

Національний університет «Львівська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Костик Ігор Володимирович

Прим. № _____

УДК 681.121.84

ДИСЕРТАЦІЯ

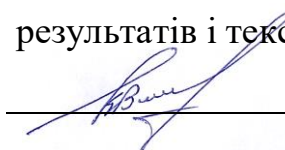
ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗМІННОЮ ГАЗОДИНАМІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ

05.11.01 - прилади та методи вимірювання механічних величин

152 - метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 / Костик І.В. /

Науковий керівник

Матіко Федір Дмитрович,

д.т.н., професор

Львів - 2020

АНОТАЦІЯ

Костик І.В. Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 - Прилади і методи вимірювання механічних величин» (152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу змінної газодинамічної структури потоку на точність вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску. Шляхом аналізу фізичної суті процесу вимірювання витрати нестационарного потоку виявлено причини виникнення та виконано класифікацію додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати нестационарного потоку. Для кількісного визначення цих складових невизначеності удосконалено методику оцінювання додаткової складової невизначеності, яка зумовлена нелінійністю залежності витрати від перепаду тиску та методику оцінювання додаткової складової невизначеності, що виникає внаслідок відсутності інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння витрати. Розроблено математичну модель пневматичного каналу перетворювача тиску (перепаду тиску). Розроблено експериментальну установку для дослідження динамічних властивостей пневматичного каналу та виконано експериментальні дослідження, за результатами яких підтверджено адекватність цієї моделі. Шляхом застосування лінеаризованої математичної моделі пневматичного каналу досліджено залежність частоти резонансу від конструктивних характеристик каналу та розроблено рекомендації для уникнення резонансу в пневматичному каналі перетворювачів тиску (перепаду тиску). Розроблено експериментальну витратовимірювальну установку та проведено дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу витратоміра змінного перепаду тиску на коефіцієнт

витікання діафрагми. На основі результатів виконаних експериментальних досліджень розроблено нові аналітичні залежності для кількісної оцінки додаткової невизначеності коефіцієнта витікання діафрагми, яка зумовлена впливом виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу. Удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірюваного значення витрати, шляхом введення додаткових складових невизначеності, які зумовлені нестационарністю потоку газоподібного середовища та впливом виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу, що дає можливість розширити область застосування методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою. Результати дисертаційної роботи впроваджено у науково-дослідних та виробничих підприємствах, що займаються дослідженням, проектуванням, виробництвом та налагодженням систем вимірювання витрати енергоносіїв.

Ключові слова: метод змінного перепаду тиску, вимірювання витрати, звужувальний пристрій, нестационарний потік, структура потоку, додаткова невизначеність.

АННОТАЦІЯ

Костик І.В. Измерения расхода газов с изменяемой газодинамической структурой потока. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения механических величин» (152 – Метрология и информационно-измерительная техника). – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2020.

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния изменяемой газодинамической структуры потока на точность измерения расхода газов методом переменного перепада давления. Путем анализа физической сущности процесса измерения расхода нестационарного потока выявлены причины возникновения и выполнено классификацию дополнительных составляющих неопределенности

измеряемого значения расхода нестационарного потока. Для количественного определения этих составляющих неопределенности усовершенствована методика оценки дополнительной составляющей неопределенности, обусловленной нелинейной зависимостью расхода от перепада давления и методику оценки дополнительной составляющей неопределенности, возникающей вследствие отсутствия инерционного члена в подкоренном выражении квазистационарного уравнения расхода. Разработана математическая модель пневматического канала преобразователя давления (перепада давления). Разработана экспериментальная установка для исследования динамических свойств пневматического канала и выполнены экспериментальные исследования, по результатам которых подтверждена адекватность этой модели. Путем применения линеаризованной математической модели пневматического канала исследована зависимость частоты резонанса от конструктивных характеристик канала и разработаны рекомендации для предотвращения резонанса в пневматическом канале преобразователей давления (перепада давления). Разработана экспериментальная расходоизмерительная установка и проведено исследование влияния выступов во внутреннюю полость измерительного трубопровода расходомера переменного перепада давления на коэффициент истечения диафрагмы. На основе результатов выполненных экспериментальных исследований разработаны новые аналитические зависимости для количественной оценки дополнительной неопределенности коэффициента истечения диафрагмы, которая обусловлена влиянием выступов во внутреннюю полость измерительного трубопровода. Усовершенствовано уравнения комбинированной неопределенности измеряемого значения расхода, путем введения дополнительных составляющих неопределенности, обусловленных нестационарностью потока газообразной среды и влиянием выступов во внутреннюю полость измерительного трубопровода, что позволяет расширить область применения метода переменного перепада давления для измерения расхода потоков с переменной газодинамической структурой. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательских и

производственных предприятиях, занимающихся исследованием, проектированием, производством и наладкой систем измерения расхода энергоносителей.

Ключевые слова: метод переменного перепада давления, измерения расхода, сужающее устройство, нестационарный поток, структура потока, дополнительная неопределенность.

ABSTRACTS

Kostyk I. V. Measurement of flow rate of gaseous fluids with variable gas-dynamic flow structure. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by the specialty of 05.11.01 “Devices and methods for mechanical values measurement” (152 – Metrology and information-measuring equipment). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

The dissertation work is devoted to research of influence of a variable gas-dynamic flow structure on the accuracy of flow rate measurement for gaseous fluids by means of the differential pressure method. By analyzing the physical principle of the process of flow rate measurement for non-stationary flow the additional components of uncertainty of the measured value of the flow rate are revealed and classified for non-stationary flow. To define the values of these components of uncertainty, the technique for estimating the additional component of uncertainty caused by the nonlinear dependence between the flow rate and the differential pressure is improved. The technique for estimating the additional component of uncertainty caused by the absence of the inertial term in the sub-root expression of the quasi-stationary flow equation is also improved. The mathematical model of the pneumatic channel of the pressure (differential pressure) transducer was developed. The experimental setup for studying the dynamic properties of the pneumatic channel was developed and the experiments were carried out. The adequacy of the developed model was confirmed by the results of the experimental study. The dependence of the resonance frequency on the design characteristics of the channel was investigated

by applying a linearized mathematical model of the pneumatic channel. The recommendations for avoiding the resonance in the pneumatic channels of pressure (differential pressure) transducers were developed. The experimental flow measuring facility was developed and the study of the influence of protrusions at the internal surface of the measuring pipe of a differential pressure flow meter on the discharge coefficient of orifice plates was carried out. Based on the results of experimental studies, new analytical dependences were developed for quantitative assessment of the additional uncertainty of the orifice plate discharge coefficient, caused by the influence of protrusions at the internal surface of the measuring pipe. The equation of combined uncertainty of the measured flow rate value is improved by introducing additional components of uncertainty, caused by non-stationary flow of gaseous fluid and by the influence of protrusions at the internal surface of the measuring pipe. The improved equation provides the possibility to expand the scope of the differential pressure method for measurement of flow rate of gaseous fluids with variable gas-dynamic flow structure. The results of the dissertation were implemented in R&D and production companies involved in research, design, production and installation of fluid energy carriers metering systems.

Keywords: differential pressure method, flow rate measurement, primary device, non-stationary flow, flow structure, additional uncertainty.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.

Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 наукових працях: 4 статі у фахових наукових виданнях України та 1 стаття в фаховому виданні Республіки Польща, що входить до міжнародної науково-метричної бази Web of science. 12 публікації у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, які вищезазначені.

1. Ф. Матіко, Р. Федоришин, І. Костик, Я. Грень. Аналіз причин виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку // Вісник: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. - 2011. - № 677. - С. 79-86.

2. Костик І. В., Матіко Ф. Д. Дослідження динамічних характеристик пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // *Методи та прилади контролю якості*. - 2014. - № 1. - С. 83-92.
3. І.В.Костик, Ф.Д.Матіко, В.І.Роман. Дослідження додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати нестационарного потоку // *Метрологія та прилади*. – 2020. - №2(82). – С.25-33
4. Kostyk I., Matiko F., Fedoryshyn R. Effect of flow pulsations on the accuracy of differential pressure flowmeters // *Challenges of Modern Technology*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 23–31. (Index Copernicus International).
5. F.Matiko, I.Kostyk, H.Matiko, V.Roman. Investigating the additional uncertainty of flowrate measurement caused by symmetrically disturbed flow // *Праці Одеського політехнічного університету*. – 2020. - №1(60). – С. 142-152.
6. Пістун Є.П., Костик І.В. Аналіз впливу параметрів пульсуючого потоку на точність витратомірів змінного перепаду тиску // *Вимірювання витрати та кількості газу: Шоста всеукраїнська науково-технічна конференція, 20-21 жовтня 2009 р., Івано-Франківськ : збірник тез доповідей*. - Івано-Франківськ, 2009. - С.56-57.
7. Костик І. Встановлення причин виникнення пульсацій потоку і їх впливу на вимірювання витрати витратомірами змінного перепаду тиску // *Друга Міжнародна конференція молодих вчених Енергетика та системи керування (EPECS-2010) в межах II-го міжнародного молодіжного фестивалю науки Litteris Et Artibus: Матеріали конференції. 25-27 листопада 2010р.* – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – с.20- 21.
8. Костик І.В., Матіко Ф.Д. Аналіз похибки вимірювання усередненого значення витрати за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску // *Перша всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, студентів та аспірантів Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології - 2011 АКІТ-2011: Матеріали конференції. 20-21 квітня 2011р.* – К.: НТУУ КПІ, 2011. – С.28-29.

9. І.В. Костик, Ф.Д. Матіко Аналіз додаткових складників невизначеності вимірюваного значення витрати пульсуючого потоку // Автоматика/Automatics – 2011. XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, 28-30 вересня 2011 року: матеріали конференції / Відп. за вип. М.Д. Кіселичник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – с. 158.

10. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Костик І.В. Дослідження резонансних явищ в імпульсних трубках витратомірів // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції Вимірювання витрати та кількості газу. - Івано-Франківськ. - 25 – 27 жовтня 2011 р. - С. 21.

11. Костик І.В., Лесовой Л.В. Визначення додаткових невизначеностей результату вимірювання витрати середовища в умовах пульсуючого потоку // Збірник тез доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи. 24-25 квітня 2012р., м.Київ, ПБФ, НТУУ КПІ. – 2012. – С.245-246.

12. Костик І.В., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Дослідження резонансних явищ у пневматичних лініях вимірювальних перетворювачів систем обліку газу // Тези доповіді XII Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи" – Київ, 23 - 24 квітня 2013 р. - С.252.

13. Костик І.В., Матіко Ф.Д. Аналіз невизначеності вимірювання витрати нестационарного потоку витратомірами змінного перепаду тиску // Тези доповіді XIII Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи – Київ, 23 - 24 квітня 2014 р. - С.228.

14. Roman Fedoryshyn, Fedir Matiko, Ihor Kostyk and Yevhen Pistun. Systematic Error of Gas Flow Rate Measurement Caused by Flow Pulsation // 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Arlington, Virginia, April 14 to 17, 2015

15. Костик І.В., Федоришин Р.М., Матіко Ф.Д. Моделювання пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Тези доповіді XV

Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи – Київ, 17 - 18 травня 2016 р. - С.203.

16. Костик І.В., Матіко Ф.Д. Дослідження впливу характеристик пневматичних ліній на вимірювальне значення тиску газового потоку // Тези доповіді XVIII Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи – Київ, 15 - 16 травня 2019 р. - С.178.

17. Костик І.В., Матіко Ф.Д., Роман В.І. Дослідження впливу конструктивних особливостей вимірювального трубопроводу на точність вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску // Тези доповіді XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020)» – Київ, 19 - 20 травня 2020 р. - С.104.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ..	24
1.1. Аналіз застосування витратомірів змінного перепаду тиску для вимірювання витрати газоподібних середовищ в умовах нестационарного потоку	25
1.2. Аналіз впливу геометричних характеристик вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску ...	30
1.2.1. Аналіз вимог до діаметра вимірювального трубопроводу та впливу відхилень вимірюваного значення діаметра на результат вимірювання витрати	30
1.2.2. Аналіз впливу виступів, заглиблень та прокладок на результат вимірювання витрати	34
1.2.3. Аналіз впливу конусних секцій вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати	37
1.2.4. Аналіз впливу зварних швів, що виступають у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати	39
1.2.5. Аналіз впливу шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу на результат вимірювання витрати	41
1.2.6. Аналіз впливу скорочення довжин прямолінійних ділянок трубопроводу на результат вимірювання витрати	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	50

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ	52
2.1. Теоретичні основи застосування методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати потоку із змінною структурою	52
2.2. Класифікація нестационарних потоків та додаткових похибок вимірювання їх витрати	56
2.2.1. Характеристики та класифікація нестационарних потоків газоподібних середовищ	56
2.2.2. Класифікація причин появи пульсацій та нестационарних режимів протікання газоподібних середовищ на вимірювальних ділянках трубопроводів	62
2.2.3. Додаткові невизначеності, які виникають при вимірюванні витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку, методом змінного перепаду тиску ...	62
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	69
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ	70
3.1. Дослідження динамічних характеристик пневматичних каналів перетворювачів тиску та перепаду тиску	70
3.1.1. Побудова математичної моделі пневматичних каналів перетворювачів тиску та перепаду тиску	70
3.1.2. Перевірка адекватності математичної моделі пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску	76
3.2. Моделювання резонансу в пневматичних каналах перетворювачів тиску та перепаду тиску	85

3.3.	Дослідження похибки визначення усередненого значення витрати газу при застосуванні методу змінного перепаду тиску	90
3.4.	Оцінювання додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати	96
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	107
РОЗДІЛ 4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ	109
4.1.	Розроблення установки для експериментальних досліджень впливу конструктивних особливостей вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати	109
4.2.	Експериментальні дослідження впливу виступів у вимірювальному трубопроводі на вимірюване значення витрати та коефіцієнт витікання звужувального пристрою	115
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	131
РОЗДІЛ 5.	РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ МЕТОДОМ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ СТРУКТУРИ	132
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5	135
	ВИСНОВКИ	136
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	138
	ДОДАТОК А. Протоколи відповідності геометричних розмірів вимірювального трубопроводу та камер усереднення	148
	ДОДАТОК Б. Паспорти стандартних діафрагм еталонного витратоміра	154

ДОДАТОК В. Паспорти стандартних діафрагм робочого витратоміра	159
ДОДАТОК Г. Результати експериментальних досліджень зміни витрати та коефіцієнта витікання стандартної діафрагми з відносним діаметром $\beta=0,2; 0,4; 0,5$, внаслідок впливу виступів в внутрішній площині вимірювального трубопровода	164
ДОДАТОК Д. Акт та лист відгук про застосування результатів дисертаційних досліджень	171

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
АЧС – амплітудно-частотний спектр;
ВЗПТ – витратоміри змінного перепаду тиску;
ВК – вимірювальний канал;
ВТ – вимірювальний трубопровід;
ЗВ – засіб вимірювання;
ЗП – звужувальний пристрій;
ЗТ – з'єднувальна трубка
МО – місцевий опір;
ОП – обчислювальний пристрій;
ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;
ПНК – пневматичний канал;
ППТ – вимірювальний перетворювач перепаду тиску;
ПТ – вимірювальний перетворювач тиску;
СРП – спосіб визначення кількості середовища з роздільним вимірюванням параметрів;
САП – спосіб визначення кількості середовища з автоматизованим вимірюванням параметрів;

ВСТУП

Обґрунтування теми дослідження.

Економне використання енергоносіїв, основним з яких є природний газ, можливе тільки за умови налагодження точного вимірювання його витрати та кількості. Застосування точних систем вимірювання витрати та кількості дає можливість виявляти втрати газоподібних середовищ, контролювати баланс об'єму газу в технологічних системах, усуває можливість зловживань під час економічних розрахунків між постачальником та споживачем, тому необхідно підвищувати точність вимірювання витрати плинних енергоносіїв.

Під час транспортування та розподілу газоподібного середовища, його параметри багаторазово змінюються, як внаслідок виконання над газом роботи, так і внаслідок зміни конструктивних характеристик трубопроводу. Внаслідок цього у вимірювальних трубопроводах (ВТ) витратомірів виникають ділянки із змінною газодинамічною структурою потоку, тобто ділянки із зміною профілю швидкості потоку, яка може виникати внаслідок впливу конструктивних характеристик ВТ, а також внаслідок зміни параметрів середовища (тиску, перепаду тиску на звужувальному пристрої) внаслідок наявності нестационарного потоку середовища.

Ці фактори мають значний вплив на точність вимірювання витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску. При вимірюванні витрати в умовах нестационарного потоку можуть виникати додаткові невизначеності, зумовлені нелінійністю рівняння витрати, інерційністю з'єднувальних трубок (ймовірністю виникнення явища резонансу), фільтруванням та зміною частоти дискретизації сигналів перепаду тиску та тиску середовища. Конструктивні характеристики ВТ (зокрема, наявність виступів у його внутрішній порожнині) також можуть спричинити додаткову невизначеність внаслідок зміни коефіцієнта витікання звужувального пристрою (ЗП). За результатами виконаного аналізу літературних джерел встановлено, що сьогодні, відсутні результати досліджень, які дають можливість оцінити ці додаткові невизначеності результату вимірювання витрати газоподібних середовищ.

У зв'язку з цим, особливої актуальності набувають дослідження впливу динамічних режимів потоку газу у вимірювальній ділянці ВТ та впливу конструктивних характеристик ВТ на невизначеність вимірюваного значення витрати, а також розроблення рекомендацій для зменшення додаткових складових невизначеності та підвищення точності вимірювання витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску.

Таким чином, задачі виявлення, оцінювання та зменшення додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати газових потоків із змінною газодинамічною структурою, які вирішуються у дисертаційній роботі, є актуальними.

Об'єкт дослідження

Процес вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою.

Предмет дослідження

Точність вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності та розширення області застосування витратомірів змінного перепаду тиску шляхом виявлення, оцінювання та зменшення додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою.

Для досягнення цієї мети, в роботі виконано такі завдання:

- виконано аналіз відомих результатів досліджень впливу нестационарних потоків газоподібного середовища та конструктивних характеристик ВТ на точність вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску;

- виділено задачі для подальших досліджень;

- виділено особливості застосування методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку, а також причини виникнення додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати;

- розроблено математичну модель пневматичного каналу (ПНК) вимірювального перетворювача тиску (ПТ), перепаду тиску (ППТ) та підтверджено її адекватність за результатами експериментальних досліджень;

- досліджено вплив резонансних явищ, які виникають в ПНК ПТ (ППТ) на результат вимірювання тиску середовища, та перепаду тиску на ЗП;

- досліджено додаткові складові невизначеності вимірюваного значення витрати в умовах нестационарного потоку;

- розроблено витратовимірювальну установку для експериментальних досліджень витратомірів змінного перепаду тиску;

- виконано експериментальні дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на вимірюване значення витрати, а також на коефіцієнт витікання стандартної діафрагми;

- розроблено аналітичні залежності додаткової невизначеності коефіцієнта витікання від геометричних характеристик ВТ, ЗП та висоти виступу;

- розроблено рекомендації для зменшення виявлених додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати та підвищення точності витрати в умовах із змінною газодинамічною структурою потоку.

Методи дослідження.

В процесі виконання дисертаційної роботи проводяться дослідження із застосуванням методів математичного моделювання газодинамічних процесів, що відбуваються у витратомірах, методів постановки та планування експериментів, методів статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень, теорії похибок та невизначеності результатів вимірювань. Виконуються експериментальні дослідження із застосуванням засобів вимірювання тиску, температури, витрати.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна полягає в тому, що:

- за результатами аналізу фізичної суті процесу вимірювання витрати нестационарного потоку витратомірами змінного перепаду тиску, виявлено причини виникнення додаткових складових невизначеності вимірюваного

значення витрати нестационарного потоку, що дало можливість сформулювати підходи до оцінювання кожної з цих складових та виконати їх класифікацію;

- шляхом застосування у сукупності аналітичного та емпіричного методів моделювання розроблено нову математичну модель пневматичного каналу, яка дає можливість дослідити зміну тиску в камері вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску під час нестационарного режиму потоку газоподібного середовища;

- отримано нові аналітичні залежності для обчислення додаткової невизначеності коефіцієнта витікання звужувального пристрою, яка зумовлена впливом виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу, що дають можливість оцінити цю складову невизначеності в залежності від геометричних характеристик вимірювального трубопроводу, звужувального пристрою та висоти виступу;

- удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірюваного значення витрати, шляхом введення додаткової складової невизначеності, зумовленої нестационарністю потоку газоподібного середовища, та складової, зумовленої виступами у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу, що дає можливість оцінити невизначеність вимірюваного значення витрати в реальних умовах експлуатації витратоміра змінного перепаду тиску.

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором особисто.

У наукових публікаціях, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: в роботах [11, 23] проведено аналіз причин виникнення додаткових похибок, які виникають внаслідок вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку; в роботах [13, 16] проведено аналіз додаткових складників невизначеності результату вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку; в роботах [9, 17, 18, 52, 66] розроблення математичної моделі ПНК, а також експериментальної установки для дослідження динамічних характеристик ПНК, визначення похибки

математичної моделі; в роботах [24, 15, 52, 66] розроблення залежностей для обчислення частоти резонансу у ПНК в залежності від довжини та діаметру з'єднувальної трубки та розроблення рекомендацій для уникнення явища резонансу; в роботах [10, 14] проведення досліджень додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати в умовах нестационарного потоку; в роботах [19, 69] розроблення витратовимірювальної установки та дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на вимірюване значення витрати та значення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми, отримання аналітичних залежностей додаткової невизначеності коефіцієнта витікання від геометричних характеристик ВТ, ЗП та висоти виступу; в роботах [12, 23] проведено аналіз та дослідження похибки вимірювання усередненого значення витрати за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску.

Апробація матеріалів досліджень.

Дисертаційна робота обговорювалась на наукових семінарах кафедри “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” Національного університету “Львівська політехніка”.

Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на наступних науково-технічних конференціях:

- XI Всеукраїнська науково-технічна конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 20 – 21 жовтня 2009 р., м. Івано-Франківськ);

- II-га Міжнародна конференція молодих вчених Енергетика та системи керування (EPECS-2010) в межах II-го міжнародного молодіжного фестивалю науки Litteris Et Artibus (Національний університет «Львівська політехніка», 25-27 листопада 2010р., м.Львів);

- I-ша всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ – 2011 (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 20-21 квітня 2011р., м.Київ);

- XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління. Автоматика 2011 (Національний університет «Львівська політехніка», 28-30 вересня 2011 р., м.Львів);

- XII Всеукраїнська науково-технічна конференції «Вимірювання витрати та кількості газу» (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 25 – 27 жовтня 2011 р., м. Івано-Франківськ);

- XI Міжнародна науково-технічна конференція Приладобудування: стан і перспективи. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 24-25 квітня 2012р., м.Київ);

- XII Міжнародна науково-технічна конференція Приладобудування: стан і перспективи. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 23-24 квітня 2013р., м.Київ);

- XIII Міжнародна науково-технічна конференція Приладобудування: стан і перспективи. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 23-24 квітня 2014р., м.Київ);

- 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Arlington, Virginia, April 14 to 17, 2015;

- XV Міжнародна науково-технічна конференція Приладобудування: стан і перспективи. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 17-18 травня 2016 р, м.Київ);

- XVIII Міжнародна науково-технічна конференція Приладобудування: стан і перспективи. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 15-16 травня 2019 р, м.Київ);

- XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020)» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 19-20 травня 2020 р, м.Київ).

Публікації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 наукових працях: 4 статі у фахових наукових виданнях України та 1 стаття в

фаховому виданні Республіки Польща, що входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International. 12 публікації у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, які вищезазначені.

Структура та обсяг роботи.

Дисертація робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літературних джерел та додатків. Дисертація викладена на 173 сторінках. Крім того, робота проілюстрована 32 рисунками, містить 23 таблиці, список літературних джерел із 89 найменувань та 5 додатків.

Наукове значення виконаного дослідження

Наукове значення виконаної роботи полягає в розвитку теорії методу змінного перепаду тиску, розширенні його області застосування, зокрема для вимірювання витрати та кількості газоподібного середовища із змінною газодинамічною структурою потоку.

Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані у таких наукових галузях як: прилади та методи вимірювання механічних величин, інформаційно-вимірювальні системи, автоматизація технологічних процесів.

Результати виконаного дослідження застосовані в навчальному процесі кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка» при вивченні навчальних дисциплін: «Технологічні вимірювання та прилади», «Спеціальні вимірювальні прилади та системи (за галуззю промисловості)», «Основи систем автоматизованого проектування» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- удосконалено методику оцінювання додаткової складової невизначеності вимірювання витрати газоподібного середовища, яка виникає внаслідок впливу нестационарності потоку;

- на основі розробленої математичної моделі пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску уточнено аналітичні

залежності, які дозволяють визначити резонансні частоти системи «імпульсна трубка – камера перетворювача» та наведено рекомендації для уникнення резонансних явищ в пневматичних каналах;

- розроблено експериментальну установку для дослідження динамічних характеристик пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску та досліджено динамічні характеристики пневматичного каналу з вимірювальним перетворювачем тиску ППС.3-РН для різних значень довжини з'єднувальної трубки; експериментально підтверджено адекватність математичної моделі пневматичного каналу та встановлено, що граничне значення похибки моделі не перевищує 6,4%;

- розроблено експериментальну витратовимірювальну установку для дослідження витратомірів змінного перепаду тиску, в тому числі і для дослідження впливу конструктивних характеристик вимірювального трубопроводу на точність вимірювання витрати;

- розроблено методику оцінювання додаткової невизначеності коефіцієнта витікання звужувального пристрою, яка зумовлена впливом виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу;

- розроблено рекомендації, щодо зменшення додаткових складових невизначеності, які виникають в умовах потоків зі змінною газодинамічною структурою, що дають можливість підвищити точність вимірювання витрати таких потоків.

Результати досліджень можуть бути застосовані на підприємствах, які займаються транспортуванням природного газу, його постачанням до підприємств і споживачів а також підприємствами, які займаються розробленням та впровадженням витратомірів плинних середовищ.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, темами, грантами.

Основою дисертаційної роботи є теоретичні і експериментальні дослідження виконані на кафедрі «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Національного університету «Львівська політехніка» у рамках

наукового напрямку «Вдосконалення і розробка елементів і підсистем збору та первинної обробки інформації в АСУ ТП».

Дослідження за темою дисертації виконувались згідно з планом науково-дослідних робіт Національного університету «Львівська політехніка» в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи:

- «Підвищення точності обліку природного газу на автоматизованих газорозподільвальних станціях з підігрівом газу». ДБ/Підігрів (реєстраційний номер 0106U000028, 2006-2007 рр.);

- «Підвищення точності вимірювання витрати та кількості вологого нафтового газу», ДБ/ВНГ (реєстраційний номер 0108U000336, 2006-2007 рр.);

- Г/д № 1304. Обстеження вузлів обліку природного газу в УМГ „Львівтрансгаз”;

- Г/д 0566. Розроблення стандарту організації ПАТ „Укртрансгаз”, який регламентує вимоги щодо застосування витратомірів змінного перепаду тиску за умови невідповідності геометричних характеристик вимірювальних трубопроводів і діафрагм вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ

У зв'язку із зростанням цін на енергоносії, в нашій державі стали першочерговими завдання впровадження енергозберігаючих технологій та економного використання енергоносіїв. Економне споживання енергоносіїв можливе тільки за умови налагодження їх точного обліку. Це дасть можливість виявляти втрати енергоносіїв в системах їх транспортування та розподілення, сприяє налагодженню чітких економічних стосунків між постачальником та споживачем і усуває можливість зловживань, тому необхідно підвищувати точність вимірювання витрати енергоносіїв в усіх ланках їх транспортування та постачання до споживачів [30].

В переважній більшості для вимірювання витрати газоподібних середовищ (енергоносіїв) застосовують витратоміри на основі звужувальних пристроїв (ЗП), зокрема, витратоміри зі стандартними діафрагмами [20, 29, 77], які характеризуються простотою конструкції, виготовлення, монтажу і використанням його на трубопроводах з внутрішнім діаметром від 50 до 1000 мм. Однак досить часто під час транспортування та розподілення природного газу, його параметри багаторазово змінюються, як внаслідок виконання над газом роботи, так і внаслідок зміни конструктивних параметрів чи умов прокладання газопроводів. У результаті цього в газопроводах виникають ділянки із змінною структурою потоку, зокрема виникають ділянки із нестационарним потоком [7, 28, 29, 34, 37, 54, 61], а також ділянки з спотвореним профілем швидкості потоку [63, 33, 41, 42, 72], перед первинним перетворювачем витрати (діафрагмою). Ці явища негативно впливають на точність вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску, оскільки спричиняють виникнення додаткових невизначеностей.

У зв'язку з цим, особливої актуальності набувають питання дослідження додаткових складових невизначеності, які виникають внаслідок виникнення

ділянок із змінною структурою потоку, а також розробки рекомендацій, щодо зменшення їх впливу на точність вимірювання витрати.

1.1. Аналіз застосування витратомірів змінного перепаду тиску для вимірювання витрати газоподібних середовищ в умовах нестационарного потоку

Стаціонарне протікання потоку в трубопроводі можливе лише при ламінарному режимі руху, який може існувати тільки при числах Рейнольдса в трубопроводі менших за 2000. У більшості промислових вимірювальних трубопроводах протікання середовища відбувається при числах Рейнольдса більших за 2000, тому режим протікання в них є турбулентним, що означає, що вони є лише статистично стаціонарними. У таких потоках існують постійні флуктуації (коливання) таких величин, як швидкість, тиск та температура. Тим не менше, якщо умови протікання потоків у ВТ є типовими для цілком розвиненого турбулентного потоку і періодичні пульсації відсутні, то приймають, що потік умовно стаціонарний (квазістаціонарними) і виконують вимірювання витрати згідно із вимогами стандартів щодо стаціонарного потоку ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:20009 [3-7] та ISO 5167.1-4:2003 [57-60].

