

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Витвицький Андрій Зіновійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.396

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення та метрологічний аналіз удосконаленої системи контролю герметичності магістрального трубопроводу

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175 Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

А.З. Витвицький

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Лютак Зеновій .Петрович, к.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

В.С.Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

М.А. Кононенко

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ

2025

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу** \_\_\_\_\_  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут \_\_\_\_\_ інформаційних технологій \_\_\_\_\_

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій \_\_\_\_\_

Освітній рівень магістр \_\_\_\_\_

Спеціальність 175 інформаційно-вимірювальні технології \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** ІВТ \_\_\_\_\_

Цих В.С.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**  
Витвицькому Андрію Зіновійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та метрологічний аналіз удосконаленої системи контролю герметичності магістрального трубопроводу

Керівник роботи Лютак Зеновій Петрович , к.т.н., проф. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом закладу вищої освіти від "15.12" 2023 року № 734/7.

Строк подання студентом роботи 21..01.25 \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Діаметр трубопроводу – до 1420 мм, тиск у трубопроводі до 10 МПа

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз існуючих методів та пристроїв для контролю герметичності трубопроводів

2. Розроблення пристрою для контролю герметичності трубопроводів та течешукання

3. Метрологічний аналіз пристрою для контролю герметичності та течешукання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Теоретичне обґрунтування методу пошуку витоку в трубопроводі

Визначення координат витоку

Структурна схема пристрою пошуку витоку

Схема нагромадження похибки

Блок-схема програми процесу роботи пристрою

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормо-контроль	Біліщук В.Б., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз існуючих методів та пристроїв для контролю герметичності трубопроводів	15.10.-1.11.2023р.	
3.	<u>Метрологічний аналіз пристрою для контролю герметичності та течешукання</u>	20.11 – 30.11.2024р.	
4.	Висновки по роботі	31.11-30.12.2024р.	
5.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	15.01.-21.01.2025р.	

Студент \_\_\_\_\_ **Витвицький А.З.**  
 ( підпис ) ( прізвище та ініціали )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ **Лютак З.П.**  
 ( підпис ) ( прізвище та ініціали )

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота : 63 с., 7 рис., 1табл. , 20 джерел, 5 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – процеси, які мають місце при протіканні речовини (рідини чи газу) по трубопроводу з можливістю визначення місця витіку.

Мета роботи – розроблення пристрою для контролю герметичності магістральних трубопроводів і контролю наявності та місця витіку.

Метод дослідження – математичне моделювання процесу перенесення речовини по трубопроводі при наявності витіку.

Розроблено математичну модель процесу речовини по трубопроводі без витіку та при його наявності в залежності від місця розміщення витіку. Розроблено конструкцію контролю пристрою та програмне забезпечення його роботи.. Проведено метрологічний аналіз пристрою, проаналізовано вплив факторів на процес контролю, розроблено схему нагромадження похибок..

**КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГІСТРАЛЬНІ ТРУБОПРОВОДИ, ВИТІК, ТЕЧОШУКАННЯ , КОРІОЛІСОВЕ ПРИСКОРЕННЯ, ПОХИБКА.**

## ABSTRACT

Master's thesis: 61p., 7 figures, 1 tables, 20 sources, 5 sheets of drawings.

The object of research is the processes that take place when a substance (liquid or gas) flows through a pipeline with the possibility of determining the location of the leak.

The purpose of the work is to develop a device for monitoring the tightness of main pipelines and monitoring the presence and location of leaks.

The research method is mathematical modeling of the process of substance transfer through the pipeline in the presence of a leak.

A mathematical model of the process of the substance through the pipeline without a leak and with its presence, depending on the location of the leak, has been developed. The design of the device control and the software for its operation were developed. The metrological analysis of the device was carried out, the influence of factors on the control process was analyzed, and the error accumulation scheme was developed.

**KEY WORDS: MAIN PIPELINES, LEAKAGE, LEAK SEARCH, CORIOLIS ACCELERATION, ERROR.**

## ЗМІСТ

	Ст
Вступ	7
1 Аналіз існуючих методів та пристроїв для контролю герметичності трубопроводів	10
1.1 Види магістральних трубопроводів і аналіз складності їх контролю	10
1.2 Аналіз методів пошуку витоків	14
1.3 Аналіз способів і пристроїв для реалізації пошуку витоків	18
1.4 Постановка задачі магістерської роботи	24
2 Розроблення системи контролю герметичності	26
2.1 Розроблення математичної моделі процесу руху речовини по трубопроводі високого тиску при наявності витоку	26
2.2 Аналіз процесів визначення місця витоку у трубопроводі	37
2.3 Розроблення та опис структурної і функціональної схеми	39
2.4 Вибір типу та опис конструкції давача	41
2.5 Розроблення програмного забезпечення процесу роботи системи в автоматизованому режимі	48
2.6 Висновки до розділу	51
3 Метрологічний аналіз системи контролю герметичності та течешування	52
3.1 Аналіз факторів впливу на похибку вимірювання	52
3.2 Розрахунок похибки вимірювання	55
3.3 Висновки до розділу	57

Висновки	59
Перелік літературних джерел	60
Бібліографічна довідка	62

## ВСТУП

На даний час сучасна наука і техніка постійно пов'язана із необхідністю забезпечення герметизації різноманітних об'єктів. Герметичність – це властивість виробів, котра виключає проникнення газоподібних або рідких речовин через оболонки різноманітних виробів. Ця властивість є однією із найважливіших показників якості виробів, котрі підлягають герметизації.

Однією із проблемних галузей, де необхідно не тільки забезпечувати герметичність, але й визначати місця витoku є нафтогазова промисловість, особливо системи перекачування нафти і газу магістральними трубопроводами, тобто транспортування цих продуктів на дальні відстані. Магістральний трубопровід включає споруди з підготовки середовища, що транспортується, насосні (компресорні) і газорозподільні станції, лінійні частини [1].

До магістральних трубопроводів відносяться трубопроводи і відгалуження (відведення) від них діаметром до 1420 мм з тиском продукту, що транспортується не вище 10 МПа [2].

Магістральні трубопроводи призначені для транспортування природного газу або нафтового вуглеводневого газу, зріджених вуглеводневих газів (пропану, бутану і їх сумішей), нафти з районів видобутку (від головних перекачувальних насосних станцій) до місць використання, нафтопродуктів від місць їх виробництва (нафтопереробних заводів) до місць використання (нафтобаз, перевалочних баз, пунктів наливання, окремих промислових підприємств і портів); товарної продукції в межах головних і проміжних газокомпресорних, нафто- і нафтопродуктоперекачувальних насосних станцій, станцій підземного зберігання газу, газорозподільних станцій, вимірювальних пунктів [1].

Тому є велика необхідність забезпечувати герметичність магістральних трубопроводів та виявляти місця витоків у них. Незважаючи на значну кількість різноманітних розробок, на даний час є велика потреба у створенні удосконалених та нових методів і способів для визначення місця витoku нафто- і газопродуктів у магістральних трубопроводах, які давали б можливість протягом нетривалого часу від моменту виникнення витoku дистанційно проводити контроль і визначати координати місця витoku для оперативної ліквідації течі.

Тому **метою даної роботи** є розроблення системи для контролю герметичності магістральних трубопроводів і контролю наявності та місця витoku та оперативної його ліквідації.

**Об'єктом дослідження** є процеси, які мають місце при протіканні речовини (рідини чи газу) по трубопроводу з можливістю визначення місця витoku.

**Предметом дослідження** є герметичність трубопроводу.

**Основним методом дослідження** є математичне моделювання процесу перенесення речовини по трубопроводі при наявності витoku.

**Наукова новизна** роботи полягає у наступному.

1. Вперше проаналізовані особливості задач визначення наявності та місця витoku в залежності від різних видів призначень магістральних трубопроводів

2. На основі аналізу різних методів контролю обґрунтовано доцільність розроблення удосконаленого методу, ґрунтованому на використанні коріюлісових витратомірів

3 Вперше на основі теоретичного аналізу процесів, які мають місце при транспортуванні нафто- газопродуктів, обґрунтовано доцільність розроблення системи на основі коріюлісового витратоміра.

**Практична цінність** роботи визначається наступними положеннями:

1. Розроблена конструкція системи для контролю герметичності трубопроводу та визначення місця витіку, а також визначені конструктивні особливості основних вузлів пристрою

2. Розроблена методика проведення контролю при використанні розробленої системи.

3. Проведено метрологічний аналіз розробленої системи, який підтвердив високу достовірність контролю

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ

## 1.1 Види магістральних трубопроводів і аналіз складності їх контролю

Основні втрати нафто- і газопродуктів відбуваються саме у магістральних трубопроводах. Тому потрібно основну увагу приділити для контролю герметичності і течешукання в першу чергу на цій ділянці подорожі нафтогазо продуктів від видобутку до споживача.

Магістральні трубопроводи залежно від умовного діаметру підрозділяються на чотири класи [2]:

від 1000 до 1400 мм;

від 500 до 1000 мм;

від 300 до 500 мм;

менш 300 мм.

Магістральні трубопроводи, як правило, прокладають під землею. У виняткових випадках трубопроводи можуть бути прокладені по поверхні землі в насипі (наземний) або на опорах (надземний). Такі прокладки допускаються в пустелях, горах, болотах, на вічномерзлих і нестійких ґрунтах, на переходах через природні і штучні перешкоди.

Прокладка трубопроводу здійснюється одиночно або у складі паралельних трубопроводів в загальному технічному коридорі. Число ниток в технічному коридорі регламентується граничною кількістю сумарного об'єму продукту, що транспортується.

Глибина залягання трубопроводу (від верху труби) залежить від діаметру, характеристик ґрунтів місцевості і повинна бути не менше [3]:

- при умовному діаметрі від 0,8 м — 1 м;
- при умовному діаметрі 1 м і більш;
- на болотах і торф'яних ґрунтах підлягаючих осушенню— 1,1 м;
- у піщаних барханах (вважаючи від міжбарханних западин)— 1 м;
- у скельних ґрунтах, болотистій місцевості за відсутності проїзду автотранспорту і сільськогосподарських машин— 0,6 м;
- на орних і зрошуваних землях— 1 м;
- при перетині штучних каналів (від дна каналів)— 1,1 м;

Основними причинами і місцями витоків є наслідок довгої експлуатації магістральних трубопроводів, у яких виникають несучільності, через які відбуваються великі втрати нафто- і газопродуктів. А також сьогодні багато людей вдаються до несанкціонованого відбору нафто- і газопродуктів, що завдає великих збитків нашій державі. Місцями значних витоків у трубопроводі є стикові з'єднання, місця встановлення засувок, розгалужень. Часто несучільності вникають у місцях механічних напружень, які виникають внаслідок просідання ґрунтів, зсувів, селів чи інших факторів геологічного походження. З цих причин кожного року Україна втрачає від 2,5 до 4 млн. м<sup>3</sup> газу.[3] Тому задача визначення місць витоків і несанкціонованого відбору є однією із глобальніших проблем у нашій державі.

Відповідальність об'єктів, що герметизуються, їх висока вартість, економічні втрати при масовому випуску, залежність їх працездатності, від якості герметизації визначають значущість правильного організованого контролю герметичності. Відповідно ГОСТ 18353-79 відносить контроль герметичності до числа основних видів неруйнівного контролю.

Особливості контролю герметичності в порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю пов'язані з виявленням дефектів, які називають течєю. Відповідно техніка контролю герметичності носить назву техніки течешування.

Теча виявляється шляхом реєстрації перетікаючих через них речовин, званих пробними речовинами.

Кількісною оцінкою натікання (через течу) служить потік пробної речовини в об'ємі приладу або установки в процесі проведення перевірки на герметичність [4]. Причому прийнято розрізняти дві технологічні операції: перевірку об'єкту на герметичність і пошук місця течі (течешукання).

Залежно від агрегатного стану вживаної пробної речовини всі методи розподіляються на групи газових і рідинних. Рідинні методи, як правило, не вимагають застосування спеціальної апаратури. Газоподібні пробні речовини виявляються за допомогою газоаналітичної апаратури. В деяких випадках як пробні речовини використовується робоча речовина. При цьому підбирається відповідний метод течешукання, що забезпечує економічність і зручність контролю. Наприклад, вузли і устаткування холодильної промисловості, у тому числі і побутові холодильники, контролюються галогеновим методом із застосуванням галогенових течошукачів, здатних реєструвати витoki фреону.

Оскільки забезпечити абсолютно герметичність є неможливим, тому ключовою характеристикою є здатність забезпечувати таке мале натікання всередину об'єму, що ним можна знехтувати в робочих умовах це і називається герметичністю.

Внаслідок малих розмірів перерізу і неоднорідностей хаотичного розташування по довжині каналів, через які відбувається теча, а також залежності величини течі від властивостей пробних речовин, різниці тисків між внутрішнім і зовнішнім середовищем і інших фізичних факторів кількісно величину течі прийнято визначати величиною витоків пробної речовини. Відповідно і за величиною витоків виражається поріг чутливості течошукуючих приладів і їх методів, а також діапазон вимірювання.

