:00	171,8	66,231	60,91	32,4
13:00	38,3	0,914	60,86	32,29
14:00	78,4	88,12	60,82	31,99
15:00	83,1	9,79	60,77	32,11
16:00	74,6	3,52	60,72	32,59
17:00	1074,6	858	60,67	33,26
18:00	1074,6	288,903	60,62	33,16
19:00	408,1	98,175	60,58	32,96
20:00	406	97,196	60,53	32,5
21:00	405,3	95,901	60,49	32,03
22:00	403,9	94,97	60,45	31,29
23:00	398	92,29	60,41	30,45
0:00	354,7	73,41	60,38	29,92
1:00	166	16,5	60,34	29,53
2:00	117,5	7,8	60,3	29,41
3:00	107,1	6,4	60,27	29,33
4:00	103,8	5,9	60,23	29,29
5:00	99,9	5,6	60,19	29,55
6:00	99,1	5,5	60,14	30,4
7:00	99,2	5,5	60,09	31,68
8:00	83,8	4,4	60,04	32,21
9:00	83,9	4,8	60,1	30,07
Всього	73386,2	81,609	60,54	31,69

а)



б)

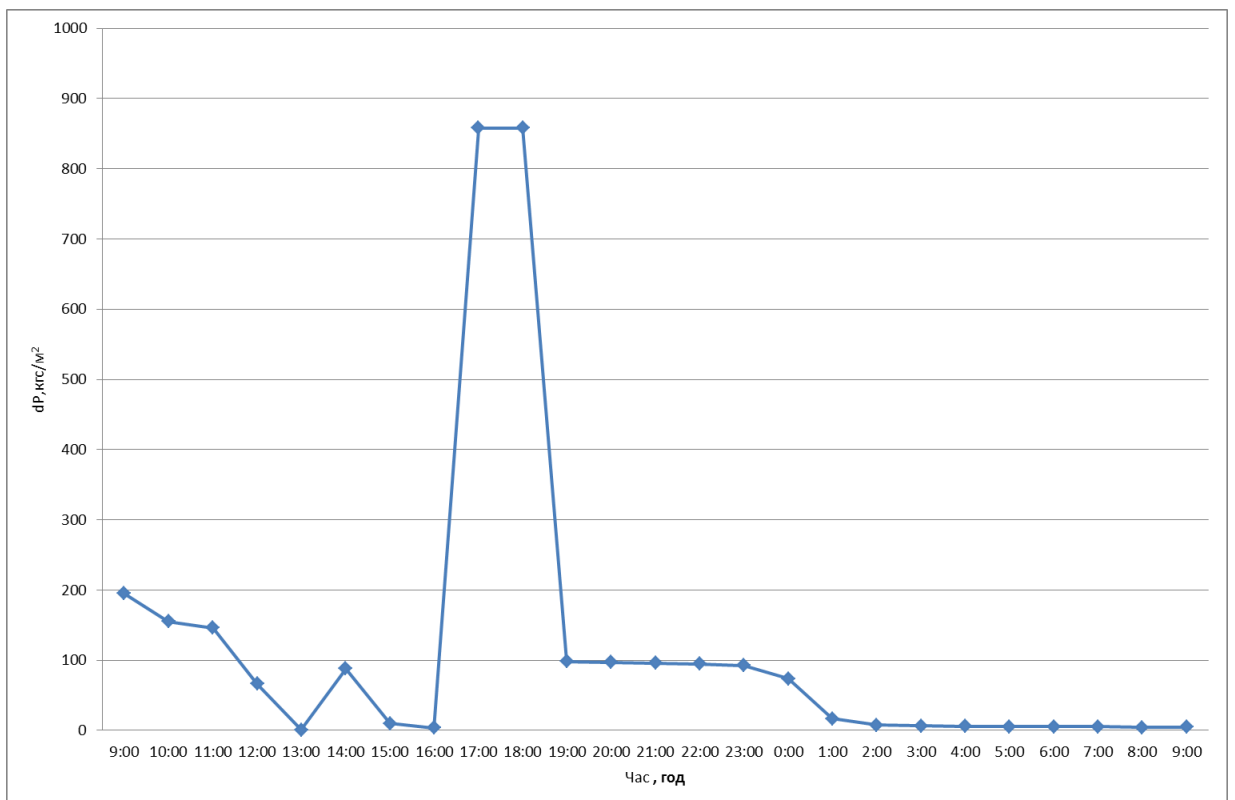


Рисунок 4.6 – Графік погодинного газоспоживання за добу, характер зміни витрати (а), і тиску газу в системі при включенні буферного споживача(б)

Коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання для опалювального сезону складає 0,862, а для неопалювального сезону – 0,509, що підтверджує суттєвий вплив побутового сектору в балансі газоспоживання.

На рисунку 4.6 приведено графік погодинного газоспоживання за добу 31.07.2014 р з стрибкодібною зміною витрати в сторону зростання, характерною для включення буферного споживача в 16 год.22 хв., який супроводжувався с стрибкодібним зростанням тиску на величину 8660 Па і наступним коливальним процесом в межах 180 Па з затуханням на протязі 36 хв.

Обсяг річних втрат газу складає за 2013 рік 23902 м<sup>3</sup>, з яких 8847,9 м<sup>3</sup>(тобто 37,1%) припадає на втрати в результаті аварій на газопроводах, які експлуатуються понад 25 років. Кількість аварійних відмов за 2013 рік за опалювальний сезон склала 14 і за неопалювальний – 3. Тривалість аварійного ремонту (середня) 26,7 год., а середні затрати на аварійний ремонт 3,72 тис. грн.

Запропоновані рекомендації з удосконалення діагностування стану газопроводів і величини і координат витоків газу з газопроводу в результаті аварії за даними Богородчанського УЕГГ дозволила скоротити втрати газу з газопроводів в 2014 році в порівнянні з 2013 роком на 82,7%. Це значить, що економія втрат газу склала  $8847,9 \cdot 0,827 = 7317,2$  м<sup>3</sup>, що при вартості газу 3600 грн за м<sup>3</sup> складає 26341,9 грн. Якщо врахувати ефект від скорочення затрат на аварійно-відновлювальні ремонти то економія зросте.