Досить часто в умовах експлуатації під час роботи компресорних установок, вентиляторів, регулюючої арматури, можуть виникати періодичні пульсації параметрів потоку, спричиняють нестационарний режим руху вимірюваного середовища.

Аналіз джерел [7, 8, 28, 32, 34, 40, 44, 48, 50, 51, 53, 54, 61, 68, 76, 87, 88], які стосуються дослідження нестационарних (пульсуючих) потоків, показав, що основними джерелами пульсацій є:

- а) зворотно-поступальний рух поршнів компресорів, насосів, вентиляторів та ін.;
- б) вібрації трубопроводу та регулювального обладнання на ньому;
- в) періодичне спрацювання та коливання регулювального обладнання (клапани та ін.);

г) завихрення на предметах, встановлених у трубопроводі (гільза термометра, фільтр та ін.);

д) самозбуджувальні коливання потоку на трійниках;

е) геометрична конфігурація трубопроводу та фазовий склад потоку з можливим утворенням корків (в промислових трубопроводах).

Пульсації параметрів можуть розповсюджуватися як за напрямом потоку, так і проти, тому джерело пульсацій може знаходитися як до, так і після вузла вимірювання витрати. Залежно від відстані до джерела пульсацій, а також за рахунок впливу стискуваності середовища (як для рідин, так і для газів), амплітуда пульсацій на вимірювальній ділянці може бути малою і навіть невідчутною. Діапазон частот пульсацій складає від десятих герца до декількох сотень герц, а діапазон амплітуд пульсацій відносно середнього значення витрати становить від декількох відсотків до 100 % і більше [61].

До введення ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009 [3-7] у нормативних документах, зокрема в РД 50-21383 [33] питання вимірювання витрати та кількості середовища за методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарності потоку не розглядалось. Питаннями можливості вимірювання витрати та кількості середовища при нестационарному режимі потоку розглядається у міжнародному стандарті ISO 5167-1:2003 [57], де наведена умова допустимої межі пульсації перепаду тиску на ЗП, при якому можливе вимірювання витрати та кількості середовища за методом змінного перепаду тиску.

В ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 в додатку Ж [7] наведено основні правила, засоби та порядок проведення робіт, необхідних для визначення режиму протікання середовища та проведення вимірювання витрати в умовах нестационарності потоку вимірювального середовища. В даному стандарті також наведено схеми вимірювання, які рекомендуються для застосування при проведенні дослідів із визначення режиму протікання, а також при вимірюванні витрати та кількості середовища.

Аналіз джерел [7, 27, 28, 32, 47, 54, 55, 61, 68, 88] вказує на те, що наявність пульсацій потоку приводить до виникнення додаткових невизначеностей вимірювання витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку.

Для усунення даних невизначеностей в стандарті [7] пропонується введення в результати вимірювання витрати коефіцієнт корекції K_D , який визначається з формули:

$$K_D = \frac{1}{1 + 0,01 \cdot U'_D} \quad (1.1)$$

де U'_D - значення додаткової невизначеності вимірювання витрати в умовах нестационарного потоку, яке визначається з рівняння:

$$U'_D = \sqrt{U'_{Ду}{}^2 + U'_{Дін}{}^2 + U'_{Двим}{}^2 + U'_{Да}{}^2} \quad (1.2)$$

$U'_{Ду}$ - складова невизначеності, який враховує нелінійність залежності витрати $q(\tau)$ від перепаду тиску на ЗП $\Delta p(\tau)$;

$U'_{Дін}$ - невизначеність, яка враховує відсутність інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння залежності перепаду тиску від витрати;

$U'_{Двим}$ - складова невизначеності, який враховує вплив частоти дискретизації сигналів вимірювальних параметрів при умові застосування обчислювального пристрою витрати та кількості середовища;

$U'_{Да}$ - невизначеність, яка враховує динамічні властивості вимірювального каналу (ВК).

Однак потребує удосконалення методика оцінювання складової невизначеності, яка враховує нелінійність залежності витрати $q(\tau)$ від перепаду тиску на ЗП, а також методика оцінювання невизначеності, яка враховує відсутність інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння перепаду тиску, зокрема потребують уточнення аналітичні залежності для обчислення цієї складової невизначеності.

В стандарті ISO/TR 3313:1998 [61], який нормує нестационарні режими руху середовища при вимірюванні витрати та кількості середовища за методом змінного

перепаду тиску, а також в працях [32, 53, 54, 68], для оцінювання впливу нестационарності потоку на результат вимірювання витрати пропонується визначити додаткову похибку E_T за формулою:

$$E_T = \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma(\Delta p)}{\Delta p_c(\tau)} \right)^2} - 1, \quad (1.3)$$

де $\Delta p_c(\tau)$ – перепад тиску на ЗП в умовах стаціонарного потоку;

$\sigma(\Delta p)$ – середньоквадратичне відхилення перепаду тиску на ЗП у умовах нестационарного потоку.

Однак в ISO/TR 3313:1998 не надано належної уваги іншим складовим невизначеності вимірюваного значення витрати, що можуть виникати під час вимірювання витрати нестационарного потоку.

За результатами аналізу встановлено, що всі наявні літературні джерела, які присвячені тематиці вимірювання витрати та кількості середовища в умовах нестационарного потоку не дають чіткої методики для кількісної оцінки невизначеності результату вимірювання витрати нестационарного потоку, тому необхідно додатково провести дослідження для виявлення, дослідження та зменшення додаткових складових цієї невизначеності.

Дослідженню впливу резонансу у ВТ та в пневматичних каналах (ПНК) на точність вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску присвячена праця [37].

В даній праці авторами проведено розробку математичної моделі ПНК (з'єднувальної трубки, якою передається вимірюваний сигнал перепаду тиску, тиску, від ЗП до первинного вимірювального перетворювача (ПВП)), на основі якої проведено моделювання впливу дії резонансу на точність вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску.

За результатами математичного моделювання, авторами доведено, що при збільшенні діаметра ЗТ та зменшенні її довжини зменшується вплив резонансу на точність вимірювання витрати, однак при виникненні резонансу, амплітуда вимірюваного значення тиску (перепаду тиску) може зростати в декілька разів.

Однак дана математична модель ПНК авторами виведена для ламінарного режиму протікання середовища, а тому відповідно вона може давати хибні результати, оскільки у ВТ при вимірюваннях витрати середовища в умовах нестационарного потоку можуть виникати турбулентний режим, а відповідно необхідно провести додаткові дослідження впливу резонансу в ПНК на точність вимірювання витрати.

Для дослідження впливу пульсацій потоку на точність вимірювання витрати в роботі [34] автор використовує метод електро-газодинамічної аналогії. На основі якого пропонується проводити описувати процеси, які виникають в ВТ та ПНК при вимірюванні витрати в умовах нестационарного потоку схемами заміщення з використанням електричних параметрів, а саме активного опору, індуктивності та ємності. Автором пропонується в якості активного опору описувати сили тертя, які виникають внаслідок переміщення газового потоку від ЗП до ПВП, індуктивністю - міру інерційності газу, а ємністю – міру пружності газу.

На основі розробленої методики, автор надає рекомендації, щодо використання методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати газоподібних середовищ в умовах нестационарного потоку, а також розрахунку допустимих параметрів вузла обліку. Однак на сьогоднішній день, у зв'язку з розвитком і удосконаленням вимірювальної техніки, метод електро-газодинамічної аналогії втратив свою актуальність, оскільки є громіздкий і надає менш точні дані при дослідженнях вимірювання витрати в умовах нестационарного потоку.

Дуже важливим питанням при вимірюванні витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску є правильність вибору ПВП тиску та перепаду тиску. Дослідженням даних питань присвячено праці [7, 40, 44, 53] в яких авторами на основі експериментальних даних проведено порівняльний аналіз впливу пульсацій потоку на точність вимірювання тиску та перепаду тиску. Також наведено рекомендації, яких необхідно дотримуватись при виборі ПВП для проведення вимірювань витрати в умовах нестационарності потоку.

1.2. Аналіз впливу геометричних характеристик вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску.

Впровадження комплексу стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009 [3-7] для діючих витратомірів, що спроектовані за старими нормативними документами, потребує виконання цілого комплексу заходів, що передбачає, зокрема, і зміни геометричних характеристик ВТ, його конфігурації, зміни геометричних характеристик ЗП. При цьому іноді невідповідність вимогам стандартів стосується тільки окремих характеристик ВТ чи ЗП. За умови, що вплив зміни цих окремих геометричних характеристик на вимірюване значення витрати є відомим, може бути виконана корекція вимірюваного значення витрати, чи корекція його невизначеності та продовжена експлуатація такої вимірювальної системи.

Тому в даному розділі основна увага прикута до аналізу відомих досліджень впливу геометричних характеристик ВТ та ЗП на вимірюване значення витрати.

1.2.1. Аналіз вимог до діаметра вимірювального трубопроводу та впливу відхилень вимірюваного значення діаметра на результат вимірювання витрати

Похибка вимірювання діаметра ВТ на вході ϵ , відповідно, причиною виникнення додаткової похибки вимірювання витрати, що може бути визначена за формулою [57]:

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \frac{-2\beta^4}{(1-\beta^4)} \cdot \frac{\delta D}{D}, \quad (1.4)$$

де D – внутрішній діаметр ВТ перед ПЗП в умовах експлуатації, м;

q_m – масова витрата газоподібного середовища, кг/с;

β – відносний діаметр отвору ПЗП

$$\beta = \frac{d}{D}, \quad (1.5)$$

d – діаметр отвору або горловини ЗП в умовах експлуатації, м.

Як видно з (1.4), вплив похибки визначення діаметра трубопроводу зростає із збільшенням відносного діаметра β . Наприклад, при $\beta = 0,75$, додатна похибка визначення D значенням $+1,0\%$ спричинить від'ємну похибку вимірювання витрати q_m величиною близько $-0,9\%$.

У відповідності до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [3] ВТ повинен бути круглого перерізу по всій довжині прямолінійних ділянок. Виконання цієї вимоги контролюють візуально, за винятком ділянок у безпосередній близькості від ЗП (довжиною $2D$), де таку оцінку може бути дано лише за результатами вимірювань геометричних характеристик перерізу трубопроводу, виконаних відповідно до вимог, які залежать від типу ЗП. Зокрема для діафрагми, вимоги щодо вимірювання геометричних характеристик ВТ викладені в ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4].

У разі застосування збірної конструкції ВТ, уступ на стику його секцій не повинен перевищувати встановлених меж, які залежать від типу ЗП і відстані від уступу до ЗП.

Якщо для виготовлення ВТ використано прямошовні труби і для відбирання статичного тиску застосовують один окремий отвір, то шов труби на ділянці завдовжки не менше ніж $0,5D$, яка міститься безпосередньо перед отвором для відбирання тиску, не повинен бути розташований в секторі поперечного перерізу ВТ з кутом $\pm 30^\circ$ від осі цього отвору. В випадку, коли для відбирання статичного тиску використовують кільцеву щілину або декілька взаємно з'єднаних отворів, то шов може бути розташований в будь-якому секторі.

У відповідності до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4] на ділянці ВТ завдовжки $2D$, розташований безпосередньо перед діафрагмою (або корпусом камери усереднення, якщо вона є), жодне значення діаметра в будь-якій площині на цьому відрізку не повинно відрізнятися більше ніж на $0,3\%$ від усередненого значення D , визначеного відповідно до вимог цього стандарту.

Якщо на цій ділянці є зварний шов, то внутрішній вал шва повинен бути сточений його механічним обробленням до стану, при якому внутрішній діаметр ВТ, виміряний в площині зварного шва, буде відповідати даній вимозі.

За межами ділянки ВТ завдовжки $2D$, розташованої безпосередньо перед ЗП (або корпусом камери усереднення, якщо вона є), ВТ між діафрагмою і першим місцевим опором (МО) може бути виготовлений з однієї або декількох секцій труб.

В межах ділянки ВТ, розташованої між перерізами ВТ на відстані від ЗП $2D$ і $10D$, різниця значень діаметра суміжних секцій ВТ і висота уступу в місцях їх стику не повинні перевищувати $0,003D$.

Відхилення діаметра трубопроводу після ЗП набагато менш критичні для похибки вимірювання витрати за допомогою звужувальних пристроїв. Зокрема, для діафрагми (див 6.4.6 ISO 5167-2:2003 [58], ГОСТ 8.586.2:2009 [4]) відхилення значень діаметра трубопроводу після ЗП повинні знаходитись в межах 3% відносно значення діаметра ВТ, визначеного до ЗП.

У відповідності до рекомендацій ISO/TR 9464:2008 [62] секції ВТ, які прилеглі до ЗП слід виготовляти з товстостінних труб, для того щоб забезпечити можливість їх механічної обробки та відсутності різниці діаметрів суміжних секцій після цієї обробки.

Зокрема, контроль діаметра ВТ перед ЗП має бути зроблений таким чином, що будь який діаметр, який вимірюється в будь-якій площині по довжині секції $2D$ вище по потоку від ЗП, повинен не відрізнятись більш ніж на 0,3% від раніше середнього значення діаметру отриманого у відповідності до ISO 5167-2: 2003, 6.4.2 [58].

При цьому на додаток до значень діаметрів, які виміряні в трьох поперечних перерізах під час визначення середнього значення « D », діаметр повинен бути виміряний щонайменше в таких площинах [62]:

- $0,5D$ і $2D$ для діафрагм з трирадіусним способом відбору тиску;
- D і $2D$ для діафрагм з кутовим і фланцем способом відбору тиску.

Важливо, щоб під час контролю значень діаметра в кількох поперечних перерізах, не було виявлено систематичного відхилення виміряних значень від середнього значення D .

Одним із факторів, що також впливає на внутрішній діаметр ВТ є відкладення на внутрішній поверхні ВТ. Відкладення і накип призводять до

збільшення шорсткості стінок ВТ і зменшення його внутрішнього діаметра. Вплив відкладень на внутрішній поверхні ВТ на коефіцієнт витікання діафрагм показано на рисунках 1.1 та 1.2, які наведені в ISO/TR 12767:2007 [63].

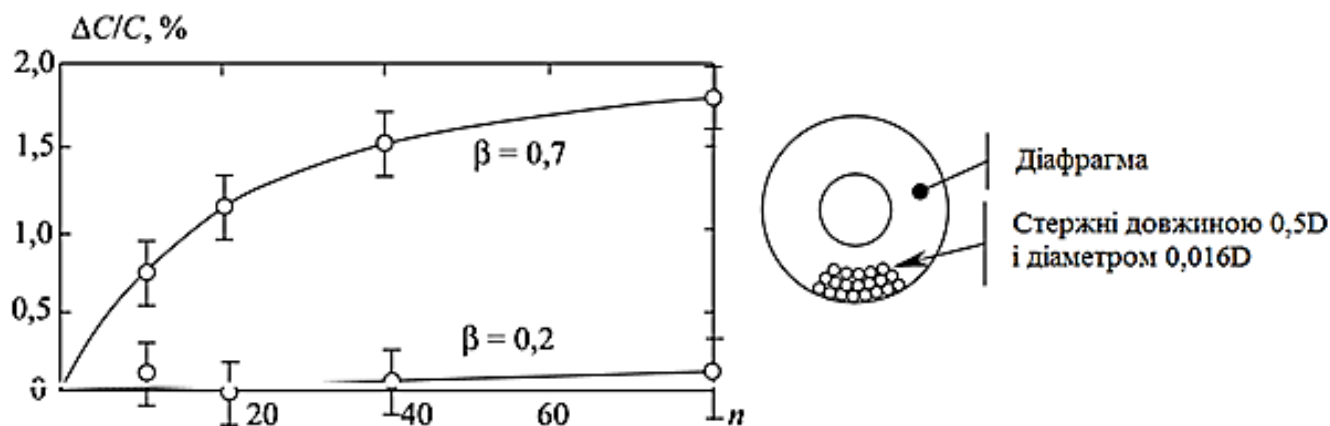


Рис.1.1. Результати дослідження впливу забруднення ВТ на коефіцієнт витікання ЗП

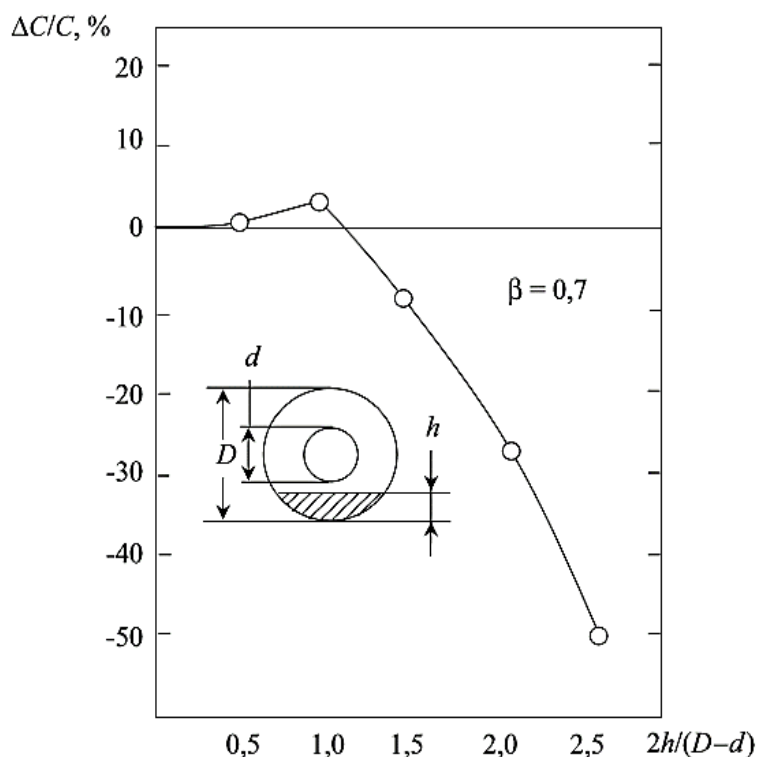


Рис.1.2. Результати дослідження впливу однорідних відкладень на дні ВТ на коефіцієнт витікання ЗП

На рисунку 1.1 показані результати моделювання забруднення ВТ перед ЗП шляхом укладання перед нею різної кількості (n) стрижнів довжиною $0,5D$ і діаметром $0,016D$. На рисунку 1.2 показаний результат досліджень впливу однорідних відкладень (висотою h) внизу порожнини ВТ до і ЗП. З графіків рисунка

1.2 видно, що відкладення перед діафрагмою призводять до зростання коефіцієнта витікання. Причому зі збільшенням відносного діаметра ЗП зростає вплив відкладень. Якщо відкладення досягають отвору ЗП (див. рис. 1.2), то коефіцієнт витікання починає зменшуватися з ростом висоти відкладень.

1.2.2. Аналіз впливу виступів, заглиблень та прокладок на результат вимірювання витрати

Будь-які конструктивні елементи, що виступають у внутрішню порожнину трубопроводу (прокладки, з'єднувальні кільця), можуть бути причиною виникнення збурень потоку і, відповідно, додаткових похибок, спричинених цими збуреннями потоку.

Слід зазначити, що вимірювання внутрішнього діаметра на кінцях кожної секції ВТ не є достатнім, щоб забезпечити відповідність вимірювального трубопроводу вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586. Невдале з'єднання секцій може бути причиною виникнення зміщень та уступів.

Для виконання вимог ISO 5167-2:2003 [58], а також ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4] рекомендується застосовувати секції, з'єднання яких мають елементи самоцентрування. Для цього можуть бути застосовані шпунтові фланці, фланці з виступом та впадиною, центрувальні штифти або втулки і виїмки.

В ISO/TR 12767:2007 [63] тільки якісно розглянуто ефекти, що виникають коли внутрішній діаметр з'єднувального кільця або прокладок менший від діаметра труби. За умови, що такі елементи розміщені на ділянці ВТ до ЗП (по потоку), можуть виникати дуже великі похибки вимірювання витрати. Величина і знак похибки вимірювання витрати потоку залежать від комбінації декількох факторів, зокрема, товщини кільця (прокладки), висоти його виступаючої частини, його положення по відношенню до ЗП і отворів відбору тиску, а також від шорсткості внутрішньої поверхні ВТ перед ЗП.

Вивченню впливу виступів та виїмок у порожнину трубопроводу присвячена робота [84]. Виїмки або виступи поблизу місця встановлення ЗП можуть виникати тоді, коли ЗП та пов'язане з нею обладнання монтується за

допомогою з'єднувачів кільцевого типу, які використовують для експлуатації при високому тиску, внаслідок невідповідності внутрішнього діаметру фланців і ВТ, а також внаслідок застосування ущільнюючих кілець на певних типах арматури, ЗП і т.д.

Виїмку зазвичай не вважають впливовим фактором, який формує суттєві збурення потоку [84]. Навпаки, наявність виступів у внутрішній порожнині трубопроводу можуть бути причиною суттєвих похибок вимірювання витрати.

Сучасні стандарти [3-7, 57-60] не мають чітких вказівок про допустимі виїмки або виступи. І американські [72] і міжнародні [57-60] норми вказують, що слід застосовувати прокладки, внутрішній діаметр яких рівний внутрішньому діаметру ВТ, або більший від нього (прокладка врівень із поверхнею ВТ або нижче неї). Стандарти США [72] дозволяють деяку виїмку в безпосередній близькості від ЗП для обох фланців і ділянок ВТ (на відстані $2,5D$ вгору за течією, та $8D$ вниз за течією). Виїмка менше 6,4 мм (1/4 дюйма) дозволена для всіх значень β . Якщо виїмка є більша, ніж 6,4 мм (1/4 дюйма), то вона допускається тільки для наступних умов: $\beta \leq 0,3$, $D=50$ мм; $\beta \leq 0,4$, $D=75$ мм; і $\beta \leq 0,5$, $D=100$ мм.

Міжнародний стандарт [58], а відповідно і національний стандарт [4], містять вимоги стосовно діаметра та ширини камери усереднення для ЗП з кутовим способом відбору тиску. Ці стандарти містять умову, яка визначає межі відхилення діаметра камери усереднення та її ширини (тобто геометричні характеристики виїмки в безпосередній близькості до ЗП). Однак жодної інформації немає щодо ЗП з фланцевим способом відбору тиску.

Відповідно в роботі [84] досліджено вплив заглиблень або виступів у різних місцях ВТ вздовж невеликої відстані в околі ЗП. Розглянуто чотири ділянки ВТ, де часто виникають виступи (виїмки):

- в безпосередній близькості до ЗП;
- в безпосередній близькості після ЗП;
- на відстані $2D$ до ЗП (вище за потоком),
- на відстані $2D$ до ЗП (нижче за потоком).

За результатами досліджень, викладених в [84], зроблено такі висновки:

1. У трьох з вивчених інсталяцій, наявність виступу викликало збільшення коефіцієнта витікання C . Це значення збільшувалось як з ростом висоти виступу, так і з ростом β . Єдиний виняток: в випадку наявності виступів на відстані $2D$ нижче за течією, не було виявлено ніякого ефекту.

2. Виступи на відстані $2D$ перед ЗП можуть мати істотний вплив на коефіцієнт витікання C . Варіація похибки аналогічна випадку із уступами безпосередньо перед ЗП, однак, величини менші. Наприклад, значення похибки C при виступах $6,3\%D$ або менше знаходяться в межах похибки повторюваності даних для $\beta=0,3$; в той час як для $\beta=0,5$, виступ повинен перебувати на рівні або нижче $1,7\%D$; і для $\beta=0,7$, виступ не повинен перевищувати $0,9\%D$, щоб досягти цієї точності (похибки повторюваності даних).

3. Як і очікувалося, виступи безпосередньо перед діафрагмою викликають найбільш значні відхилення коефіцієнта витікання C в залежності від розміру виступу і відносного діаметра β діафрагми. Для $\beta=0,3$, похибки були незначними для виступів висотою менше $5,8\%D$, але були вищими, ніж $1,6\%$ при висоті виступу рівній $12,5\%D$. При $\beta=0,5$ вплив виступів є значно більшим і повинен бути врахованим вже при висоті виступу більше $1,0\%D$. Зокрема, відхилення коефіцієнта витікання C досягають значення $11,5\%$ при висоті виступу рівній $12,5\%D$. Для $\beta=0,7$ вплив виступів є ще більшим і виступів слід уникати взагалі або забезпечувати висоту нижче $0,38\%D$, щоб зберегти відхилення коефіцієнта витікання в межах його невизначеності. Для $\beta=0,3$ і $0,5$ висота виступів повинна бути нижчою $5,8\%D$ і $1\%D$, відповідно, щоб зберегти відхилення коефіцієнта витікання в межах його невизначеності.

4. Виступи безпосередньо після ЗП мали набагато менший ефект, ніж виступи перед ЗП. Насправді, для $\beta=0,3$ і $0,5$, ефект був незначним навіть при найвищих виступах.

Для $\beta=0,7$, відхилення коефіцієнта витікання були меншими $0,5\%$ при виступі $6,25\%D$, але значення відхилення коефіцієнта витікання є вищими 5% і були отримані з виступом $12,5\%D$. На підставі даних [84] можна зробити висновок,

що виступ повинен бути нижче $3\%D$, щоб досягати відхилення в межах відтворюваності даних для цього β .

5. При наявності виступу висотою $12,5\%D$ на віддалі $2D$ вниз по потоку від ЗП, істотного впливу на значення коефіцієнта витікання C_d не виявлено.

6. Як і слід було очікувати виїмки мають істотно нижчий вплив, аніж виступи. Досліджуючи розміщення виїмки на віддалі $2D$ перед ЗП (вище по потоку) встановлено, що:

- для $\beta=0,3$ і $0,5$, відхилення є незначними,

- для $\beta=0,7$ отримано відхилення коефіцієнта витікання C_d на рівні $0,32\%$ і $0,22\%$ для ВТ з виїмками глибиною $6,25\%D$ і $12,5\%D$, відповідно. Оскільки не існує ніякого логічного пояснення більш високого відхилення для меншого поглиблення, ці результати вимагають перевірки.

7. Подібно до результатів п.6, для виїмок розміщених на відстані $2D$ вниз за потоком (після ЗП), дані для обох $\beta=0,3$ і $\beta=0,5$ не показали ніякого впливу на коефіцієнт витікання C для виїмки до $12,5\%D$. Проте, при $\beta=0,7$, відхилення від приблизно $0,8\%$ до $0,9\%$ були отримані для виїмок глибиною більше $6,25\%D$.

8. Безпосередньо після ЗП, виїмки до $6,25\%D$ не роблять ніякого впливу на коефіцієнт витікання для всіх значень відносного діаметра ЗП, в той час як виїмка глибиною $12,5\%D$ спричинила зниження коефіцієнта витікання (негативне відхилення) на $0,25\%$ для $\beta=0,7$.

9. Для виїмок на відстані $2D$ після ЗП не виявлено ніякого впливу на коефіцієнт витікання для всіх β .

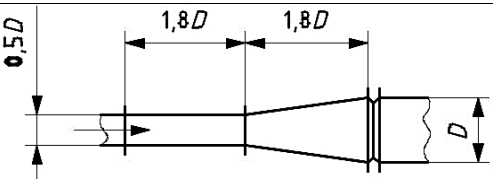
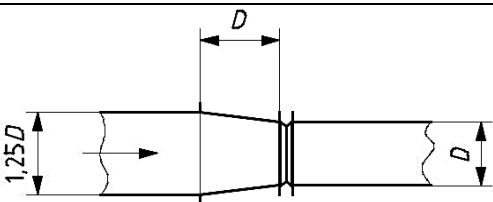
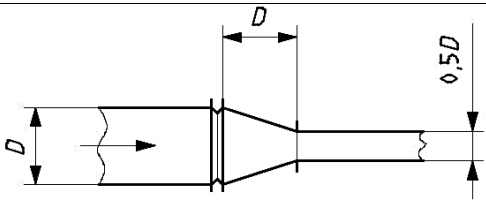
1.2.3. Аналіз впливу конусних секцій вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати

Стандартами ДСТУ ГОСТ 8.586:1,2,3,4,5:2009 [3-7] визначено мінімальні довжини прямолінійних ділянок ВТ між МО та ЗП для різних типів місцевих опорів. Зокрема, встановлено вимоги щодо розміщення різких звужень або розширень потоку, конфузорів чи дифузорів.

В ISO/TR 12767:2007 [63] наведено деякі результати досліджень зміни коефіцієнта витікання діафрагми в умовах, коли розміщення конусних секцій ВТ не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586:1,2,3,4,5:2009 [3-7]. Згідно з [63], слід уникати різких розширень трубопроводу в безпосередній близькості від ЗП, так як їх наявність викликає значні додаткові похибки вимірювання витрати. Конусні звуження ВТ також можуть призвести до суттєвих похибок визначення коефіцієнта витікання діафрагми (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Вплив конусних секцій на коефіцієнт витікання діафрагми [12]

Положення діафрагми	β	Очікувана зміна коефіцієнта витікання $C_d, \%$
а) Безпосередньо нижче за течією від конусної секції що розширюється		
	0,4 0,7	+ 10 + 50
б) Безпосередньо нижче за течією від конусної частини що звужується		
	0,4 0,7	- 0,5 - 2
в) Відразу вгору за течією від конусної частини що звужується		
	0,4 0,7	Від 0 до - 1 + 1

З таблиці 1.1 видно, що наявність конусної секції ВТ, яка розширюється в напрямку потоку, безпосередньо перед ЗП, не рекомендується, так як в результаті коефіцієнт витікання може бути збільшений на величину від 10% до 50%. Наявність конусної секції, що звужується та встановлена безпосередньо до або після ЗП, але за умови, що конусність не повинна бути більшою ніж показано на рисунках в табл.1.1, призводить до зміни коефіцієнта витікання, як правило, менш ніж на 2%.