Величини витoku вимірюють у одиницях системи СІ [5]:  $\frac{m^3 \cdot Pa}{c}$ ;

та таких додаткових:  $\frac{l \cdot \text{мм.рт.ст.}}{c}$ ;  $\frac{l \cdot \text{мбар}}{c}$ ;  $\frac{l \cdot \text{мм.рт.ст.}}{c}$

Герметичність об'єкту є якісним показником. Операція пошуку місця течі дозволяє визначити місце порушення герметичності для подальшого його усунення.

Для здійснення даних операцій розроблена велика кількість приладів для відшукування течі, а також методів і способів оцінки герметичності. При цьому слід зазначити, що окремі методи течешукання можуть бути реалізовані за допомогою різних приладів і навіть без них і, відповідно, за допомогою одного і того ж приладу можна реалізувати декілька методів. Під способом течешукання розумітимемо конкретні технологічні прийоми або «стратегії» пошуку течі і оцінки герметичності.

Все різноманіття методів течешукання можна умовно розділити на дві групи - за характером і способом введення пробної речовини [6]:

- методи опресовування;
- вакууметричні;
- люмінесцентні;
- плазмені;
- іскрові.

За способом контролю пробної речовини розрізняють:

- газові теплові;
- манометричні;
- мас-спектрометричні;
- акустичні;
- хімічні;
- сенсорні (напівпровідникові, п'єзокварцеві, оптичні та інші).

Як пробні речовини використовують різні гази, газову плазму, а також рідини. З газів найширше застосування знайшли гелій, аргон, галогеномістні гази, водень, повітря, неон, а з рідин - спирт, ацетон, ефіри.

У більшості випадків перед проведенням контролю на герметичність, проводять очищення поверхні. Цей процес включає в себе механічну очистку, знежирювання і видалення рідин із несучільностей. Для знежирювання поверхні чи очистка від речовин (нафтові плями, залишки в об'єкті контролю технічної оливи то що) використовують різного роду розчинники. При очистці каналів несучільності використовують такі способи: витримка у звичайних умовах, кнвективна, температурна, термовакуумна, одностороннє вакуумування, і їх комбінації.

У методах опресовування пробний газ під тиском подається або у внутрішню порожнину обстежуваного об'єкту, або всередину камери, в яку його поміщають. При цьому газочутливий давач може знаходитися із зовнішньої сторони об'єкту або приєднуватися до його внутрішньої порожнини. Способи вимірювання потоків проникаючого через течу пробного газу можуть бути найрізноманітніші: від простих - бульбашкових - до складних - масс-спектрометричних.

## **1.2 Аналіз методів пошуку витоків**

Вакууметричні методи основані на вимірюванні тиску залишкового середовища або окремих компонентів (пробних газів) у вакуумованому об'ємі [6]. У простому випадку для цієї мети служать різні манометричні давачі, якими комплектуються стандартні вакуумметри: теплові, іонізаційні, магнітні електророзрядні, мембранні. Найчастіше використовують ті, які входять до складу обстежуваного вакуумного поста. У складніших випадках до вакуумної системи відкачуючих постів підключають датчики, що входять до складу

спеціальних приладів (течошукачів): гелієві, водневі, галогенові, гелієві мас-спектрометричні. Застосування зовнішнього по відношенню до об'єкту, що перевіряється, приладу може бути виправдане тільки в тому випадку, якщо шукана теча менше, ніж чутливість штатного засобу вимірювання.

Люмінесцентний метод оснований на свіченні люмінофорів, проникаючих в пори матеріалів при їх нанесенні на обстежувані поверхні. Метод володіє достатньо високою чутливістю, проте має обмежену область застосування - відкриті поверхні і шви трубопроводів.

Плазмові методи - відносно новий і перспективний напрям в течешукуванні. Робота течешукачів плазмового типу основана на зміні параметрів порушеної в газовому середовищі плазми при проникненні в прилад пробної речовини. У Росії випускаються вакуумметри вказаного типу: ТПЗ - із зовнішньою відкачуючою системою і ТП4 - з вбудованою відкачуючою системою. На жаль, як пробний газ в цих приладах використовують: елегаз (SF<sub>6</sub>), фреони і інші електронегативні гази. Ці гази мало підходять для контролю герметичності відкачуючих постів нафтогазопромисловості.

Іскровий метод пошуку течі оснований на виникненні іскри в наслідок проникнення газу у зовнішнє середовище і контакту його із електродом високовольтного трансформатора. Проте при контролі скляної оболонки з інертним газом за допомогою іскрового течешукача можна порушити в ній високочастотний газовий розряд, за кольором якого судять про наявність домішок в газовому середовищі. Тобто за допомогою іскрового течешукача можна реалізувати плазмовий метод з візуальним контролем герметичності за кольором розряду. Використовуючи краплинний метод нанесення пробної рідини на місце передбачуваного дефекту, можна за зміну кольору розряду знайти місце течі навіть в металевих конструкція. Причому чутливість цього способу вища, ніж у разі стандартного іскрового методу.

Акустичний метод визначенні місця течі полягає у реєстрації акустичних хвиль акустичним датчиком, які виникають в наслідок витоку газу чи рідини під тиском через нещільності в об'єкті контролю [7]. Основною особливістю і перевагою цього методу є можливість контролювати надземні трубопроводи і реєструвати наявності витоку на віддалі до 300 м від місця течі. Чутливість даного методу:  $10^{-4} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$ .

Радіаційний метод полягає на індикації малих кількостей радіоактивних газів чи речовин за їхнім радіоактивним випромінюванням. Вибір джерела випромінювання залежить від енергії випромінювання і періоду піврозпаду застосовуючих речовин. Спочатку об'єкт контролю піддають опресуванню, після певної витримки починають визначати місця витоку за допомогою газорозрядних чи сцинтиляційних лічильників. Найчастіше використовують радіоактивний криптон-85 або радон-222, інколи використовують в якості пробних речовин вуглекислий газ із вмістом радіоактивних вуглеводневих, або рідини які містять радіоактивні ізотопи натрію чи йоду.

Чутливість контролю становить  $10^{-14}$ - $10^{-17} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$ . Метод застосовують для контролю виробів атомної енергетики.

Хімічний метод полягає у реєстрації через течу речовин по ефекту хімічних реакцій на щупі з індикаторним покриттям. Даний метод ефективно застосовують для контролю зварних з'єднань посудин і елементів гідравлічних і газових систем, які знаходяться під тиском. Найчастіше як пробну речовину використовують аміак з повітрям чи азотом. Індикаторні речовини розчиняють у воді, гліцерині чи спирті, пропитують цим розчином папір чи тканину і поміщають її на поверхню контролюючого об'єкту. Чутливість даного методу:  $10^{-9} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$ .

Електрозахоплюючий метод реєструє перетікання через місця витоків електронегативних пробних речовин, схильних до утворення негативних іонів, за зміною струму розряду. Реєстрацію витоків проводять щупом або обдуваом. У першому випадку проводять контроль об'єктів, які знаходяться під надлишковим тиском електронегативних пробних речовин. Чутливість даного методу:  $10^{-10} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$ .

Катарометричний метод полягає в реєстрації проникаючих через витoki речовин, теплопровідність яких є відмінною від теплопровідності повітря. Використовується для перевірки герметичності виробів, які заповнені газом під тиском, теплопровідність якого є відмінною від теплопровідності повітря. Індикатором виступає щуп. Чутливість даного методу:  $10^{-9} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$  [8]/

Манометричним методом реєструють зміну тиску в системі випробувань в результаті перетікання проникаючих речовин через витoki. Розділяють два підтипи даного методу: камерний і безкамерний. Використовується для перевірки об'єктів які знаходяться під надлишковим тиском. Чутливість даного методу:  $10^{-6} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$  [8].

Галогенний метод використовується для контролю об'єктів опресованих із середини галогеномісткими речовинами, при цьому реєструється збільшення емісії позитивних іонів з розігрітої металевої поверхні при попаданні на неї галогенів [4]. Реєстрація проводиться щупом. Чутливість даного методу:  $10^{-7} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$ .

Ахроматичний метод полягає у реєстрації контрастності ахроматичного сліду, який утворюється проникаючими речовинами, на фоні поверхні контрольованого об'єкту у видимому випромінюванні світла. Реалізовується

даний метод з використанням різних спеціальних покриттів. Застосовується для контролю зварних з'єднань. Чутливість даного методу:  $10^{-4} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$  [8].

### 1.3 Аналіз способів і пристроїв реалізації методів пошуку витоків

Вище подані методи реалізуються різними способами. Але є класичні способи, які пояснюють метод проведення контролю.

Для проведення контролю на герметичність трубопроводу манометричним методом, використовуються наступні три способи [9].:

- спосіб падіння тиску;
- спосіб наростання тиску;
- спосіб диференційного манометру.

Спосіб падіння тиску. Спочатку проводять опресування об'єкту контролю впродовж певного заданого часу. Після цього встановлюють тиск випробування і витримують певний час. Далі за відповідними формулами, маючи значення різниці тисків і час падіння тиску обчислюють рівень герметичності об'єкту контролю. Схема контролю за способом падіння тиску наведена на рис. 1.1.

Найчастіше цей спосіб використовують для об'єктів, які працюють під тиском, що дає змогу його не відключати від роботи

Спосіб наростання тиску. Використовується для контролю вакуумних систем, які мають особисті системи відкачування і вимірювання тиску. Для визначення сумарного потоку натікання випробовуючу систему оснащують засобами відкачування у певних ділянках об'єкту і будують криву зміни тиску в часі. Теоретично виділяють три види натікання: сильне натікання, натікання із газовиділенням із стінок об'єкту контролю, відсутність натікання. В більшості випадків зустрічається натікання з газовиділенням. При контролі

використовують як рідкі так і газоподібні контролюючі речовини, проте більш ефективний контроль при використанні рідин.

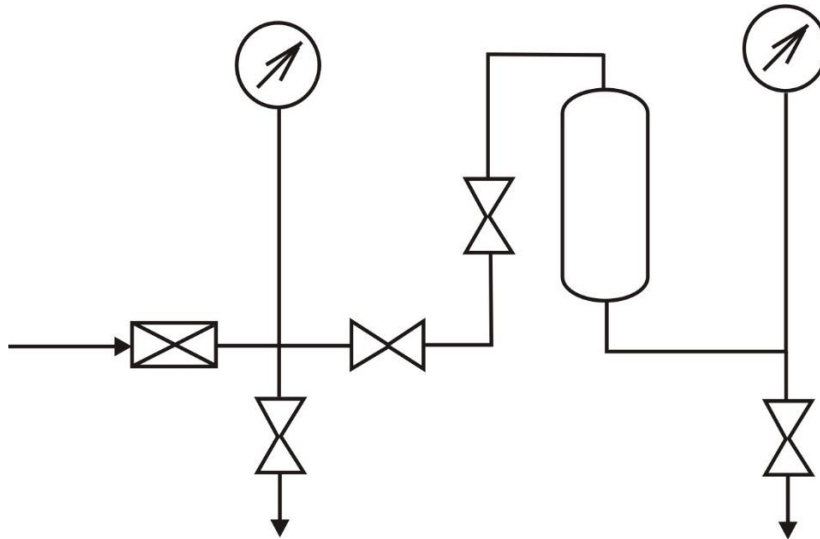


Рисунок 1.1— Схема манометричного контролю по методу падіння тиску

Спосіб диференціального манометра. Спосіб включення диференційного манометра у контролюючу систему зображено на рис. 1.2. Даний спосіб використовується для визначення локальних місць витоків у вакуумних, газових і гідравлічних системах. Виріб чи конкретне місце контролюючого виробу ззовні обдувають пробним газом, або обприскуюють пробною рідиною (ефір, бензин, ацетон). Перед контролем у виробі створюють вакуум. Даний спосіб дає змогу досягнути чутливості контролю до  $10^{-11} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$ .

Бульбашковий метод контролю реалізується такими способами [7]:

- пневматичний спосіб;
- вакуумний спосіб;
- пневмогідравлічний.

Пневматичний спосіб визначення герметичності трубопроводу, застосовується при контролі зварних, паяних і інших типів замкнутих чи відкритих конструкцій. В якості контрольних речовин використовують повітря або азот. Контроль проводиться опресуванням стиснутим повітрям з обмазкою контролюючих ділянок піноутворюючими речовинами. Чутливість контролю при використанні води не більше  $10^{-6} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$ , а при використанні спирту становить  $5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$ .

Вакуумний спосіб є різновидністю пневматичного методу із використанням піноутворюючих речовин. Його застосовують при односторонньому доступі до контрольованого об'єкту. На поверхні об'єкту контролю встановлюють вакуумну камеру (рис. 1.3), і створюють від'ємний перепад тиску. Спостереження утворення бульбашок проводиться через спеціальне вікно.