#### Висновки до розділу 4

1. Встановлено, що на характер нестационарних процесів в газовій мережі окрім збурень появою витоків газу мають вплив нерівномірність добового газоспоживання і режим споживання газу буферними споживачами. Показано що, якщо для даного регіону відомі середньодобова величина газоспоживання та коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання то запропоновано залежність, яка дозволяє відтворити погодинний характер газоспоживання.

2. Нерівномірність газоспоживання в межах зміни коефіцієнта нерівномірності від 0,7 до 1,0 практично не впливає на нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою витоків газу, оскільки коливання тиску, викликані зазначеними збуреннями, відбуваються з суттєво різною частотою.

3. При низьких значеннях величини витрати витоків газу (до 7% від величини витрати газу в газопроводі) його поява практично не викликає збурення технологічного режиму, тому такі витoki слід вважати малими. Починаючи з відносної величини витрати витоків 8% його поява викликає коливання тиску на початку газопроводу, які можуть бути зафіксовані вимірювальними засобами, тому такі витoki слід віднести до великих. Лінійна координата витоків відносно початку газопроводу не має суттєвого впливу на характер нестационарного процесу, викликаного його появою.

4. Нестационарні процеси в газопроводах газових мереж, за характером протікання яких можна діагностувати появу великих витоків, в значній мірі піддаються впливу стрибкоподібної зміни витрати газу. Для таких процесів у відповідності до проведених досліджень встановлено критичну величину витрати витоків газу, перевищення якої суттєво вплине на характер нестационарного процесу, викликаного появою витоків за умови стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі, її можна вважати рівною 13% -15% від початкової витрати газу.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень встановлено закономірності процесів витікання газу з газопроводів мереж низького та середнього тисків, а також фільтрації газу в навколишньому ґрунті, що дозволило удосконалити методи діагностування витоків із газопроводів, а саме:

1. На основі проведених експериментальних досліджень процесу витікання газу під тиском встановлено, що суттєві розбіжності у визначенні витрати витоків між прогнозними і фактичними даними пояснюються рядом неприйнятних припущень в аналітичних дослідженнях, і на основі встановлених закономірностей запропоновано залежність для компенсаційної поправки у вигляді коефіцієнта витрати отвору.

2. Показано, що процес формування ареалу загазованості ґрунту витоків з газопроводу можна розділити на дві фази нестационарної фільтрації газу, перша з яких починається з моменту появи витоків і закінчується досягненням поверхні ґрунту, і з цього моменту починається друга фаза, яка триває до встановлення стаціонарного витікання газу через ґрунт в атмосферу. При виникненні малих витоків газу індикація їх на поверхні ґрунту можлива через короткий проміжок часу (5-10хв) в залежності від властивостей ґрунту, ареал загазованості ґрунту витоків газу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї, а з підняттям до поверхні ґрунту його форма наближається до еліпса, а площа складає близько  $40 \text{ м}^2$ ; після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу, внаслідок чого площа поверхні загазованості зменшується.

3. Встановлено, що на характер нестационарних процесів в газовій мережі окрім збурень появою витоків газу мають вплив нерівномірність добового газоспоживання і режим споживання газу буферними споживачами. Показано що, якщо для даного регіону відомі середньодобова величина газоспоживання та коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання то запропоновано залежність, яка дозволяє відтворити погодинний характер

газоспоживання. Нерівномірність газоспоживання в межах зміни коефіцієнта нерівномірності від 0,7 до 1,0 практично не впливає на нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою витoku газу, оскільки коливання тиску, викликані зазначеними збуреннями, відбуваються з суттєво різною частотою.

4. При низьких значеннях величини витрати витoku газу (до 7% від величини витрати газу в газопроводі) його поява практично не викликає збурення технологічного режиму, тому такі витoki слід вважати малими. Починаючи з відносної величини витрати витoku 8% його поява викликає коливання тиску на початку газопроводу, які можуть бути зафіксовані вимірювальними засобами, тому такі витoki слід віднести до великих. Лінійна координата витoku відносно початку газопроводу не має суттєвого впливу на характер нестационарного процесу, викликаного його появою.

5. Нестационарні процеси в газопроводах газових мереж, за характером протікання яких можна діагностувати появу великих витоків, в значній мірі піддаються впливу стрибкоподібної зміни витрати газу. Для таких процесів у відповідності до проведених досліджень встановлено критичну величину витрати витoku газу, перевищення якої суттєво вплине на характер нестационарного процесу, викликаного появою витoku за умови стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі, її можна вважати рівною 13% -15% від початкової витрати газу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Араманович.И. Уравнения математической физики / И. Араманович, В. И. Левин. – М.:Наука,1964.–286 с
2. Альтшуль А.А.Гидравлические сопротивления / А. А. Альтшуль.– М.:Недра,1970.
3. Андронов А.А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С Э. Хайкин. – М.: Физматгиз, 1959. – 427с.
4. Абрамович Н. Прикладная газовая динамика/ Н. Абрамович.– М.:Наука,1969.–544 с.
5. Араманович.И. Уравнения математической физики/ И. Араманович, В. И. Левин. – М.:Наука,1964.–286 с
6. Асатурян А.М. О неустановившихся движениях газа в трубопроводах/ А. М. Асатурян, З. Т. Галиуллин, В. И. Черников// Изв. вузов. Нефть и газ. –Баку. – 1961. – Т10. – С.73-79
7. Бахвалов И.С. Численные методы / И. С. Бахвалов.–М.:Наука,1973.–631 с.
8. Белаконь Н. И. Термодинамика/ Н. И. Белаконь. – М.-Л.:Госэнергоиздат,1954. – 416 с
9. Биргер И.А.Техническая диагностика/ И. А. Биргер.– М.:Машиностроение, 1978. – 139с
10. Бобровский С.А. Движение газа в газопроводе с путевым отбором / С. А. Бобровский, С. Г. Щербаков, М. А. Гусейнзаде.–М.: Наука,1972.–193 с
11. Бакаев В.В. Технологии и оборудование компании "Розен" для диагностики объектов нефтегазовой отрасли/ В. В. Бакаев// Материалы 3 науч.-техн. конф. "Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта". – Минск, 2000. – С.120-123
12. Булгаков Б.В. Колебания / Б. В. Булгаков. – М.: Гостехиздат,1954.–399 с.
13. Яковлев Е. И. Газовые сети и газохранилища/ Яковлев Е. И. – М.: Недра, 1991 – 543с.
14. Варгафтик Н.П. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. П. Варгафтик. – М.:Наука,1972.–720 с.