1.2.4. Аналіз впливу зварних швів, що виступають у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати

В ISO/TR 12767:2007 [63] наведено загальний аналіз впливу зварних швів, що виступають у внутрішню порожнину трубопроводу. Ефект впливу кільцевих швів подібний до виступаючих кілець чи прокладок. Виступаючі шви можуть виникати у місцях приварки фланців до трубопроводу, а величина ефекту буде залежати від однорідності зварного шва, його висоти і положення по відношенню до одного або множинного відбору тиску для вимірювання перепаду тиску на первинному пристрої. Однак кількісно оцінити похибку в конкретній ситуації важко без допомоги процедури калібрування.

Слід зазначити, що зварна труба може бути використана [62, 63], за умови, що внутрішній зварний шов паралельний осі труби по всій довжині ВТ, необхідній щоб задовольнити вимоги до установки для конкретного ЗП. Будь-який зварний шов не повинен мати висоту більше допустимого відхилення значення діаметра ВТ. Якщо для відбору тиску не використовується кільцева камера, шов не повинен бути розташований в межах сектору $\pm 30^\circ$ відносно окремого отвору відбору тиску (див. рис.1.3). Якщо застосована кільцева камера, розташування шва не має істотного значення.

Якщо застосовано трубу з спіральним зварним швом, то цей шов повинен бути усунутий шляхом механічної обробки до гладкого стану для виконання вимог п.7.1.4 ISO 5167-1:2003 [57] (ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [3]).

На рисунку 1.3 приведені зони розташування поздовжнього шва ВТ щодо окремого отвору для відбору тиску.

Згідно з вимогами стандартів ISO 5167-1:2003 [57] (ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [3]) у випадках застосування прямошовної труби або звареної конструкції ВТ, або приварки фланців встик трубопроводу, необхідно на ділянці $2D$ перед ЗП шов зачистити. Крім того, слід виміряти внутрішній діаметр ВТ в перетині розташування шва і переконатися, що його величина не відрізняється більш ніж на $0,3\%D$ розрахованого відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.2,3,4:2009 (пункт 6.4.2) [2-4].

У разі застосування звареної конструкції ВТ і трирадіусного способу відбору тиску, поперечний зачищений шов повинен знаходитися на відстані не менше $0,06D$ до отвору для відбору тиску і не менше $0,03D$ після нього .

Отвори для відбору тиску при кутовому і фланцевому способах відбору тиску розташовуються в застійній зоні, тому для цих способів розташування поперечного зачищеного шва щодо отворів для відбору не нормується.

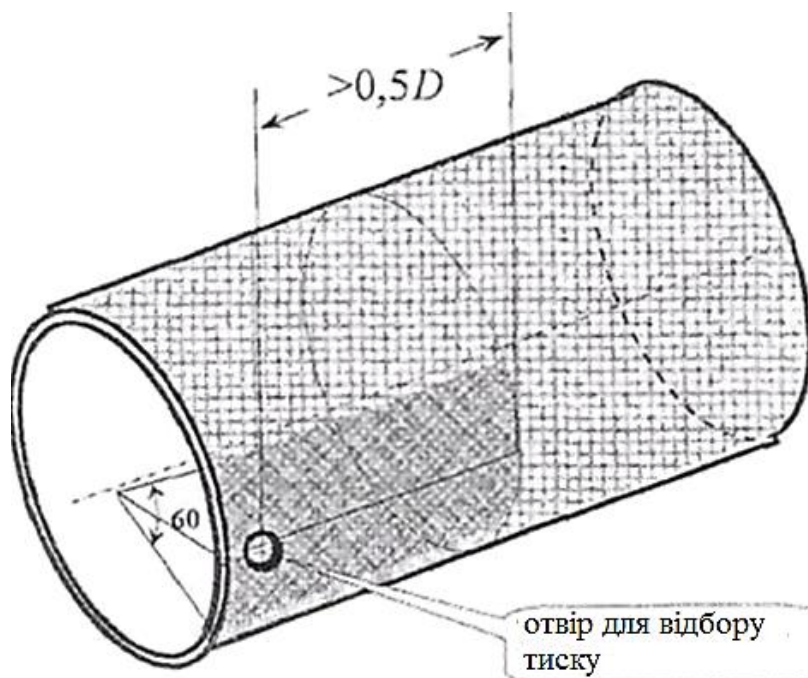


Рисунок 1.3. Положення поздовжнього шва щодо окремого отвору для відбору тиску

За межами ділянки 2D висота внутрішнього шва прямошовної труби, а також внутрішнього валика зварного шва з'єднання секцій ВТ не повинна перевищувати допуску на уступ, встановленого для кожного типу ЗП (ДСТУ ГОСТ 8.586.2,3,4:2009 (пункт 6.4.3) [3-6]).

1.2.5. Аналіз впливу шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу на результат вимірювання витрати

Рівняння для визначення коефіцієнта витікання ЗП, зокрема представлене в ISO 5167-2:2003 [58] (ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4]), отримане за умов виконання експериментальних досліджень на гладких ВТ. Застосування шорстких трубопроводів призводить до зміни коефіцієнта витікання, оскільки коефіцієнт витікання ЗП залежить від шорсткості внутрішньої поверхні ВТ, яка характеризується відносною еквівалентною шорсткістю R_{iu} / D . Зростання R_{iu} / D призводить до збільшення коефіцієнта витікання ЗП, при цьому, чим більше β і число Рейнольдса Re , тим більше змінюється коефіцієнт витікання C . Вплив шорсткості внутрішньої поверхні ВТ на величину коефіцієнта витікання в стандартах [5] враховують шляхом застосування поправкового коефіцієнта, для визначення якого необхідна інформація про величину еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні ВТ R_{iu} .

Коефіцієнт витікання C експериментально визначали для ВТ із певною шорсткістю їх внутрішньої поверхні, яка характеризується еквівалентною шорсткістю R_{iu} внутрішньої поверхні трубопроводу або середнім арифметичним відхиленням профілю шорсткості R_a . Залежність еквівалентної шорсткості R_{iu} від середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості R_a визначається спрощеним рівнянням [4, 58]

$$R_{iu} = \pi \cdot R_a. \quad (1.6)$$

При цьому діапазони зміни цих параметрів були обмежені граничними значеннями. Отже, значення коефіцієнта витікання діафрагми, обчислене за рівнянням із в [4, 58], буде правильним лише для умови, що значення R_a знаходиться в заданому діапазоні, тобто між мінімальним та максимальним

допустимими значеннями відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу $10^4 R_{a.min}/D$ і $10^4 R_{a.max}/D$, відповідно [20, 43].

Слід відзначити, що шорсткість внутрішньої стінки трубопроводу впливає на розподіл швидкості середовища по його перерізу. Якщо значення R_a виходить за вищевказані межі, то це приводить до спотворення розподілу швидкості середовища по його перерізу і, відповідно, до зміни значення коефіцієнта витікання C [30, 63].

Стандарт ISO 5167-1:2003 [57] не дозволяє застосовувати витратоміри змінного перепаду тиску в трубопроводах, в яких значення R_a виходить за допустимі межі. В деяких інших стандартах, зокрема в ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009 [3-7], дозволяється застосовувати витратоміри змінного перепаду тиску і в трубопроводах, в яких значення R_a виходить за ці межі, але при цьому слід вводити відповідний поправковий коефіцієнт. Це означає, що корекція впливу шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу на значення коефіцієнта витікання ЗП здійснюватиметься за допомогою поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $K_{ш}$.

Поправковий коефіцієнт $K_{ш}$ залежить від еквівалентної шорсткості трубопроводу $R_{ш}$, для визначення якого можна застосувати один з наступних методів, які наведені в ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [3]:

- пряме вимірювання середньоарифметичного відхилення профілю шорсткості R_a і обчислення $R_{ш}$;
- експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного тертя ВТ λ і обчислення $R_{ш}$;
- застосування табличних значень еквівалентної шорсткості ВТ.

На базі експериментальних даних, отриманих німецькими вченими та наведеними у DIN1952 [46], були отримані значення гранично допустимої відносної шорсткості $\left(10^4 \cdot \frac{R_{ш}}{D}\right)_{доп}$ трубопроводу, вище яких необхідно враховувати поправковий коефіцієнт $K_{ш}$ при розрахунку витрати середовища. Області значень

$10^4 R_{ш}/D$, які визначають умови застосування діафрагм згідно [46], показано на рисунку 1.4.

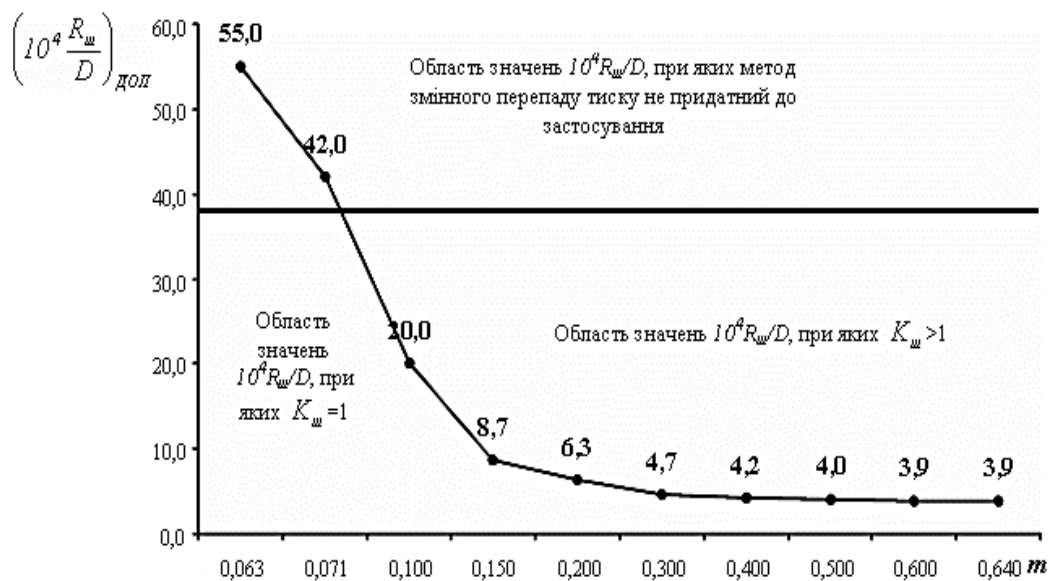


Рис. 1.4. Области значень $10^4 R_{ш}/D$ для визначення умов застосування діафрагм згідно [46]

Як було сказано вище, коефіцієнт витікання C був визначений для певного заданого діапазону значень середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості R_a . Згідно із [58], якщо значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості R_a для діафрагм з будь-яким способом відбору перепаду тиску не перевищують допустиме значення наведене в таблиці 1.2, і не є меншими за значення, вказане в таблиці 1.3, то в цьому діапазоні значень R_a поправковий коефіцієнт на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $K_{ш}$ приймають рівним одиниці. Якщо ж значення R_a для діафрагм з будь-яким способом відбору перепаду тиску є більшим за значення, яке вказане в таблиці 1.2, то поправковий коефіцієнт $K_{ш}$ буде більшим за одиницю. Якщо ж значення R_a для діафрагм з будь-яким способом відбору перепаду тиску є меншим за значення, яке вказане в таблиці 1.3, то поправковий коефіцієнт $K_{ш}$ буде меншим за одиницю.

Якщо при вимірюванні витрати за допомогою ЗП значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості R_a перевищує значення, вказане в табл. 1.2, або є меншим за наведене в табл. 1.3, то коефіцієнт витрати зміниться на величину

$$\Delta C = C \cdot K_{iu} - C. \quad (1.7)$$

Виходячи із (1.8) поправковий коефіцієнт K_{iu} можна визначити з залежності

$$K_{iu} = 1 + \frac{\Delta C}{C}. \quad (1.8)$$

Таблиця 1.2

**Максимально допустиме значення відносної шорсткості внутрішньої
поверхні ВТ $10^4 Ra_{max}/D$ [7]**

β	$10^4 Ra_{max}/D$ при Re								
	$\leq 10^4$	3×10^4	10^5	3×10^5	10^6	3×10^6	10^7	3×10^7	10^8
$\leq 0,20$	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0,30	15	15	15	15	15	15	15	14	13
0,40	15	15	10	7,2	5,2	4,1	3,5	3,1	2,7
0,50	11	7,7	4,9	3,3	2,2	1,6	1,3	1,1	0,9
0,60	5,6	4,0	2,5	1,6	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4
$\geq 0,65$	4,2	3,0	1,9	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3

Таблиця 1.3

**Мінімально допустиме значення відносної шорсткості внутрішньої
поверхні трубопроводу $10^4 Ra_{min}/D$ [7]**

β	$10^4 Ra_{min}/D$ при Re			
	$\leq 3 \times 10^6$	10^7	3×10^7	10^8
$\leq 0,50$	0,0	0,0	0,0	0,0
0,60	0,0	0,0	0,003	0,004
$\geq 0,65$	0,0	0,013	0,016	0,012

Значення поправки ΔC залежить від відносного діаметра отвору β та зміни гідравлічного опору ВТ $\Delta \lambda$, зумовленого відхиленням значення R_{iu} від його допустимих значень. У відповідності до [57, 56] зміна коефіцієнта витікання визначається за рівнянням

$$\Delta C = 3,134\beta^{3,5}\Delta\lambda. \quad (1.9)$$

Підставивши (1.9) у рівняння (1.8) та врахувавши, що за значення C взято величину $C=0,6$ [57], рівняння для розрахунку поправкового коефіцієнта на шорсткість $K_{ш}$ внутрішньої поверхні ВТ запишеться у вигляді:

$$K_{ш} = 1 + 5,22\beta^{3,5}(\lambda - \lambda^*), \quad (1.10)$$

де λ і λ^* – коефіцієнти тертя, розраховані при дійсному числі Re і значеннях еквівалентної шорсткості ВТ, які дорівнюють її дійсному значенню $R_{ш}$, і при допустимому значенні $R_{ш}^*$, відповідно.

Значення λ і λ^* розраховують [4, 57, 63] за формулою Колбрука-Уайта.

Таким чином, у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [4] закладено залежності для компенсації впливу однорідної шорсткості на вимірюване значення витрати. Однак часто виникає ситуація, коли ВТ перед ЗП має неоднорідну шорсткість, зокрема, оброблений ВТ на ділянці 2D та необроблені інші ділянки ВТ. Вплив такої неоднорідної шорсткості на окремих ділянках ВТ на вимірюване значення витрати потребує додаткових досліджень.

У роботі [41] представлено результати експериментального дослідження впливу шорсткості ділянок ВТ на коефіцієнт витікання ЗП. Дослідження виконано для ВТ діаметру 3, 4, 6 дюймів.

З урахуванням отриманих у роботі даних зроблено висновки про вплив шорсткості у витратомірах діаметру до 6 дюймів, а на основі даних [56] – для 10-дюймових витратомірів.

На основі даних, наведених в [41] можна зробити наступні висновки:

1. Для діафрагми з β менше, ніж 0,5, не існує статистично значущого впливу на коефіцієнт витікання, викликаного шорсткістю.
2. Для значень шорсткості $R_a < 3,8$ мкм (150 мікродюймів) вплив на коефіцієнт витрати, викликаний шорсткістю становить менше 0,5 % для будь-яких β менших ніж 0,75.
3. Для діафрагми з $\beta > 0,55$ і $R_a > 3,8$ мкм (150 мікродюймів), існує статистично значущий ефект впливу шорсткості на коефіцієнт витікання.

4. Для діафрагми з $\beta = 0,73$ і $Ra \approx 7,6$ мкм (300 мікродюймів) ефект впливу шорсткості на коефіцієнт витікання може перевищувати 1 %.

5. Область допуску обробки в обох стандартах [3, 4] не є достатньою для запобігання похибок вимірювання витрати, які можуть перевищувати 1 %.

6. Механічна обробка (обточування) ВТ витратоміра для 2D або 4D вище по потоку від ЗП до шорсткості 1,3 мкм (50 мікродюймів) не призводить до видалення всіх ефектів шорсткості труби вгору за течією для діафрагми з $\beta = 0,67$ і вище.

У роботі [79] визначено межі зміни шорсткості для застосування рівня коефіцієнта витікання ЗП, запропонованого Рідером-Харісом і Саттарі. Для врахування впливу шорсткості на коефіцієнт витікання діафрагми пропонується застосовувати рівняння

$$\Delta C = \beta^4 \Delta \lambda. \quad (1.11)$$

Однак, як було зазначено вище, у подальших роботах це рівняння було уточнене та до застосування у діючих стандартах рекомендоване рівняння (1.10).

В роботі [83] виконано дослідження впливу шорсткості вимірювальної ділянки ВТ, яка відповідає стану промислової експлуатації витратомірів, на коефіцієнт витікання ЗП. Дослідження виконано із застосуванням у якості плинного середовища природного газу високого тиску на установці NOVA в Дидсбурі, Альберта. В роботі показано, що різна якість обробки поверхні секцій трубопроводу можуть привести до ступінчатих змін шорсткості поверхні і, як наслідок, до змін профілю швидкості потоку. Особливо важливим є різке збільшення шорсткості поверхні вище по потоку від ЗП. Встановлено, що навіть 1.5D довжини секції ВТ з грубою шорсткістю може вистачити, щоб змінити покази витратоміра більше ніж на 1% при великому співвідношенні діаметрів.

Представлені у [83] результати тестів приводять нас до таких висновків:

- витратоміри на основі ЗП з відносним діаметром β більше, ніж 0,60 чутливі до змін шорсткості вимірювальної секції ВТ;

- збільшення шорсткості вимірювальної секції ВТ призводить до більш високого коефіцієнта витікання i , відповідно, до заниження вимірюваного значення витрати;

- похибки вимірювання зростають для вищих чисел Re ;

- в окремих випадках, результати вимірювань за допомогою витратомірів із стандартним ЗП можуть відрізнятися на 1,3% внаслідок впливу ефектів шорсткості поверхні;

- відносно короткий відрізок ВТ ($2.5D$) з більшою шорсткістю поверхні встановлений безпосередньо перед ЗП може мати значний вплив на вимірюване значення витрати;

- коротка секція обробленого (гладкого) ВТ не покращує точність витратоміра на основі ЗП.

В роботі [43] представлені результати експериментальних досліджень, виконаних з метою визначення впливу на коефіцієнт витікання різного ступеня шорсткості ВТ, що примикають до неї на різних відстанях. Експерименти проводилися для повітряного потоку в 12-ти, 6 і 3-дюймових трубах і потоку води в 3-и дюймових трубах.

Встановлено, що важкий накіп на поверхні секцій ВТ вниз за течією від ЗП, не робить істотного впливу на результати вимірювання. Вгору за течією, ефекти змінюються в залежності від ступеня шорсткості, діаметра ВТ, значення відносної площі отвору діафрагми m і числа Рейнольдса Re . Для значення $m = 0,5$ і значної шорсткості, об'єднані ефекти шорсткості і зменшення діаметра ВТ (внаслідок відкладень) призводять до виникнення збурюючого фактора K який приймає значення рівні близько 1,40, 1,17 і 1,08, відповідно, для 3, 6 і 12-дюймових труб. Встановлення секції ВТ з грубою шорсткістю довжиною $2D$ безпосередньо вище по потоку від ЗП дає ефект, близький до того, що можна було б отримати для дуже довгої шорсткої труби. Було виявлено, що можна екстраполювати результати ці результати і для дуже великих діаметрів ВТ.

Один з найбільш важливих результатів роботи [43] полягає в тому, що очищення та зменшення шорсткості відносно короткої довжини секції трубопроводу перед діафрагмою зменшує похибки, які можуть бути в іншому випадку досить значні. В роботі надано таблицю для вибору довжини секцій для очищення в залежності від діаметра ВТ, значення m та типу шорсткості (див. табл. 1.4). Результати цих досліджень, зокрема й таблиця 1.4 ввійшли до стандарту ISO/TR 12767:2007 [63].

Таблиця 1.4

Рекомендації щодо очищення ділянок ВТ [12, 70]

Внутрішній діаметр ВТ D , мм	Відносний діаметр ЗП β	Тип шорсткості	Ділянка ВТ для очищення, щоб отримати похибки, які не перевищують:				
			$\pm 3\%$	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$	0
76	0,5 - 0,59	кульки 7,0 мм	3 - 4	4 - 5	5 - 15	15 - 20	> 20
	0,71	кульки 7,0 мм	4 - 10	10 - 20	20 - 25	25 - 30	> 30
	0,71	Пісок		3 - 5	5 - 25	25 - 30	> 30
152	0,5 - 0,59	кульки 7,0 мм	2,5 - 4	3 - 5	5 - 12	12 - 20	> 20
	0,71	кульки 7,0 мм		4 - 15	15 - 25	25 - 30	> 30
	0,71	Пісок		1 - 3	3 - 4	4 - 20	> 20
305	0,71	кульки 7,0 мм		2,5 - 4	4 - 6	6 - 15	> 15
	0,71	Пісок			1 - 3	3 - 5	> 5

В стандарті [63], а також в роботі [43] рекомендовано, щоб для досягнення необхідної точності при вимірюванні витрати брудних рідин, витратоміри повинні бути сконструйовані таким чином, щоб існувала можливість для легкого періодичного огляду та очищення секцій ВТ вище по потоку від ЗП.

Результати досліджень, наведені в роботі [64], показали, що тонкі рідкі масляні плівки на внутрішній поверхні ВТ призводять до зростання шорсткості, а

отже і до збільшення значення коефіцієнта витікання діафрагм. Однак дуже тонкі масляні плівки на внутрішній поверхні ВТ, товщина яких знаходиться в межах найбільшої висоти профілю нерівностей поверхні ВТ, можуть призводити до зменшення їх шорсткості. У зв'язку з цим, необхідно підтримувати чистоту внутрішніх поверхонь ВТ шляхом їх періодичної чистки. Регламент робіт з очищення поверхонь повинен розроблятися з урахуванням досвіду експлуатації вузла вимірювань.

1.2.6. Аналіз впливу скорочення довжин прямолінійних ділянок трубопроводу на результат вимірювання витрати

Мінімальні значення прямолінійних ділянок, що вимагається встановлювати між ЗП і різними типами МО вище за течією наведені в п.6.2 ISO 5167-2:2003 [58], п.6.2 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4]. Мінімальні значення прямолінійних ділянок визначені в [4, 58] як для нульової додаткової невизначеності так і для 0,5% додаткової невизначеності коефіцієнта витікання.

Коли мінімальні вимоги, навіть для 0,5% додаткової невизначеності не можуть бути виконані, необхідно оцінити зміну коефіцієнта витікання, а також додаткову невизначеність вимірюваного значення витрати.

В ISO/TR 12767:2007 [63] зібрана та узагальнена інформація щодо зміни коефіцієнта витікання діафрагми з кутовим, фланцевим та трирадіусним способом відбору для умов скорочення довжин прямолінійних ділянок між ЗП та різними МО, а також щодо обчислення додаткової невизначеності вимірюваного значення витрати.

Додаткові дані про зміну коефіцієнта витікання діафрагм для великого числа місцевих опорів встановлених перед ЗП наведені в роботах [67, 82, 83, 87].

Отже інформація щодо зміни коефіцієнта витікання діафрагм, встановлених в умовах скорочених прямолінійних ділянок ВТ, наявна в ISO/TR 12767:2007 [63], дає можливість оцінити додаткову невизначеність вимірюваного значення витрати для багатьох конфігурацій ВТ.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами аналізу науково-технічної літератури, присвяченої питанням впливу нестационарного потоку, а також конструктивних особливостей витратомірів змінного перепаду тиску на похибку вимірювання витрати, встановлено, що такий вплив може бути суттєвим та може призводити до виникнення додаткових похибок що сягають десятків відсотків. Отже, дослідження таких похибок є важливим заданням, виконання якого дає можливість оцінити невизначеність вимірюваного значення витрати газоподібного середовища. А також надасть можливість зробити висновок про можливість застосування конкретної системи обліку для вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку.

Аналіз літературних джерел, присвячених вивченню питань впливу нестационарного потоку на точність вимірювання витрати показали, що станом на сьогоднішній день немає чітких кількісних характеристик такого впливу.

Також не відомі результати досліджень, які б дозволили математично пов'язати миттєве значення коефіцієнта витікання з параметрами пульсацій та врахувати вплив резонансу у ВТ та ПНК. Загальні рекомендації щодо проектування витратомірів змінного перепаду тиску дозволяють частково усунути вплив названого явища, однак необхідно провести уточнення математичної моделі ПНК для турбулентного режиму протікання середовища у ВТ.

В працях щодо якості виконання ВТ та досліджень відхилень діаметра ВТ від вимог діючих стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009 [3-7] вказує на те, що у наявній науково-технічній літературі не представлено результатів досліджень, які б містили кількісні характеристики впливу відхилень діаметра (циліндричності ВТ) перед ПЗП на невизначеність вимірюваного значення витрати.

Також встановлено, що виступи безпосередньо перед ЗП викликають найбільш значні відхилення коефіцієнта витікання в залежності від розміру виступу і відносного діаметра β діафрагми. Зокрема, при $\beta=0,5$ вплив виступів повинен бути врахованим вже при висоті виступу більше $1,0\%D$. При висоті виступу рівній $12,5\%D$, відхилення коефіцієнта витікання досягають значення

11,5%. Для $\beta=0,7$ вплив виступів є ще більшим і їх слід уникати взагалі або забезпечувати висоту нижче $0,38\%D$, щоб зберегти відхилення коефіцієнта витікання в межах його невизначеності.

Для формування чітких рекомендацій щодо зміни невизначеності коефіцієнта витікання діафрагми залежно від характеристик виступу, а, відповідно, і невизначеності вимірюваного значення витрати необхідно виконати ряд додаткових досліджень і уточнень.

Для виконання поставлених завдань, в даній дисертаційній роботі буде виконано дослідження:

- динамічних характеристик та резонансних явищ в ПНК перетворювачів тиску (ПТ) та перепаду тиску (ППТ) в умовах нестационарності потоку середовища;
- похибок визначення усередненого значення витрати газу при застосуванні методу змінного перепаду тиску та додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати в умовах нестационарного потоку;
- впливу виступів у вимірювальному трубопроводі на коефіцієнт витікання ПЗП.

За результатами даних досліджень буде розроблено рекомендації, які нададуть можливість:

- оцінювати додаткові складові невизначеності вимірювання витрати газоподібного середовища, які виникатимуть при вимірюваннях в режимі нестационарного потоку;
- визначити конструктивні параметри ПНК (довжина та діаметр ЗТ) ПТ та ППТ для усунення явища резонансу в умовах пульсацій потоку газоподібних середовищ;
- розраховувати значення невизначеності вимірюваного значення витрати, яка виникає внаслідок відхилень окремих геометричних характеристик вимірювального трубопроводу та звужувального пристрою від вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.1–5:2009, ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009, а саме невизначеності, яка враховуватиме зміну коефіцієнта витікання ЗП внаслідок виступів у внутрішню порожнину ВТ.

Результати даного розділу опубліковано в наукових працях [23, 31].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ

2.1. Теоретичні основи застосування методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати потоку із змінною структурою

Найбільш поширеним методом вимірювання витрати газоподібних середовищ є метод змінного перепаду тисків. Вимірювання витрати цим методом базується на вимірюванні потенціальної енергії речовини, що протікає через місцеве звуження в трубопроводі. Мірою витрати є перепад тисків на звужувальному пристрої (ЗП), який вимірюється вторинним приладом, а саме вимірювальним перетворювачем перепаду тиску (ППТ) [20, 29, 68].

Більшість теоретичних методів дослідження впливу нестационарного потоку на поведінку витратоміра змінного перепаду тиску розвинуті, розглядаючи витрату через діафрагму, як одномірну і приймаючи, що форма струмин не змінюється протягом періоду пульсацій. На основі цієї гіпотези, а також для нестисливого середовища взаємоз'язок між витратою і перепадом тиску визначається рівнянням моменту [54]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

та рівнянням нерозривності потоку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} = 0, \quad (2.2)$$

де U – швидкість потоку вздовж координати x ;

ρ - густина середовища;

P – абсолютний тиск середовища;

t – час.

Інтегруючи рівняння моменту відносно координати x отримують диференціальне рівняння, що зв'язує миттєву витрату та перепад тиску на звужувальному пристрої [68]:

$$\Delta p = K_1 \cdot \frac{dq_m}{dt} + K_2 \cdot q_m^2, \quad (2.3)$$

де Δp – перепад тиску на ПЗП;

q_m - масова витрата;

K_1 і K_2 коефіцієнти, які визначають з рівнянь (2.4) і (2.5) відповідно:

$$K_1 = \frac{4 \cdot l_e}{\pi \cdot d^2 \cdot C_k}, \quad (2.4)$$

l_e – інерційна довжина ($l_e \approx d$);

C_k – коефіцієнт звуження потоку;

d – діаметр отвору ЗП;

$$K_2 = \frac{1 - \beta^4}{C^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \rho}, \quad (2.5)$$

β – відносний діаметр отвору ЗП, який визначається за формулою (1.5);

ρ – густина середовища;

C – коефіцієнт витікання ЗП, який визначається за формулою, яка представлена в [4, 29]:

$$C = \frac{\mu \sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{\phi_2 + \psi_2 + \xi - \beta^4 \mu^2 (\phi_1 - \psi_1)}}, \quad (2.6)$$

ϕ_1, ϕ_2 – коефіцієнти Коріоліса, рівні відношенню дійсної кінетичної енергії потоку до його середньої кінетичної енергії до та після ЗП:

$$\phi = \frac{\int u^3 dF}{\bar{u}^3 F}, \quad (2.7)$$

u – швидкість потоку речовини;

F – площа поперечного перерізу;

ψ_1, ψ_2 – частки швидкісного напору, які враховують різницю значень вимірюваного та фактичного тиску до та після ЗП;

ξ – коефіцієнт гідравлічного опору ЗП.