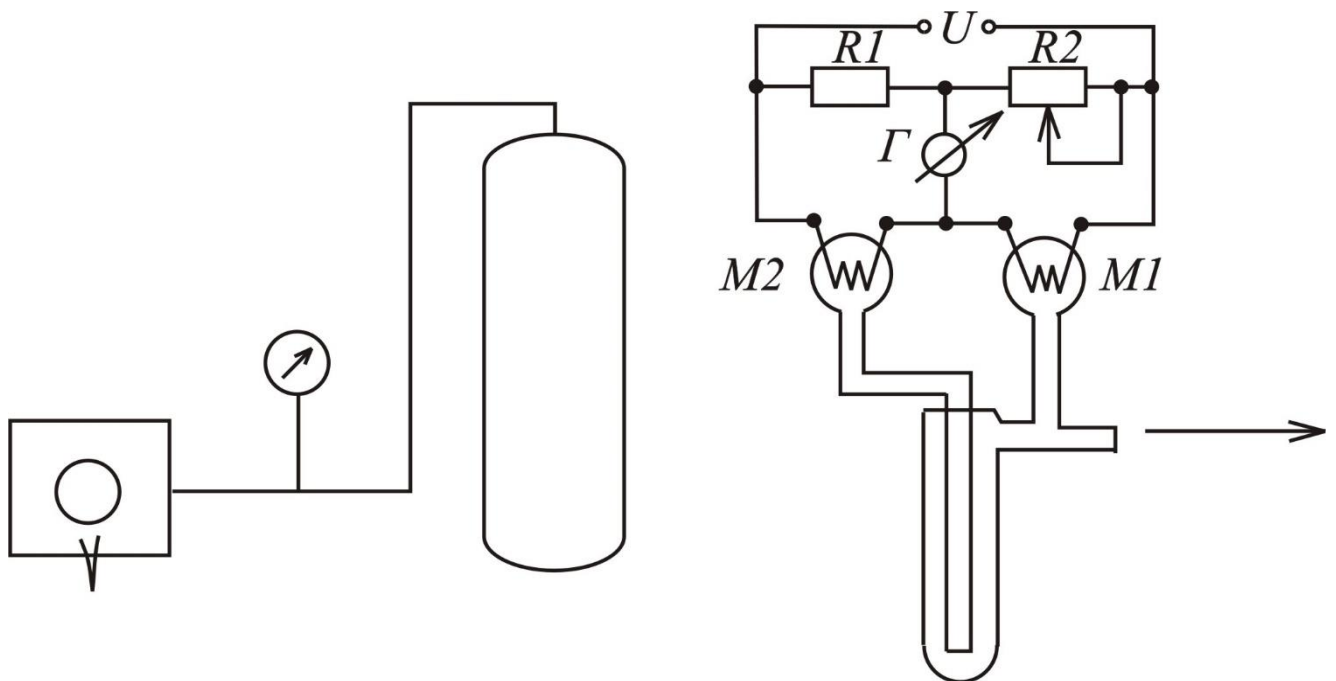


Рисунок 1.2— Диференціальний манометр

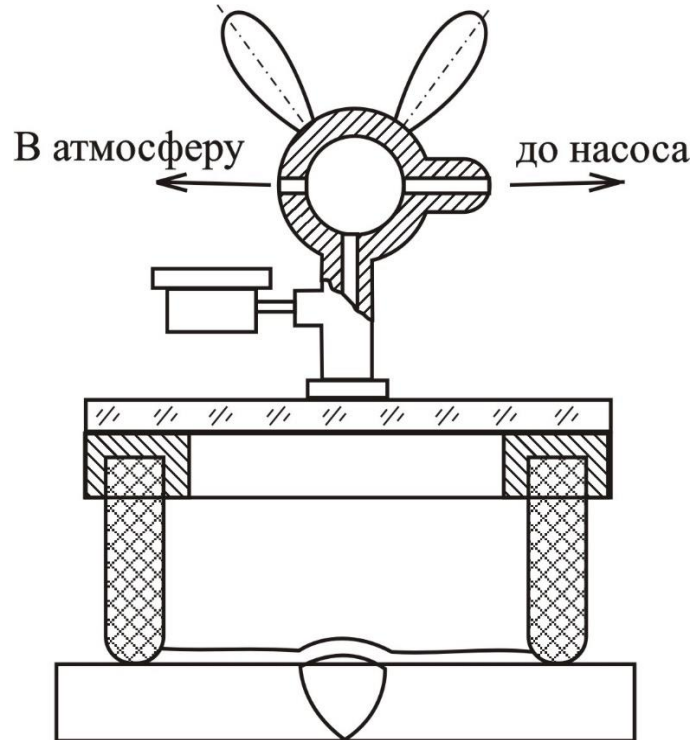


Рисунок 1.3— Схема контролю зварного з'єднання вакуумним методом

Контроль на герметичність вакуумним способом можна проводити при температурах до  $-35^{\circ}\text{C}$ . Якщо у пробний розчин додати гліцерин, то робоча температура досягає  $-50^{\circ}\text{C}$ . Для підвищення чутливості контролю у емульсійні розчини часто додають поверхнево активні речовини [6].

При використанні водних розчинів піноутворюючих речовин, огляд контрольованої поверхні проводять безпосередньо після нанесення розчину, а при використанні гліцеринових розчинів огляд проводять двічі: через 3-5 хв. і через 20-30 хв. Піноутворюючі речовини наносять пензлем або спеціальним пістолетом. Чутливість даного способу контролю залежить від часу витримки, її оцінюють за розміром бульбашок повітря при заданому тиску випробувань.

Середня чутливість вакуумного методу становить  $10^{-6} - 10^{-7} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}}$

Пневмогідралічний спосіб. Його використовують для контролю зварних, паяних, клепаєних і інших замкнених конструкцій невеликих розмірів. У виріб подають під тиском пробну речовину (повітря чи азот) і занурюють об'єкт контролю у рідину (воду або спирт). Розрізняють способи акваріума і бароакваріума.

При використанні способу акваріума в об'єкті контролю створюють надлишковий тиск і занурюють його у рідину на глибину 3-5 см, а при використанні бароакваріума— в об'єкті контролю створюють вакуум. Чутливість контролю такого способу залежить від багатьох показників, зокрема глибини занурення, надлишкового тиску, чи рівня вакууму, властивостей рідини, в яку занурюють об'єкт контролю.

Газоаналітичний метод реалізується за допомогою щупу спеціальної форми, який виготовлений виключно із міді для виключення впливу зовнішнього теплового поля на чутливі елементи, виготовлені із тонких платинових, чи платинородійових ниток. Ці нитки включаються у мостову схему (рис. 1.4). Міст спочатку балансують пропускаючи через обидва канали приймача повітря. При проведенні контролю один із каналів щупу заповнюється газом, який витікає з об'єкту контролю, внаслідок цього одна із ниток більше охолоджується і міст розбалансовується— відбувається реєстрація витоку.

Чутливість даного методу залежить від виду робочого газу і швидкості переміщення щупа над поверхнею об'єкту контролю.

Галогенний спосіб є найпростішим методом контролю серед газоелектричних методів. Схема пристрою перетворювача показана на рис.1.5. Нагріваючий пристрій забезпечує нагрів платинового анода-емітера до 800-900 °С. Іони, які утворились при попаданні галогеномісткого газу, осідають на колекторі іонів і їх реєструють міліамперметром. Каталізатором реакції виступає кисень повітря. Галогенний метод використовується для контролю великих ємностей, трубопроводів з діаметром малого перерізу, і виробів із яких

немає можливості відкачати газ. Для налаштування роботи пристрою використовують еталонний газ— гексахлоретан, який забезпечує потік  $10^{-7} \frac{м^3 \cdot Па}{с}$ . Прилад, який оснащений виносним щупом, може працювати неперервно в продовж 8 годин.

Галогенний течношукач можна застосовувати при температурах навколишнього середовища до  $35-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості повітря 80%. При роботі течношукач може суттєво втратити чутливість (так зване «отруєння») внаслідок попадання надто великої кількості галогенного газу у чутливі елементи. Чутливість відновлюють, пропускаючи через нагрітий перетворювач чисте повітря.

Контроль галогенним методом виконують способом щупів або вакуумуванням. Установка для контролю методом щупів наведена на рис.1.6

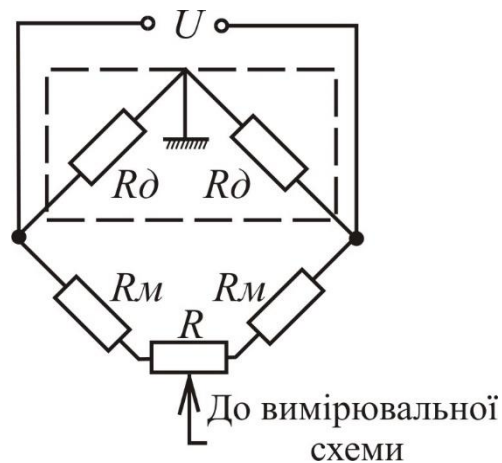


Рисунок 1.4— Схема включення перетворювача катарометричного течношукача

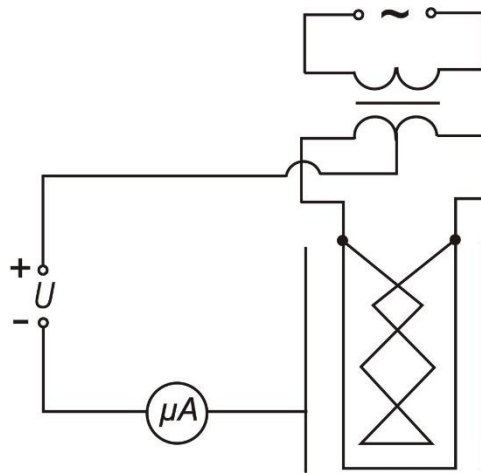


Рисунок 1.5— Перетворювач галогенного течешукача

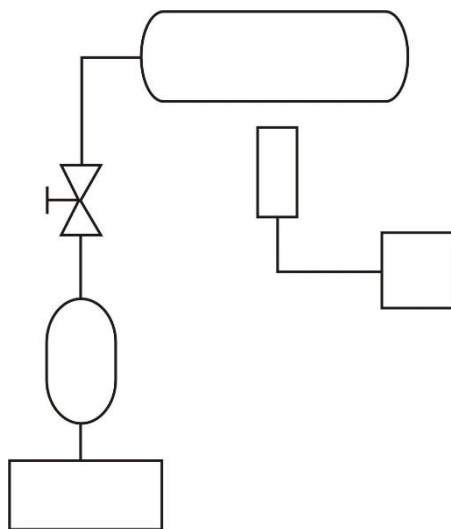


Рисунок 1.6— Схема контролю галогенним течешукачем методом щупа

#### 1.4 Постановка задачі магістерської роботи

Хоча на даний час існує велика різноманітність методів контролю герметичності і визначення місць витоку, все ж таки дана галузь неруйнівного контролю залишається проблемною. Адже ні один із методів, крім акустичного, не може задовольнити поставлені вимоги для контролю магістральних трубопроводів.

Тому є і надалі потреба у розроблюванні нових методів для контролю герметичності і визначення місць витoku у магістральних трубопроводах. Ці методи повинні відповідати поставленим вимогам відносно швидкості фіксування наявності течі, можливості проведення контролю дистанційно у трубопроводів підземного і наземного типу, для різних перекачувальних середовищ, і економічності.

Тому в даній магістерській роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Теоретично обґрунтувати можливість визначення місця зосередженого відбору за зміною витрати на початку і в кінці досліджуваної ділянки. Для цього розробити математичну модель процесу руху речовини по трубопроводі при наявності течі в залежності від її координат.

2. Розробити конструкцію пристрою для реалізації розробленого методу. Для цього розробити структурну схему системи контролю наявності течі та вимірювання її координат.

3. Розробити конструкцію приймального пристрою системи як одного з основних елементів, які впливають на характеристики системи. Проаналізувати можливі види конструкцій та вибрати найбільш прийнятну на сучасній елементній базі.

4. Обґрунтувати вимоги до характеристик лічильників витратомірів які входять в систему, за критеріями забезпечення необхідної чутливості, надійності точності та вимірювання витрати як рідин так і газів. Розробити конструкцію лічильника витратоміра.

5. Розробити програму роботи мікроконтролера для забезпечення керування роботою всієї системи.

6. Здійснити метрологічний аналіз розробленої системи, проаналізувати фактори впливу на точність вимірювання та розрахувати сумарну похибку.

## **2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ**

Розробка пристрою передбачає теоретичний аналіз процесу руху речовини по трубопроводі для визначення залежності між параметрами потоку і параметрами трубопроводу. Також у даному розділі подано опис конструкції розробленого пристрою.

### **2.1 Розроблення математичної моделі процесу руху речовини по трубопроводі високого тиску при наявності витоку**

Невстановлений рух газу чи нафти в трубопроводах зазвичай виникає внаслідок нерівномірного відбору в часі споживачем, нерівномірної подачі продукту в трубопровід, несанкціонованих врізок, включенням і відключенням компресорів, тощо. В процесі роботи трубопроводу виникнення аварійних витоків додатково впливає на характер руху продукту. При цьому відбувається накладання впливів різних факторів на цей процес, що не дає можливості конкретно визначити причину зміни характеру руху [8].