15. Яковлев Е. И. Методика оперативного диспетчерского управления режимами сложных газотранспортных систем/ Е. И. Яковлев, В. Я. Грудз, Д. Ф. Тымкив. – К.: Час, 1990.
16. Ясин Э.М. Надежность магистральных газопроводов/ Э. М. Ясин, В. Л. Березин, К. Е. Расщепкин. – М.: Недра, 1972. – 183 с
17. Вольский Э.Л. Режимы работы магистрального газопровода/ Э. Л. Вольский, И. М. Константинова.–М.:Недра,1970. – 168 с.
18. Яковлев Е. И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами/ Е. И. Яковлев// Изв.вузов. Нефть и газ. – Баку. – Т2. – 1968. – С. 72-76
19. Галиуллин З.Т. Вопросы физического моделирования нестационарных течений газа в магистральных газопроводах с учетом влияния инерционных сил и зон гидравлического сопротивления. Повышение надежности газоснабжения/ З. Т. Галиуллин, И. Е. Ходанович, В. В. Девичев// Труды ВНИИГАЗ,1976. – С.7-16
20. Галиуллин З.Т. Оценка влияния инерционных сил при нестационарном течении газа в магистральных газопроводах / Т. Галиуллин, И. Е. Ходанович, В. В. Девичев//Труды ВНИИГАЗ. Магистральные газопроводы.–М,1975. –С.71-79
21. Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа/ А. И. Гарляускас.– М.:Недра, 1975. – 160 с.
22. Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа/ С. Г. Щербаков. – М.:Наука, 1982. – 205 с.
23. Щербаков С.Г. Определение аварийного состояния газопроводов/ С. Г. Щербаков, С. А. Бобровский. – М.: ВНИИОЭНГ, 1970. – 34 с.
24. Гусейнов Ч.С. Влияние конденсата на производительность газопровода / Ч. С. Гусейнов//Трубопроводный транспорт нефти и газа.– Труды МИНХ и ГП им.И.М.Губкина. – вып.45. – 1963. – С.83-88
25. Гусейнов И.А. Расслоеное движение жидкости и газа в трубопроводах/ И. А. Гусейнов, В. Ю. Елшин //Изв.Сиб.АН СССР. – сер.техн.наук. – вып.2.– Т8. – 1969. – С.221

26. Гончарук М.І. Довідник з газопостачання населених пунктів України/ М. І. Гончарук, М. Д. Середюк, В. І. Шелуденко.–Івано-Франківськ: «Сімик», 2006. – 1313с.
27. Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація газопроводів/ М. І. Гончарук // Нафтова і газова промисловість. — 2003. — № 2. — С. 56-57.
28. Гончарук М.І. Аналіз причин втрат природного газу/ М. І. Гончарук // Нафтова і газова промисловість. — 2003. — № 1. — С. 51-53.
29. Гончарук М.І.Корозійно-механічна поведінка металу газопроводу/ М. І. Гончарук, Є. І. Крижанівський, Л. Я. Побережний // Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу. — 2003. — № 1(5). —С. 54-59.
30. Гончарук М.І. Щодо ситуації на ринку природного газу України/ М. І. Гончарук // Нафтова і газова промисловість (Спец. Випуск). — 2003. — С. 16-20.
31. Гончарук М.І. Стан та перспективи виробництва і реалізації скрапленого газу в Україні/ М. І. Гончарук, В. І. Репалюк, Казанцева Н. Л. // Нафтова і газова промисловість. — 2003. — № 3. — С. 54-56.
32. Гухман А.А Введение в теорию подобия/ А. А. Гухман. – М.:Высшая школа,1973. – 254с.
33. Грудз В.Я. Обслуживание газотранспортных систем/ В. Я. Грудз, Д. Ф.Тымкив, Е. И. Яковлев. – К.: УМКВО,1991. – 159 с.
34. Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів/В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків та ін. Івано-Франківськ: Лілея-НВ. 2009 - 711 с.
35. Грудз В.Я.Методика диагностики состояния магистрального газопровода/ В. Я. Грудз, В. Б. Мыхалкив, Д. Ф. Тымкив. – К.:Час,1990.
36. Грудз В.Я. Оптиміальне планування режимів роботи газотранспортних систем в умовах багато критеріальності / В. Я. Грудз, Я. В. Грудз// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Вип.32. – 1995. – С.12-15
37. Грудз В.Я. Математичні моделі для діагностування гідравлічного стану газових мереж/ В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. Д. Фейчук// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Вип.35. – 1998. – С.218-221

38. Грудз В.Я. Діагностування малих витоків з трубопроводу/ В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. Д. Фейчук// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Вип.36. – 1999. – С.42-44
39. Грудз Я.В. Дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу/ Я.В. Грудз, Н.Я. Дрінь, Р.Б. Стасюк, В.Д. Шологон // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ, 2011. – № 2. – С.43-47.
40. Грудз В. Я. Дослідження процесу витікання газу з газопроводу/ В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, Н. Я. Дрінь, Р. Б. Стасюк. // «Журнал енергетики вуглеводнів» «JOURNAL OF HYDROCARBON POWER ENGINEERING».. – Івано-Франківськ, 2014. – № 2. – С.103-107.
41. Грудз В.Я. Математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі/ В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В. Фейчук, Н.Я. Дрінь, Р.Б. Стасюк. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2011. – №3 – С. 66-69.
42. Грудз В.Я. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті при появі витоків з газопроводу/ В.Я. Грудз, Я.В.Грудз, Н.Я. Дрінь, Р.Б.Стасюк // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ, 2011. – № 1 С. 70-74.
43. Грудз В.Я.Оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання / Н.Я.Дрінь, Р.Б.Стасюк. // Науковий вісник – Івано-Франківськ. 2012. – №2, – С.105-106.
44. Р.Б.Стасюк. Исследование нестационарных процессов в газопроводах газовых сетей/ – Научный периодический журнал «СИСТЕМЫ. МЕТОДЫ. ТЕХНОЛОГИИ»), – г. Братск 2015, – № 1 (25) – С. 139-136
45. Грудз В.Я. Разработка методов диагностики газотранспортных систем на нестационарных режимах и повышения эффективности их обслуживания. – Диссертация на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. – Ивано-Франковск, 1995. –С. 357.
46. Мыхалкив В.Б. Определение количества отложений во внутренней полости действующих газопроводов/ В.Б. Мыхалкив, В.Я. Грудз, А. В. Шибнев // Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве. – ВНИИЭГАЗПРОМ. – вып.5. – 1983. – С.16-17