Наявні методи розрахунку коефіцієнта витікання ЗП C , як правило, не забезпечують достатню для практики точність. Тому значення коефіцієнтів витікання є стандартизовані на основі обробки численних експериментальних досліджень.

Рівняння (2.3) отримане із врахуванням того, що осьова довжина ЗП є невеликою, тобто співмірною з довжиною хвилі пульсації потоку.

Під час дослідження нестационарного потоку його розглядають як квазістационарний, тобто приймають, що інерційний член $K_1 \cdot \frac{dq_m}{dt}$ у рівнянні (2.3) дорівнює нулю, а витрата зв'язана з перепадом тиску рівнянням

$$q_m = \sqrt{\frac{\Delta p}{K_2}}. \quad (2.8)$$

Підставивши (2.5) в (2.8), та провівши спрощення, отримуємо рівняння витрати реальної рідини:

$$q_m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} C E \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}, \quad (2.9)$$

де E – коефіцієнт швидкості входу, який визначається з формули [4, 29]:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}. \quad (2.10)$$

Рух потоку газоподібного середовища через ЗП аналогічний руху потоку реальної рідини. Основна відмінність газоподібного середовища від потоку реальної рідини полягає в тому, що газоподібне середовище є стискуваним, тобто його густина залежить від тиску, що повинно бути враховано в рівнянні масової витрати даного середовища.

В стандарті [3], а також в праці [29] для визначення витрати газоподібного середовища, в рівняння витрати реальної рідини (2.9) пропонується вводити

коефіцієнт розширення потоку газоподібного середовища ε , який визначається з формули:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_1}{(p_1-p_2)} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \frac{(\phi_2 - \psi_2 + \xi - \beta^4 \mu^2 (\phi_1 - \psi_1))}{1 - \beta^4 \mu_r^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}}} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)}. \quad (2.11)$$

А отже рівняння для розрахунку масової витрати газоподібного середовища буде мати вигляд:

$$q_m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} C E \varepsilon \sqrt{2\rho(p_1-p_2)}. \quad (2.12)$$

В основному витрату газоподібного середовища вимірюють в одиницях масової витрати q_m , об'ємної витрати в робочих умовах q_v , та об'ємної витрати приведеної до стандартних умов q_c . Взаємозв'язок між цими витратами описується такими рівняннями [4, 29]:

$$q_m = q_v \cdot \rho_1 = q_c \cdot \rho_c, \quad (2.13)$$

$$q_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} C E \varepsilon \sqrt{\frac{2(p_1-p_2)}{\rho_1}}, \quad (2.14)$$

$$q_c = \frac{\pi d^2 C E \varepsilon \sqrt{2\rho_1(p_1-p_2)}}{4\rho_c}, \quad (2.15)$$

де ρ_c – густина газоподібного середовища за стандартних умов.

Як вже зазначалося в п.1.2.5, на коефіцієнт витікання ЗП C значний вплив має значення шорсткості внутрішніх стінок ВТ, вплив якого враховується за допомогою поправочного коефіцієнта $K_{ш}$. Також на коефіцієнт витікання ЗП C впливає і радіус закруглення вхідної кромки діафрагми. Вплив радіуса закруглення вхідної кромки діафрагми, що перевищує допустимі межі, враховують за допомогою поправочного коефіцієнта $K_{п}$ [3, 29].

Залежності для визначення витрати газоподібного середовища (2.12), (2.14) та (2.15) з врахуванням поправочних коефіцієнтів $K_{ш}$ та $K_{п}$ будуть мати наступний вигляд [4, 29]:

$$q_m = F_0 K_{ш} K_n C E \varepsilon \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)}, \quad (2.16)$$

$$q_v = F_0 K_{ш} K_n C E \varepsilon \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1}}, \quad (2.17)$$

$$q_c = \frac{F_0 K_{ш} K_n C E \varepsilon \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)}}{\rho_c}. \quad (2.18)$$

В зарубіжних стандартах [57-60] поправочні коефіцієнти $K_{ш}$ і K_n не використовуються, тому що цими стандартами не допускається перевищення встановлених норм на граничні значення шорсткості внутрішньої стінки трубопроводу, та притуплення вхідної кромки отвору діафрагми.

Для визначення кількості газоподібного середовища, використовується наступна залежність [29]:

$$K_q = \int_{\tau_n}^{\tau_k} q(\tau) d\tau, \quad (2.19)$$

де K_q – кількість газоподібного середовища;

τ_n, τ_k — відповідно початкове та кінцеве значення часу, упродовж якого обчислюється кількість газоподібного середовища.

Кількість газоподібного середовища зазвичай обчислюють в одиницях об'єму, тому для визначення витрати, яка є складовою залежності (2.19) використовують формули (2.17) та (2.18).

2.2. Класифікація нестационарних потоків та додаткових похибок вимірювання їх витрати.

2.2.1. Характеристики та класифікація нестационарних потоків газоподібних середовищ.

Для характеристики нестационарних потоків газоподібного середовища, а також для їх класифікації потрібно отримати ряд параметрів. У цій роботі для класифікації режиму протікання середовища застосовано параметри, які визначають на основі підходів Додатку Ж стандарту [7]:

- відносне відхилення перепаду тиску на ЗП – характеризує ступінь відхилення перепаду тиску на ЗП від його середнього значення $\overline{\Delta p}$:

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) = \pm \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta p_i - \overline{\Delta p}|}{\Delta p}, \quad (2.20)$$

де $\Delta(\Delta p)$ – відхилення і-го значення перепаду тиску на ЗП Δp_i від його середнього значення $\overline{\Delta p}$ за інтервал вимірювання;

$$\overline{\Delta p} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{n}, \quad (2.21)$$

n – кількість точок значень перепаду тиску, за інтервал часу вимірювання;

- середньоквадратична амплітуда пульсацій перепаду тиску – характеризує середньоквадратичне відхилення значень перепаду тиску на ЗП Δp за проміжок часу вимірювань [7]

$$\sigma(\Delta p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_i - \overline{\Delta p})^2}{n}}; \quad (2.22)$$

- відносна середньоквадратична амплітуда пульсацій перепаду тиску – середньозважена відносна амплітуда частини АЧС Δp , яка належить до середньочастотних пульсацій [7]. Значення відносної середньоквадратичної амплітуди пульсацій перепаду тиску обчислюють за формулою:

$$\tilde{\sigma}(\Delta p) = \frac{\sigma(\Delta p)}{\overline{\Delta p}}. \quad (2.23)$$

Для характеристики частотного спектру пульсацій параметрів потоку використовується наступний поділ [7, 22]:

а) низькочастотні пульсації – характер зміни параметрів потоку, обумовлений технологічним режимом роботи ВТ за звітний період часу (в основному – різноманітні перехідні процеси, пов'язані з режимом надходження і споживання середовища, зокрема і пульсуючі процеси). Частота коливань параметра при низькочастотних пульсаціях – від 10^{-4} до $(0,5-1,0)$ Гц;

б) середньочастотні пульсації – пульсації основних параметрів потоку середовища, обумовлені амплітудно-частотним спектром витрати на вході у ВТ (залежить від типу джерела потоку і АЧХ системи подавання середовища до ВТ) і власними динамічними властивостями ВТ. Частота коливань параметра при середньочастотних пульсаціях – від (0,5-1,0) до (10-30) Гц;

в) високочастотні пульсації – пульсації будь-яких параметрів у ВТ, пов'язані з акустичними ефектами, резонансними явищами у ВТ та ЗТ витратоміра, турбулентними пульсаціями. Частота коливань параметра при високочастотних пульсаціях – більше (10-30) Гц;

Застосовуючи підходи ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [7] щодо класифікації режимів протікання потоку та параметри (2.20) і (2.23) у якості критеріїв класифікації, виділено такі режими протікання потоку: квазістаціонарний, пульсуючий, змінний, нестаціонарний (див. рис. 2.1).

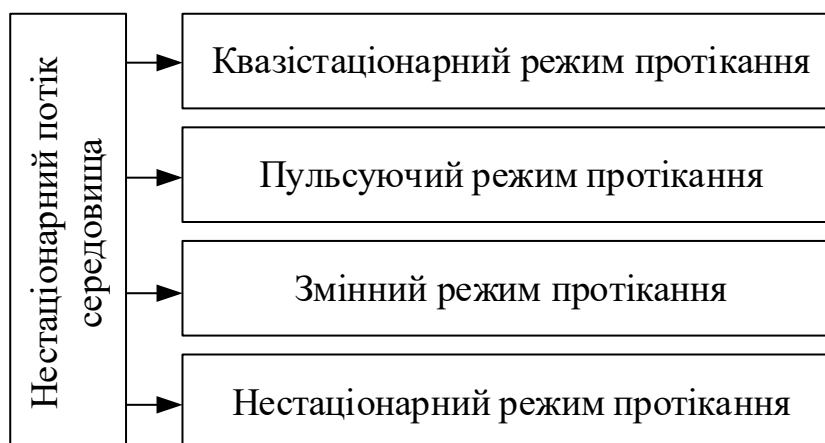


Рис.2.1. Режими протікання нестаціонарного потоку газоподібного середовища через ЗП.

1) *Квазістаціонарний режим протікання* (рис.2.2) характеризується наявністю сукупності низько- та середньочастотних пульсацій з дуже малими амплітудами, та середньоквадратичними амплітудами пульсацій перепаду тиску на ЗП. В цьому режимі протікання:

а) значення відносного відхилення низькочастотних пульсацій перепаду тиску

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) \leq 0,14; \quad (2.24)$$

б) значення відносної середньоквадратичної амплітуди середньочастотних пульсацій перепаду тиску

$$\tilde{\sigma}(\Delta p) \leq 0,1; \quad (2.25)$$

в) миттєве значення перепаду тиску на ЗП $\Delta p(\tau)$ знаходиться в робочому діапазоні засобу вимірювання (ЗВ).

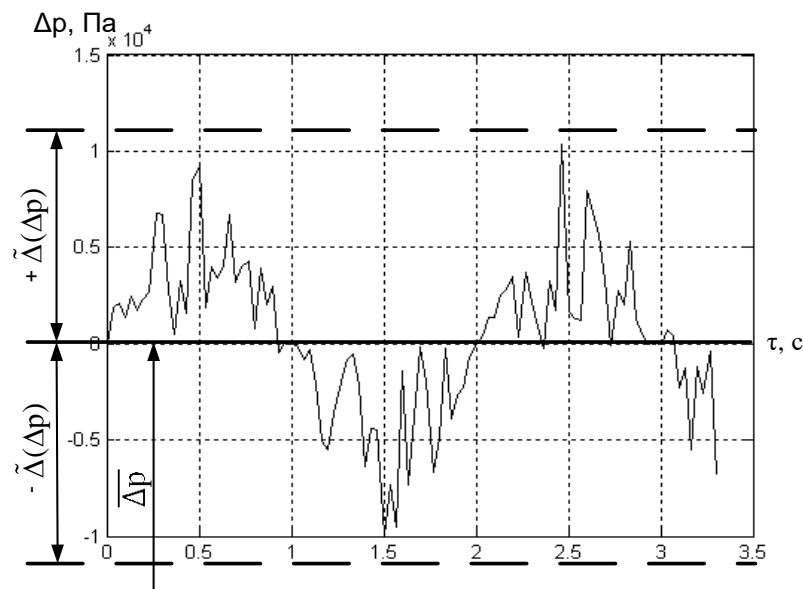


Рис.2.2. Квazистаціoнарний режим протікання газоподібного середовища через звужуючий пристрій.

2) Пульсуючий режим протікання (рис.2.3) характеризується наявністю яскраво виражених середньоквадратичних амплітуд середньочастотних пульсацій перепаду тиску на ЗП, а відповідно і витрати, з можливою наявністю низькочастотних пульсацій з дуже малими амплітудами пульсацій. В пульсуючому режимі протікання:

а) відносне відхилення низькочастотних пульсацій перепаду тиску

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) \leq 0,14; \quad (2.26)$$

б) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій

$$0,1 < \tilde{\sigma}(\Delta p) \leq 0,5. \quad (2.27)$$

в) низькочастотна складова зміни перепаду тиску $\overline{\Delta p}(\tau)$ повинна знаходитись в робочому діапазоні ЗВ.

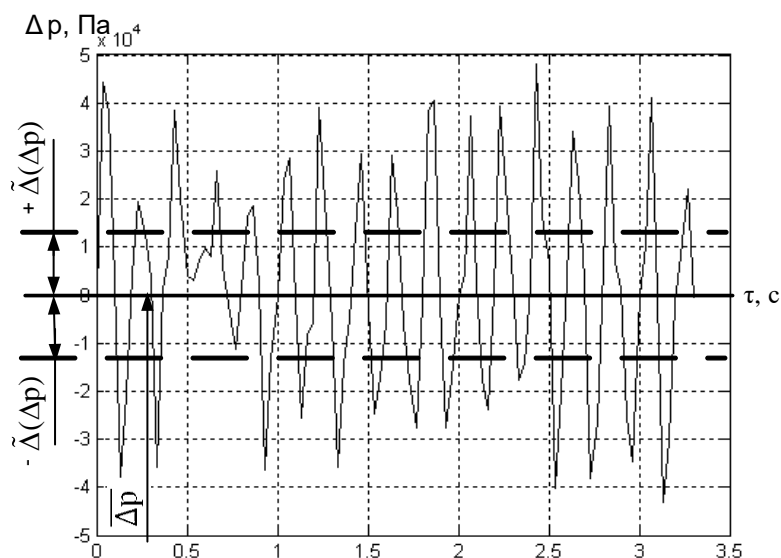


Рис.2.3. Пульсуючий режим протікання газоподібного середовища через звужуючий пристрій.

3) Змінний режим протікання (рис. 2.4) характеризується наявністю яскраво виражених низькочастотних амплітуд пульсацій перепаду тиску на ЗП (відповідно і витрати), та дуже малими середньоквадратичними амплітудами середньочастотних пульсацій або їх відсутністю.

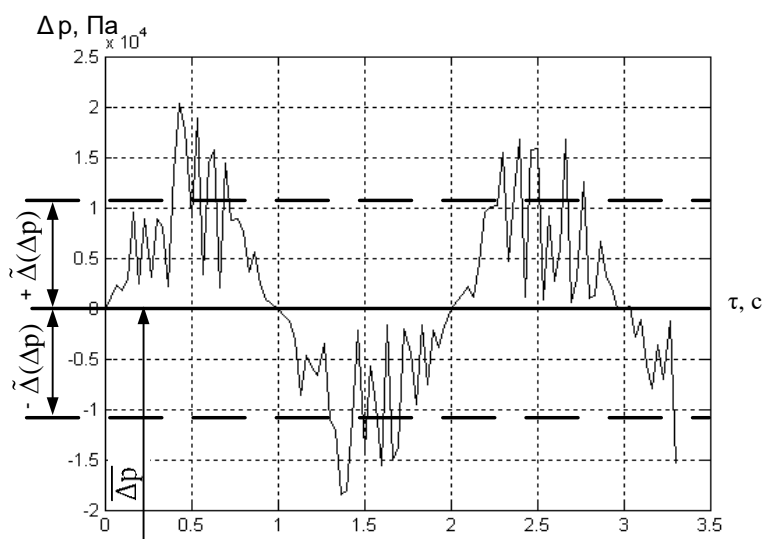


Рис.2.4. Змінний режим протікання газоподібного середовища через звужуючий пристрій.

В змінному режимі протікання:

а) відносне відхилення миттєвого значення низькочастотних пульсацій перепаду тиску за звітний період

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) > 0,14; \quad (2.28)$$

б) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій

$$\tilde{\sigma}(\Delta p) \leq 0,1; \quad (2.29)$$

в) миттєве значення перепаду тиску на ЗП $\Delta p(\tau)$ повинно знаходитись в робочому діапазоні ЗВ.

4) *Нестационарний режим протікання* (рис.2.5) характеризується сукупністю яскраво виражених низько- і середньочастотних пульсацій з значними амплітудами, та середньоквадратичними амплітудами пульсацій перепаду тиску на ЗП.

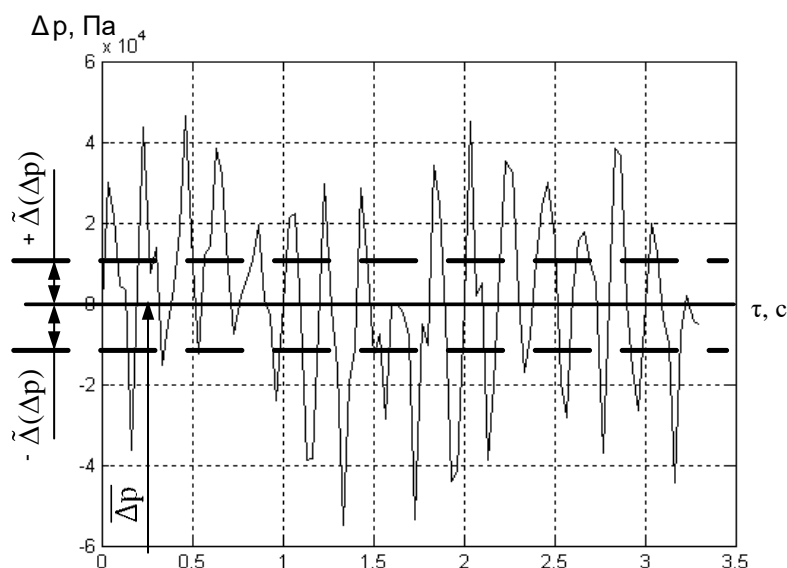


Рис.2.5. Нестационарний режим протікання газоподібного середовища через звужуючий пристрій.

В нестационарному режимі протікання:

а) відносна відхилення миттєвого значення низькочастотних пульсацій перепаду тиску за звітний період

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) > 0,14; \quad (2.30)$$

б) відносна середньоквадратична амплітуда середньочастотних пульсацій

$$0,1 < \tilde{\sigma}(\Delta p) \leq 0,5; \quad (2.31)$$

в) низькочастотна складова зміни перепаду тиску $\overline{\Delta p}(\tau)$ повинна знаходитись в робочому діапазоні ЗВ.

2.2.2. Класифікація причин появи пульсацій та нестационарних режимів протікання газоподібних середовищ на вимірювальних ділянках трубопроводів

Всі джерела нестационарних потоків середовища можна розділити на дві групи:

1. Джерела пульсацій, які виникають, в потоці газу: скупчення конденсату в газопроводі, пробки, трійники, заглушені ділянки трубопроводу, невідповідність геометричних характеристик ВТ (зварних швів, виступів, заглиблень, відводів, не повністю закритої запірної арматури). Зазначені джерела формують нестационарні режими потоку тільки при протіканні газу у вимірювальному трубопроводі.

2. Джерела пульсацій, які виникають внаслідок роботи технологічного обладнання: компресорів, клапанів або неправильно налаштованих регуляторів тиску, збурення, що виникають внаслідок комутаційних процесів в газових мережах. Джерела нестационарних режимів потоку цієї групи є активними і здатні самостійно вносити збурення в потік газу під час своєї роботи, незалежно від режиму протікання середовища.

2.2.3. Додаткові невизначеності, які виникають при вимірюванні витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку, методом змінного перепаду тиску.

Завдяки широкому розповсюдженню витратомірів для вимірювання витрати газоподібних середовищ, які працюють на основі методу змінного перепаду тиску, можливість вимірювання витрати та кількості середовища в умовах нестационарного потоку представляє собою великий практичний інтерес. Але далеко не завжди їх застосування для цієї мети дає задовільні результати. Причина полягає у великій кількості джерел додаткових невизначеностей, які в деяких випадках можуть досягти неприпустимо великих значень. Визначення причин виникнення цих невизначеностей допоможе встановити межі і умови застосування методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати газоподібних середовищ в умовах нестационарного потоку. За характером

виникнення похибок їх можна поділити згідно класифікації, яка наведена на рисунку 2.6 [13, 14, 23].



Рис.2.6. Класифікація причин виникнення додаткових невизначеностей при вимірюванні витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку.

Вплив нелінійної залежності між витратою газоподібного середовища і перепадом тиску на пристрої звуження потоку.

Для стаціонарного потоку витрата через ПЗП (діафрагму, сопло, витратомірну трубу) пропорційна кореню квадратному з перепаду тиску на ньому. Якщо вдається застосувати рівняння витрати для розрахунку миттєвих значень витрати нестационарного потоку, то інтегральне, а відповідно і середнє значення витрати за деякий інтервал часу може бути отримане за допомогою сумування миттєвих значень витрати. Однак реалізувати розрахунок миттєвого значення витрати в реальному часі досить складно, тому здійснюють обчислення усередненого значення витрати за усередненими значеннями параметрів потоку в тому числі за усередненим значенням перепаду тиску на певному інтервалі часу.

Крім того, значна кількість ППТ внаслідок своїх динамічних властивостей також виконують усереднення перепаду тиску на звужувальному пристрої.

Застосування усередненого в часі сигналу перепаду тиску для вимірювання усередненої в часі витрати приводить до виникнення додаткової складової невизначеності $U'_{Дy}$ вимірюваного значення витрати, оскільки:

$$\left(\overline{\Delta p}\right)^{1/2} \neq \overline{\left(\Delta p\right)^{1/2}}. \quad (2.32)$$

Невизначеність $U'_{Дy}$, може бути оцінена шляхом порівняння значень кореня квадратного з сигналів перепаду тиску на виході двох вимірювальних перетворювачів перепаду тиску (ППТ): ППТ, що застосований у складі автоматизованої системи вимірювання (САП) витрати та спеціалізованого малоінерційного ППТ, що додатково застосований для виконання експерименту з оцінювання невизначеності $U'_{Дy}$. За результатами такого експерименту, у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.856.5.2009 [7] пропонують обчислювати невизначеність $U'_{Дy}$ за формулою

$$U'_{Дy} = \frac{\sqrt{\overline{\Delta p}} - \sqrt{\overline{\Delta p_e}}}{\sqrt{\overline{\Delta p}}} \cdot 100, \quad (2.33)$$

де $\sqrt{\overline{\Delta p_e}}$ – усереднене значення кореня квадратного з перепаду тиску, визначеного за допомогою САП;

$\sqrt{\overline{\Delta p}}$ – усереднене значення кореня квадратного з перепаду тиску, визначеного за допомогою малоінерційного вимірювального перетворювача.

У всіх випадках невизначеність $U'_{Дy}$ має позитивний знак. Але це не значить, що її можна з достатньою точністю врахувати відповідною поправкою, оскільки форма, а іноді і частота пульсацій потоку не відомі з достатньою точністю.

Вплив відсутності інерційного члена в рівнянні залежності між перепадом тиску і витратою середовища.

Коли витрата швидко змінюється, у вираз для визначення перепаду тиску потрібно ввести інерційний член (див. рівняння 2.3).

Інерційний член залежить від безрозмірної величини, яка відома, як число Струхаля Sh , а також від геометричних розмірів ЗП і відстані між осями отворів для відбору тисків.

При наявності пульсацій потоку профілі швидкостей до ЗП та у ЗП змінюються циклічно, а тому коефіцієнти K_1 і K_2 також змінюються циклічно, а їх середні значення не дорівнюють значенням при стаціонарному потоці, за виключенням випадків, коли амплітуда та частота пульсацій є малими.

Спроби оцінити значення інерційного члена тільки за числом Струхаля без урахування амплітуди пульсацій приводить до невизначених і неоднозначних висновків. Так, в роботі [76] рекомендується не враховувати додаткової похибки від дії місцевого прискорення, якщо $Sh < 0.002$, тоді як в роботі [49] вказується, що лише при $Sh > 1$ виникають значні похибки. У роботі [8] на підставі досліджень, виконаних із діафрагмою з $\beta = 0,39$, вказується, що вплив нестационарності потоку виявляється лише при $Sh > 0.02$.

У роботах [22, 25, 27] проаналізовано та отримано залежності похибок вимірювання, обумовлені інерційним членом, від числа Sh і від коефіцієнта пульсацій тиску, з яких виходить, що похибка приймає від'ємні значення і зростає із збільшенням числа Sh і коефіцієнта пульсації.

Проведені експерименти [55] показали, що від'ємна похибка є особливо значною при великому відносному діаметрі отвору ПЗП β . Тому автор рекомендує для вимірювання витрати в умовах нестационарного потоку застосовувати ПЗП з $\beta = 0,25$. Але в роботі [8] дається протилежна рекомендація. Очевидно, це питання вимагає подальшого дослідження і уточнення.

Вплив частоти дискретизації сигналів вимірюваних параметрів.

Оскільки для вимірювання витрати та кількості газоподібного середовища використовують мікропроцесорні обчислювачі, в яких частота дискретизації вхідного сигналу може бути нижчою, від частоти пульсацій вимірювального потоку, виникає додаткова складова невизначеності $U'_{Двим}$, яку обчислюється за формулою [7]:

$$U'_{\text{вим}} = \frac{100}{\overline{\Delta p}} \sqrt{\frac{\Delta \tau}{\tau_k - \tau_n}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \tau}{\tau_k - \tau_n}\right) \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta p_i - \overline{\Delta p})^2 - \left(\frac{\Delta \tau}{\tau_k - \tau_n - \Delta \tau}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta p_i - \overline{\Delta p}) \cdot (\Delta p_{i+1} - \overline{\Delta p})}, \quad (2.34)$$

де Δp_i – вимірне значення перепаду тиску в i -ій точці на інтервалі $\tau_k - \tau_n$ з кроком дискретизації $\Delta \tau$;

$\overline{\Delta p}$ – усереднене значення перепаду тиску на інтервалі $\tau_k - \tau_n$;

τ_n – початковий відлік часу вимірювань;

τ_k – кінцевий відлік часу вимірювань;

$\Delta \tau$ – крок дискретизації точок вимірювань.

Якщо $\Delta \tau \leq 1c$, то значення невизначеності є дуже малим і нею можна знехтувати. Тому для усунення даної складової невизначеності рекомендується використовувати вимірювальні перетворювачі з високою частотою дискретизації сигналів вимірюваних параметрів.

Вплив зміни коефіцієнта витікання.

Коефіцієнт витікання для різних типів ЗП в умовах стаціонарного потоку залежить від профілю швидкості потоку на вході ЗП. Діафрагми є особливо чутливими до змін профілю швидкостей потоку за рахунок ефекту звуження струменя потоку. Більш плоский по відношенню до нормального профіль швидкостей збільшує ефект звуження струменя потоку і, як наслідок, зменшує коефіцієнт витікання. Більш загострений профіль швидкостей приводить до протилежного результату.

У пульсуючих потоках миттєвий профіль швидкостей змінюється впродовж циклу пульсацій. Величина зміни залежить від амплітуди пульсацій, швидкості, форми хвилі та числа Струхаля. Внаслідок цього миттєве значення коефіцієнта витікання також залежить від фази циклу пульсацій, амплітуди пульсацій, форми хвилі та числа Струхаля. Однак, за висновками стандарту ISO/TR 3313:1998 [61], в якому інтегрований досвід багатьох європейських дослідників, на сьогодні немає результатів досліджень, які б дозволили математично пов'язати миттєве значення коефіцієнта витікання з параметрами пульсацій. Таким чином, у [61] рекомендується при наявності пульсацій потоку застосовувати постійне значення

коефіцієнта витікання, яке застосовується в умовах стаціонарного потоку. Такий підхід дасть добрі результати для нестискуваного середовища при малих амплітудах та частотах пульсацій i , відповідно, мінімальні значення поправних коефіцієнтів для витрати. Додаткові похибки за рахунок впливу тимчасової інерційності та змін коефіцієнта витікання збільшуються при збільшенні амплітуди та частоти пульсацій, як це показано у [54].

Вплив інерційних властивостей пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску та перепаду тиску.

Разом з хвилями швидкості при пульсуючих потоках виникають і хвилі тиску, що переміщаються із швидкістю звуку. Вони відображаються від різних перешкод на своєму шляху, у тому числі і від стінки діафрагми, і за деяких умов, сприяючих виникненню резонансу в ЗТ, в останніх можуть утворюватися “стоячі хвилі”. Все це може спотворити розподіл тиску в ЗТ, пов'язане з рухом потоку і стояти на заваді при правильному вимірюванні перепаду тиску на ЗП. В роботі [54] зазначено, що похибка вимірювання перепаду тиску може виникнути також внаслідок високочастотних коливань (більше 1000 Гц), так звані звукові шуми, що виникають з різних причин, наприклад при витіканні струменя газу з регулюючого клапана.

Врахувати вплив вище перерахованих акустичних явищ на точність вимірювання дуже важко. Але, ймовірно, вони можуть спричиняти значні значення похибок, що помічалися в деяких випадках, при вимірюванні пульсуючих потоків. В роботі [53] вказується, що акустичними ефектами можна знехтувати, якщо діаметр отвору діафрагми малий в порівнянні з довжиною четвертої частини звукової хвилі. Звідси випливає, що для діаметру отвору ЗП, який є меншим 100мм допустимі частоти становлять 50-75 Гц. Виконання цієї вимоги дійсно необхідне, але воно може виявитися недостатнім у разі виникнення резонансу, залежного від конфігурації ВТ.

Вплив конструктивних характеристик з'єднувальних трубок (ЗТ).