Для швидкого виявлення витоків (чи несанкціонованого відбору) в трубопроводі, потрібно вміти виділяти характер впливу саме аварійної чи внаслідок несанкціонованого відбору течії в трубопроводі, із великої кількості факторів, які є причиною невстановленого процесу.

В зв'язку з цим виникає задача дослідження невстановленого процесу в трубопроводі, який виникає з двох причин 1) викликаного технологічними факторами; 2) через виникнення аварійних витоків чи внаслідок несанкціонованого відбору.

Вплив вище перелічених факторів можна врахувати в диференційному рівнянні руху рідини по трубопроводі. Тоді ще невстановлений процес руху по складному розгалуженому трубопроводі можна описати одним рівнянням. Якщо кількість зосереджених відборів вздовж трубопроводу є досить великою, то в частковому випадку їх можна замінити розподіленим відбором продукту по довжині трубопроводу, що додатково спрощує задачу дослідження.

Складемо диференційне рівняння для опису нестационарного процесу в трубопроводі з неперервно розподіленим по довжині відбором продукту, який залежить від відстані і змінюється в часі [9]. Діаметр трубопроводу  $D$  приймаємо постійним по всій довжині. Візьмемо довільну кінцеву ділянку трубопроводу від  $x_1$  до  $x_2$ . На цій ділянці перепад тиску буде змінним в часі. Він визначається втратами на тертя, інерційними опорами і різницею горизонтальних рівнів трубопроводу на кінцях досліджуваної ділянки (в точках з координатами  $x_1$  та  $x_2$ ). В зв'язку з цим можемо записати [9]

$$P(x_1, t) - P(x_2, t) = \int_{x_1}^{x_2} \lambda \frac{\omega^2 \rho}{2D} dx + \int_{x_1}^{x_2} \rho \bar{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2} \right) dx + \int_{x_1}^{x_2} \rho g \frac{\partial z}{\partial x} dx + \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} dx, \quad (2.1)$$

де  $\bar{\alpha} = 1 + \bar{\beta}$ ,  $\bar{\beta}$  — поправка Коріоліса на нерівномірний розподіл швидкостей в перерізі.

Різницю тисків на даній ділянці трубопроводу можна визначити також шляхом сумування перепадів в кожній точці трубопроводу:

$$P(x_1, t) - P(x_2, t) = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (2.2)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (2.1) та (2.2) отримаємо:

$$- \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial P}{\partial x} dx = \int_{x_1}^{x_2} \lambda \frac{\omega^2 \rho}{2D} dx + \int_{x_1}^{x_2} \rho \bar{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2} \right) dx + \int_{x_1}^{x_2} \rho g \frac{\partial z}{\partial x} dx + \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} dx \quad (2.3)$$

або

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[ \frac{\partial P}{\partial x} + \lambda \frac{\omega^2 \rho}{2D} + \rho \bar{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2} \right) + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} \right] dx = 0 \quad (2.4)$$

В силу довільно вибраної ділянки підінтегральна функція в рівнянні (2.4) повинна бути рівною нулю. Таким чином, отримаємо рівняння руху речовини в трубопроводі:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \bar{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2} \right) + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda \omega}{2D} \omega \rho + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

Перший доданок рівняння (2.5) є градієнт тиску по довжині трубопроводу, другий — характеризує інерційний опір, який виникає внаслідок зміни лінійної швидкості руху середовища по довжині трубопроводу, третій — втрати на подолання різниць рівнів по горизонталі, четвертий — втрати на тертя в трубопроводі; п'ятий доданок характеризує втрати на подолання інерції потоку, яка виникає внаслідок зміни масової швидкості речовини в розглядуваному перерізі трубопроводу в часі.

Для виведення рівняння балансу (нерозривності) розглянемо зміну кількості рідини чи газу на даній ділянці. Різниця кількості речовини  $M(x, t)$ , яка протікає через кінці довільної ділянки  $(x_2 x_1)$  [10],

$$M(x_1, t) - M(x_2, t) = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial M}{\partial x} dx \quad (2.6)$$

або

$$M(x_1, t) - M(x_2, t) = -F \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x} dx \quad (2.7)$$

Ця різниця і відповідає зміні кількості речовини внаслідок її підкачування чи відбору

$$M(x_1, t) - M(x_2, t) = -F \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \pm \int_{x_1}^{x_2} m(x, t) dx \quad (2.8)$$

Прирівнявши праві частини останніх виразів отримаємо

$$-F \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x} dx = -F \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \pm \int_{x_1}^{x_2} m(x, t) dx \quad (2.9)$$

або

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[ F \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} + F \frac{\partial\rho}{\partial t} \pm m(x,t) \right] dx = 0 \quad (2.10)$$

Внаслідок довільного вибору ділянки маємо  $\partial(\rho\omega)/\partial x + \partial\rho/\partial t \pm m/F = 0$ . Відбір речовини у загальному випадку залежить від контрольованої ділянки трубопроводу і від часу. Якщо похідну густини від часу замінити виразом  $\partial\rho/\partial t = \partial\rho/\partial P \cdot \partial P/\partial t = 1/c^2 \cdot \partial P/\partial t$ , то рівняння балансу матиме вигляд

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \pm \frac{m(x,t)}{F} = 0 \quad (2.11)$$

Таким чином, для опису нестационарного процесу в трубопроводі з неперервним по довжині відбором речовини отримуємо систему рівнянь руху і балансу (неперервності):

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho\bar{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2} \right) + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda\omega}{2D} \omega\rho + \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \pm \frac{m(x,t)}{F} = 0 \quad (2.13)$$

Плюсовий знак перед  $m(x,t)$  в другому рівнянні системи (2.13) відповідає випадку підкачки, а мінусовий — відбору речовини по довжині трубопроводу. Якщо  $m=0$ , то система (2.13) перетворюється у звичайну систему диференціальних рівнянь, які описують нестационарні процеси у простих трубопроводах.

У довгих трубопроводах і при плавних течах речовини другим і п'ятим доданками рівняння руху, які виражають інерційні властивості потоку, можна знехтувати. Тоді система диференціальних рівнянь прийме вигляд:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda\omega}{2D} \omega\rho = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \pm \frac{m(x,t)}{F} = 0 \quad (2.15)$$

Продиференціюємо перше рівняння (2.14) по  $t$ , а друге (2.15)— по  $x$ , тоді отримаємо:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + g \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\partial z}{\partial x} + 2a \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial^2(\rho\omega)}{\partial x^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t \partial x} \pm \frac{\partial m(x,t)}{F \partial x} = 0 \quad (2.17)$$

де  $2a = \lambda\omega / 2D$ .

Із останніх двох рівнянь отримуємо одне рівняння, яке описує зміну масової витрати речовини:

$$g \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\partial z}{\partial x} + 2a \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} - c^2 \frac{\partial^2(\rho\omega)}{\partial x^2} \pm \frac{c^2}{F} \frac{\partial m}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

Якщо ввести масову витрату речовини в отримане диференціальне рівняння, то воно отримає вигляд:

$$gF \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\partial z}{\partial x} + 2a \frac{\partial M}{\partial t} - c^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \pm c^2 \frac{\partial m}{\partial x} = 0 \quad (2.19)$$

Продиференціювавши рівняння (2.14) по  $x$  і співставивши його з (2.15), отримаємо диференціальне рівняння для опису зміни тиску в трубопроводі при нестационарних режимах руху речовини:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{c^2}{2a} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{c^2}{2a} g \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \pm \frac{c^2}{F} m(x,t) \quad (2.20)$$

У випадку лінійного профілю  $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0$  [10], отримаємо:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{c^2}{2a} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{c^2}{2a} g \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial x} \pm \frac{c^2}{F} m(x,t) \quad (2.21)$$

Помноживши рівняння (2.21) на дріб  $\frac{2a}{c^2}$  і знехтувавши інерційністю потоку можна отримати:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \pm \frac{2a}{F} m(x,t) \quad (2.22)$$

Для визначення тиску і витрати у магістральному трубопроводі при наявності зосередженого відбору чи витоку  $M_m$  в деякій точці  $x=x_l$  потрібно розв'язати систему диференційних рівнянь, яка впливає із (2.22)

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P_1}{\partial t} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P_2}{\partial t} \quad (2.24)$$

Рівняння (2.23) описує процес на першій ділянці (до місця витоку), а рівняння (2.24)— на другій ділянці (після місця витоку) магістрального трубопроводу. В цих рівняннях  $P_1(x,t)$  є функцією розподілу тиску в області  $0 \leq x \leq x_l$ ; а  $P_2(x,t)$  в області  $x_l \leq x \leq l$  ( $l$ — довжина трубопроводу). Так як тиск вздовж трубопроводу повинен бути розподілений неперервно, то при  $x=x_l$ , маємо  $P_1(x,t) = P_2(x,t)$ . Наявність постійного відбору чи витоку в точці  $x=x_l$  враховується в умовах на двох границях досліджуваних ділянок:

$$-\frac{F}{2a} \left( \frac{\partial P_1}{\partial x} - \frac{\partial P_2}{\partial x} \right) = M_m \quad (2.25)$$

Так як  $-\frac{F}{2a} \frac{\partial P_1}{\partial x}$  є масовою витратою в області  $0 \leq x \leq x_l$ , а  $-\frac{F}{2a} \frac{\partial P_2}{\partial x}$  в області  $x_l \leq x \leq l$ , то умова (2.25) означає розрив витрати в точці  $x=x_l$ , причому різниця витрати справа і зліва в точці  $x=x_l$  рівна кількості речовини, яка витікає через місце течі.

Якщо зосереджені відбори чи витоки відбуваються в  $n$  точках, то потрібно розв'язувати систему  $n+1$  рівнянь з відповідними граничними умовами [10]. Таким чином, розв'язок задач для магістральних трубопроводів при наявності зосередженого відбору чи витоку пов'язаний з необхідністю інтегрування системи диференціальних рівнянь в часткових похідних, тобто із дуже громіздким обчисленням.

Тому пропонується розв'язати дану задачу іншим методом, який полягає у тому, що умови в точках відбору чи витоку будуть враховані в самому диференційному рівнянні. Таким чином система диференціальних рівнянь для трубопроводу з будь-яким числом зосередженого відбору буде замінена одним

диференціальним рівнянням для всього трубопроводу. Для цього використовуємо рівняння, коли на ділянці трубопроводу  $x_1x_2$  має місце неперервний відбір, який здійснюється в одному місці (зосереджений відбір) тобто  $m_l = M_m / (x_2 - x_1)$ , де  $M_m$ — загальна кількість газу, яку відбирають на ділянці  $x_1x_2$ . Це рівняння матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aM_m}{F(x_2 - x_1)} [\sigma(x - x_1) - \sigma(x - x_2)] \quad (2.26)$$

Позначивши  $x_2 - x_1 = \Delta x$ , отримаємо:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aM_m}{F} \frac{\sigma(x - x_1) - \sigma[(x - x_2) - \Delta x]}{\Delta x} \quad (2.27)$$

Тепер для отримання диференціального рівняння при наявності зосередженого відбору чи витoku в точці  $x = x_1$  достатньо у формулі (2.27) переходити до границі  $x_2 \rightarrow x_1$ , тобто  $\Delta x \rightarrow 0$ .

Оскільки

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sigma(x - x_1) - \sigma[(x - x_2) - \Delta x]}{\Delta x} = \delta(x - x_1) \quad (2.28)$$

де  $\delta(x - x_1)$ —  $\delta$ -функція Дірака, то рівняння (2.27) набуде вигляду

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aM_m}{F} \delta(x - x_1) \quad (2.29)$$

В даному випадку  $\delta$ -функція має розмірність  $\frac{1}{l}$ .

Розглянемо задачу визначення тиску і витрати у трубопроводі довжиною  $l$  із початковим тиском  $P_0$ . Припустимо, що при  $t > 0$  на початку і в кінці газопроводу підтримується постійний тиск  $P_n$  і  $P_k$ , а в точці  $x = x_1$  має місце зосереджений відбір чи теча з масовою витратою  $M_m$ .

Такий процес описується диференціальним рівнянням виду:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2aM_m}{F} \delta(x - x_1) \quad (2.30)$$

з граничними умовами:

$$P(x, t)|_{x=0} = P_i, \quad P(x, t)|_{x=l} = P_e, \quad P|_{t=0} = P_0 \quad (2.31)$$

Для розв'язання поставленої задачі потрібно проінтегрувати рівняння (2.30).