47. Жидкова М.А. Трубопроводный транспорт газа/ М. А Жидкова. – К.:Наукова думка,1973. – 142 с.
48. Жидкова М.О. Моделирование технологических процессов и повышения эффективности трубопроводного транспорта газа/ М. О. Жидкова//Вісник АН УРСР: ТЗ. – К.: Наукова думка,1985. – С.37-44.
49. Жидкова М.А. О точности линеаризации уравнения движения газа/ М. А. Жидкова //Газовая промышленность. – №11. – 1965. – С.20-26.
50. Загоруйченко В.А. Уравнение состояния и термодинамические свойства газовых смесей водорода, азота и метана/ В. А. Загоруйченко// Теплофизические свойства газов. – М.:Наука,1970. – С.95-97.
51. Загоруйченко В.А. Метод составления уравнений состояния многокомпонентных смесей/ В. А. Загоруйченко//Теплофизика высоких температур. – т.3. – №3. – 1965. – С.244-249
52. Капцов И.И. Восстановительные работы на МГ: пути повышения эффективности/ И. И. Капцов, В. Н. Гончаров, В. Н. Гончар//Газовая промышленность. – №4. – 1990. – С.28-30
53. Капцов И.И. Определение количества жидкости вгазопроводе/ И. И. Капцов, В. Н. Гончар //Газовая промышленность. – №3. – 1989. – С.22-26
54. Лойцянский Л.Г.Механика жидкости и газа/ Л. Г. Лойцянский. – М.:Техтеориздат. – 1950. – 784 с.
55. Лурье М.В.Газодинамическое сопротивление при движении поршня в трубе/ М. В. Лурье//Изв.вузов.Нефть и газ. – Баку. – Т8. – 1976. – С.42-46
56. Лейбензон А.С. Собрание починений. т.3. Нефтепромысловая механика/ А. С. Лейбензон. – М.: Изд-во АН СССР. – 1956. – 678 с.
57. МазурИ.И. Безопасность трубопроводных систем/ И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104с.
58. Майгуров Е.Н. Определение времени стационарного движения газа по трубопроводу/ Е. Н. Майгуров//Вопросы развития газовой промышленности УССР. Труды УкрНИИГАЗ. – вып.15. – М.:Недра,1966. – С.28-32

59. Майгуров Е.Н. Методика расчета параметров продувки трубопровода/ Е. Н. Майгуров //Газовая промышленность. – №11 – 1968. – С.20-26
60. Методика расчета сложных газотранспортных систем с пересеченным профилем трассы/ [Яковлев Е.И., Мыхалкив В.Б., Грудз В.Я и др.] :РИ-Киев, Час, 1990.
61. Мирзанжанзаде А.Х. Решение задач нефтепромысловой механики/ А. Х. Мирзанжанзаде, М. А. Гусейнзаде. – М.:Недра, 1969. – 199 с
62. Мозгалевский А.В. Техническая диагностика/ А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаспаров. – М.:Высшая школа, 1975.
63. Мыхалкив В.Б. Разработка методов оперативного расчета режимов эксплуатации сложных систем газопроводов с пересеченным профилем трассы: Диссертационная работа на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – М., 1985.
64. Мыхалкив В.Б. Определение количества отложений во внутренней полости действующих газопроводов/ В.Б. Мыхалкив, В.Я. Грудз, А. В. Шибнев // Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве. – ВНИИЭГАЗПРОМ. – вып.5. – 1983. – С.16-17
65. Мыхалкив В.Б. Об оптимальной периодичности очистки полости газопровода/ В. Б. Мыхалкив, В. Я. Грудз, А. В. Шибанев //Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве. – ВНИИЭГАЗПРОМ. – вып.6. – 1983. – С.8-9
66. Методика расчета сложных газотранспортных систем с пересеченным профилем трассы/ [Яковлев Е.И., Казак А.С., Грудз В.Я. и др.] – К, 1984.
67. Методика диагностики состояния полости магистрального газопровода/ [Яковлев Е.И., Иванов В.А., Грудз В.Я. и др.] – К, 1987.
68. Олейников В.А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности/ В. А. Олейников. – Л.:Недра, 1982. – 216
69. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний/ А. Н. Обморшев. – М.:Наука, 1965. – 275 с.
70. Огибалов П. М. Нестационарное движение вязкопластичных сред/ П. М. Огибалов, А. Х. Мирзанжанзаде. – М.:Изд-во МГУ, 1970. – 346 с.

71. Одишария Г.З. Результаты обследования работы газопровода Серпухов-Ленинград/ Г. З. Одишария, В. Г. Скрыбин//Газовоедело. – №6. – 1962. – С.39-41
72. Репников А.В. Колебания в оптимальных системах автоматического регулирования/ А. В. Репников. – М.:Машиностроение,1968. – 239 с.
73. Рауз Х. Механика жидкости/ Х. Рауз. – М.: Изд-во литературы по строительству,1967. – 410 с
74. Ретинский В.С. О методике исследования режимов работы сложных магистральных трубопроводных сетей на ЭВМ/ В. С. Ретинский. – Тр.МИНХ и ГП им. Губкина,1979. – вып.139. – С. 85-100
75. Режимы газотранспортных систем/ [Яковлев Е.І., Казак О.С., Михалків В.Б. и др.] – Львів:Світ,1993. – 170 с.
76. Середюк М.Д. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів: навч. посібник/ М. Д. Середюк, В. Я. Малик, В. Т. Болонний. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 140 с.
77. Середюк М.Д. Технологічні розрахунки газових мереж населених пунктів: навч. посібник/ М. Д. Середюк, Л. Д. Пилипів, Ю. І. Зарубіна. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 152 с.
78. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики/ А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
79. Трубопроводный транспорт газа/ [С.А. Бобровский, С.Г. Щербаков, Е.И. Яковлеи и др.] – М.: Наука, 1976. – 475 с.
80. Трубопровідний транспорт газу/ [М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін.]– К.: АренаЕКО, 2002. – 600с.
81. Технічна діагностика трубопровідних систем/[В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В. костів та ін. ] – Івано-Франківськ: Лілея-НВ. 2012 - 511 с.
82. Фейчук В.В. Ремонт трубопроводів без зупинки перекачування/ В. В. Фейчук, Я. В. Дорошенко// Обслуговування і ремонт газопроводів./ Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б., Костів В.В. – Івано-Франківськ: Лілея, 2009. – 750 с.