ЗТ між ЗП і ППТ можуть бути додатковим джерелом похибок при вимірюванні витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку

через можливу нерівність опорів обох трубок, а також наявність нелінійних опорів в ЗТ. При вимірюванні пульсуючих витрат речовина, що знаходиться в ЗТ, безперервно переміщається в ту або іншу сторону. Тому, за умови наявності нелінійних опорів, вони спотворюють передачу перепаду тиску тим більше, чим більше несиметричні форми пульсацій. При цьому тиск в кінці трубки може виявитися і менше, і більше середнього. Слід застосовувати лише повністю відкриті прямоточні крани. При вимірюванні витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку досить часто вимагається демпферувати ЗТ. Однак для цього не рекомендується встановлювати на ЗТ комбінації із звужень і ємностей, оскільки їх опір нелінійний і залежить від напрямку руху. Необхідно уникати спотворення форми та фази хвилі тиску у будь-якій із ЗТ (за рахунок тертя, наявності нелінійностей). Крім цього довжина ЗТ повинна бути обмежена і не бути кратною $1/4$ довжини хвилі пульсацій для уникнення резонансу [61].

Проведений аналіз джерел похибок вимірювання витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку за допомогою методу змінного перепаду тиску, дозволяє зробити наступні висновки. При невеликій частоті (менше 3-5 Гц) пульсацій потоку, головне значення має похибка, викликана квадратичною залежністю між витратою і перепадом тиску. При невеликому коефіцієнті пульсації витрати (менше 0,2) цією похибкою вимірювання можна знехтувати.

Але із збільшенням частоти f пульсацій все більше значення набуває похибка, що викликається впливом місцевого прискорення. Врахувати цю похибку дуже важко, не дивлячись на ряд досліджень, направлених на виявлення залежності її від частоти і амплітуди пульсації. Запропоновані критерії [49] для оцінки похибки, включаючи число Струхаля, виявилися не універсальними і дають цю оцінку з вельми обмеженим наближенням [22]. Причини цього – велике число впливаючих обставин крім числа Струхаля і амплітуди пульсацій, пов'язаних з конфігурацією ВТ, розташуванням джерела пульсацій до або після ЗП, значення відносного діаметра отвору ЗП β , стисливістю вимірюваного середовища, характером пристроїв для вимірювання амплітуди і форми кривої пульсацій, не

говорячи вже про можливі акустичні впливи і перешкоди. Тому важко дати рекомендації щодо надійного та точного вимірювання витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку методом змінного перепаду тиску, що мають одночасно високу частоту f і значну амплітуду пульсацій.

Вимірювання таких витрат з достатньою точністю можна здійснити, якщо до надходження на ЗП амплітуда пульсацій потоку буде певною мірою понижена за допомогою особливих фільтрів-заспокоювачів. Висока ж частота пульсацій при малій їх амплітуді помітно не впливатиме на результати вимірювання. Так, за даними роботи [49], якщо коефіцієнт пульсації перепаду тиску $a_{\Delta p} = (\Delta p_{\max} - \Delta p_{\min}) / \Delta p_{cp}$ не перевершує 0,5, то незалежно від частоти пульсацій похибка вимірювання витрати не перевищить 2 %. Якщо ж коефіцієнт пульсацій витрати не більший за 0,1, то похибка вимірювання витрати буде менше 1 %.

Отже, метод змінного перепаду тиску можна використовувати для вимірювання витрати газоподібних середовищ в умовах нестационарного потоку, але необхідно до результатів вимірювання витрати вводити додаткові невизначеності, які виникають при вимірюваннях витрати в нестационарних потоках.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Проведено аналіз теоретичних засад методу змінного перепаду тиску, а також оцінку можливості застосування даного методу для вимірювання витрат газоподібних середовищ в умовах газодинамічної структури потоку.

2. Наведено характеристики та класифікацію режимів протікання нестационарних потоків газоподібного середовища.

3. Введено класифікацію причин появи пульсацій та нестационарних режимів протікання газоподібних середовищ на вимірювальних ділянках трубопроводів.

4. Класифіковано причини виникнення додаткових невизначеностей вимірювання витрати, зумовлених нестационарністю потоку середовища.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОТОКУ

3.1. Дослідження динамічних характеристик пневматичних каналів перетворювачів тиску та перепаду тиску

3.1.1. Побудова математичної моделі пневматичних каналів перетворювачів тиску та перепаду тиску

З метою дослідження впливу динамічних характеристик пневматичних каналів (ПНК) вимірювальних перетворювачів тиску (ПТ) і перепаду тиску (ППТ) на вимірюване значення, в даному підрозділі проведено розробку математичної моделі ПНК.

Під ПНК розуміється сполучний канал, утворений:

- камерою ППТ та з'єднувальною трубкою (ЗТ), яка через канал у штуцері сполучає камеру ППТ з плюсовою або мінусовою камерою звужувального пристрою (ЗП);
- камерою ПТ та ЗТ, яка через канал у штуцері сполучає камеру ПТ з внутрішньою порожниною вимірювального трубопроводу (ВТ).

Для побудови математичної моделі ПНК встановлено такі умови:

- температура природного газу є незмінною по довжині ПНК, а також в межах часу дослідження пульсуючого процесу $T = \text{const}$;
- об'єм камери перетворювача тиску не змінюється $V_k = \text{const}$;
- молярна маса газоподібного середовища (тобто його склад) не змінюється $M = \text{const}$ в межах часу дослідження пульсуючого процесу.

Принципова схема ПНК, на основі якої виконується її моделювання, зображена на рис. 3.1.

Оскільки канал у штуцері ПТ чи ППТ, через який вимірюване середовище поступає у камеру вимірювального перетворювача, має діаметр менший від

внутрішнього діаметра ЗТ, тому цей канал розглянутий як циліндричний дросель із діаметром $D_{др}$ та довжиною $L_{др}$.

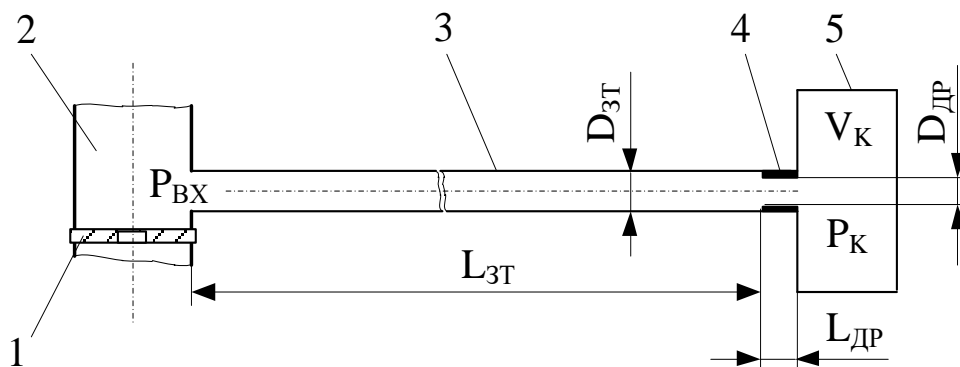


Рис.3.1. Принципова схема пневматичного каналу:

- 1 – звужувальний пристрій (ЗП); 2 – вимірювальний трубопровід (ВТ);
3 – з'єднувальна трубка (ЗТ); 4 – штуцер ПТ чи ППТ (дросель); 5 – камера вимірювального перетворювача тиску (ПТ) чи перепаду тиску (ППТ)

Масова витрата газоподібного середовища через ЗТ до камери ПТ (ППТ) визначається залежністю:

$$q_m = \frac{\Delta m_k}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

де q_m – масова витрата газоподібного середовища через ЗТ до камери ПТ (ППТ), кг/с;

Δm_k – зміна маси газоподібного середовища в камері ПТ (ППТ) за час Δt , кг;

Δt – час протягом якого змінюється маса газоподібного середовища в камері ПТ (ППТ), с.

З модифікованого рівняння стану Менделєєва-Клапейрона маса природного газу в камері ПТ (ППТ) рівна:

$$m_k = \frac{P_K \cdot V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}, \quad (3.2)$$

де m_k – маса газоподібного середовища в камері ПТ (ППТ), кг;

V_K – геометричний об'єм камери ПТ (ППТ), м³;

P_K – тиск у камері ПТ (ППТ), Па;

M – молярна маса газоподібного середовища, кг/кмоль;

R – універсальна газова стала, $R = 8314,51$ Дж/(кмоль·К);

T – абсолютна температура газоподібного середовища, К;

$$T = 273,15 + t, \quad (3.3)$$

t – температура газоподібного середовища, °С;

z – фактор стисливості, який може бути визначений за одним із методів, представлених у ГОСТ 30319.2-96 [2].

У формулу (3.2) входить фактор стисливості z , який є функцією тиску газу. Однак зміною фактора стисливості на протязі елементарного малого приросту часу Δt можна знехтувати, оскільки приріст тиску на протязі Δt також є незначним.

Враховуючи, що $T = \text{const}$, $M = \text{const}$, $V_K = \text{const}$, формулу (3.2) можна записати у вигляді:

$$\Delta m_k = \Delta P_K \cdot A, \quad (3.4)$$

де ΔP_K – зміна тиску в камері ПТ (ППТ) за елементарно малий проміжок часу Δt , Па;

A – коефіцієнт, який обчислюється за формулою:

$$A = \frac{V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}. \quad (3.5)$$

Оскільки масова витрата може бути представлена, як добуток об'ємної витрати на густину в робочих умовах (2.13) на основі рівняння (3.1) отримуємо:

$$\frac{\Delta P_K \cdot A}{\Delta t} = q_v \cdot \rho. \quad (3.6)$$

Перейшовши до границі відношення приросту тиску до приросту часу отримуємо диференціальне рівняння зміни тиску в камері ППТ (ПТ):

$$A \frac{dP_K}{dt} = q_v \cdot \rho. \quad (3.7)$$

Згідно із другим законом Ньютона рух газу через ЗТ можна описати наступним рівнянням:

$$m \cdot a = F_{\text{прикладена}} - F_{\text{протиюча}}, \quad (3.8)$$

де m – маса газоподібного середовища в ЗТ, кг;

a – прискорення газоподібного середовища в ЗТ, м/с²;

$F_{\text{прикладена}}$ – сила, яка прикладена до маси середовища у ЗТ та приводить її в рух;

$F_{\text{протидіюча}}$ – сила, яка протидіє руху потоку середовища в ЗТ.

Сила $F_{\text{прикладена}}$ може бути визначена за формулою

$$F_{\text{прикладена}} = (P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ДР}}) \cdot S_{\text{ЗТ}}, \quad (3.9)$$

де $P_{\text{ВХ}}$ – тиск на вході в ЗТ, Па;

$P_{\text{ДР}}$ – тиск на вході в дросель, Па;

$S_{\text{ЗТ}}$ – площа поперечного перерізу ЗТ, м²;

$$S_{\text{ЗТ}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ЗТ}}^2}{4}, \quad (3.10)$$

$D_{\text{ЗТ}}$ – внутрішній діаметр ЗТ, м.

У прийнятій принциповій схемі (див.рис.3.1) дросель розглядаємо як циліндричний канал довжиною $L_{\text{ДР}}$. Тоді тиск на вході в дросель може бути визначений з рівняння Дарсі-Вейсбаха [1], Па;

$$P_{\text{ДР}} = \lambda_{\text{ДР}} \cdot \frac{L_{\text{ДР}}}{D_{\text{ДР}}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho + P_{\text{К}}, \quad (3.11)$$

де $L_{\text{ДР}}$ – довжина дроселя, м;

$D_{\text{ДР}}$ – діаметр отвору дроселя, м;

v - швидкість потоку газу у пневматичній лінії, м/с;

$\lambda_{\text{ДР}}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині дроселя, визначається в залежності від значення числа Рейнольдса.

Сила, яка протидіє руху потоку газу $F_{\text{протидіюча}}$ також може бути визначена на основі рівняння Дарсі-Вейсбаха [1]:

$$F_{\text{протидіюча}} = \Delta P \cdot S_{\text{ЗТ}} = \left(\lambda_{\text{ЗТ}} \cdot \frac{L_{\text{ЗТ}}}{D_{\text{ЗТ}}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \right) \cdot S_{\text{ЗТ}}, \quad (3.12)$$

де $L_{\text{ЗТ}}$ – довжина ЗТ, м;

$\lambda_{\text{ЗТ}}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині ЗТ, визначається в залежності від значення числа Рейнольдса.

Як було зазначено вище, під час вимірювання витрати пульсуючого потоку газоподібне середовище у ЗТ почергово рухається в напрямку до камери ПТ (ППТ)

та від неї. При цьому швидкість потоку змінюється від максимального значення до нуля та навпаки. Це призводить до зміни режиму руху з турбулентного на ламінарний і навпаки. В таких умовах для визначення різниці тисків на початку ЗТ та в її кінці (в камері ПТ (ППТ)) доцільно застосувати саме рівняння Дарсі-Вейсбаха, як це зроблено в рівняннях (3.11) та (3.12). Формула Дарсі-Вейсбаха придатна для опису, як турбулентних, так і ламінарних потоків, оскільки форма залежності різниці тисків від швидкості потоку у цьому рівнянні змінюється залежно від виразу, застосованого для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ . Зокрема, якщо застосувати вираз визначення λ для ламінарного режиму руху

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}, \quad (3.13)$$

то формула Дарсі-Вейсбаха перетворюється до вигляду рівняння Пуазейля для ламінарного режиму [21]. Тобто рівняння (3.11) та (3.12) можуть бути застосовані для опису руху газу у ЗТ та дроселі, як за умов турбулентного, так і ламінарного режиму руху газоподібного середовища.

Підставивши вирази (3.9), (3.11), (3.12) у рівняння (3.8), із врахуванням того, що $a = dv/dt$, отримаємо диференціальне рівняння швидкості руху природного газу у пневматичній лінії:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = (P_{\text{ВХ}} - \lambda_{\text{ДР}} \cdot \frac{L_{\text{ДР}}}{D_{\text{ДР}}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho - P_{\text{К}}) \cdot S_{\text{ЗТ}} - (\lambda_{\text{ЗТ}} \cdot \frac{L_{\text{ЗТ}}}{D_{\text{ЗТ}}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho) \cdot S_{\text{ЗТ}}. \quad (3.14)$$

Враховуючи, що маса природного газу в ЗТ визначається формулою

$$m = \rho \cdot L_{\text{ЗТ}} \cdot S_{\text{ЗТ}}, \quad (3.15)$$

а об'ємна витрата зв'язана із швидкістю залежністю

$$q_v = S_{\text{ЗТ}} \cdot v, \quad (3.16)$$

отримуємо диференціальне рівняння зміни витрати газоподібного середовища у ПНК:

$$S_{\text{ЗТ}} \cdot \rho \cdot L_{\text{ЗТ}} \cdot \frac{dq_v}{dt} = (P_{\text{ВХ}} - P_{\text{К}}) \cdot S_{\text{ЗТ}}^2 - q_v^2 \cdot (\lambda_{\text{ДР}} \cdot \frac{L_{\text{ДР}}}{D_{\text{ДР}}} \cdot \frac{\rho}{2} + \lambda_{\text{ЗТ}} \cdot \frac{L_{\text{ЗТ}}}{D_{\text{ЗТ}}} \cdot \frac{\rho}{2}). \quad (3.17)$$

Виконавши математичні перетворення отримуємо диференціальне рівняння витрати у вигляді:

$$k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_2 \cdot q_v^2 = P_{BX} - P_K, \quad (3.18)$$

де k_1 , k_2 коефіцієнти, які визначаються за формулами (3.19) та (3.20) відповідно:

$$k_1 = \frac{\rho \cdot L_{3T}}{S_{3T}}, \quad (3.19)$$

$$k_2 = \frac{\frac{\rho}{2} \cdot (\lambda_{др} \cdot \frac{L_{др}}{D_{др}} + \lambda_{3T} \cdot \frac{L_{3T}}{D_{3T}})}{S_{3T}^2}. \quad (3.20)$$

Із виразів (3.19) та (3.20) видно, що коефіцієнти диференціального рівняння (3.18) є змінними. Зокрема k_1 є залежний від густини газоподібного середовища, яка в свою чергу є функцією тиску в камері ППТ P_K , а k_2 є залежним від значення коефіцієнта гідравлічного опору ЗТ λ_{3T} та дроселя $\lambda_{др}$. Як зазначено вище, в умовах вимірювання тиску (перепаду тиску) пульсуючого потоку, коли витрата газу у ЗТ змінюється в широких межах, коефіцієнт гідравлічного опору λ залежить від числа Рейнольдса Re , а отже й від витрати q_v , $\lambda = f(Re) = f(q_v)$.

Отже математична модель ПНК матиме вигляд системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} A \frac{dP_K}{dt} = q_v \cdot \rho; \\ k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_2 \cdot q_v^2 = P_{BX} - P_K, \end{cases} \quad (3.21)$$

при початкових умовах P_{K0} , Q_0 , де коефіцієнти A , k_1 , k_2 визначають, відповідно, за формулами (3.5), (3.19) та (3.20).

Коефіцієнти k_1 , k_2 є змінними та залежними від диференційованих параметрів, тому систему рівнянь (3.21) доцільно розв'язувати за допомогою числових методів.

3.1.2. Перевірка адекватності математичної моделі пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску

Перевірку адекватності математичної моделі (3.21) виконано відносно отриманих експериментальним шляхом перехідних процесів у ПНК. Для виконання експериментальних досліджень спроектовано установку, яку представлено на рисунку 3.2.



Рис.3.2. Експериментальна установка для дослідження динамічних характеристик пневматичного каналу перетворювача тиску

У складі установки застосовані такі компоненти:

- з'єднувальна трубка діаметру $D_{зТ} = 0,004$ м та довжиною $L_{зТ} = 2,1$ м, $L_{зТ} = 4,2$ м, $L_{зТ} = 6,3$ м;
- компресорна установка з максимальним тиском на виході $P = 3,5$ кгс/см² (343,2 кПа);
- вимірювальний перетворювач надлишкового тиску ППС.3-РН виробництва НПВП «Техприлад», з верхньою границею вимірювання $P = 10$ кПа і аналоговим вихідним струмовим сигналом $I = 4 \div 20$ мА;

- вимірювальний перетворювач надлишкового тиску Sitrans P DSIII, для вимірювання тиску в системі до електромагнітного клапана, з верхньою границею вимірювання $P = 10$ кПа;

- електромагнітний клапан фірми Bürkert типу ZGRCH6UP;

- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) фірми National Instruments типу NI USB-6009, 12-ти розрядний з максимальною частотою дискретизації $f = 48$ кГц.

Функціональна схема експериментальної установки зображено на рис.3.3.

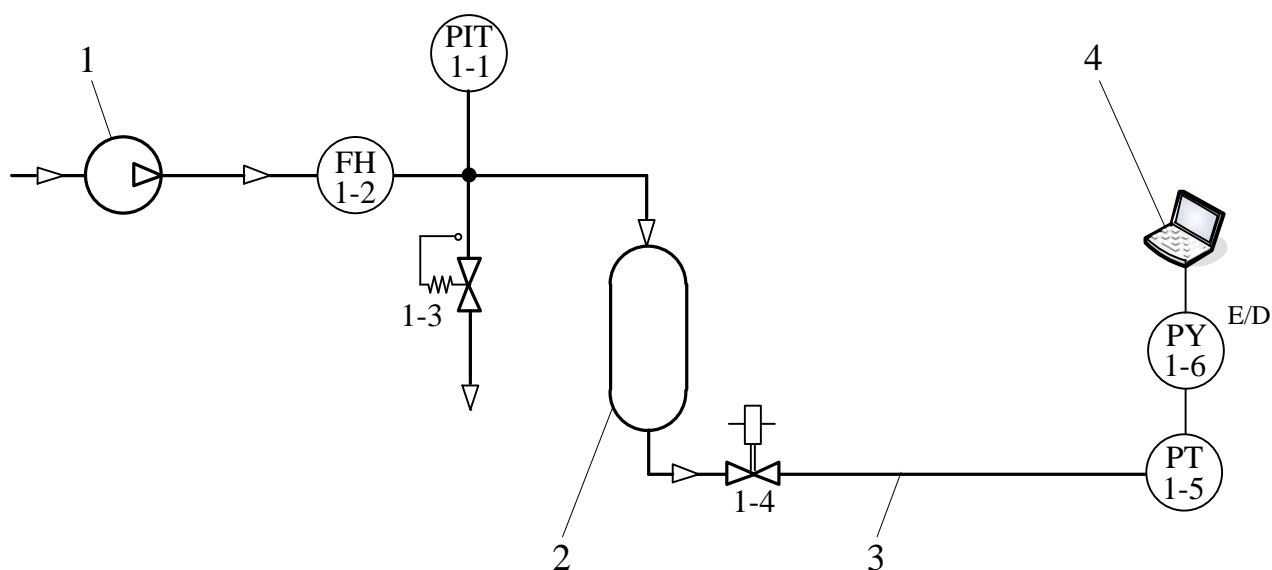


Рис.3.3. Функціональна схема установки для дослідження динамічних характеристик пневматичного каналу перетворювача тиску:

1 – компресорна установка (УК25-16М); 2 – ємність ($D=180$ мм, $H=310$ мм, $V=0,0079$ м³); 3 – з'єднувальна трубка (ЗТ); 4 – персональний комп'ютер; 1-1 – вимірювальний перетворювач вхідного тиску Sitrans P DSIII; 1-2 – ротаметр (М-Д-0Б0631 УЗ); 1-3 – стабілізатор тиску (САД-305); 1-4 – електромагнітний клапан (BürkertZGRCH6UP); 1-5 – вимірювальний перетворювач тиску ППС.3-РН; 1-6 – аналогово-цифровий перетворювач NI USB-6009

Для отримання перехідних процесів зміни тиску у ПНК застосовано вимірювальний перетворювач ППС.3-РН (поз.1-5) із аналоговим вихідним сигналом. Вибір цього перетворювача зумовлений тим, що він має аналогову вимірювальну схему без вбудованих додаткових фільтрів та без цифрової обробки

вихідного сигналу. Тобто такий вимірювальний перетворювач може бути застосований для вимірювання тиску швидкозмінних процесів.

ЗТ (поз.3 рис.3.3) є змінним елементом системи, тому ЗТ довжиною 2,1м, 4,2 м; 6,3 м встановлюються по чергово під час виконання трьох серій експериментальних досліджень.

Суть експериментальних досліджень полягає в отриманні та реєстрації перехідних процесів на виході ПТ (поз.1-5) при стрибкоподібній зміні тиску на вході ЗТ (поз.3).

Тиск в системі створюється за допомогою компресорної установки (поз.1). За допомогою ротаметра (поз.1-2) та стабілізатора тиску (поз.1-3) встановлюють необхідне значення тиску в системі, яке вимірюють за допомогою ПТ (поз.1-1).

Ротаметр (поз.1-2) із вбудованим вентилям є допоміжним елементом у складі установки, який зручно застосувати для зміни витрати повітря від компресора до установки. Таким чином забезпечується можливість грубого швидкого регулювання тиску перед елементом точного регулювання тиску – стабілізатором абсолютного тиску (поз.1-3). Таке регулювання доцільно застосувати оскільки маневрування компресором (зміна тиску на виході компресора) є інерційним процесом.

Для того, щоб забезпечити стабільність тиску повітря в установці та його швидку зміну у ПНК ПТ схемою установки передбачено ємність (поз.2), об'єм якої значно перевищує об'єм ПНК ПТ. Під час відкриття електромагнітного клапана (поз.1-4) повітря із ємності поступає у пневматичну лінію ПТ формуючи стрибкоподібну зміну тиску, при цьому зміна тиску у самій ємності є незначною. Реагуючи на стрибкоподібну зміну тиску ПТ формує вихідний сигнал, який поступає на вхід АЦП (поз.1-6). Цифровий сигнал з виходу АЦП обробляється за допомогою персонального комп'ютера і програмного забезпечення LabVIEW (рис.3.2). Оскільки на вхід АЦП необхідно подати сигнал зміни напруги (0-10 В), то вихідний струмовий сигнал (4-20 мА) із виходу вимірювального перетворювача тиску перетворений у сигнал напруги, для чого застосовано опір магазину опорів ($R_M = 500 \text{ Ом}$). Спад напруги на опорі R_M і є вхідним сигналом для АЦП.

Під час виконання експериментальних досліджень виконано декілька серій вимірювань для ЗТ різної довжини: $L_{ЗТ} = 2,1$ м, $L_{ЗТ} = 4,2$ м, $L_{ЗТ} = 6,3$ м. У рамках кожної серії вимірювань для ЗТ одної із вказаних довжин виконано 10 вимірювань, тобто отримано 10 перехідних процесів при однаковій стрибкоподібній зміні тиску на вході ЗТ.

Вимірювання виконувались таким чином.

1) На початку вимірювання при відкритому електромагнітному клапані встановлювали початковий тиск (4,0 кПа) у ЗТ та ємності, після чого закривали клапан.

2) При закритому клапані стабілізатором тиску встановлювали нове значення тиску (8,0 кПа) у ємності і, відповідно, всій пневматичній лінії до клапана.

3) При відкритті клапана тиск повітря стрибкоподібно змінювався на вході ЗТ внаслідок чого у ЗТ та камері перетворювача тиску відбувався перехідний процес. Зміна тиску у камері вимірювального перетворювача під час цього перехідного процесу, перетворена вимірювальним перетворювачем у вихідний сигнал зміни струму, а, відповідно, і напруги на вході АЦП реєструвалася програмним пакетом LabVIEW на ПЕОМ.

4) Для отримання наступного перехідного процесу тиск зменшували за допомогою стабілізатора до початкового значення (4,0 кПа) при відкритому клапані (1-4) після чого закривали клапан та виконували п.п.2-3 цієї послідовності.

Для кожного із вимірювань стрибкоподібна зміна тиску становила 4,0 кПа.

В результаті обробки та усереднення 10-ти перехідних процесів, одержаних у рамках однієї серії вимірювань для ЗТ фіксованої довжини, отримано усереднений перехідний процес зміни напруги на виході ПТ (див. рис. 3.4). Значення усередненого перехідного процесу в кожен фіксований момент часу отримане як середнє арифметичне значень 10-ти отриманих процесів у той же момент часу. Таке усереднення виконане авторами для того, щоб усунути випадкові вибіги, що можуть виникнути під час експерименту.

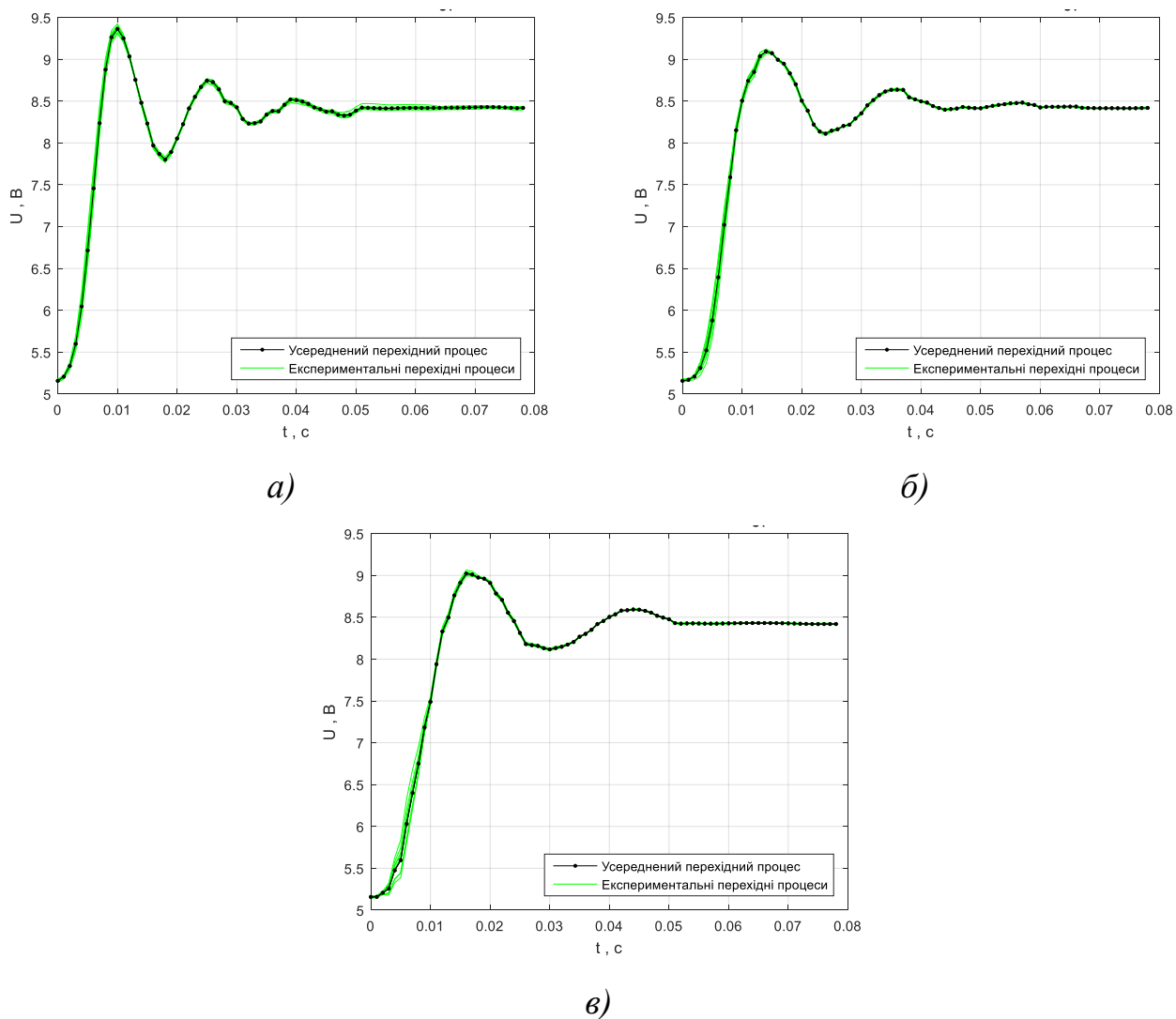


Рис.3.4. Перехідні процеси зміни напруги на виході ПТ при стрибкоподібній зміні тиску на вході ЗТ довжиною:

а) $L_{ЗТ} = 2,1$ м; б) $L_{ЗТ} = 4,2$ м; в) $L_{ЗТ} = 6,3$ м;

Графіки усереднених процесів зміни напруги на виході ПТ в часі при стрибкоподібній зміні тиску повітря на вході в ЗТ для трьох ЗТ різної довжини представлені на рисунку 3.5.