Помноживши рівняння (2.30) на  $(2/l)\sin(n\pi x/l)dx$  і проінтегрувавши від 0 до  $l$ , отримаємо:

$$\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \sin \frac{n\pi x}{l} dx = \frac{2n\pi}{l^2} [(-1)^{n-1} P_e + P_i] - \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 P_i \quad (2.32)$$

$$\frac{2}{l} \int_0^l \frac{\partial P}{\partial t} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{l} dx = \frac{dP_n}{dt} \quad \text{і} \quad \frac{2}{l} \int_0^l \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{l} \delta(x - x_1) dx = \frac{2}{l} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x_1}{l} \quad (2.33)$$

$$\text{де } P_n = \frac{2}{l} \int_0^l P \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{l} dx$$

Після деяких перетворень із рівняння (2.30) отримаємо:

$$\frac{dP_n}{dt} + \frac{c^2}{2a} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 P_n = \frac{c^2 n\pi}{al^2} [(-1)^{n-1} P_e + P_i] - \frac{2c^2 M_\delta}{Fl} \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{l} \quad (2.34)$$

Рівняння (2.34) при початковій умові  $P_n|_{t=0} = P_0 \frac{2}{n\pi} [(-1)^{n-1} + 1] = P_{n0}$  набуде вигляду

$$P_i = \frac{2}{n\pi} [(-1)^{n-1} P_e + P_i] - \frac{4aM_n l}{F\pi^2 n^2} \sin \frac{n\pi x_1}{l} + C_n \exp \left[ -\frac{c}{2a} \left(\frac{\pi \cdot n}{l}\right)^2 t \right] \quad (2.35)$$

$$\text{де } C_n = P_{n0} - \frac{2}{n\pi} [(-1)^{n-1} P_e + P_i] + \frac{4aM_n l}{F\pi^2 n^2} \sin \frac{n\pi x}{l}$$

Звідси тиск у будь-якому перерізі газопроводу визначиться формулою

$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin(n \cdot \pi \cdot x/l)$ . Провівши відповідні перетворення і враховуючи, що

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin kx}{k} = \frac{\pi - x}{2} \quad (2.36)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} \sin kx}{k} = \frac{x}{2} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned}
\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(n \cdot \pi \cdot x_1 / l) \cdot \sin(n \cdot \pi \cdot x / l)}{n^2 \pi^2} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n \cdot \pi \cdot (x_1 - x) / l) - \cos(n \cdot \pi \cdot (x_1 + x) / l)}{n^2 \pi^2} = \\
&= - \left[ \frac{1}{6} - \frac{x_1 + x}{2l} + \frac{(x_1 + x)^2}{4l^2} \right] + \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{6} + \frac{x_1 - x}{2l} + \frac{(x_1 - x)^2}{4l^2} & \text{при } x < x_1 \\ \frac{1}{6} - \frac{x - x_1}{2l} - \frac{(x - x_1)^2}{4l^2} & \text{при } x > x_1 \end{array} \right\} = \\
&= \frac{x_1 l + x l - 2x x_1}{2l^2} + \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x_1 - x}{2l} & \text{при } x < x_1 \\ \frac{x - x_1}{2l} & \text{при } x > x_1 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x(l - x_1)}{l^2} & \text{при } x < x_1 \\ \frac{x_1(l - x)}{l^2} & \text{при } x > x_1 \end{array} \right\} \quad (2.38)
\end{aligned}$$

отримаємо

$$\begin{aligned}
P &= P_i - \frac{P_i - P_r}{l} x - \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp \left[ -\frac{c^2 \left( \frac{\pi \cdot n}{l} \right)^2 t}{2a} \right] \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{l} - \\
&\quad - \frac{2aM_m}{F} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x(l - x_1)}{l^2} & \text{при } x < x_1 \\ \frac{x_1(l - x)}{l^2} & \text{при } x > x_1 \end{array} \right\} \quad (2.39)
\end{aligned}$$

За допомогою формули (2.39) можна визначити тиск у будь-якому перерізі газопроводу для будь-якого моменту часу. У частинному випадку, при  $t \rightarrow \infty$  і сталій течі розв'язок поставленої задачі матиме вигляд

$$P = P_n - \frac{P_n - P_r}{l} x - \frac{2aM_m}{F} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x(l - x_1)}{l^2} & \text{при } x < x_1 \\ \frac{x_1(l - x)}{l^2} & \text{при } x > x_1 \end{array} \right\} \quad (2.40)$$

Для знаходження масової витрати  $M(x, t)$  в будь-якому перерізі газопроводу можна використати наступну формулу [11]:

$$M = -\frac{2FD}{\lambda \omega} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (2.41)$$

Підставляючи в рівняння (2.41) замість  $P(x)$  рівняння (2.40) для розподілу тиску в трубопроводі з зосередженим відбором чи течєю на віддалі  $x_1$  від початку трубопроводу, з величиною течі  $M_m$  і продиференціювавши його, одержимо:

$$M = \frac{F}{2a} \left\{ \frac{P_n - P_\kappa}{l} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cdot \pi \cdot C_n}{l} \exp \left[ -\frac{c^2}{2a} \left( \frac{\pi \cdot n}{l} \right)^2 t \right] \cdot \cos \frac{n \cdot \pi \cdot x}{l} \right\} +$$

$$+ M_m \begin{cases} \frac{(l - x_1)}{l} n\pi i - x < x_1 \\ -\frac{x_1}{l} n\pi i - x > x_1 \end{cases} \quad (2.42)$$

Зокрема, витрата  $M_n$  через переріз  $x=0$  і  $M_\kappa$  через  $x=l$  визначаються за формулами:

$$M_n = \frac{F}{2a} \frac{P_n - P_\kappa}{l} + M_m \frac{l - x_1}{l} - \frac{F\pi}{2al} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot C_n \exp \left[ -\frac{c^2}{2a} \left( \frac{\pi \cdot n}{l} \right)^2 t \right] \quad (2.43)$$

$$M_\kappa = \frac{F}{2a} \frac{P_n - P_\kappa}{l} + M_m \frac{x_1}{l} - \frac{F\pi}{2al} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot (-1)^n \cdot C_n \exp \left[ -\frac{c^2}{2a} \left( \frac{\pi \cdot n}{l} \right)^2 t \right] \quad (2.44)$$

В цих формулах  $M_n$ — це кількість закачаного газу через переріз  $x=0$ , а  $M_\kappa$ — кількість відібраного через переріз  $x=l$ . А при  $t \rightarrow \infty$  отримаємо формулу для визначення масової витрати на кінцях трубопроводу при відповідній сталій течі:

$$M_n = \frac{F(P_n - P_\kappa)}{2al} + M_m \frac{(l - x_1)}{l} \quad (2.45)$$

$$M_\kappa = \frac{F(P_n - P_\kappa)}{2al} - M_m \frac{x_1}{l} \quad (2.46)$$

де  $2a = \frac{\lambda \omega}{2D}$

Із отриманих формул для витрати при сталій течі газу видно, що наявність зосередженого відбору (течі) при постійному тиску на початку трубопроводу приводить до збільшення витрати на вході і зменшення в кінці. При цьому, якщо відбір відбувається на середині трубопроводу,  $x_1 = l/2$ , то приріст витрати на початку трубопроводу буде рівним зменшенню витрати газу на кінці трубопроводу. Також із формул (2.45) видно, що якщо відбір проводиться дуже близько до початку трубопроводу,  $x_1 \ll l$ , то в кінці трубопроводу його майже не буде помітно і витрата буде дуже мало

відрізняться від витрати при відсутності відбору. Закачка ж на початку трубопроводу буде майже рівною величині відбору  $M_m$ . Також якщо відбір буде дуже близько до кінця трубопроводу ( $x_1 \approx l$ ), то на початку цей відбір не буде помітним (величина закачування буде майже рівною її значенню при відсутності відбору), а в кінці трубопроводу витрата зменшиться майже на величину відбору  $M_m$ .

До початку зосередженого відбору витрата в трубопроводі становила  $M_0$  і визначалась за формулою:

$$M_0 = \frac{F(P_n - P_\kappa)}{2al} \quad (2.47)$$

Тому вирази (2.45, 2.46) переписуться у такому вигляді:

$$M_n = M_0 + M_m \frac{(l - x_1)}{l} \quad (2.48)$$

$$M_\kappa = M_0 - M_m \frac{x_1}{l} \quad (2.49)$$

Якщо  $M_0$  перенести в ліву частину обох виразів, то отримаємо

$$\Delta M_n = M_m \frac{(l - x_1)}{l} \quad (2.50)$$

$$\Delta M_\kappa = \left| -M_m \frac{x_1}{l} \right| \quad (2.51)$$

Поділивши цих два вирази один на одного, отримаємо

$$\frac{\Delta M_n}{\Delta M_\kappa} = \frac{(l - x_1)}{x_1} \quad (2.52)$$

Знайшовши з виразу (2.52) шукану нами величину  $x_1$ — віддаль від початку трубопроводу до місця течі чи зосередженого відбору отримаємо вираз

$$x_1 = \frac{l}{\frac{\Delta M_n}{\Delta M_\kappa} + 1} \quad (2.53)$$

де  $l$ — довжина трубопроводу який контролюється;  $\Delta M_{\gamma}$  і  $\Delta M_{\delta}$ — зміна величини масової витрати на початку і в кінці трубопроводу відповідно, внаслідок зосередженого відбору чи течі у цьому трубопроводі.

Таким чином, рівняння (2.53) теоретично обгрунтовує можливість визначення місця утворення течі чи несанкціонованого відбору за вимірюваними значеннями масової витрати на початку і в кінці досліджуваної ділянки трубопроводу.

## 2.2 Аналіз процесів визначення місця витoku у трубопроводі

Доцільно розглянути частинні випадки зміни масової витрати на початку і в кінці вимірювальної ділянки трубопроводу в залежності від місця розташування зосередженого відбору. Для цього вводяться такі позначення

Прийmemo що:

$x_1 = 0$ — початкова точка вимірювальної ділянки, км;

$x_2 = l$ — кінцева точка вимірювальної ділянки, км ( $l$ — довжина ділянки);

$x_B$ — точка зосередженого відбору, км;

В загальному можна виділити таких 5 випадків [11]:

- а) Зосереджений відбір на середині трубопроводу;
- б) Зосереджений відбір нескінченно близько до початку вимірювальної ділянки;
- в) Зосереджений відбір нескінченно близько до кінця вимірювальної ділянки;
- г) Зосереджений відбір в першій половині досліджуваної ділянки;
- д) Зосереджений відбір в другій половині досліджуваної ділянки.

$$x_B = \frac{1}{2}(x_2 - x_1) = \frac{1}{2}l \quad (2.54)$$

$$\Delta M_n = \lim_{x_e \rightarrow l/2} M_m \frac{l - x_e}{l} = \frac{1}{2} M_m$$

$$\Delta M_\kappa = \lim_{x_e \rightarrow l/2} M_m \frac{x_e}{l} = \frac{1}{2} M_m$$
(2.55)

З вище наведених двох обчислень видно, що масова витрата внаслідок зосередженого відбору зміниться на однакову величину, як на початку вимірювальної ділянки так і в кінці та є рівна половині масової витрати через зосереджений відбір. При цьому графічно розподіл витрати по довжині досліджуваної ділянки трубопроводу буде представляти собою пряму спадну лінію яка проходить через центр початкової кривої (МР.МТТМ-37.00.00.002 рис.1).

При варіанті відбору б) місце витoku і зміна масової витрати на кінцях досліджуваної ділянки визначається:

$$x_B = 0$$
(2.56)

$$\Delta M_n = \lim_{x_e \rightarrow 0} M_m \frac{l - x_e}{l} = M_m$$

$$\Delta M_\kappa = \lim_{x_e \rightarrow 0} M_m \frac{x_e}{l} = 0$$
(2.57)

Формули (2.57) показують що зміна масової витрати на кінцях вимірювальної ділянки — на початку рівна величині масової витрати зосередженого відбору, а витрата в кінці ділянки є рівною нулю (тобто не змінюватиметься). Графічно розподіл масової витрати вздовж ділянки трубопроводу матиме вигляд прямої, яка в точці  $x_2$  буде збігатися з вхідною прямою розподілу масової витрати (МР.МТТМ-37.00.00.002 рис.2).

При варіанті відбору в) місце витoku і зміна масової витрати визначаються:

$$x_B = l$$
(2.58)

$$\Delta M_n = \lim_{x_e \rightarrow l} M_m \frac{l - x_e}{l} = 0$$

$$\Delta M_\kappa = \lim_{x_e \rightarrow l} M_m \frac{x_e}{l} = M_m$$
(2.59)

З виразів (2.59) видно, що якщо місце розташування зосередженого відбору близьке до кінця досліджуваної ділянки, то рівень масової витрати на початку цієї ділянки не змінюється, а в кінці буде рівний величині масової витрати витоку. При цьому графік розподілу масової витрати вздовж ділянки трубопроводу має вигляд прямої, яка починається із початкової точки прямої розподілу витрати при відсутності витоку ((МР.МТТМ-37.00.00.002 рис.3).