83. Ходанович И.Е. Тепловые режимы магистральных газопроводов/ И. Е. Ходанович, Б. Л. Кривошеин, Р. Н. Бикчентай. – М.:Недра,1971. – 216 с.
84. Ходанович Е.И Аналитические основы проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов/ Е. И. Ходанович. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 127 с.
85. Ходанович Е.И. Температурный режим газопровода с учетом термодинамической неидеальности газа/ Е. И. Ходанович//Тр.ВНИИГАЗ. – №87. – М.,1970. – С.78-81
86. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах/ И. А. Чарный. – М.:Гостехиздат,1951. – 224 с.
87. Чарный И. А. Основы газовой динамики/ И. А. Чарный. – М.:Гостоптехиздат, 1961. – 200 с.
88. Aerodynamic of Turbines and Compressors.-High Speed Aerodynamics and Yet Propulsion.Volume X. Editor W.R.Hawtorne.London.Oxford University Press.1964.s.616
89. New concept single signature vibration monitoring through the lifetimes of an engine. - AircraftEngeneering, 1979, 51, 3, P. 21-22.
90. Bush William L. Instrumention pays off compressor regulator stations / William L. Bush //. – Pipeline Industry, 1970.- 32.N5.- P. 55-56, 61.
91. Chisholm Roland. Techniques of vibration analysis applied to gas turbines / Roland Chisholm //. – Gas Turbine Int., 1976, 17, N6, P.16-22.
92. De Mott L.B. TF 41-A-2/H7E inglight engine condition monitoring system (IECMS) / De Mott L.B.//. – AIAA Papers, 1978, N1472, P.9.
93. Du Bois M.R. Inspection and maintenance of gas turbine nozzles, buckets and rotors / M.R. Du Bois, R.Q. Fresneda //. – Power Engeneering (USA), 1978, 82, N7, P.58-61.
94. Edmunds David B. Modular engine maintenance concept consideration for aircraft turbine engines / David B. Edmunds //. – Aircraft Engeneering, 1978, 50, N1. P. 14-17.
95. Engine maintenance program triples time between overhauls. – Pipelines and Gas Journal, 1976, 203, N6, P. 66,69,71.

96. Engeneering develops turbine diagnosis system. – Diesel and Gas Turbine Progress, 1979, 45, N5, P.82.
97. Ford T.E. The changing balance of design requirements / T.E. Ford //. - Aircraft Engeneering, 1976.- 48.- N1- P.21-22,25.
98. Kruchenberg U.D. Design and testing of the American airlines prototype 747.AiDS system / U.D. Kruchenberg //. - Journal of Aircraft, 1972.- v.9.- N4.- P.17-19.
99. Barranger J.P. Laser-optical blade tip clearance measurement system./ J.P. Barranger, M.J. Ford //. – Trans ASME. t Engineering Power, 1983.- 103.- N2.- P.457-460.
100. Maintenance information system for gas turbines. – Pipe Line Industry, 1981, .- N6.- P. 33-36.
101. Methoden zurfruh diagnose von Schaden an Bewegungsele menten Gantzen E. – TU, 1981.- 22.- N7.- P. 312-315.
102. Muchlow P.A. Wear particle monitoring / P.A. Muchlow //. – Brit. J. Non-Destruct test, 1980.- 22.- N6.- P.275-280.
103. Natrass Donald. Measuring gas turbine perforce parameters / Donald Natrass //. – J. Diesel and Gas Turbine Progress, 1976.- 42.- N7.- P.16.
104. Parrish R. Care and repair of turbine engines / R. Parrish //. – Bus and commerAviant., 1978.- 43.- N7.- P.54-58.
105. Ottensmann G. Operational experience on engine health monitoring / G. Ottensmann //. – FGLR-TachbuhrBd 6, Koln, 1976, P. 59-75.
106. Paul A. Gas turbines maintenance practice / A. Paul //. – Energy Dev, 1979.- 3.- N1.- P. 25-28.
107. Scott J.N. Performance analysis boots efficiency of gas turbines / J.N. Scott //. – The Oil and Gas J., 1977, N18, P. 51-55.
108. Simms W.H. Boroscopying of gas turbine engines for condition monitoring / W.H. Simms //. – Gas Turbine Int., 1976.- 17.- N16.- P. 32-33.
109. Survey of rotating machinery using vibration monitoring techniques. – Norw Shipp News, 1977.- N11c.- P.25-26, 29.
110. Corrigan J.T. The inspection of heave duty industrial gas turbines using fibre-



- optical boroscope / Corrigan J.T//. – Turbomachineri Int., 1981.- 22.- N8.- P. 15-20.
111. Valory R. Effectiveness of the realitimeferrograph and other oil monitors as related to oil filtration. – U.S. Department Commer. Publ., 1977.- N494.- P. 49-72.
112. Van de Water B. Ten years of on-condition turbine operation / B. Van de Water // . – SAE-Austral, 1980.- 40.- N6.- P. 295-301.
113. Walker C.I. Parts tracking and engine history recording for on-condition maintenance / C.I. Walker, R.M. Donovan // . – AIAA Papers, 1979, N1280, P.11.
114. Weinert N. Marine gas turbine diagnostic testing / N. Weinert // . – Navigational Engeneering J., 1976.- 88.- N6.- P. 51-61.
115. Wulf R.H. CE6 get engine performance deterioration / R.H. Wulf // . – AIAA Papers, 1979.- N1233.- P. 8.
116. Wurm L.W. Computer ueilds compressor options / L.W. Wurm // . – The Oil and Gas J., 1978.- 75.- N32.- P. 62,66.
117. War-Josepk P.,Blesh I.I. The Stability of Flexible Rotor Supported by Circumferentially Fed-Journal bearings. Trans.ASME,1977,F99,N4.p.469-477

## Додаток А

## Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової  
роботи ІФНТУНГ

О. Карпаш

23 січня 2015 р.