Як видно із рис.3.5, отримані з експерименту перехідні процеси є залежностями напруги з виходу ПТ від часу. Ці перехідні процеси враховують динамічні характеристики ПНК та ПТ. Для того щоб застосувати ці перехідні процеси для перевірки моделі (3.21), яка відтворює динамічні характеристики тільки ПНК, необхідно доповнити цю модель диференціальним рівнянням, яке б відтворювало вплив зміни тиску P_K в камері ПТ на зміну напруги на його виході U .

Тобто необхідно отримати диференціальне рівняння ПТ, який є невід'ємною складовою експериментальної установки.

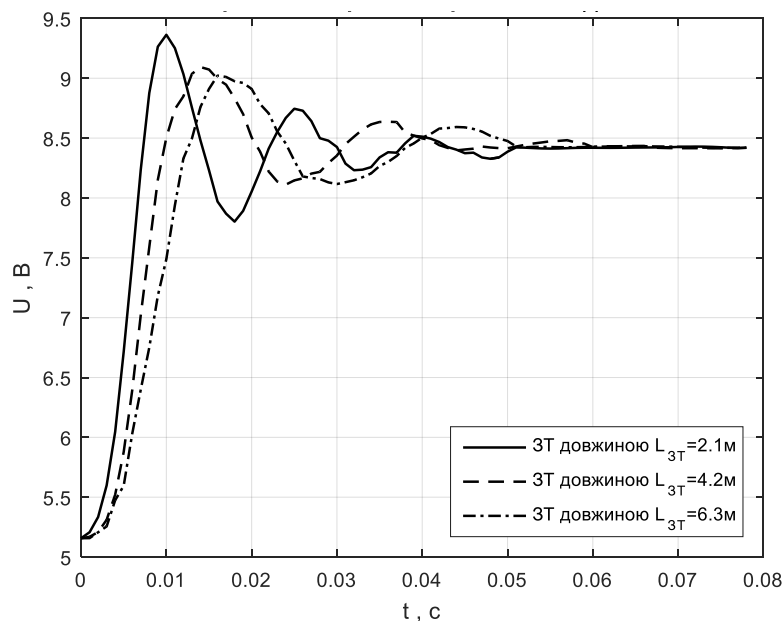


Рис.3.5. Усереднені перехідні процеси зміни напруги на виході ПТ при стрибкоподібній зміні тиску на вході ЗТ

Таке рівняння отримано на основі обробки експериментальної кривої розгону ПТ, яке має вигляд

$$T_3 \cdot \frac{dU}{dt} + U = k(P_K - P_{K_0}), \quad (3.22)$$

де U – сигнал зміни напруги на виході ПТ, В;

P_K – тиск в камері ПТ, Па;

P_{K_0} – початковий тиск в камері ПТ, Па;

T_3 – стала часу ПТ, $T_3 = 0,00425$ с;

k – коефіцієнт передачі ПТ, $k = 0,0008$ В/Па.

Слід відмітити, що і вигляд і параметри диференціального рівняння ПТ залежать від його типу та конструктивних особливостей. Тобто отримане рівняння (3.22) із наведеними значеннями параметрів k , T_3 відтворює властивості тільки застосованого ПТ типу ППС.3-РН.

Доповнивши систему рівнянь (3.21), рівнянням (3.22), отримано математичну модель каналу вимірювання тиску у вигляді:

$$\begin{cases} A \frac{dP_K}{dt} = q_v \cdot \rho; \\ k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_2 \cdot q_v^2 = P_{BX} - P_K; \\ T_3 \cdot \frac{dU}{dt} + U = k(P_K - P_{K_0}). \end{cases} \quad (3.23)$$

Під каналом вимірювання тиску тут і далі розуміємо ПНК, ПТ, АЦП та інтерфейс персонального комп'ютера, з'єднані для отримання значень тиску в ВТ.

Математична модель (3.23) дозволяє отримати перехідний процес зміни напруги U на виході ПТ при зміні тиску P_{BX} на вході ЗТ, який може бути порівняний із експериментально отриманим перехідним процесом. Дана математична модель реалізована в середовищі MATLAB, методи для розрахунку допоміжних параметрів (наприклад, фактора стисливості) реалізовані у вигляді окремих функцій MATLAB.

За результатами розв'язування системи рівнянь (3.23) числовим способом отримані розрахункові перехідні функції каналу вимірювання тиску $U = f(t)$. Порівняння розрахункових перехідних функцій та усереднених перехідних функцій, отриманих експериментальним шляхом, представлено на рисунку 3.6.

За результатами порівняння усередненої експериментальної функції та розрахункової, визначено максимальне відносне відхилення між їх значеннями за формулою

$$\delta = \max \left[\frac{|U_p(i) - U_e(i)|}{U_e(i)} \cdot 100\% \right], \quad (3.24)$$

де $U_p(i)$ – значення розрахункової перехідної функції в i -й точці;

$U_e(i)$ – значення усередненої експериментальної перехідної функції в i -й точці.

Отримані значення максимального відхилення δ для трьох досліджуваних довжин ЗТ представлено у таблиці 3.1.

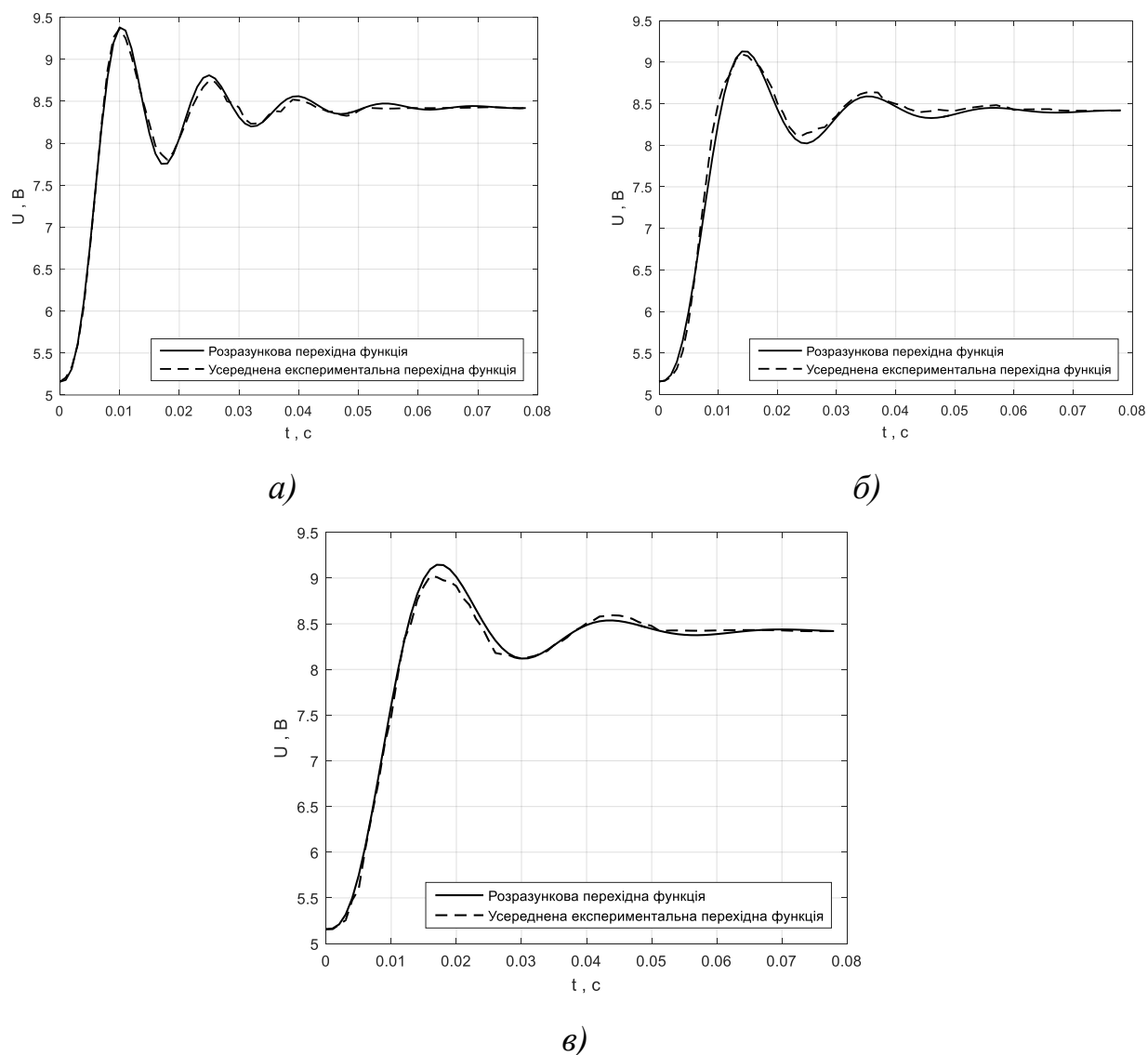


Рис.3.6. Порівняння перехідних функцій каналу вимірювання тиску повітря при стрибкоподібній зміні тиску на вході ЗТ:

а) $L_{ЗТ} = 2,1$ м, б) $L_{ЗТ} = 4,2$ м, в) $L_{ЗТ} = 6,3$ м

Таблиця 3.1.

Максимальне відносне відхилення перехідних функцій каналу вимірювання тиску

№ п/п	Геометричні розміри ЗТ		Максимальне відносне відхилення δ , %
	Довжина, $L_{ЗТ}$, м	Діаметр, $D_{ЗТ}$, м	
1	2,1	0,004	4,28
2	4,2	0,004	3,59
3	6,3	0,004	4,95

Отже, як видно з табл. 3.1, максимальне відносне відхилення перехідних функцій, отриманих за результатами розв'язування математичної моделі (3.23), від усереднених експериментальних перехідних функцій не перевищує 5% для всього діапазону часу перехідної функції. Отже, математична модель каналу вимірювання тиску є адекватною. Для визначення граничного значення динамічної похибки математичної моделі (3.23) необхідно врахувати також максимальне відхилення експериментальних перехідних функцій від усередненої перехідної функції (див.рис.3.4). Значення максимального відносного відхилення окремих експериментальних перехідних функцій від усередненої для всіх трьох серій експерименту (тобто для ЗТ трьох вказаних довжин) не перевищує $\delta_y = 4,0\%$. Тобто граничне значення похибки моделі рівне

$$\delta_{гр} = \sqrt{\delta^2 + \delta_y^2} = \sqrt{4,95^2 + 4,0^2} \approx 6,4\% . \quad (3.25)$$

Очевидно, що похибка математичної моделі ПНК (3.21) також не буде перевищувати граничного значення $\delta_{гр}$, оскільки вилучення одної із складових моделі (3.23), а саме рівняння (3.22), також усуне одну із складових похибки математичної моделі.

Слід підкреслити, що математична модель (3.21) може бути застосована для аналізу процесів, які відбуваються в камері ПТ (ППТ) під час вимірювання тиску (перепаду тиску) в умовах нестационарного потоку. Вплив цих процесів на вихідний сигнал ПТ (ППТ) може бути визначений за даною моделлю, при умові доповнення її диференціальним рівнянням, яке б відтворювало вплив зміни тиску в камері ПТ на зміну вихідної величини (струму, напруги) ПТ.

Також потрібно зазначити, що математична модель (3.23) містить отриману на основі експериментальної кривої розгону модель ПТ ППС.3-РН, тому дана математична модель відтворює із вказаною похибкою динамічні властивості каналу вимірювання тиску побудованого саме на основі такого перетворювача.

3.2. Моделювання резонансу в пневматичних каналах перетворювачів тиску та перепаду тиску

Оскільки, під час проведення досліджень математичної моделі ПНК встановлено, що при стрибкоподібній зміні тиску на вході в ПНК, в ній виникає ламінарний режим руху при малих значеннях числа Рейнольдса $Re < 1000$, тому для визначення коефіцієнта гідравлічного опору ЗТ $\lambda_{ЗТ}$ та дроселя $\lambda_{ДР}$ можна використовувати залежність (3.13).

Підставивши (3.13) в рівняння (3.20)

$$k_2 = \frac{k_{21}}{q_v}, \quad (3.26)$$

де k_{21} – коефіцієнт, який визначається з рівняння

$$k_{21} = \frac{128 \cdot \nu \cdot \rho}{\pi \cdot D_{ЗТ}^3} \cdot \left(\frac{L_{ДР}}{D_{ДР}} + \frac{L_{ЗТ}}{D_{ЗТ}} \right), \quad (3.27)$$

ν – кінематична в'язкість газоподібного середовища (природного газу), $\text{м}^2/\text{с}$, та замінивши коефіцієнт k_2 в рівнянні (3.18) отримано:

$$k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_{21} \cdot q_v = P_{ВХ} - P_K. \quad (3.28)$$

Як видно, рівняння (3.28) стає лінійним, а отже і система рівнянь, яка описує математичну модель ПНК також буде лінійною і прийме вигляд:

$$\begin{cases} A \frac{dP_K}{dt} = q_v \cdot \rho; \\ k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_{21} \cdot q_v = P_{ВХ} - P_K, \end{cases} \quad (3.29)$$

Виразивши з рівняння 1 математичної моделі (3.29) значення витрати q_v , та підставивши його в рівняння 2 (3.29), отримаємо наступне диференціальне рівняння, яке описує зміну тиску середовища в камері ПТ (ППТ):

$$k_3 \cdot \frac{d^2 P_K}{dt^2} + k_4 \cdot \frac{dP_K}{dt} + P_K = P_{ВХ}, \quad (3.30)$$

де k_3, k_4 коефіцієнти, які визначаються за формулами (3.31) та (3.32) відповідно:

$$k_3 = \frac{V_K \cdot M \cdot L_{3T}}{z \cdot R \cdot T \cdot D_{3T}}, \quad (3.31)$$

$$k_4 = \frac{128 \cdot \nu}{\pi \cdot D_{3T}^3} \cdot \left(\frac{L_{ДР}}{D_{ДР}} + \frac{L_{3T}}{D_{3T}} \right) \cdot \frac{V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}. \quad (3.32)$$

Застосувавши перетворення по Лапласу диференційного рівняння (3.30), знайдено функцію передачі ПНК ПТ (ППТ):

$$W(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (3.33)$$

де T_1 та T_2 – сталі часу, які визначаються з рівнянь:

$$T_1 = k_4 = \frac{640 \cdot \nu}{\pi \cdot D_{3T}^3} \cdot \left(\frac{L_{ДР}}{D_{ДР}} + \frac{L_{3T}}{D_{3T}} \right) \cdot \frac{V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}; \quad T_2 = \sqrt{k_3} = \sqrt{\frac{V_K \cdot M \cdot L_{3T}}{z \cdot R \cdot T \cdot D_{3T}}}. \quad (3.34)$$

Як видно з (3.33) ПНК можна описати за допомогою функції передачі аперіодичної ланки 2-го порядку, яка як відомо при виконанні залежності $T_1 < 2T_2$ стає коливною, а отже можуть виникати резонансні явища в ПНК, які негативно впливають на вимірювання тиску та перепаду тиску.

Для впливу конструктивних параметрів ПНК (а саме довжини та діаметра ЗТ) на значення частоти резонансу, в середовищі MatLAB визначено значення резонансних частот за формулою (3.35) для ЗТ довжиною $L_{3T} = [1, 4, 7, 10, 13, 16]$ м., та діаметром $D_{3T} = [4, 6, 8, 10, 12]$ мм. Об'єм камери ПТ прийнятий рівним $V_K = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, довжина та діаметр дроселя (вхідний штуцер ПТ) рівні $L_{ДР} = 10$ мм, діаметр $D_{ДР} = D_{3T}$.

$$f_{рез} = \frac{\frac{1}{T_2} \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2}}{2\pi} \quad (3.35)$$

Результати розрахунку наведено в таблиці 3.2 та на рисунку 3.7.

Таблиця 3.2.

Розрахункові значення резонансної частоти ПНК $f_{рез}=f(L_{ЗТ}, D_{ЗТ})$

Діаметр $D_{ЗТ}$, мм.	Довжина $L_{ЗТ}$, м.					
	1	4	7	10	13	16
4	21,3	10,6	8,0	6,7	5,8	5,3
6	31,9	15,9	12,1	10,1	8,8	8,0
8	42,5	21,3	16,1	13,5	11,8	10,6
10	53,2	26,6	20,1	16,8	14,7	13,3
12	63,8	31,9	24,1	20,2	17,7	16,0

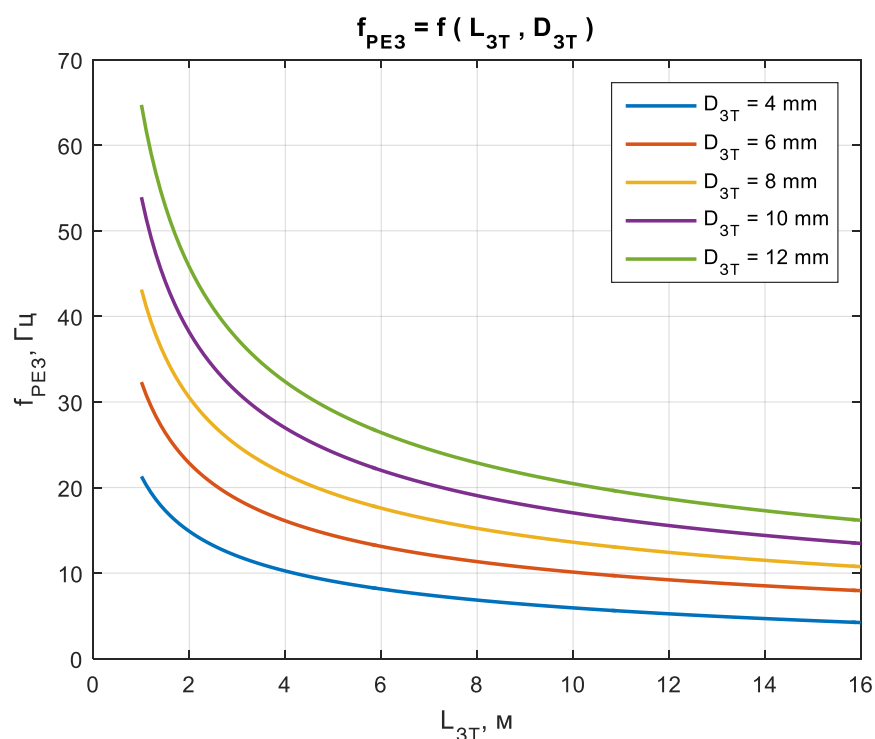


Рис.3.7. Графік залежності частоти резонансу $f_{рез}$ від довжини $L_{ЗТ}$ та діаметру $D_{ЗТ}$ ЗТ

Як видно з результатів (табл.3.2 та рис.3.7), частота резонансу, із збільшенням діаметра ЗТ є більшою і зменшується в залежності від довжини ЗТ. Однак варто зазначити, що на значення частоти резонансу, окрім довжини та діаметра ЗТ, досить значний вплив має і значення об'єму камери ПТ (ППТ) (рис.3.8), а саме, чим менший об'єм камери, тим частота резонансу є вищою. Із збільшенням об'єму камери ПТ (ППТ), частота резонансу зменшується і може досягати значень частоти пульсацій потоку.

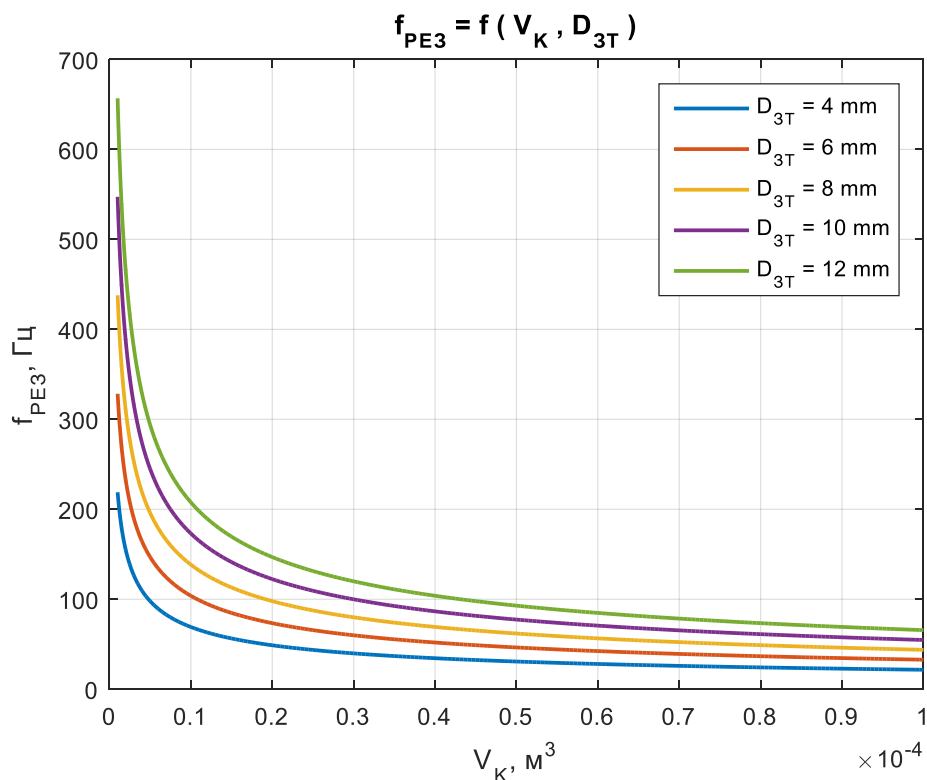


Рис.3.8. Графік залежності частоти резонансу f_{PE3} від об'єму камери ПТ (ППТ) V_K та діаметру ЗТ D_{3T} при умові, що довжина ЗТ рівна $L_{3T} = 1 \text{ м}$.

На основі отриманих результатів (табл.3.2, рис.3.7 - рис.3.9) можна зробити висновок, що при вимірюванні тиску (перепаду тиску) в умовах нестационарного потоку, при низькочастотних та середньочастотних пульсаціях сигналів (згідно класифікації наведеної в п.2.2.1) краще застосовувати імпульсні трубки меншої довжини та більшого діаметру. В цьому випадку сигнал у камері ПТ (ППТ) буде повторювати сигнал на вході ПНК. Для високочастотних пульсацій сигналів краще застосовувати імпульсні трубки більшої довжини та меншого діаметру і це дозволить уникнути резонансу та забезпечить фільтрування високочастотного сигналу. Однак для зменшення впливу високочастотних пульсацій на вимірювальне значення тиску (перепаду тиску) при використанні ЗТ малої довжини, рекомендується при проектуванні ПНК використовувати ПТ (ППТ) в яких об'єм камери ПТ (ППТ) є меншим ніж $V_K = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, оскільки для даних перетворювачів частота резонансу буде вищою, ніж частота пульсацій потоку.

Для дослідження впливу явища резонансу в ПНК на значення тиску (перепаду тиску) в камері ПТ (ППТ), а відповідно і на вимірюване значення, в середовищі MatLAB/Simulink (рис.3.9) проведено математичне моделювання ПНК для ПТ типу ППС.3-РН. Опрацювавши технічну документацію даного ПТ, визначено, що об'єм камери для даного перетворювача рівний $V_K = 4,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Моделювання проведено для ЗТ довжиною $L_{ЗТ} = 4 \text{ м}$ та діаметром $D_{ЗТ} = 4 \text{ мм.}$, довжина та діаметр дроселя (вхідний штуцер ПТ) рівні $L_{ДР} = 22 \text{ мм}$, діаметр $D_{ДР} = D_{ЗТ}$.

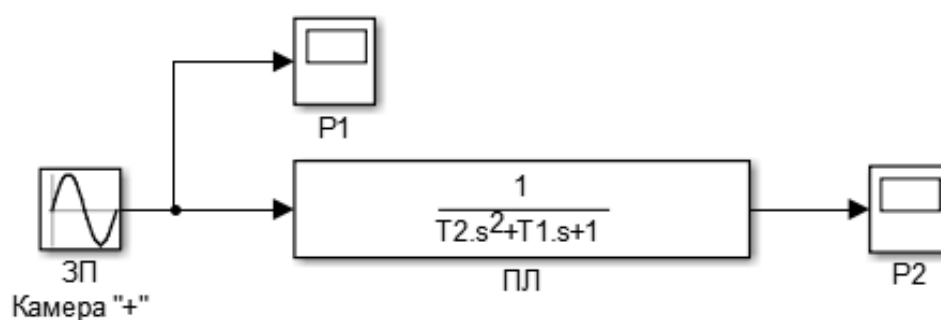


Рис.3.9. Модель ПНК з використанням ПТ типу ППС.3-РН в середовищі MatLAB/Simulink,

де P1 – тиск в плюсовій камері на ЗП, P2 – тиск в камері ПТ

При даних параметрах ПНК, частота резонансу $f_{рез} = 51,143 \text{ Гц}$, сталі часу функції передачі ПНК $T_1 = 2,887 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$, $T_2 = 9,642 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2$. Для дослідження на вхід моделі подається синусоїдальний сигнал з частотою рівній частоті резонансу $f_{рез}$ і амплітудою коливань 10% від значення тиску на діафрагмі $A = 392,15 \text{ Па}$. Результати дослідження представлено на рисунку 3.10.

Як видно з результатів дослідження, внаслідок виникнення явища резонансу в ПНК амплітуда коливань тиску зростає від початкового значення $A_1 = 392,15 \text{ Па}$, до значення $A_2 = 4113,7 \text{ Па.}$, а отже це свідчить про те, що резонансні явища в ПНК мають значний вплив на вимірювальне значення тиску (перепаду тиску), оскільки призводять до спотворення результатів їх вимірювання. Відповідно, при проектуванні ПНК вимірювання тиску (перепаду тиску) необхідно також

проводити розрахунки резонансних частот, щоб уникнути даного явища резонансу і усунути його вплив на точність вимірювання.

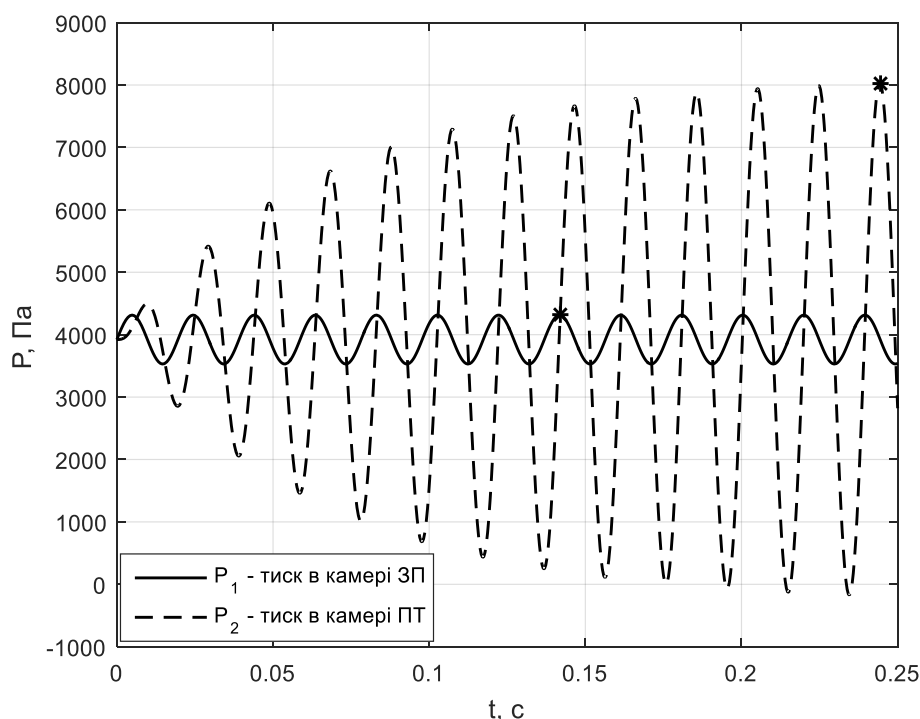


Рис. 3.10. Графіки тиску на ЗП та ПТ при виникненні явища резонансу в ПНК

3.3. Дослідження похибки визначення усередненого значення витрати газу при застосуванні методу змінного перепаду тиску

Для вимірювання витрат газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску, на сьогоднішній день існує велика кількість обчислювачів, які усереднюють значення перепаду тиску на ЗП, тиску і температури газу і за цими усередненими значеннями знаходять погодинні значення витрати [20]. При такому визначенні значення витрати, а відповідно і кількості газоподібного середовища, виникає ряд методичних похибок, розгляду яких присвячений даний підрозділ.

Згідно [20] об'ємна витрата q_v сухого газу в нормальному стані розраховується по формулі:

$$q_v = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot P}{\rho_c \cdot T \cdot K}}, \quad (3.36)$$

де α – коефіцієнт витрати звужуючого пристрою;

ε – поправковий множник на розширення газу на звужуючому пристрої;

d – діаметр отвору звужуючого пристрою;

Δp – перепад тиску на ЗП;

P – абсолютний тиск газу;

T – температура газу;

ρ_c – густина газу при стандартних умовах;

K – коефіцієнт стиснення газу.