При варіанті відбору г) і д) розподіл масової витрати вздовж ділянки трубопроводу описується так:

$$x_B = \frac{1}{4}(x_2 - x_1) = \frac{1}{4}l \quad (2.60)$$

$$\Delta M_n = \lim_{x_g \rightarrow l/4} M_m \frac{l - x_g}{l} = \frac{3}{4}M_m \quad (2.61)$$

$$\Delta M_\kappa = \lim_{x_g \rightarrow l/4} M_m \frac{x_g}{l} = \frac{1}{4}M_m$$

$$x_B = \frac{3}{4}(x_2 - x_1) = \frac{3}{4}l \quad (2.62)$$

$$\Delta M_n = \lim_{x_g \rightarrow 3l/4} M_m \frac{l - x_g}{l} = \frac{1}{4}M_m \quad (2.63)$$

$$\Delta M_\kappa = \lim_{x_g \rightarrow 3l/4} M_m \frac{x_g}{l} = \frac{3}{4}M_m$$

У випадку, коли зосереджений відбір знаходиться у першій чи другій половині вимірювальної ділянки (2.61) і (2.63), масова витрата суттєво змінюватиметься як на початковій, так і в кінцевій точці вимірювання, а розподіл визначається експоненціальною кривою (МР.МТТМ-37.00.00.002 рис.4).

### 2.3 Розроблення та опис структурної і функціональної схеми системи

На МР.МТТМ-37.00.00.003 зображено структурну схему системи для визначення місця витоку в трубопроводі.

Установка складається з 2-х основних частин — вимірювання і перетворення аналогового сигналу в цифровий та частини обробки даних і їх представлення.

Вимірювальна частина установки знаходиться на значних віддальх від обчислювальної частини. Іноді ця віддаль становить десятки кілометрів. Вимірювальна частина складається із двох масових витратомірів які розміщені на початку та в кінці трубопроводу. Витратоміри коріолісового типу, які на виході дають цифровий сигнал. Вони повинні бути однотипними, і бажано із однієї партії, для зменшення похибки вимірювання [11].

Оскільки сигнал потрібно передавати на далекі віддалі, перед тим як його передати передаючий пристрій проводить ряд додаткових перетворень сигналу. Сигнал передають по двох дротах із зсувом фаз один відносно одного, що забезпечує більш економічний монтаж, і надійність лінії від зовнішніх електромагнітних наводок, що дають спотворення сигналу.

На вході в частині обробки сигналу розміщений приймаючий пристрій, який підсилює сигнал і перетворює сигнал у стандартний цифровий, з яким пізніше може працювати мікроконтролер. Блок обробки інформації і її представлення знаходиться в приміщенні оператора.

На виході витратоміра отримується цифровий модульований сигнал пропорційний величині масової витрати, який передається на станцію, де відбувається підсилення сигналу, після чого він передається на блок обробки сигналів (БОС). БОС постійно працює в режимі приймання даних і їх обробки. При зміні параметрів потоку на одній чи на обох точках вимірювання, БОСом подається звуковий і світловий сигнал про наявність зосередженого відбору.

Блок цифрової індикації постійно знаходиться в «сплячому» режимі, і включається відразу при дії сигналу від пульта управління, запит якого постійно здійснюється блоком обробки сигналів, який виконаний на мікроконтролері AVR ATmega16-16PI. Цифрова індикація реалізована на рідкокристалічному

індикаторі. На індикаторі відображається час виникнення змін в параметрах потоку, час стабілізації процесу, величина витoku в одиницях масової витрати, місце розташування витoku від початку трубопроводу, номер зміни оператора.

Блок обробки сигналів також накопичує результати проведення вимірювань в базі, яка розміщена на додатковому зовнішньому та внутрішньому накопичувачі. Зчитування і обробка сигналів, а також запис результатів відбувається кожних 120 с.

## 2.4 Вибір типу та опис конструкції давача

Коріолісовими називаються витратоміри, в перетворювачах яких під впливом силової дії виникає коріолісове прискорення, яке залежить від масової витрати. Для утворення цього прискорення перетворювачу витрати, який неперервно обертається, надають форму, яка заставляє потік переміщатися в радіальному напрямі по відношенні до осі обертання, яка співпадає з віссю трубопроводу [12].

Принципова схема коріолісового витратоміра, запропонованого в 1953 році, зображена на рис. 2.1. Два трубних штуцери 1 і 6 за допомогою гнучких трубних з'єднань з'єднані з трубопроводом, по якому тече вимірювана речовина. Штуцери з'єднані один з одним металічною втулкою і лежать в шарикопідшипниках. Вони разом з іншою частиною перетворювача витрати обертаються із частотою 1800 об/хв. від електродвигуна через зубчасту передачу, зв'язану зі штуцером 6. Рідина поступає через штуцер 6. В трубках 5, що обертаються, виникає коріолісове прискорення, викликаючи момент сил, прикладених до стінок трубки, який направлений протилежно обертовому моменту. В трубках 3, зв'язаних еластичними з'єднаннями 4 з трубками 5, коріолісове прискорення має направлення, протилежне коріолісовому прискоренню в трубках 5. Тому до стінок трубок 3 прикладено момент сил  $M_K$ ,

який напрямлений в сторону обертового моменту. Момент  $M_K$  закручує тонку торсійну трубку 2, з'єднану з вихідним штуцером 1. Кут закручування вимірюється за допомогою тензорезистивних перетворювачів.

Момент  $M_K$  визначається рівнянням

$$M_K = 2 \int_{r_1}^{r_2} a \rho F r dr \quad (2.64)$$

де  $r$  – радіус трубки;  $r_1$ — радіус (середній), на якому закінчується рух рідини в радіальному напрямку;  $r_2$  – радіус зовнішнього кінця трубки;  $a$  – коріолісове прискорення в трубках;  $\rho$ – густина вимірюваної рідини;  $F$  – площа поперечного січення трубки.

Коріолісове прискорення

$$a = 2v\omega \quad (2.65)$$

де  $v$  – швидкість рідини в трубці 3,  $\omega$  -- кутова швидкість обертання трубки.

Після підставлення значення  $a$  в попереднє рівняння і його інтегруванні знайдемо що

$$M_K = \omega(r_2^2 - r_1^2)Q_M \quad (2.66)$$

а кут  $\varphi$  закручування торсійної трубки 2, яка має жорсткість  $c$ , буде

$$\varphi = c\omega(r_2^2 - r_1^2)Q_M \quad (2.67)$$

Тут ми не брали до уваги протидію еластичних з'єднань 4.

Особливість витратоміра, приведеного на рис. 2.1— незалежна потужність, витрачена електродвигуном, від витрат  $Q_M$ , тому що енергія, витрачена при обертанні трубок 5, повертається при проходженні рідини через трубки 3. Потужність електродвигуна витрачається тільки на переборення тертя в опорах і ущільнювачах чи в еластичних з'єднаннях перетворювача з трубопроводом.

Більш поширений витратомір К-3,, в якому ротор електродвигуна відділений від обмотки статора діамагнітною перегородкою із сталі 1X13 товщиною 0,6 мм [12]. Разом з ротором неперервно обертається патрубок, який

міститься в ньому, з радіальними каналами на виході. При проходженні рідини через ці канали виникають коріолісові сили, які створюють момент опору  $M_K$ , який визначається рівнянням (2.66). Електродвигуну попри цей момент, ще необхідно подолати момент  $M_B$  опору сил в'язкого тертя рідини і момент  $M_M$  сил тертя в опорах. Ротор забезпечений шарикопідшипниками, які винесені за межі активної зони потоку. Тому момент  $M_M$  незначний і постійний,

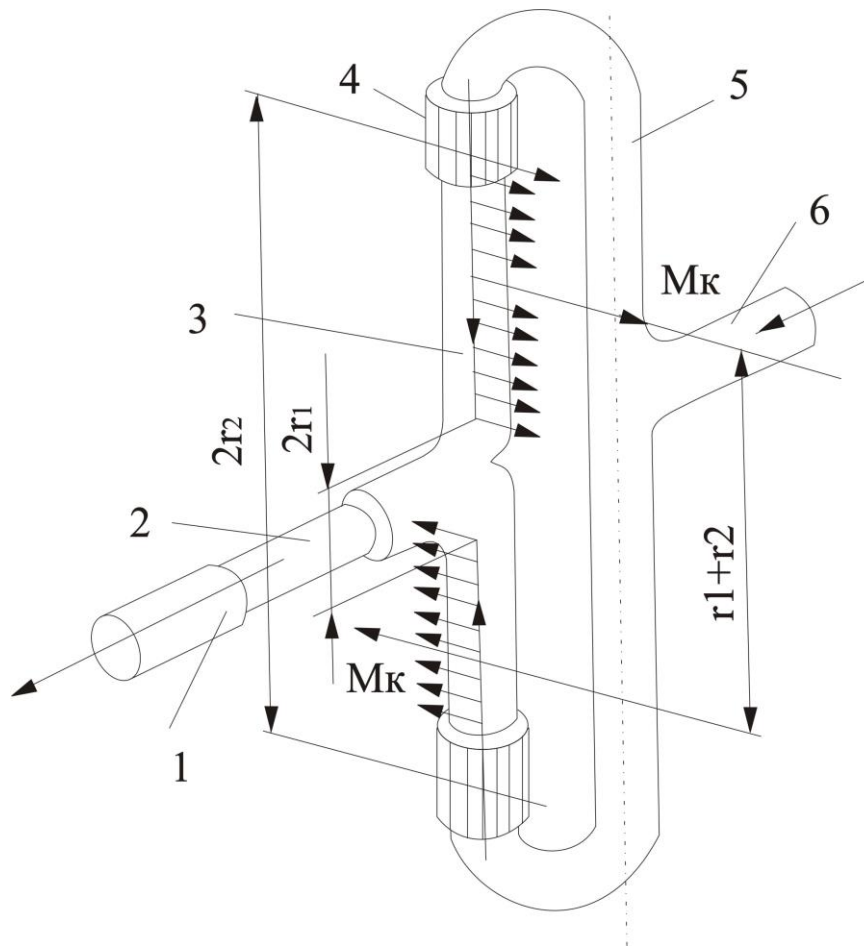


Рисунок 2.1— Схема дії сил в коріолісовому витратомірі

а це означає, що він не впливає на точність вимірювання. Межа вимірювання від 0,1 до 0,7 кг/с. Для збільшення межі при даній потужності електродвигуна потрібно відносно рівняння (2.66) зменшити зовнішній радіус  $r_2$ . Витратомір К-3 по конструкції простий, але вигідний лише для вимірювання речовин, які мають малу в'язкість. Вимірювана величина в ньому – потужність, яку використовує електродвигун.

Для речовин, в'язкість яких сильно змінюється, розроблений подвійно роторний коріолісовий витратомір К-4[12]. Його перетворювач складається із двох роторів, які направлені назустріч один одному. Зазор між їх радіальними каналами досить невеликий. Кожен ротор приводиться в обертання своїм електродвигуном в одну сторону з однаковою кутовою швидкістю  $\omega$ . Потік в радіальних каналах першого ротора направлений від центра до країв і створює коріолісові сили, які протидіють обертовому моменту першого електродвигуна. В каналах другого ротора потік руху від країв до центру і створює коріолісові сили, які призводять до розвантаження другого електродвигуна. При включенні обмотки статорів електродвигунів в мостову систему, вимірюють різницю струмів, які потребують електродвигуни, це буде пропорційно витратам  $Q_M$  при умові, що моменти опору  $M_C$  і  $M_M$  в обох роторів однакові.

Запропоновані також декілька конструкцій коріолісових витратомірів, в яких витрата  $Q_M$  визначається за часом  $\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega}$  проходження кутового зсуву  $\Delta\varphi$  двох роторів [12]. Перетворювач витрат, який забезпечує виключення впливу в'язкості, з тією різницею що дві крильчатки завдяки своїй формі крім осьового створюють ще й радіальне переміщення потоку. Як і в К-4, потік в одній крильчатці рухається від центру до краю, а після переходу до другої крильчатки – від краю до центру. Моменти  $M$ , які створені коріолісовими силами в кожній крильчатці, протилежні за напрямком, утворюють кутовий зсув  $\Delta\varphi$  між

крильчатками, пропорційний  $2M$ , при умові рівності моментів опору  $M_B + M_M$  в обох крильчатках.

Витратоміри «Micro Motion» призначені для прямого вимірювання масової витрати, густини, температури, вимірювання об'ємної витрати рідини, газів [13]. Всі вимірювання виконуються в реальному часі. Якого-небудь додаткового обладнання для вимірювання не потрібно.

Випускається вісім типів моделей датчиків витрат (сенсорів) і шість моделей мікропроцесорних перетворювачів, функціональні можливості яких відповідають різним потребам.

Коріолісовий витратомір складається із датчика витрат (сенсора) і перетворювача. Сенсор прямо вимірює витрату, густину, температуру. Перетворювач конвертує отриману з сенсора інформацію в стандартні вихідні сигнали.

Вимірювальне середовище, яке поступає в сенсор, ділиться на рівні половини, протікаючи через кожен із сенсорних трубок. Рух котушки приводить до того, що трубки коливаються вгору-вниз в протилежних напрямках один одному.