ЗАТВЕРДЖЕНО

Головний інженер  
Богородчанського УЕГГ

Т. Гедзик


15 січня 2015 р.



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Стасюка Р.Б.  
«Удосконалення методів діагностування витоків з газових мереж»,  
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафто газосховища

Ми, що підписалися нижче, інженер обліку газу Богородчанського управління експлуатації газового господарства (УЕГГ) В.Латишевський та аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) Р. Стасюк склали даний акт в тому, що розроблені ІФНТУНГ в рамках дисертаційної роботи Стасюка Р.Б. рекомендації, алгоритми і програми розрахунку діагностування витоків газу з газових мереж середнього і низького тиску прийняті в 2013 році до впровадження Богородчанським УЕГГ, і їх впровадження дозволило скоротити обсяг втрат газу в результаті аварій в 2014 році в порівнянні 2013 роком на величину 82,7%.

 В. Латишевський

 Р. Стасюк

## Додаток Б

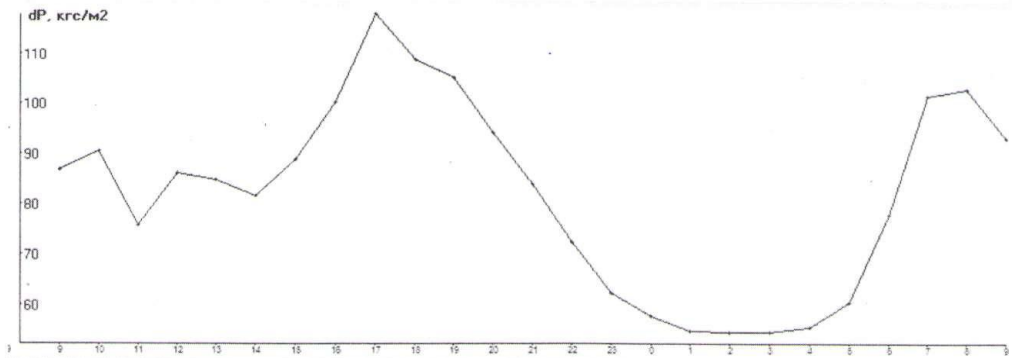
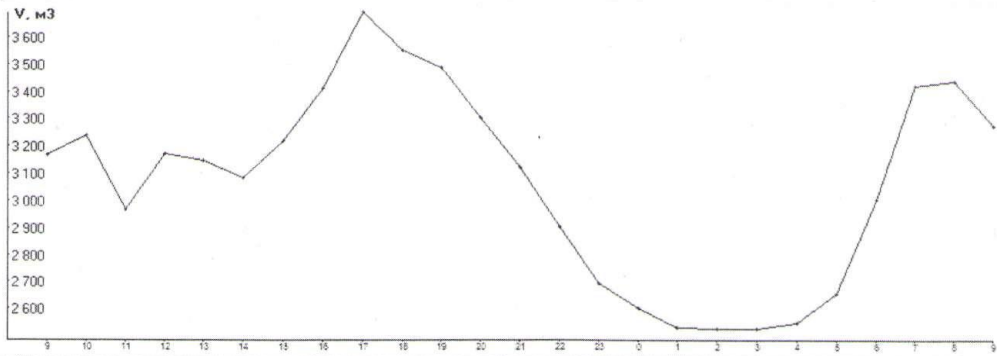
## Дані режим роботи системи газопостачання

## Богородчанського УЕГГ

Додаток Б

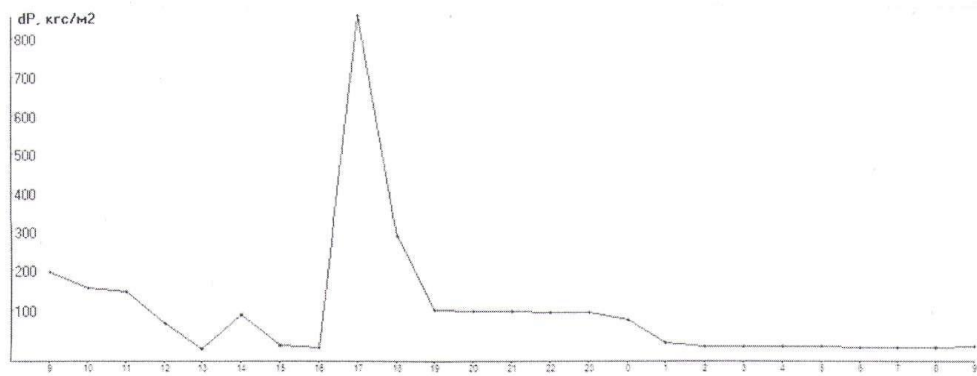
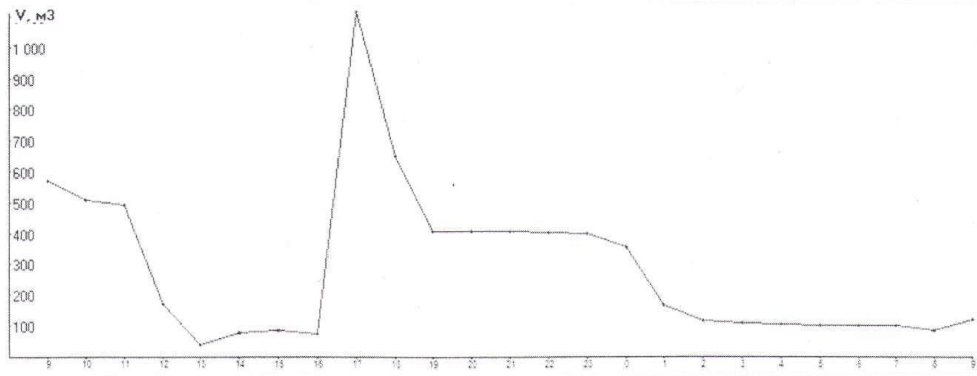
Дані на об'єкті богородчани (осн.) за 25/11/14.