Середнє значення об'ємної витрати за проміжок часу \bar{q}_v розраховується у відповідності з формулою (3.36), причому в залежності від апаратної реалізації витратоміра і за середніми значеннями перепаду тиску $\bar{\Delta p}$ і температури \bar{T} або за середніми значеннями кореня квадратного із перепаду тиску $\sqrt{\bar{\Delta p}}$, тиску \bar{P} і температури \bar{T} , з врахуванням якщо в цьому є необхідність поправкових коефіцієнтів на зміну ε , d , ρ_c і K .

Якщо припустити, що процеси зміни в часі величин Δp , P і T та відповідно і q_v є стаціонарними ергодичними та випадковими процесами, що в більшості випадків підтверджується практикою [28], то згідно з ергодичною гіпотезою розрахунок \bar{q}_v через значення $\bar{\Delta p}$, \bar{P} і \bar{T} відповідає рівнянню:

$$E(q_v) = f[E(\Delta p), E(P), E(T)], \quad (3.37)$$

де $E(\Delta p)$, $E(P)$ і $E(T)$ – математичне сподівання вимірювальних параметрів перепаду тиску, тиску та температури середовища відповідно;

$E(q_v)$ – математичне сподівання витрати.

Згідно [28], рівняння виду (3.37) справедливе лише для лінійних функціональних залежностей. В даному випадку функція $q_v = f(\Delta p, P, T)$, яка виходить із (3.36), являється нелінійною, тому дійсне значення математичного сподівання витрати $E_D(q_v)$ повинно розраховуватися рівняння:

$$E_D(q_v) = f[E(\Delta p), E(P), E(T)] + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial(\Delta p)^2} \sigma(\Delta p)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} \sigma(P)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \sigma(T)^2, \quad (3.38)$$

де $\frac{\partial^2 f}{\partial(\Delta p)^2}$, $\frac{\partial^2 f}{\partial(P)^2}$ і $\frac{\partial^2 f}{\partial(T)^2}$ – квадратні часткові похідні від функції (3.36) по перепаду тиску, тиску та температурі відповідно;

$\sigma(\Delta p)^2$, $\sigma(P)^2$ і $\sigma(T)^2$ – дисперсії параметрів перепаду тиску, тиску та температурі відповідно.

Значення вказаних похідних визначаються в точках $E(\Delta p)$, $E(P)$ і $E(T)$.

Перетворення рівняння (3.38) виконано виходячи з припущення, що величини ε , d , ρ_c і K у формулі (3.36) на протязі періоду досліджень є постійними.

З врахуванням сказаного із рівняння (3.38) і (3.36) отримаємо:

$$E_D(q_v) = k \sqrt{\frac{E(\Delta p) \cdot E(P)}{E(T)}} - \frac{k \sqrt{E(P)}}{8 \sqrt{E(T)}} \cdot \frac{\sigma(\Delta p)^2}{\sqrt{[E(\Delta p)]^3}} - \frac{k \sqrt{E(\Delta p)}}{8 \sqrt{E(T)}} \cdot \frac{\sigma(P)^2}{\sqrt{[E(\Delta p)]^3}} + \frac{3k \sqrt{E(\Delta p) \cdot E(P)}}{8 \sqrt{[E(T)]^5}} \cdot \sigma(T)^2, \quad (3.39)$$

де k – коефіцієнт, який визначається з формули

$$k = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 / \sqrt{\rho_c \cdot K}. \quad (3.40)$$

Виходячи з рівняння (3.39), якщо параметри потоку Δp , P і T в процесі вимірювання витрати не змінюються, то дисперсії цих параметрів $\sigma(\Delta p)^2$, $\sigma(P)^2$ і $\sigma(T)^2$ рівні нулю, тоді рівняння (3.39) прийме вигляд:

$$E_D(q_v) = k \sqrt{\frac{E(\Delta p) \cdot E(P)}{E(T)}}, \quad (3.41)$$

що відповідає рівнянню (3.37).

В даному випадку $E_D(q_v) = E(q_v)$. Внаслідок нестационарності потоку середовища, параметри Δp , P і T , як правило змінюються, тому при застосуванні рівняння (3.41) для обчислення середнього значення витрати замість рівняння (3.29) приводить до появи похибки $\overline{\delta q_v}$ відносно значення якої можна визначити як:

$$\overline{\delta q_v} = \frac{E(q_v) - E_D(q_v)}{E_D(q_v)} \cdot 100\% . \quad (3.42)$$

Якщо виразити дисперсії $\sigma(\Delta p)^2$, $\sigma(P)^2$ і $\sigma(T)^2$ у відносних одиницях, рівняння (3.39) спрощується до вигляду

$$E_D(q_v) = k \sqrt{\frac{E(\Delta p) \cdot E(P)}{E(T)}} \left(1 - \frac{\tilde{\sigma}(\Delta p)^2}{8} - \frac{\tilde{\sigma}(P)^2}{8} + \frac{3 \cdot \tilde{\sigma}(T)^2}{8} \right), \quad (3.43)$$

де $\tilde{\sigma}(\Delta p)^2 = \frac{\sigma(\Delta p)^2}{[E(\Delta p)]^2}$ – відносна дисперсія перепаду тиску на ЗП;

$\tilde{\sigma}(P)^2 = \frac{\sigma(P)^2}{[E(P)]^2}$ – відносна дисперсія тиску;

$\tilde{\sigma}(T)^2 = \frac{\sigma(T)^2}{[E(T)]^2}$ – відносна дисперсія температури.

Враховуючи рівняння (3.43), залежність для розрахунку похибки $\overline{\delta q_v}$ прийме вигляд

$$\overline{\delta q_v} = \frac{100}{8 \cdot [\tilde{\sigma}(\Delta p)^2 + \tilde{\sigma}(P)^2 - 3 \cdot \tilde{\sigma}(T)^2]^{-1} - 1}. \quad (3.44)$$

Із (3.43) та (3.44) виходить, що коливання перепаду тиску Δp та тиску P зменшують дійсне значення $E_D(q_v)$, а коливання температури T навпаки збільшує це значення. В зв'язку з цим, неврахування відносних дисперсій по перепаду тиску $\tilde{\sigma}(\Delta p)^2$ і по тиску $\tilde{\sigma}(P)^2$ завищує середнє значення витрати, а неврахування дисперсії по температурі $\tilde{\sigma}(T)^2$ занижує його.

Рівняння (3.39), (3.43) і (3.44) отримані для більш загального випадку визначення середньої витрати $\overline{q_v}$, безпосередньо через середні значення параметрів потоку $\overline{\Delta p}$, \overline{P} і \overline{T} . Значення відносних дисперсій параметрів потоку $\tilde{\sigma}(\Delta p)^2$, $\tilde{\sigma}(P)^2$ та $\tilde{\sigma}(T)^2$ можуть знаходитися в межах від 0 до 1, однак в результаті проведеного статичного дослідження отримано, що для витратомірів газоподібних

середовищ значення вказаних дисперсій не перевищують 0,2. Незважаючи на це похибка $\overline{\delta q_v}$ може приймати великі значення.

В якості прикладу в таблиці 3.3 наведено розрахунок значення похибки $\overline{\delta q_v}$ згідно (3.44), для різних відносних дисперсій перепаду тиску на ЗП $\tilde{\sigma}(\Delta p)^2$ при умові, що $\tilde{\sigma}(P)^2$ та $\tilde{\sigma}(T)^2$ рівні нулю.

Таблиця 3.3.

Розрахункові значення похибки $\overline{\delta q_v}$ в залежності від $\tilde{\sigma}(\Delta p)^2$

$\tilde{\sigma}(\Delta p)^2$	0	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2
$\overline{\delta q_v}, \%$	0	0,125	0,31	0,63	1,27	1,91	2,56

Виходячи з вищесказаного, формула (3.44) дозволяє оцінити похибку визначення середнього значення витрати і кількості газу в умовах нестационарного потоку газоподібного середовища. Для підтвердження залежності (3.44), щодо визначення похибок усередненого значення витрати газу при вимірюванні методом змінного перепаду тиску виконано математичний експеримент, під час якого:

1) сформовано сигнали зміни перепаду тиску на ЗП, графіки яких зображено на рисунку 3.11, які за статистичними характеристиками та формою амплітудно-частотного спектру відповідають чотирьом режимам протікання газоподібного середовища (п.2.2.1).

2) на основі отриманих сигналів визначено дисперсію та відносну дисперсію;

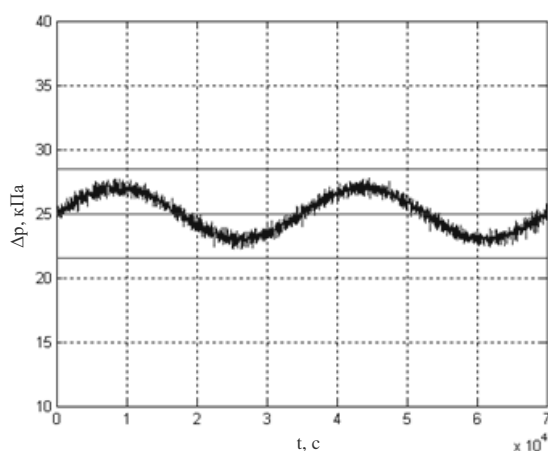
3) для кожного з режимів протікання середовища за відомими значеннями математичного сподівання та дисперсії сигналів перепаду тиску та тиску обчислено за формулою (3.44) значення похибки $\overline{\delta q_v}$, яка виникає внаслідок усереднення значень перепаду тиску та тиску.

4) розраховано та сформовано сигнали миттєвого значення витрати у ВТ за значеннями сигналів перепаду тиску та тиску, а також знайдено математичне сподівання миттєвого значення витрати.

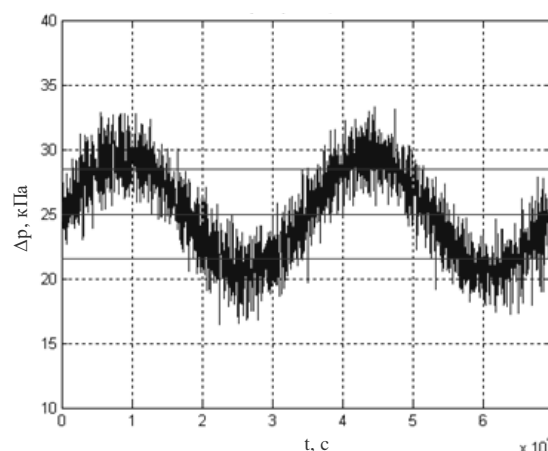
5) розраховано математичні сподівання сигналів перепаду тиску та тиску. За значеннями математичних сподівань обчислено усереднене значення витрати на протязі часу реалізації сигналів (10 с).

б) на основі отриманих даних в п.п.4 та п.п.5, знайдено відносне відхилення усередненого значення витрати від математичного сподівання миттєвого значення витрати за формулою

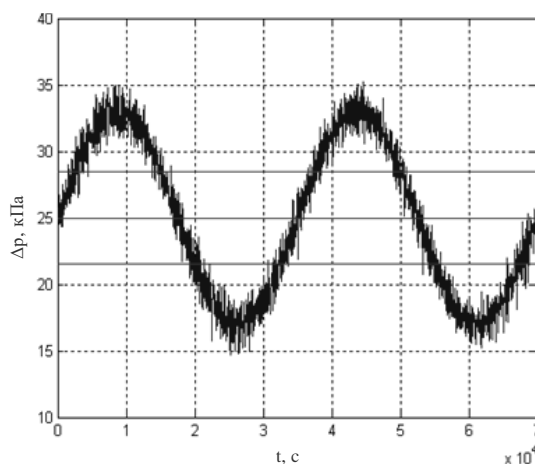
$$\delta = \frac{Q(E(P), E(\Delta p)) - E(Q_i)}{E(Q_i)} \cdot 100\% \quad (3.45)$$



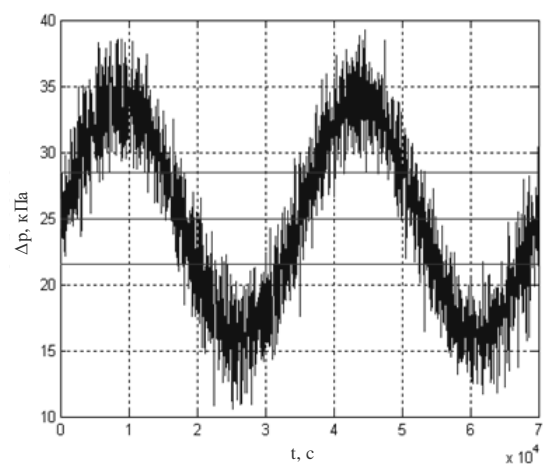
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.11. Графік сигналу перепаду тиску на ЗП для:

а) стаціонарного режиму протікання;

б) пульсуючого режиму протікання; в) змінного режиму протікання;

г) нестаціонарного режиму протікання

7) проведено порівняння отриманих значень похибок визначення усередненого значення витрати $\overline{\delta q_v}$ та δ , розрахованих за формулами (3.44) та (3.45). Результати математичного експерименту наведено в таблиці 3.4.

На основі результатів математичного експерименту (табл.3.4) доведено, що аналітична залежність (3.44) для визначення похибки, яка виникає внаслідок усереднення параметрів потоку є правильною, та може застосовуватись на практиці.

Таблиця 3.4.

Порівняння похибки визначення усередненого значення витрати

Режим протікання середовища	$\overline{\delta q_v}$, %	δ , %	$\sigma(\Delta p)^2$, частка одиниці
Стаціонарний	0,0410	0,0279	0,0033
Пульсуючий	0,1326	0,1070	0,0106
Змінний	0,6659	0,6374	0,0529
Нестаціонарний	0,8633	0,8546	0,0685

Також підтверджено, що визначення витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску в нестаціонарному потоці за усередненими значеннями тиску та перепаду тиску на ЗП приводить до завищення значення витрати тим більше, чим більшою є дисперсія, зокрема сигналу перепаду тиску на ЗП.

3.4. Оцінювання додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати

З огляду на викладене в п.2.2.3, під час вимірювання витрати нестаціонарного потоку, виникають такі додаткові складові невизначеності:

- U'_{Dy} невизначеність, яка зумовлена нелінійністю залежності $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$;

- $U'_{Дін}$ невизначеність впливу місцевого прискорення, яка пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореному виразі квазістаціонарного рівняння витрати.

В сучасних системах вимірювання витрати на основі мікропроцесорного обчислювача, сигнали вимірюваних параметрів (тиску, перепаду тиску, температури) дискретизують. Залежно від частоти дискретизації цих сигналів може виникати додаткова складова невизначеності $U'_{Двим}$, яку оцінюють за допомогою формули (2.34).

Окрім того, в системах з роздільним вимірюванням параметрів потоку може виникати додаткова складова невизначеності $U'_{Да}$, яка пов'язана з динамічними властивостями вимірювального каналу кожного з параметрів.

Враховуючи вище сказане, можна зробити висновок, що при вимірюванні витрати нестационарного потоку можуть виникати чотири додаткові складові невизначеності. Ці складові формують результуючу додаткову невизначеність, яку у загальному випадку визначають за формулою (1.2).

За значенням додаткової невизначеності $U'_Д$ в стандарті [7] пропонується коректувати вимірюване значення витрати нестационарного потоку введенням поправкового коефіцієнта, який визначається з залежності (1.1).

Оцінювання складових невизначеності $U'_Д$ виконують застосовуючи умову квазістаціонарності рівняння миттєвого значення витрати, а саме, вважають, що коефіцієнти витікання і звуження потоку рівні за значенням коефіцієнтам, визначеним, як для стаціонарного потоку [7, 54, 61].

Невизначеність $U'_{Ду}$, яка зумовлена нелінійністю залежності $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$, може бути оцінена згідно методики, яка представлена в п.2.2.3, шляхом порівняння значень кореня квадратного з сигналів перепаду тиску на виході двох ППТ, згідно формули (2.33).

При вимірюваннях витрати за допомогою способу визначення витрати та кількості середовища з роздільним вимірюванням параметрів (СРП) невизначеність $U'_{Дy}$ може бути оцінена на основі значень відносної похибки, яка може бути обчислена за формулою (3.44).

У випадку коли розглядають тільки пульсації перепаду тиску, значення $\tilde{\sigma}(P)^2$ та $\tilde{\sigma}(T)^2$ дорівнюють нулю, відповідно формулу (3.44) можна записати в спрощеному вигляді:

$$\delta \bar{q}_v = 12,5 \cdot (\tilde{\sigma}(\Delta p))^2. \quad (3.46)$$

За 95% довірчого рівня розширена відносна невизначеність $U'_{Дy}$ може бути прийнята рівною відносній похибці

$$U'_{Дy} = \delta \bar{q}_v = 12,5 \cdot (\tilde{\sigma}(\Delta p))^2. \quad (3.47)$$

Формула (3.47) пропонується в стандарті [7], як спрощена залежність для обчислення невизначеності $U'_{Дy}$ для систем з СРП.

Невизначеність $U'_{Дин}$, яка пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореному виразі квазістаціонарного рівняння витрати природного газу, може бути оцінена за рівнянням похибки вимірювання витрати нестационарного потоку E_T , що представлено у [54, 61]:

$$E_T = \left\{ \sqrt{1 + \frac{(\tilde{\sigma}(\Delta p))^2}{4 \cdot (1 + H^2 \cdot J^2)}} - 1 \right\} \cdot 100, \quad (3.48)$$

де J – коефіцієнт інерції

$$J = \frac{2 \cdot \pi \cdot C \cdot l_e \cdot St}{d \cdot (1 - C^2 \cdot \beta^4)}; \quad (3.49)$$

D – діаметр вимірювального трубопроводу;

St – число Струхалія

$$St = \frac{f_0 \cdot d}{\bar{U}}; \quad (3.50)$$

f_0 – частота основної гармоніки пульсацій;

\bar{U} – середня швидкість потоку у отворі звужувального пристрою

$$\bar{U} = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d^2}; \quad (3.51)$$

q_v – об'ємна витрата природного газу;

H – коефіцієнт гармонічних спотворень вимірюваного сигналу перепаду тиску

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n r^2 \cdot a_r^2}{\sum_{r=1}^n a_r^2}}; \quad (3.52)$$

r – номер гармоніки в інтегралі Фур'є;

a_r – амплітуда n -ої гармоніки.

Якщо добуток $H^2 \cdot J^2 \ll 1$, похибка E_T є незначною і нею можна знехтувати.

За 95% довірчого рівня розширена відносна невизначеність $U'_{\text{Дін}}$ може бути прийнята рівною відносній похибці E_T

$$U'_{\text{Дін}} = E_T = \left\{ \sqrt{1 + \frac{(\tilde{\sigma}(\Delta p))^2}{4 \cdot (1 + H^2 \cdot J^2)}} - 1 \right\} \cdot 100. \quad (3.53)$$

Слід підкреслити, що саме формула (3.53) дає можливість оцінити невизначеність $U'_{\text{Дін}}$ із врахуванням такої важливої характеристики сигналу перепаду тиску, як відносне середньоквадратичне відхилення $\tilde{\sigma}(\Delta p)$. Тому саме формулу (3.53) слід застосовувати для оцінювання цієї невизначеності замість формули (Ж.4.4) стандарту [7].

Для оцінювання невизначеності $U'_{\text{Дін}}$ за формулою (3.53) пропонуємо застосовувати таку методику:

1. Виконати реєстрацію сигналу перепаду тиску на ЗП Δp з достатнім інтервалом дискретизації для відтворення даного сигналу;

2. Застосовуючи швидке перетворення Фур'є отримати частотний спектр сигналу Δp ;

3. З частотного спектру визначити перелік гармонік, встановити номер кожної з гармонік в порядку зростання частоти, визначити амплітуду цих гармонік, а також виділити частоту основної гармоніки.

4. За формулами (3.49) - (3.52) обчислити коефіцієнт інерції та гармонічних спотворень, на основі яких виконати оцінювання невизначеності $U'_{Дін}$ за формулою (3.53).

Невизначеність $U'_{Да}$, яка пов'язана з динамічними властивостями вимірювального каналу, обчислюють за формулою [7]:

$$U'_{Да} = \left(1 - \sqrt{K_a(\tau)}\right) \cdot 100, \quad (3.54)$$

де $K_a(\tau)$ – функція нелінійного перетворення каналу вимірювання.

Під час вимірювання витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску з використанням способу визначення кількості середовища з автоматизованим вимірюванням параметрів (САП) та за умови оцінювання невизначеності $U'_{Ду}$ за формулою (2.33), невизначеність $U'_{Да}$ вже врахована в значенні невизначеності $U'_{Ду}$, тому дану невизначеність потрібно враховувати тільки у випадку вимірювання витрати з використанням СРП [7].

Для кількісного оцінювання складових невизначеності $U'_д$, які виникають під час вимірювання витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку методом змінного перепаду тиску, сформовано масиви значень сигналів перепаду тиску на ЗП $\Delta p(\tau)$, графіки яких зображені на рис. 3.12. Такі сигнали перепаду тиску сформовано для САП, у якій застосовано звужувальний пристрій (діафрагма) з відносним діаметром отвору $\beta = 0,47$. Інтервал вимірювання перепаду тиску $\tau_k - \tau_n = 4c$, крок дискретизації сигналу $\Delta\tau = 0,04c$.

Для сформованих сигналів перепаду тиску на ЗП, обчислено значення відносної середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ за формулою (2.23), та максимального відносного відхилення перепаду тиску $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ (2.20), а також визначено режим протікання середовища згідно класифікації наведеної на рисунку 2.1.

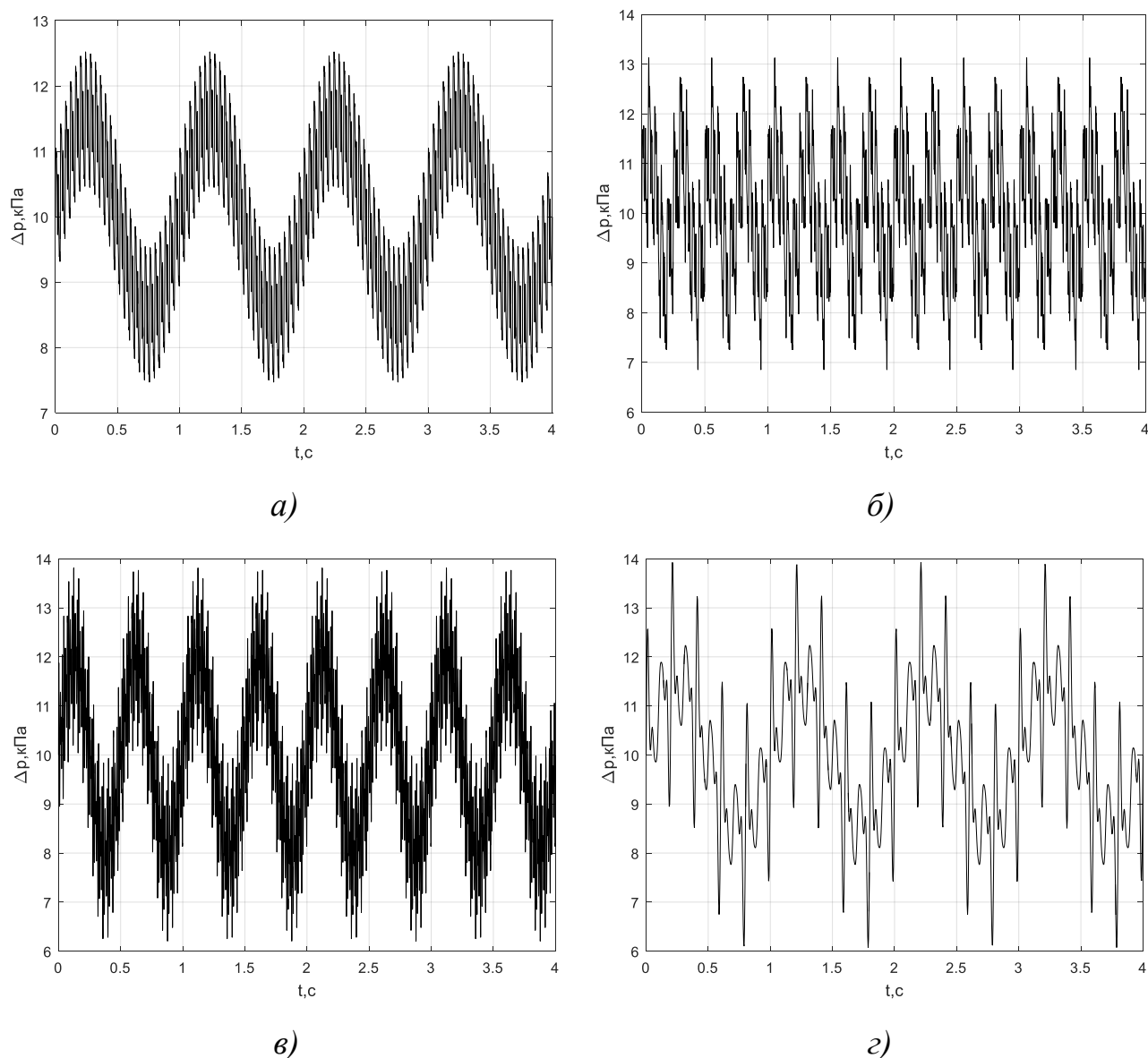


Рис.3.12. Графіки сигналів перепаду тиску на ЗП для різних режимів потоку:

- а) пульсуючого; б) нестационарного з переважанням середньочастотних складових; в) нестационарного з переважанням високочастотних складових; г) нестационарного з переважанням низькочастотних складових*

Таблиця 3.5

**Значення відносної середньоквадратичної амплітуди пульсацій, та
максимального відносного відхилення для сформованих сигналів перепаду
тиску**

Графіки перепаду тиску на діафрагмі	Максимальне відносне відхилення перепаду тиску на діафрагмі $\tilde{\Delta}(\Delta p)$	Відносна середньоквадратична амплітуда пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$	Режим протікання середовища
Сигнал “3.13а”	0,126	0,125	Пульсуючий
Сигнал “3.13б”	0,157	0,135	Нестаціонарний
Сигнал “3.13в”	0,190	0,168	Нестаціонарний
Сигнал “3.13г”	0,196	0,146	Нестаціонарний

Як видно з таблиці 3.5, всі сформовані сигнали перепаду тиску відтворюють нестаціонарний потік (пульсуючий та нестаціонарний режими протікання середовища). Відповідно до наведеної вище класифікації складових невизначеності вимірюваного значення витрати, для цих режимів протікання слід оцінити такі складові невизначеності:

- невизначеність $U'_{Ду}$, яка пов'язана з нелінійною залежністю $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$, ця невизначеність також містить в собі невизначеність $U'_{Да}$, оскільки прийнято, що для вимірювання витрати застосовано САП;

- невизначеність $U'_{Дін}$, яка пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореновому виразі квазістаціонарного рівняння витрати.

Як вказано вище, додаткова складова невизначеності $U'_{Двим}$ є функцією частоти дискретизації сигналу перепаду тиску. У аналізованих прикладах для всіх чотирьох сигналів перепаду тиску застосовано достатньо малий крок дискретизації ($\Delta\tau = 0,04c$), тому невизначеність $U'_{Двим}$ є незначною у порівнянні з іншими складовими і, відповідно, нею можна знехтувати.

Невизначеність $U'_{Ду}$ обчислена за формулою (2.33) на основі значень перепаду тиску кожного з чотирьох сформованих сигналів перепаду тиску. Отримані значення $U'_{Ду}$ представлено у таблиці 3.6.

Для оцінювання невизначеності $U'_{Дин}$, зокрема, для визначення коефіцієнта гармонічних спотворень сигналу, за допомогою функції швидкого перетворення Фур'є пакету Matlab отримано частотні спектри чотирьох досліджуваних сигналів перепаду тиску, які представлено на рисунку 3.13.