При русі речовини через сенсор відбувається фізичне явище, яке називається ефект Коріоліса. Поступальний рух речовини при обертovому русі сенсорної трубки приводить до виникнення коріолісового прискорення, яке в свою чергу, призводить до виникнення коріолісової сили. Ця сила напрямлена проти руху трубки, тобто, коли трубка рухається вгору під час свого власного циклу, то для речовини всередині трубки сила коріоліса напрямлена вниз. Як тільки речовина проходить згин трубки напрямок сили змінюється на протилежний. Таким чином у вхідній частині трубки сила, яка діє із сторони речовини, перешкоджає зміщенню трубки, а у вихідній частині сприяє. Це призводить до згину трубки. Коли при другій фазі вібраційного циклу трубка рухається вниз, напрямок згину змінюється на протилежний.

Сила Коріоліса і відповідно величина згину сенсорної трубки прямо пропорційна масовій витраті речовини. Детектори вимірюють фазовий зсув при русі протилежних сторін сенсорної трубки.

Як результат згину сенсорних трубок, генеровані детекторами сигнали не співпадають по фазі, так як сигнал від вхідної сторони затримується по відношенню до сигналу з вихідної сторони.

Різниця в часі між сигналами вимірюється в мікросекундах і є прямопропорційна масовій витраті. Чим більша масова витрата, тим більша різниця між сигналами.

Конструктивно магнітні катушки-соленоїди, які називаються детекторами, встановлені на сенсорних трубках. Катушки змонтовані на одній трубці, магніти на іншій. Кожна катушка рухається крізь однорідне магнітне поле постійного магніту. Згенерована напруга від кожної катушки детектора має форму синусоїдальної хвилі. Ці сигнали представляють рух однієї трубки відносно іншої.

Коріолісові витратоміри вимірюють масову витрату з досить високою точністю. Для пристрою найбільш підходить по метрологічних і технологічних характеристиках коріолісовий витратомір марки Optimass 1300 S40 — універсальний масовий витратомір, який надійно забезпечує вимірювання масової витрати, густини, температури і концентрації як рідин, так і газів. Чутливим елементом є пряма спарена вимірювальна трубка масової витрати, виконана із нержавіючої сталі. Вона містить розподілювач потоку для забезпечення мінімальних втрат тиску, що значно полегшує її промивання і дренажування. Витратомір Optimass1300 S40 не є чутливим до типу монтажу і до зовнішніх впливів.

Основними характеристиками витратоміра Optimass1300 S40 є [12]:

- номінальна витрата течі— 60000 кг/год;
- максимальна витрата 130% від номінального значення;

- похибка вимірювання для рідин -  $\pm 0,2\%$  від вимірювального значення;
- похибка вимірювання для газів -  $\pm 0,75\%$  від вимірювального значення;
- стабільність нуля -  $\pm 0,025\%$  від номінальної витрати відповідного первинного перетворювача;
- діапазон вимірювання густини 400-2500  $кг/м^3$ ;
- точність вимірювання густини -  $\pm 2 кг/м^3$ ;
- точність при місцевому калібруванні -  $\pm 0,5 кг/м^3$ ;

## **2.5 Розроблення програмного забезпечення процесу роботи системи в автоматизованому режимі**

Щоб забезпечити високу точність вимірювання, пристроєм керує мікроконтролер [17]. Мікроконтролером також обчислюється координата місця витоку в трубопроводі. Для того щоб мікроконтролер виконував покладені на нього функції, для нього розроблена програма, блок схема якої приведена в (МР.МТТМ-37.00.00.005).

Для управління роботою програми використовується пристрій вводу, який передбачає можливість виконання наступних операцій: включення та виключення пристрою, цифрова клавіатура для вводу пароля доступу до панелі управління, керування типом представлення даних на БЦІ, калібрування пристрою, перегляд бази даних.

Для зручності відображення даних в програмі передбачено різні режими представлення інформації на БЦІ.

Для енергозбереження і довшої працездатності програмно передбачено перехід пристрою в «очікувальний режим», при якому відключається БЦІ. Але при натисненні оператором на будь-яку клавішу пристрою вводу, автоматично відбувається перехід системи із «очікувального» режиму в робочий.

Оскільки при контролі ділянок трубопроводу на герметичність витік може виникнути в будь-який момент часу, але встановлення процесу руху речовини в трубопроводі в новий режим (при довжині трубопроводу 10000 м) відбувається приблизно за 2-5 хв., тому програмно передбачено опитування портів (зчитування вхідних сигналів) кожних 120 с. Це дає змогу забезпечити високу точність контролю, не пропустити жодного нового витоків, і водночас не перевантажувати систему зайвою обробкою вхідних сигналів, зберегти енергоресурси на довший час експлуатації, і не перевантажувати базу даних непотрібними даними, які призводять до сповільнення доступу до бази, оскільки це вимагає більших об'ємів накопичувачів інформації, і частішого оновлення бази (перенесення на персональний ЕОМ).

В базу даних заноситься інформація про тиск та витрату, дату та час виникнення течії, величину витоків. По даних бази можна прослідкувати час встановлення процесу, вплив на режим роботи станції, місця самих частих виникнень витоків, що може свідчити про необхідність проведення додаткового контролю чи заміни певної ділянки трубопроводу, або про встановлення посиленого контролю в тій місцевості, якщо виток є причиною несанкціонованого відбору.

При калібруванні систему переключають за допомогою пристрою вводу в режим калібрування. Спершу вводяться основні параметри контролюючого трубопроводу (довжина контролюючої ділянки, діаметр трубопроводу, режими роботи, вид речовини, яка перекачується, робочі діапазони витрат та тисків). Наступним кроком в налаштуванні пристрою, це переключення в режим самокалібрування, при якому програма, опитуючи перших п'ять разів порти вводу, перевіряє стабільність процесу руху речовини по досліджуваній ділянці трубопроводу, порівнюючи отримані результати. Якщо всі п'ять разів вхідні дані є рівні між собою, то пристрій приймає отримані дані як вхідні параметри трубопроводу для подальшого визначення координат зосередженого відбору.

Якщо вхідні дані виявились різними, то система автоматично проводить наступних п'ять зчитувань, проводить ті ж самі операції. Якщо після п'яти спроб системі не вдалось провести самоналаштування, пристрій переключасться з програмного в режим ручного налаштування, при якому потрібно вказати величини тиску і масової витрати на початку і в кінці трубопроводу, як вхідні дані.

Збереження інформації відбувається відразу після обчислення результату, на внутрішній і зовнішній носій, що зводить можливість її втрати внаслідок збоїв в системі чи інших форсмажорних обставин практично до нуля, та забезпечує максимально швидкий та простий спосіб перенесення даних на персональний ЕОМ.

Для визначення, чи зміни параметрів потоку в трубопроводі зумовлені витоком, чи іншим фактором, програмно відбувається перевірка зміни параметрів потоку на початку та в кінці контролюючої ділянки, кожних зокрема. Відбувається перевірка шляхом порівняння знаків зміни витрати на початку та в кінці трубопроводу. Якщо витрата зменшилась (чи збільшилась) як на початку трубопроводу, так і в кінці, то це не свідчить про виникнення течі, а про зміну процесу роботи станції, чи зумовлене якимось іншими факторами. Такі дані програмно ігноруються і не заносяться в базу даних витоків.

Для визначення моменту закінчення встановлення нового процесу руху і точному визначенні координати місця витoku речовини в трубопроводі, програма постійно при обробці сигналу порівнює нові дані з попереднім обчисленим результатом. Якщо результати співпадають, то це свідчить про закінчення встановлення нового процесу руху речовини, і отриманий останній результат є вірним.

Використання мікроконтролера для проведення керування і обчислення пристрою дає змогу збільшити точність вимірювання, позбутись хибних висновків про наявність течі, забезпечити швидший аналіз вхідних даних, а

отже і швидше прийняти міри по ліквідації витоку чи несанкціонованого відбору.

## **2.6 Висновки до розділу**

Розроблено математичну модель процесу руху речовини по трубопроводі з врахуванням тих характеристик, які змінюються при виникненні витоку: витрати на початку і в кінці обстежуваної ділянки, гідравлічного опору, зміни тиску, зміни характеру потоку.

Встановлено математичну залежність, яка дозволяє за характером зміни витрати опосередковано визначати координати зосередженого відбору вздовж трубопроводу.

Розроблено конструкцію пристрою контролю герметичності та течешукання. На основі розробленої структурної схеми визначено основні елементи пристрою, конструкцію яких необхідно розробити.

Обґрунтовано вибір типу та розроблено конструкцію лічильника-витратоміра. Вибрано коріолісовий тип витратоміра.

Розроблено конструкцію пристрою для приймання інформаційних сигналів від витратомірів, манометрів та термометрів для їх оброблення та передачі до мікроконтролера. Розроблено програму роботи мікроконтролера, яка забезпечує швидше обчислення вхідних даних, проводить відсортування хибних результатів, забезпечує зручне та надійне збереження інформації, полегшує налаштування пристрою до роботи.

### **3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ТА ТЕЧОШУКАННЯ**

Оскільки розроблений пристрій контролю передбачає тільки контроль наявності течі, а також наближене визначення координати течі, то метрологічний аналіз доцільно провести на основі розрахунку складових сумарної похибки, а також їх сумування диференційним методом. Тому в даному розділі поданий аналіз факторів впливу на точність вимірювання, визначені значення складових похибки та визначена сумарна похибка.

#### **3.1 Аналіз факторів впливу на похибки пристрою**

Сумарна похибка пристрою контролю визначається як сума всіх складових похибок, які приведені в (МР.МТТМ-37.00.00.004).

Оскільки в даній методиці визначення місця витoku в трубопроводі не враховано ряд параметрів, які впливають на результати вимірювання, тому в ній присутня методична похибка. Основними найбільш впливовими параметрами, які не враховані під час виведення математичної моделі є: вплив характеру потоку, поява декількох витоків, розподіл температури вздовж трубопроводу [18].

До впливу параметрів потоку, якими знехтувано при виведенні методики вимірювання в першу чергу відноситься характер руху речовини в трубопроводі — ламінарний чи турбулентний [19]. Оскільки при різних швидкостях рух речовини різний (в залежності від перепаду тисків на кінцях ділянки трубопроводу та діаметру трубопроводу), він може змінюватись навіть при експлуатації одного і того ж трубопроводу. Але хоча характер руху речовини є важливим параметром потоку, і часто займає значне місце у вимірюванні, який

треба враховувати мало не в першу чергу, в даному випадку, зміна характеру руху речовини на ділянках трубопроводу практично не впливає на вимірювання масової витрати на кінцях досліджуваних ділянок, тому похибка від даного опущеного параметру не може становити більше 0,5%.

Крім зміни характеру потоку, також в методиці визначення місця витoku не враховано можливість виникнення декількох витоків. Хоча якщо виникнення витоків відбувається послідовно (наступний виникає після встановлення процесу руху речовини в трубопроводі після першого витoku, який вже є зафіксований пристроєм) то жодних проблем з їх виявленням не виникає. Пристрій фіксує кожний із витоків і заносить інформацію в базу даних. Але при виникненні двох і більше витоків паралельно (одночасно, або в близький інтервал виникнення один від одного), то виявити виток буде неможливо, ні перший ні наступний. Але оскільки ймовірність виникнення двох витоків в інтервалі до 100 с надзвичайно низька (час встановлення нового процесу руху речовини внаслідок виникнення течі), тому на практиці не виникає великої необхідності враховувати дану похибку, а її вплив на точність вимірювання не може перевищувати більше 0,25%.

Також при вимірюванні не враховується параметр, який впливає на масову витрату в трубопроводі, параметр, від якого залежить густина перекачуваного середовища— температура. Хоча ми і можемо виміряти температуру, але тільки на кінцях досліджуваної ділянки трубопроводу. А розподіл температури вздовж ділянки трубопроводу, а ще коли вона досягає 10000 м це зробити неможливо. Частково вплив на точність вимірювання зменшується використанням масового витратоміра коріолісового типу, але все ж таки він впливає на параметри потоку, які неможливо виміряти і мають деякий вплив на вимірювання, особливо в місцях наявності витоків. Тому вплив даної похибки іноді досягає 0,75%.

Крім неточності математичної моделі дійсним фізичним процесам,

великий вплив на вимірювання створюють неточності засобів вимірювання параметрів досліджуваних процесів. На розроблений пристрій впливають ряд наступних факторів: неідентичність витратомірів, похибка блоку обробки сигналу, похибка приймаючого пристрою, похибка блоку цифрової індикації, і похибка чутливого елемента (витратоміра).

Оскільки вимірювання проводиться на далеких віддаль між початковою і кінцевою точками, тому потрібно використовувати два чутливих елементи. А це в свою чергу створює додатковий негативний вплив на точність вимірювання. І така похибка іноді досягає 0,5% .

Зовсім інша справа стоїть з обчислювальним елементом. Похибка при обчисленні складає в залежності від програмної частини, яка проводить обчислення. Адже в основний вплив на точність обчислення відіграє кількість значущих цифр після коми, які опускаються. Оскільки програмно передбачено вплив даної похибки, і мікроконтролером проводиться обчислення з високою точністю, тому ця похибка становить близько 0,01% і не несе ніякого впливу на результат вимірювання.