Час	V, м3	dP, кгс/м2	Рабс	T, °C	ABC
9:00	3168,1	86,805	61,1	35,06	
10:00	3237,1	90,552	61,03	34,51	
11:00	2966,8	75,648	60,97	32,65	
12:00	3170	86,128	60,91	32,4	
13:00	3146	84,858	60,86	32,29	
14:00	3085,2	81,625	60,82	31,99	
15:00	3219,6	88,962	60,77	32,11	
16:00	3412,4	100,362	60,72	32,59	
17:00	3692	117,912	60,67	33,26	
18:00	3547,8	108,861	60,62	33,16	
19:00	3485,5	105,038	60,58	32,92	
20:00	3302,2	94,176	60,53	32,5	
21:00	3119,7	83,951	60,49	32,03	
22:00	2901	72,352	60,45	31,29	
23:00	2692,1	62,122	60,41	30,45	
0:00	2598,9	57,743	60,38	29,92	
1:00	2529,2	54,614	60,34	29,53	
2:00	2525,1	54,443	60,3	29,41	
3:00	2526,9	54,537	60,27	29,33	
4:00	2544,8	55,34	60,23	29,29	
5:00	2656,9	60,484	60,19	29,55	
6:00	3002,5	77,769	60,14	30,4	
7:00	3418,2	101,462	60,09	31,68	
8:00	3437,9	102,876	60,04	32,21	
Всього	73386,2	81,609	60,54	31,69	



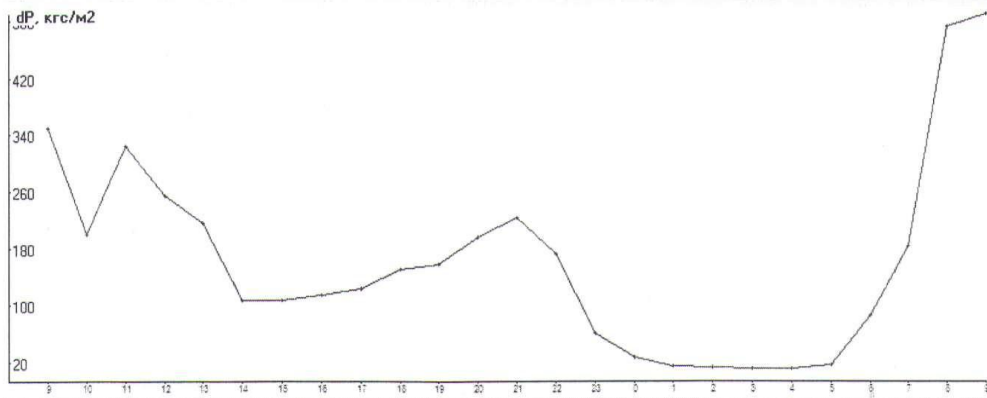
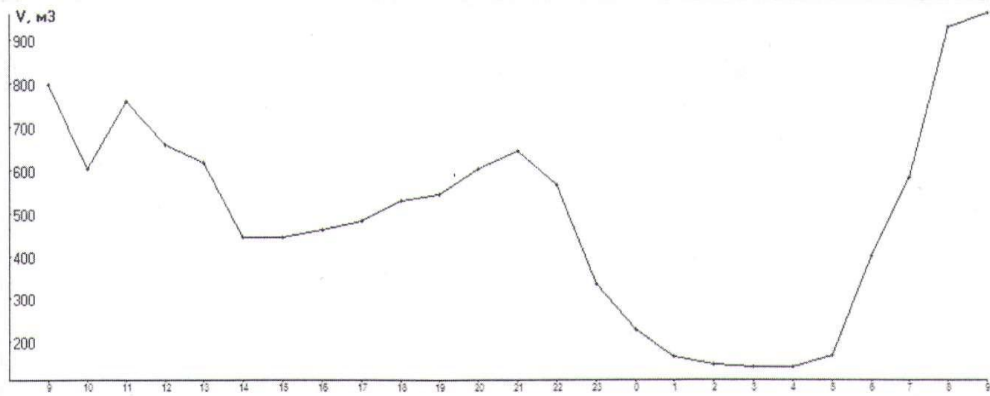
## Дані на об'єкті богородчани (осн.) за 31/7/14.

Час	V, м3	dP, кгс/м2	Рабс	T, °C	ABC
9:00	569	194,904	47,42	24,47	
10:00	508,6	155,076	47,82	25,45	
11:00	493,2	146,162	48,05	27,45	
12:00	171,8	66,231	48,13	31,39	
13:00	38,2	0,914	48,17	36,41	
14:00	78,4	88,12	48,26	38,51	A
15:00	83,1	9,793	48,43	36,03	A
16:00	74,6	3,529	48,6	40,88	
17:00	1115,3	858,313	48,53	30,15	
18:00	649,5	288,903	48,43	26,93	
19:00	408,1	98,175	48,41	25,19	
20:00	406,9	97,196	48,46	24,48	
21:00	405,2	95,901	48,47	23,51	
22:00	403,9	94,97	48,49	22,91	
23:00	398,6	92,294	48,55	22,64	
0:00	354,7	73,412	48,59	22,19	
1:00	166	16,5	48,62	20,68	
2:00	117,5	7,879	48,61	19,1	
3:00	107,1	6,495	48,6	18,13	
4:00	102,8	5,959	48,62	17,46	
5:00	99,9	5,612	48,65	16,98	
6:00	99,1	5,508	48,7	16,77	
7:00	99,2	5,52	48,77	17,16	
8:00	83,8	4,744	48,9	18,25	A
<b>Всього</b>	<b>7034,3</b>	<b>100,921</b>	<b>48,43</b>	<b>25,13</b>	<b>A</b>