Основний вплив приймаючого пристрою на точність вимірювання полягає у неправильному відтворенні вхідного сигналу. Дана похибка залежить від точності елементної бази, від стійкості пристрою до змін параметрів навколишнього середовища, тощо. Але оскільки вплив приймаючого пристрою на вимірювання можна контролювати, то можна досягнути високої стабільності роботи пристрою, і похибка приймаючого пристрою становитиме до 0,1%.

Похибка блоку цифрової індикації полягає у невідображенні всіх значущих цифр для вимірювання і становить 0,05%. Основний вплив, відносно якого і приводиться розрахунок точності вимірювання системи створює власна неточність давача. Оскільки давач представляє масовий витратомір коріюлісового типу, він є досить точним, але його похибка становить 0,75% для газів, а для рідин рівень похибки дещо нижчий.

### 3.2 Розрахунок похибки вимірювання

Як було вказано в розділі 2, координата місця розташування течії визначається на основі встановленої залежності (2.53) за вимірними безпосередньо значеннями зміни витрати на початку і в кінці ділянки трубопроводу, тому дане вимірювання можна вважати опосередкованим, а отже використати диференційний метод розрахунку похибки [20]. Згідно з даним методом вираз для розрахунку похибки матиме вигляд, що представляє собою

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial M_{n1}} \Delta M_{n1} + \frac{\partial X}{\partial M_{n2}} \Delta M_{n2} + \frac{\partial X}{\partial M_{\kappa1}} \Delta M_{\kappa1} + \frac{\partial X}{\partial M_{\kappa2}} \Delta M_{\kappa2} + \frac{\partial X}{\partial L} \Delta L \quad (3.19)$$

Для знаходження часткових похідних спростимо вираз (2.53)

$$X = \frac{l}{\frac{M_{n1} - M_{n2}}{M_{\kappa1} - M_{\kappa2}} + 1} = \frac{l(M_{\kappa1} - M_{\kappa2})}{|M_{n1} - M_{n2}| + M_{\kappa1} - M_{\kappa2}} \quad (3.20)$$

таким чином часткові похідні будуть такими:

$$\frac{\partial X}{\partial M_{n1}} \Delta M_{n1} = -L \frac{M_{\kappa1} - M_{\kappa2}}{(|M_{n1} - M_{n2}| + M_{\kappa1} - M_{\kappa2})^2} \cdot \Delta M_{n1} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial X}{\partial M_{n2}} \Delta M_{n2} = L \frac{M_{\kappa1} - M_{\kappa2}}{(|M_{n1} - M_{n2}| + M_{\kappa1} - M_{\kappa2})^2} \cdot \Delta M_{n2} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial M_{\kappa1}} \Delta M_{\kappa1} = & \left( \frac{L}{(|M_{n1} - M_{n2}| + M_{\kappa1} - M_{\kappa2})} - \right. \\ & \left. - L \frac{M_{\kappa1} - M_{\kappa2}}{(M_{n1} - M_{n1} + M_{\kappa1} - M_{\kappa2})^2} \right) \cdot \Delta M_{\kappa1} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial M_{\kappa2}} \Delta M_{\kappa2} = & \left( - \frac{L}{(|M_{n1} - M_{n2}| + M_{\kappa1} - M_{\kappa2})} + \right. \\ & \left. + L \frac{M_{\kappa1} - M_{\kappa2}}{(M_{n1} - M_{n1} + M_{\kappa1} - M_{\kappa2})^2} \right) \cdot \Delta M_{\kappa2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial X}{\partial L} \Delta L = \frac{M_{\kappa1} - M_{\kappa2}}{|M_{n1} - M_{n2}| + M_{\kappa1} - M_{\kappa2}} \cdot \Delta L \quad (3.25)$$

Для розрахунку за вище вказаними залежностями сумарної похибки

необхідно визначити абсолютні похибки по кожній із складових. Аналіз цих складових полягає у визначенні окремих факторів впливу на ці складові. Зокрема похибка вимірювання витрати визначається похибкою витратоміра, похибкою перетворення сигналу з витратоміра до мікроконтролера. Також необхідно врахувати, що визначається різниця витрати при відсутності і наявності течії, як на початку так і в кінці ділянки трубопроводу. Тому дані похибки будучи корельованими, в силу аналогічності будови та точності самих витратомірів, а також каналів передачі сигналів необхідно розраховувати з врахуванням коефіцієнта кореляції, близького до 1, тобто шляхом алгебраїчного сумування. Похибка вимірювання довжини трубопроводу залежить від точності використовуюваного засобу вимірювання віддалі. Оскільки віддаль складає в середньому  $10^4$  м то похибка вимірювання даної величини не перевищує 50 м. Таку точність забезпечує лічильник пробігу автомобіля.

$$L = 10000 \text{ м}, \Delta L = 50 \text{ м}$$

$$M_{n1} = 35000 \text{ кг/год}$$

$$\Delta M_{n1} = M_{n1} \cdot \delta M_{n1} = 35000 \cdot 0,01 = 350 \text{ кг/год}$$

$$M_{n2} = 35200 \text{ кг/год}$$

$$\Delta M_{n2} = M_{n2} \cdot \delta M_{n2} = 35200 \cdot 0,01 = 352 \text{ кг/год}$$

$$M_{к1} = 33200 \text{ кг/год}$$

$$\Delta M_{к1} = M_{к1} \cdot \delta M_{к1} = 33200 \cdot 0,01 = 332 \text{ кг/год}$$

$$M_{к2} = 33000 \text{ кг/год}$$

$$\Delta M_{к2} = M_{к2} \cdot \delta M_{к2} = 33000 \cdot 0,01 = 330 \text{ кг/год}$$

Маючи всі необхідні дані для визначення абсолютної похибки пристрою, спершу обчислюємо кожний із доданків формули (3.2.1), тобто їх часткові похідні.

$$\frac{\partial X}{\partial M_{n1}} \Delta M_{n1} = -10000 \frac{33200 - 33000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)^2} \cdot 350 = -4.375 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\frac{\partial X}{\partial M_{n2}} \Delta M_{n2} = 10000 \frac{33200 - 33000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)^2} \cdot 352 = 4.4 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\frac{\partial X}{\partial M_{\kappa 1}} \Delta M_{\kappa 1} = \left( \frac{10000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)} - \right. \\ \left. - 10000 \frac{33200 - 33000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)^2} \right) \cdot 332 = 4.15 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\frac{\partial X}{\partial M_{\kappa 2}} \Delta M_{\kappa 2} = \left( - \frac{10000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)} + \right. \\ \left. + 10000 \frac{33200 - 33000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)^2} \right) \cdot 330 = -4.125 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$\frac{\partial X}{\partial L} \Delta L = \frac{33200 - 33000}{(|35000 - 35200| + 33200 - 33000)} \cdot 50 = 25 \text{ м}$$

Підставивши відповідні значення кожного із доданків у формулу (3.19), і обчисливши, результат буде представляти абсолютну похибку вимірювання.

$$\Delta X = -4.375 \cdot 10^3 + 4.4 \cdot 10^3 + 4.15 \cdot 10^3 - 4.125 \cdot 10^3 + 25 = 75 \text{ м}$$

Оскільки абсолютна похибка характеризує точність системи кількісно, а не якісно, тому знаходимо відносну похибку вимірювання пристроєм місця витoku від початку вимірювальної ділянки до розташування витoku, яка характеризує якісно.

Відносна похибка становить:

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X} = \frac{75}{10000} \cdot 100 = 0.75\%$$

### 3.3 Висновки до розділу

Здійснено класифікацію видів похибок, що дало можливість віднести виявлені в пристрою похибки до конкретних видів для їх сумування.

Проведено аналіз основних зовнішніх і внутрішніх факторів впливу на

роботу системи та на точність виявлення координати витоку. Розроблена схема нагромадження сумарної похибки згідно з встановленою класифікацією похибок.

Розрахована сумарна похибка системи диференційним методом на основі встановленої залежності між витратами речовини на початку та в кінці обстежуваної ділянки трубопроводу певної довжини.

Розраховане значення сумарної похибки, яке склало 0,75% ,свідчить про достатньо високу точність для виявлення витоку на довгих (до 10 км) ділянках трубопроводів.

## ВИСНОВОК

У магістерській роботі розроблено систему для визначення координати витoku чи несанкціонованої врізки в магістральних трубопроводах, довжиною до 10000 м., проведено аналіз існуючих методів, їх переваги та недоліки.

Теоретично обґрунтовано можливість визначення місця зосередженого відбору за зміною витрати на початку і в кінці досліджуваної ділянки. Розроблено математичну модель процесу руху речовини по трубопроводі з врахуванням тих характеристик, які змінюються при виникненні витoku: витрати на початку і в кінці обстежуваної ділянки, гідравлічного опору, зміни тиску, зміни характеру потоку.

Встановлено математичну залежність, яка дозволяє за характером зміни витрати опосередковано визначати координати зосередженого відбору вздовж трубопроводу.

Розроблено конструкцію системи контролю герметичності та течошукання. На основі розробленої структурної схеми визначено основні елементи системи. Обґрунтовано вибір типу та розроблено конструкцію лічильника- витратоміра. Вибрано коріюлісовий тип витратомір.

Розроблено конструкцію пристрою для приймання інформаційних сигналів від витратомірів, манометрів та термометрів для їх оброблення та передачі до мікроконтролера. Розроблено програму роботи мікроконтролера, яка забезпечує швидше обчислення вхідних даних, проводить відсортування хибних результатів, забезпечує зручне та надійне збереження інформації, полегшує налаштування системи до роботи.

Здійснено метрологічний аналіз розробленої системи, розроблено схему нагромадження похибок. Розраховане значення сумарної похибки, свідчить про достатньо високу точність виявлення координати витoku на довгих (до 10 км) ділянках трубопроводів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартинюк Р.Т. Контроль герметичності магістральних газопроводів // Прикарпатський вісник НТШ. 2017. - № 1. - С. 249-259.:
2. Подолян О.О. , Тимчик Г.С. Контроль якості монтажу муфт на магістральний трубопровід : монографія.-К. КПІ ім. І. Сікорського, вид-во «Політехніка» , 2020 180 с.
3. Власюк Я.М. Лічильники природного газу на сучасних спеціалізованих газовимірювальних станціях // Методи та прилади контролю якості.- 2003.-№11.-С.62-64.
4. Гімер Р.Ф., Гімер П.Р. Основи газової динаміки: навч. посібник.- Івано-Франківськ. Факел, 2002.- 228 с.
5. Райтер П.М., Середюк О.Є. Контроль складу і витрати газорідних потоків: Конспект лекцій. – Івано-Франківськ: Факел, 2004.-124с.
6. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник/ М.П. Андріішин, О.М. Карпаш, І.С. Петришин, О.Є. Середюк, С.А. Чеховський та ін. – Івано-Франківськ: ПП “Сімик”, 2004.-160с.
7. Кісіль І.С, Середюк О.Є., Витвицька Л.А. Основи вимірювальної техніки. – Івано-Франківськ: Факел, 2001.-с150.
8. Кісіль І.С. Конструювання вузлів вимірювальних приладів: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Івано-Франківськ. Факел, 2004. – 328с. – ISBN 966-694-014-8.
9. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами
- 10 Чеховський С.А., Середюк О.Є., Петришин І.С.,Піндус Н.М.,Ващишак С.П.,Витвицька Л.А.,Кононенко М.А., Романів В.М. Метрологія і технологічні вимірювання в нафтогазовій промисловості. Навч. посібник Факел, 2010, с. 500.

- 11 Гімер Р.Ф., Гімер П.Р. Основи газової динаміки. навч посібник.- Івано-Франківськ.: Факел, 2002.- 228 с.
12. Масова витрата [Електронний ресурс].  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0\\_%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B0)
13. Ультразвуковий лічильник <https://ectc.com.ua/schetchiki-vody/ultrazvukovyj-lichylnyk-vody/> [Електронний ресурс].
14. Тахометричні витратоміри [Електронний ресурс].  
<https://studfile.net/preview/9934619/page:6/>
15. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: у 2-х томах / М.К.Дорожовець, В.С.Мотало, Б.М. Стадник, В.Б.Василюк, Р.В. Борек, А.В.Ковальчик. – Львав: Львівська політехніка, 2005. – 1529 с.
- 16.. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
- 17 Боженко С.А. Метрологія стандартизація та акредитація.- Львів: Львівська Політехніка, 2004 .- 365 с.
18. Головка А.С., Реґо В.Г. , Скрипник А.Д. Метрологія та вимірювальна техніка, К.:Либідь, 2003,- 295 с.
- 19.Поліщук Є. С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин. – Львів: Вид-во державного університету “Львівська політехніка”, 2000. 359 с.
- 20 Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: у 2-х томах / М.К.Дорожовець, В.С.Мотало, Б.М. Стадник, В.Б.Василюк, Р.В. Борек, А.В.Ковальчик. – Львав: Львівська політехніка, 2005. – 1529 с.