## Дані на об'єкті богородчани (осн.) за 26/7/13.

Час	V, м3	dP, кгс/м2	Рабс	T, °C	ABC
9:00	796,7	349,85	53,6	25,49	
10:00	603	199,301	53,38	25,65	
11:00	758,3	324,675	52,68	27,22	
12:00	659,2	253,531	52,9	27,95	
13:00	617	215,469	53,05	28,76	
14:00	442,6	107,095	53,16	29,58	
15:00	444	107,683	53,24	29,85	
16:00	460,6	115,303	53,28	28,78	
17:00	480,2	124,851	53,32	28,25	
18:00	529	150,866	53,51	27,96	
19:00	543,8	159,255	53,34	26,98	
20:00	603,2	195,83	52,99	25,32	
21:00	643,4	222,894	52,84	24,77	
22:00	563,4	173,21	52,72	24,41	
23:00	335	61,132	52,63	22,94	
0:00	226,4	27,654	52,56	21,17	
1:00	164,1	14,284	52,48	19,59	
2:00	148,7	11,638	52,41	18,55	
3:00	142	10,592	52,34	18	
4:00	143,1	10,745	52,29	17,53	
5:00	168,9	15,865	52,23	17,35	
6:00	399,4	86,693	52,17	19,04	
7:00	581,2	183,164	52,11	21,52	
8:00	930,2	492,962	51,91	24,52	
<b>Всього</b>	<b>11383,6</b>	<b>150,606</b>	<b>52,8</b>	<b>24,21</b>	



**Додаток В**  
**. Розрахунок виробничо-технологічних втрат**  
**по Богородчанському УЕГГ**

Розрахунок виробничо-технологічних втрат по Богородчанському УЕГГ на 30.11.2014р.

№ п/п	Умовний прохід(діаметр) газопроводу Ду, мм	Кількість	Богородчанське УЕГГ
			Витрата за місяць
Додаток 1.Газопроводи з тиском 12 >= P > 3 кгс/см2			
1	32	0,570	6,9426
2	40	0,280	3,99
3	50	2,346	43,00218
4	50*	0,245	5,6135625
4	65	0,420	9,9792
6	80	2,130	60,1299
7	80*	0,779	75,162375
8	100	23,893	810,68949
9	100*	9,883	419,1627375
10	125	3,332	141,24348
11	125*	16,164	856,48995
12	150	7,678	390,4263
13	150*	20,138	1280,021625
14	200	19,042	1321,89564
15	200*	12,821	1112,542275
16	300	1,343	141,4179
17	300*	8,304	1093,014
	Всього	129,368	7 771,723
	Всього старіші 25 років	68,334	4 842,007
Додаток 1.Газопроводи з тиском 3 >= P >,05 кгс/см2			
15	25	0,435	3,9933
16	32	21,879	266,48622
17	40	13,310	189,6675
18	50	48,558	890,06814
19	50*	2,943	67,4314875
20	65	68,865	1636,2324
21	80	7,125	201,13875
22	80*	0,998	35,216925
23	100	46,153	1565,97129
24	100*	9,191	389,8132875
25	125	3,030	128,4417
26	125*	3,743	198,3322125
27	150	10,642	541,1457
28	150*	6,577	418,0505625
29	200	17,819	1236,99498
30	200*	2,232	193,6818
	Всього	263,500	7962,666255
	Всього старіші 25 років	25,684	1302,526275
Додаток 1.Газопроводи з тиском P <=,05 кгс/см2(розподільчі)			

29	25*	0,105	0,2401875
79	32	0,060	0,1458
30	40	0,097	0,27645
31	50	9,303	34,04898
32	50*	9,120	41,724
33	65	22,502	106,65948
34	80	11,057	62,02977
35	80*	9,809	68,7856125
36	100	52,700	357,306
37	100*	58,408	495,0078
38	125	16,545	140,46705
39	125*	17,167	182,1847875
40	150	12,582	127,95894
41	150*	9,562	121,556925
42	200	1,024	14,37696
43	200*	3,507	61,54785
44	250*	0,100	2,2125
45	300*	0,270	7,117875
	Всього	233,918	1823,646968
	Всього старші 25 років	108,048	980,378
Додаток 1. Газопроводи з тиском $P \leq 0,05$ кгс/см <sup>2</sup> (дворові)			
46	25	11,390	69,7068
47	25*	0,780	5,967
48	32	66,161	535,9041
49	32*	14,520	147,015
50	40	96,899	921,50949
51	40*	76,061	904,1751375
52	50	25,902	316,26342
53	50*	15,139	231,0589875
121	65	0,668	10,58112
125	100	0,021	0,47502
129	150	0,158	5,3562
	Всього	307,699	3148,012275
	Всього старші 25 років	106,500	1288,216125
Додаток 1. Газопроводи з тиском $3 > P \geq 0,05$ кгс/см <sup>2</sup> (дворові)			
54	25	45,835	420,7653
55	32	59,736	727,58448
56	40	2,873	40,94025
57	50	4,011	73,52163
121	65	0,386	9,17136
	Всього	112,841	1271,98302
Додаток 1. Газопроводи з тиском $P \leq 0,05$ кгс/см <sup>2</sup> (внутрібудинкові)			
58	15	137,077	460,57872
59	15*	14,440	60,648
60	20	93,642	432,62604
61	20*	36,100	208,4775
62	25	89,965	550,5858
63	25*	21,660	165,699
64	32	2,093	16,9533
65	40	0,212	2,01612
66	50	1,453	17,74113
67	80	0,461	8,64375
68	100	0,072	1,62864
	Всього	397,175	1923,96936

	Всього старші 25 років	72,200	434,8245
	Всього по газопроводах	1 444,501	23 902,001
	Всього старші 25 років по газопроводах	380,766	8 847,951
Додаток 2. ГРП, БК ГРП, ШРП, ДКРТ.			
68	ВТВ2-1-3		0
69	ВТВ2-2-3	39	18018
70	ВТВ2-3-3	123	56826
71	ВТВ2-4-3	4624	69360
	Всього	4690	144204
Додаток 3. Газове обладнання, прилади			
72	ВТВ3-1-3	17969	9379,818
73	ВТВ3-1-3*	7885	3292,776
74	ВТВ3-2-3	2927	1501,551
75	ВТВ3-2-3*	504	206,8416
76	ВТВ3-3-3	20170	78663
77	ВТВ3-3-3*	17128	53439,36
	Всього		146 483,347
	Всього по УЕГГ		314 589,348
		в звіт	314 589

Головний інженер УЕГГ



Т.І.Гедзик