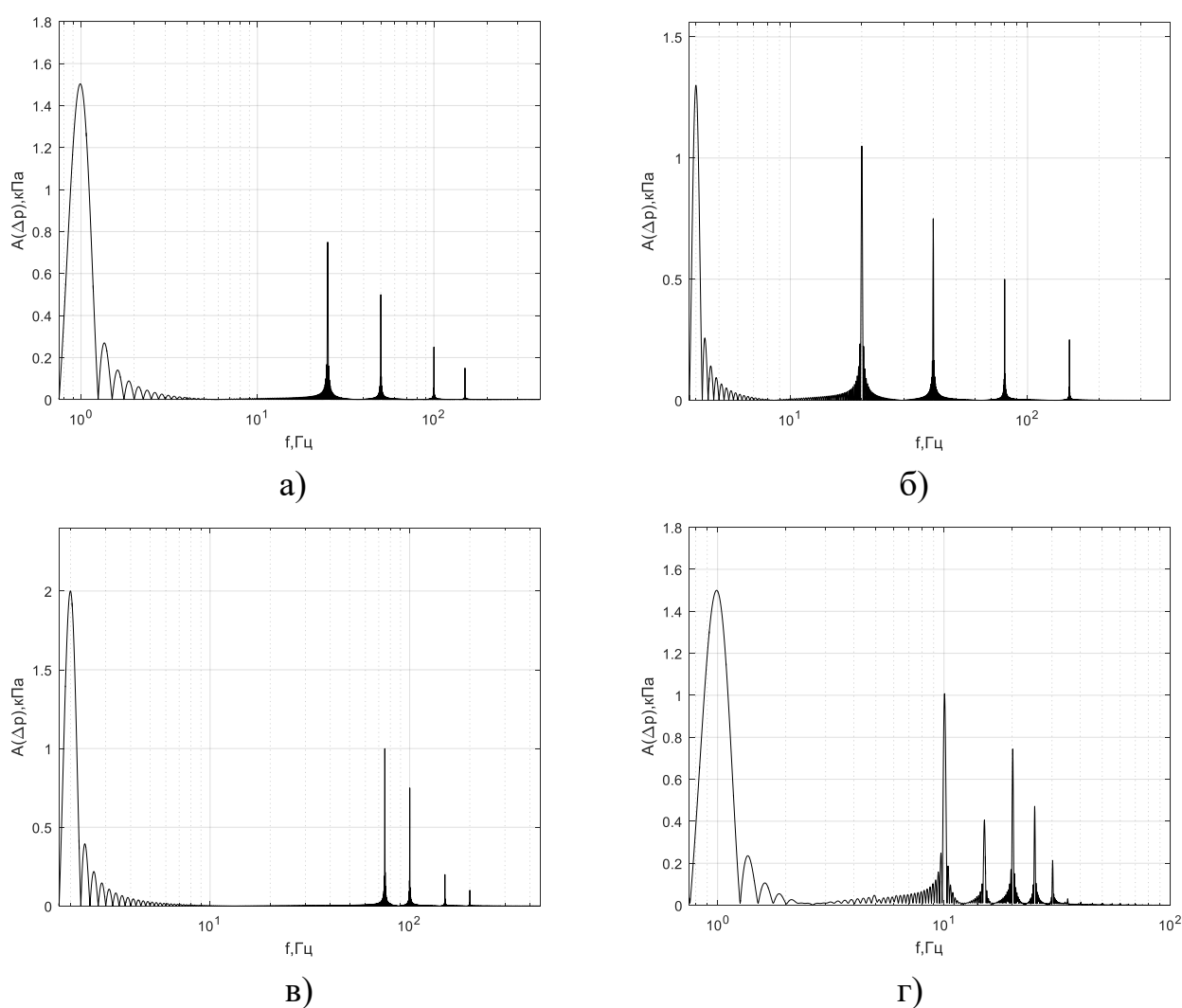


Рис. 3.13. Частотний спектр сигналів перепаду тиску на ЗП для різних режимів потоку:

- а) пульсуючого; б) нестационарного з переважанням середньочастотних складових; в) нестационарного з переважанням високочастотних складових; г) нестационарного з переважанням низькочастотних складових*

З частотного спектру кожного сигналу визначено кількість гармонік у сигналі, номер кожної гармоніки в порядку зростання частоти та їх амплітуду. На основі цих характеристик обчислено коефіцієнт гармонічних спотворень H за формулою (3.52). На основі отриманих значень H та значень коефіцієнта інерції J , обчислених за формулами (3.49) – (3.51), за формулою (3.53) обчислено значення невизначеності $U'_{Дін}$, які представлено у таблиці 3.6.

Для перевірки коректності розрахунку невизначеності $U'_{Дін}$, виконано порівняння результатів оцінювання з відомими результатами інших дослідників, що представлені кривою 1 на рисунку 3.14 [54] (див.рис.3.14).

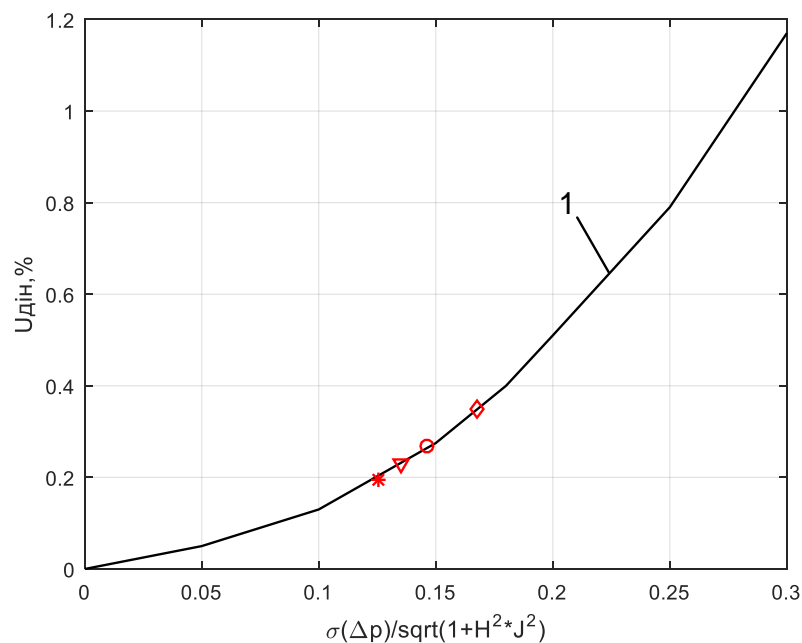


Рис.3.14. Залежність невизначеності $U'_{Дін}$ від модифікованої амплітуди пульсацій перепаду тиску:

- * - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “3.13а”;
- v - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “3.13б”;
- o - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “3.13в”;
- ◇ - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “3.13г”

Як видно з рис.3.14, отримані для досліджуваних сигналів значення $U'_{Дін}$ добре узгоджуються з теоретичною кривою, що є свідченням коректності застосування рівняння (3.53).

На основі отриманих значень невизначеностей $U'_{Ду}$, $U'_{Дін}$ за формулою (1.2) обчислено значення сумарної невизначеності $U'_Д$ вимірюваного значення витрати середовища в умовах нестационарного потоку (див. табл. 3.6).

Значення коректуючого множника K_D , обчислені за формулою (1.1), також представлено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Результати оцінювання невизначеності $U'_Д$

Графіки перепаду тиску на діафрагмі	Невизначеність $U'_{Ду}$, %	Невизначеність $U'_{Дін}$, %	Сумарна невизначеність $U'_Д$, %	Коефіцієнт поправки K_D
Сигнал “3.13а”	0,1399	0,1964	0,2412	0,9976
Сигнал “3.13б”	0,0777	0,2288	0,2416	0,9976
Сигнал “3.13в”	0,0751	0,3500	0,3580	0,9964
Сигнал “3.13г”	0,4196	0,2667	0,4971	0,9951

За результатами виконаних досліджень встановлено, що нестационарний потік може зумовити появу значної додаткової невизначеності вимірюваного значення витрати. Зокрема, при застосуванні сучасних САП на основі мікропроцесорного обчислювача та витратоміра змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку, слід оцінити дві додаткові складові невизначеності: невизначеність $U'_{Ду}$, яка пов'язана з нелінійною залежністю $q(\tau)$ від $\Delta p(\tau)$, а також невизначеність $U'_{Дін}$, яка пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння витрати. Для оцінювання цих невизначеностей необхідне виконання експериментальних досліджень параметрів

потокі із застосування додаткової приладової системи з малоінерційним перетворювачем перепаду тиску.

Як видно з формул (2.35), (3.53), додаткові похибки вимірювання витрати, на основі яких оцінено невизначеності $U'_{Ду}$ та $U'_{Дін}$, мають додатній знак, тобто під час вимірювання витрати нестационарного потоку виникає завищення вимірюваного значення витрати. Тому зростання додаткової невизначеності $U'_Д$ призводить до зменшення поправкового коефіцієнта $K_Д$.

Значення невизначеностей $U'_{Ду}$ та $U'_{Дін}$, а, відповідно, і додаткової невизначеності $U'_Д$ суттєво залежать від середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$, а також максимального відносного відхилення перепаду тиску $\tilde{\Delta}(\Delta p)$. Зростання цих характеристик сигналу призводить до зростання складових $U'_{Ду}$ та $U'_{Дін}$, а, відповідно, і результуючої додаткової невизначеності $U'_Д$. Зокрема у цій роботі виконано аналіз сигналів перепаду тиску, для яких значення $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ та $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ не перевищують 20% від середнього значення перепаду тиску на ЗП. Такі зміни перепаду тиску призводять до виникнення додаткової складової невизначеності вимірюваного значення витрати, що не перевищує 0,5%. Однак з рис.3.14 видно, що підвищення середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ до 28% призводить до збільшення невизначеності $U'_{Дін}$ до 1,0%.

Вказаним значенням додаткової невизначеності $U'_Д$ відповідає значення поправкового коефіцієнта $K_Д$, що суттєво відрізняється від одиниці. Застосування поправкового коефіцієнта $K_Д$ є прямим коректуванням вимірюваного значення витрати середовища, а отже потребує особливо ретельних експериментальних досліджень сигналу перепаду тиску в діючій системі вимірювання витрати газу, а також підтвердження того, що отримане під час досліджень значення невизначеності є умовно постійним протягом тривалого часу експлуатації системи.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблено математичну модель пневматичного каналу (ПНК) перетворювачів тиску (ПТ) та перепаду тиску (ППТ), яку описано диференційними рівняннями (3.21). Для перевірки адекватності знайденої математичної моделі, спроектовано експериментальну установку (рис.3.2, рис.3.3) та проведено експериментальні дослідження, результати яких показали, що математична модель (3.21) максимально точно описує перехідні процеси в ПНК ПТ (ППТ), допустима гранична похибка складає $\delta_{гр} \approx 6,4\%$.

2. На основі математичної моделі (3.21), для проведення моделювання впливу резонансних явищ в ПНК ПТ (ППТ), на точність їх вимірювання, виведено функцію передачі ПНК (3.33), розраховано значення частоти резонансу в залежності від конструктивних характеристик ПНК (довжини з'єднувальної трубки (ЗТ) та діаметра) (табл. 3.2), побудовано графіки залежності резонансної частоти від зміни об'єму камери ПТ (ППТ), для заданої довжини ЗТ (рис.3.8).

Проведено дослідження впливу резонансних явищ в ПНК ПТ (ППТ). На основі отриманих результатів, можна зробити висновок, що внаслідок виникнення явища резонансу в ПНК амплітуда коливань тиску зростає від початкового значення $A_1 = 392,15$ Па, до значення $A_2 = 4113,7$ Па., а отже це свідчить про те, що резонансні явища в ПНК мають значний вплив на вимірювальне значення тиску (перепаду тиску), оскільки призводять до спотворення результатів їх вимірювання. Відповідно, при проектуванні ПНК вимірювання тиску (перепаду тиску) необхідно також проводити розрахунки резонансних частот, щоб уникнути даного явища резонансу і усунути його вплив на точність вимірювання.

3. Виконано дослідження похибок визначення усередненого значення витрати газу при застосуванні методу змінного перепаду тиску. Знайдено залежність для розрахунку похибки вимірювання витрати газоподібного середовища (3.44), яка дозволяє здійснювати оцінку точності визначення середнього значення витрати і кількості газу в умовах нестационарного потоку газоподібного середовища. Для підтвердження залежності (3.44) проведено

математичний експеримент, на основі якого підтверджено актуальність залежності (3.44), а також підтверджено, що визначення витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску в нестационарному потоці за усередненими значеннями тиску та перепаду тиску на ЗП приводить до завищення значення витрати тим більше, чим більшою є дисперсія, зокрема сигналу перепаду тиску на ЗП.

4. Проведено оцінювання додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати в умовах нестационарного потоку, на основі яких встановлено, що внаслідок вимірювання витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку, виникають додаткові невизначеності, сумарне значення яких може досягати 5%.

Результати досліджень представлених в даному розділі опубліковано в наукових працях [9, 10, 12-18, 23, 24, 52, 66].

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

4.1. Розроблення установки для експериментальних досліджень впливу конструктивних особливостей вимірювального трубопроводу на результат вимірювання витрати

При вимірюванні витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску, вплив конструктивних особливостей вимірювального трубопроводу (ВТ) на точність вимірювання може бути досить суттєвим та може призводити до виникнення додаткових похибок. Тому, дослідження таких похибок є досить важливим завданням, виконання якого дасть можливість оцінити невизначеність вимірюваного значення витрати газоподібного середовища в реальних технологічних умовах, а також зробити висновок про можливість застосування певного витратоміра для вимірювання витрати.

Для виконання досліджень додаткових похибок, які виникають внаслідок зміни конструктивних особливостей ВТ, розроблено експериментальну витратовимірювальну установку, аксонометрична схема якої представлена на рис. 4.1. Дана установка має такі основні характеристики: внутрішній діаметр трубопроводу $D_{ВТ}=0,1$ м; довжина прямолінійних ділянок ВТ перед кожним з витратомірів – більше $100D$; тип середовища – повітря тиском до 0,2 бар; діапазон витрати повітря 50 – 1000 м³/год (за с.у.).

До складу установки входять два послідовно включені витратоміри змінного перепаду тиску (ВЗПТ), геометричні розміри елементів яких відповідають вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,5:2009 [3,4,7]. Один з ВЗПТ має нероз'ємну секцію вимірювального трубопроводу довжиною $10D$ перед діафрагмою, тому тут відсутні впливи додаткових конструктивних елементів, які можуть впливати на невизначеність результату вимірювання. Отже цей ВЗПТ розглядаємо як робочий еталон (надалі – еталонний ВЗПТ).

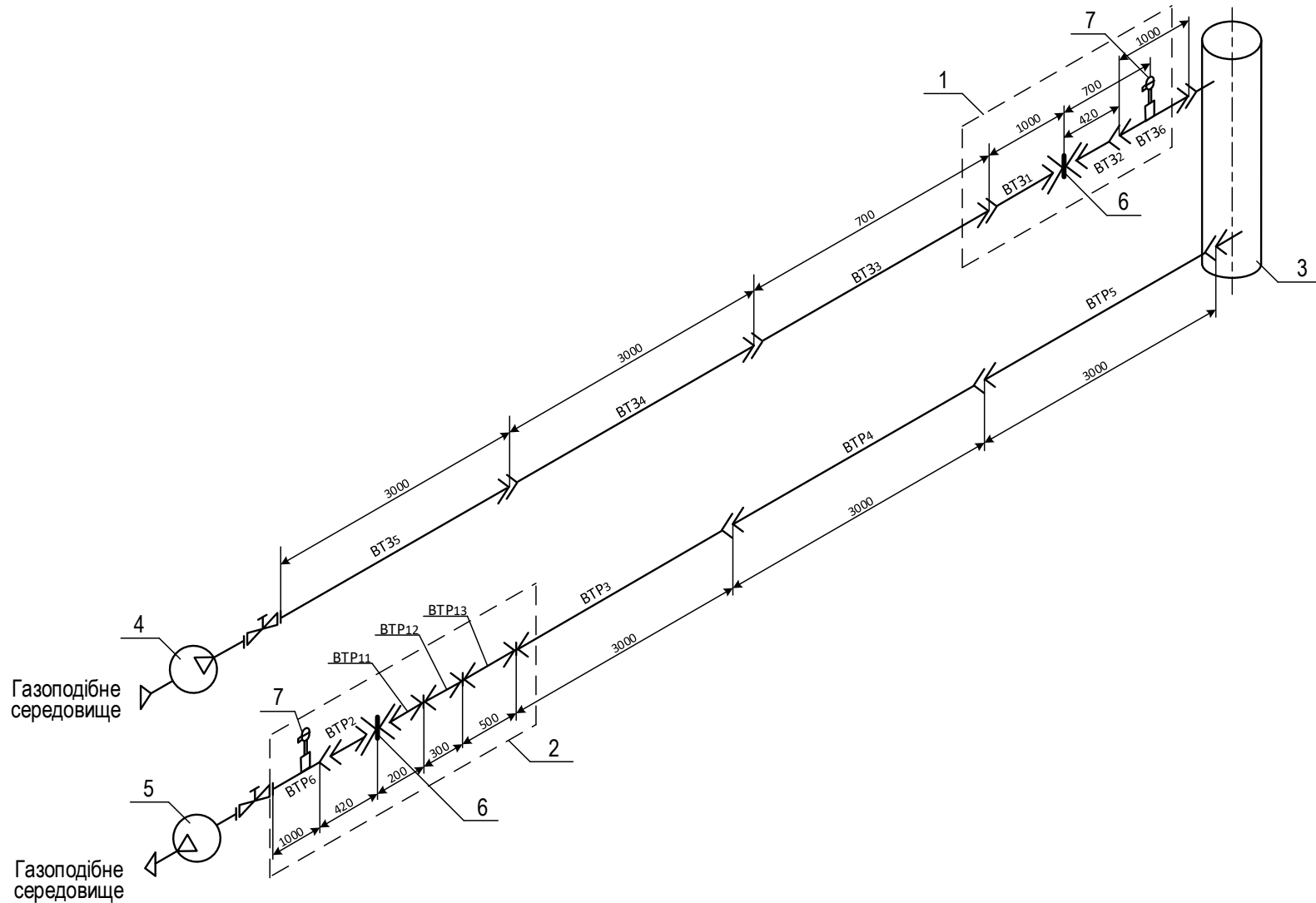


Рис.4.1. Аксонометрична схема експериментальної витратовиміральної установки:

1 – еталонний витратомір змінного перепаду тиску (ВЗТП), 2 – робочий ВЗТП, 3 – ємність, 4 – повітрорудка ПД1 на вхідній лінії подачі газоподібного середовища, 5 – повітрорудка ПД2 на вихідній лінії, 6 – звужувальний пристрій еталонного і робочого ВЗТП, 7 – вимірвальний перетворювач температури еталонного і робочого ВЗТП.

У складі обидвох ВЗПТ застосовано високоточні вимірювальні перетворювачі перепаду тиску (ППТ), тиску (ПТ) (див. рис.4.2а) та температури (див. рис.4.2б) фірми Honeywell з вихідним HART сигналом, а обчислення витрати виконується в реальному часі за допомогою програми, встановленої на персональному комп'ютері.



а)



б)

*Рис.4.2. Вимірювальні перетворювачі еталонного (робочого) ВЗПТ:
а) перепаду тиску (ППТ) та тиску (ПТ), б) температури.*

Секції ВТ витратомірів, які розміщені безпосередньо до та після ЗП виготовлені у відповідності до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2:2009 [3,4]. Дані секції виготовлені з холоднотягнутої сталеві безшовної труби 120x100 Н8, обробленої хонем, шорсткість внутрішньої поверхні $Ra < 0,4$ мкм; прямолінійність – місцеве відхилення не перевищує 1 мм на кожен метр довжини. Таким чином забезпечено умови для формування неспотвореного профілю швидкості потоку перед витратомірами.

Для усунення впливу спотворень структури потоку, які можуть виникати в місцевих опорах, перед еталонним та робочим ВЗПТ реалізовано прямолінійну ділянку ВТ довжиною більше $100D$. Для еталонного ВЗПТ ця ділянка складається з чотирьох секцій :

- секції довжиною $10D$, встановленої безпосередньо перед діафрагмою (секція ВТ31 див. рис.4.1);

- трьох секцій довжиною по $30D$ (секції ВТ33, ВТ34, ВТ35 див. рис.4.1).

Для робочого ВЗПТ ділянка ВТ складається з шести секцій:

- секцій довжиною $2D$, $3D$, $5D$ встановлених безпосередньо перед діафрагмою (секції ВТР11, ВТР12, ВТР13 див. рис.4.1). Дані секції передбачено для забезпечення можливості проведення досліджень впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на вимірюване значення витрати при відповідних відстанях від ЗП;

- трьох секцій довжиною по $30D$ (секції ВТР3, ВТР4, ВТР5 див. рис.4.1);.

Відповідність геометричних розмірів ВТ еталонного та робочого ВЗПТ вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2:2009 [3, 4] перевірено в ДП "Львівстандартметрологія" за методикою МВУ 043/01-2011, що підтверджено відповідними протоколами (див. додаток А).

Для виконання експериментальних досліджень передбачено використання стандартних діафрагм із значенням відносного діаметра отвору $\beta = 0,2; 0,4; 0,5; 0,67$.

Фактичні значення відносного діаметра отвору діафрагм β , отримані на основі значень діаметра отвору, вимірюного у відповідності до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4], представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Значення відносного діаметра отвору діафрагм β , застосованих для виконання експериментальних досліджень

№ з/п	Еталонний ВЗПТ			Робочий ВЗПТ		
	Номер діафрагми	Діаметр отвору* d_{20} , мм	Відносний діаметр β	Номер діафрагми	Діаметр отвору* d_{20} , мм	Відносний діаметр β
1	46-1	19,993	0,200070	47-1	19,982	0,200160
2	46-2	39,987	0,400150	47-2	39,99	0,400581
3	46-3	49,995	0,500300	47-3	49,992	0,500771
4	46-4	66,987	0,670339	47-4	66,978	0,670921

* - вимірювання значень діаметрів отвору діафрагми та внутрішнього діаметра ВТ виконано при температурі навколишнього середовища $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Відповідність геометричних розмірів діафрагм вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [4] перевірено в ДП "Львівстандартметрологія". Паспорти діафрагм еталонного та робочого ВЗПТ представлені у додатку Б та В відповідно.

В якості джерела витрати застосовано дві повітроредувки:

- повітроредувка ПД1 4 (див. рис. 4.1) з електроприводом потужністю 2,5 кВт, працює при незмінній частоті обертання;

- повітроредувка ПД2 5 (див. рис. 4.1) з електроприводом потужністю 7,5 кВт, працює при змінній частоті обертання і керується частотним перетворювачем.

За допомогою одночасного застосування обох повітроредувок реалізовано наступні режими роботи джерела витрати, перелік яких представлено у таблиці 4.2, які забезпечують різну витрату вимірювального середовища через експериментальну установку.

Таблиця 4.2

Режими роботи джерела витрати

Номер режиму	Характеристика режиму роботи джерела витрати
1	ПД1
2	ПД1 + ПД2 (частота живлення двигуна 30 Гц)
3	ПД1 + ПД2 (частота живлення двигуна 40 Гц)
4	ПД1 + ПД2 (частота живлення двигуна 50 Гц)
5	ПД1 + ПД2 (частота живлення двигуна 60 Гц)
6	ПД1 + ПД2 (частота живлення двигуна 70 Гц)

Розрахунок витрати газоподібного середовища виконується у реальному часі на основі вимірюваних значень перепаду тиску, абсолютного тиску, та температури за алгоритмом, що відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [7].

Програма розрахунку витрати реалізована на персональному комп'ютері (ПК), яка за допомогою HART-модема здійснює опитування вимірювальних перетворювачів ППТ, ПТ та температури. Відповідність алгоритму розрахунку витрати вимогам [7] перевірено шляхом порівняння результатів розрахунку витрати на експериментальній установці, з результатами розрахунку витрати за допомогою САПР "Расход-РУ" (версія 3.0) для тестових комбінацій вхідних даних.

За результатами вимірювань, можна отримати архіви миттєвих значень перепаду тиску, абсолютного тиску, температури, витрати повітря за стандартних умов для еталонного та робочого ВЗПТ. Для зчитування архівів з ПК, що реалізує обчислення витрати, використано програмне забезпечення OVKScan.

Загальний вигляд експериментальної витратовимірювальної установки наведено на рис. 4.3.



a)



б)

*Рис.4.3. Загальний вигляд експериментальної витратовимірювальної установки:
а) робоче місце оператора; б) вид на робочий та еталонний ВЗПТ*

4.2. Експериментальні дослідження впливу виступів у вимірювальному трубопроводі на вимірюване значення витрати та коефіцієнт витікання звужувального пристрою

Для дослідження впливу виступу у внутрішню порожнину ВТ робочого ВЗПТ, між його секціями на відстані $2D$, $5D$ та $10D$ до ЗП встановлюються кільця імітатори товщиною 8 мм, що імітують виступ висотою $0,025D$, $0,05D$, $0,1D$. Загальний вигляд кілець-імітаторів наведено на рисунку 4.4.

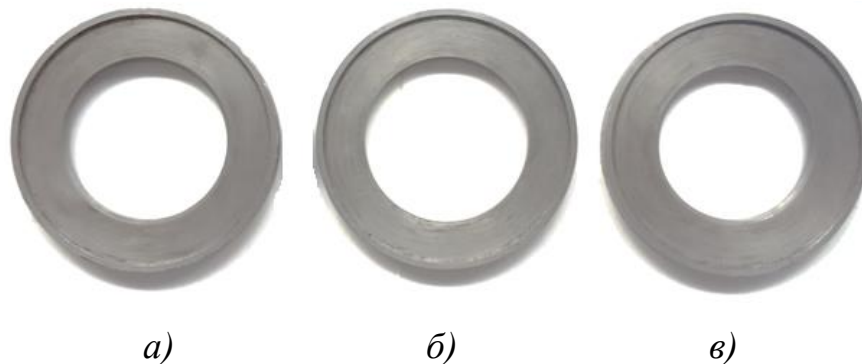


Рис.4.4. Загальний вигляд кілець-імітаторів виступу у внутрішню порожнину трубопроводу, висотою:

а) $h=0,025D$, б) $h=0,05D$, в) $h=0,1D$.

Експериментальні дослідження проведено у відповідності до розробленої методики:

1) у еталонному та робочому ВЗПТ по чергово встановлюються діафрагми, які однакові за значеннями відносного діаметра β (в межах допуску на виготовлення), перелік яких наведено в табл. 4.1. Після чого проводиться перевірка на герметичність установки;

2) після запуску установки і виходу на номінальне значення, виконується цикл вимірювання для $5 \div 7$ значень витрат із діапазону вимірювання, який реалізує експериментальна установка, при роботі в кожному з режимів роботи джерела витрати, які наведені в табл. 4.2. При цьому до складу робочого ВЗПТ не вводиться елементи, геометричні розміри яких виходять за допустимі межі згідно [3, 4, 7]. На основі проведених вимірювань формуються архіви експериментальних даних, які відповідають фіксованим значенням витрати;

3) в ВТ робочого ВЗПТ по чергово встановлюються кільця-імітатори, які створюють виступи у внутрішню порожнину ВТ висотою $0,025D$, $0,05D$, $0,1D$ на відстані $2D$, $5D$, $10D$ до ЗП, по руху потоку середовища. Після встановлення кілець проводиться перевірка установки на герметичність;

4) після запуску установки і виходу на номінальне значення, виконується цикл вимірювання для $5 \div 7$ значень витрат із діапазону вимірювання, який реалізує експериментальна установка, при роботі в кожному з режимів роботи джерела, які наведені в табл.4.2. При цьому отримують результати вимірювання витрати робочим ВЗПТ із врахуванням впливу газодинамічних явищ, спричинених наявністю виступу у внутрішню порожнину ВТ. На основі проведених вимірювань формуються архіви експериментальних даних, які відповідають фіксованим значенням витрати;

5) пункти 3, 4 проводяться по чергово для кожного фіксованого значення відстані кільця від діафрагми ($2D$, $5D$, $10D$) та значення висоти виступу ($0,025D$, $0,05D$, $0,1D$);

б) пункти 1 – 5 проводяться по чергово для кожного фіксованого значення відносного діаметра отвору діафрагми ($\beta = 0,2; 0,4; 0,5; 0,67$);

7) на основі опрацювання архівів даних експериментальних досліджень, визначаються значення відхилень витрати та коефіцієнта витікання, які зумовлені впливом виступів у внутрішню порожнину ВТ.

Для опрацювання результатів експериментальних досліджень, розроблено наступний алгоритм:

1) з архіву миттєвих значень параметрів потоку виділяються масиви експериментальних даних, які відповідають інтервалам фіксованого значення витрати;

2) на основі отриманих масивів даних в п.1, обчислюється середнє значення витрати в часі для еталонного \bar{q}_{vE} та робочого \bar{q}_{vPOB} ВЗПТ, а також визначається відносне відхилення між середнім значенням виміряної витрати еталонного та робочого витратоміра, згідно формули:

$$\delta q_v = \frac{\overline{q_{v_{POB}}} - \overline{q_{v_E}}}{\overline{q_{v_E}}} \cdot 100\% ; \quad (4.1)$$

3) для дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на вимірне значення витрати із відносних значень відхилень δq_v , які отримані під час експериментальних досліджень із встановленим кільцем-імітатором, вилучаємо (віднімаємо) значення δq_{v_0} , які отримані під час експерименту без встановленого кільця-імітатора, та формуємо масив значень відносних відхилень δq_{v_B} , який відповідатиме впливу виступу у внутрішню порожнину ВТ на значення вимірювання витрати, для кожного з режимів роботи джерела витрати, згідно формули:

$$\delta q_{v_B} = \delta q_v - \delta q_{v_0} ; \quad (4.2)$$

4) для дослідження впливу виступів в внутрішню порожнину ВТ на коефіцієнт витікання стандартної діафрагми, на основі даних отриманих в п.1, обчислюється значення відносного відхилення коефіцієнта витікання δc , для миттєвих значень згідно формули:

$$\delta_c = \frac{C - C_0}{C_0} \cdot 100\% = \left(\frac{C}{C_0} - 1 \right) \cdot 100\% , \quad (4.3)$$

де C – значення коефіцієнту витікання стандартної діафрагми обчисленого для значень параметрів потоку у ВТ робочого ВЗПТ;

C_0 – значення коефіцієнту витікання стандартної діафрагми обчисленого для значень параметрів потоку у ВТ еталонного ВЗПТ.

Виходячи із рівняння витрати зведеної до стандартних умов (рівняння (5.8) стандарту [7]), отримано вираз, для обчислення коефіцієнта витікання за результатами експериментальних досліджень:

$$C = \frac{q_{vc} \cdot \sqrt{\rho_c \cdot p_c \cdot T \cdot K}}{0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot E \cdot K_u \cdot K_n \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot p \cdot T_c}} , \quad (4.4)$$

де q_{vc} – об'ємна витрата газоподібного середовища, зведена до стандартних умов;

d – діаметр отвору діафрагми;

ε – коефіцієнт розширення потоку (2.25);

E – коефіцієнт швидкості входу (2.14);

K – коефіцієнт стисливості газу;

K_{Π} – поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта ЗП;

$K_{\text{ш}}$ – поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні ВТ;

Δp – перепад тиску на ЗП;

p – тиск вимірювального середовища;

T – абсолютна (термодинамічна) температура середовища;

p_c, T_c – відповідно тиск та температура стандартних умов;

ρ_c – густина вимірювального середовища при стандартних умовах.

У рівнянні (4.4) при розрахунку коефіцієнта витікання стандартної діафрагми робочого ВЗПТ слід використовувати значення витрати, яке виміряне еталонним ВЗПТ, тому підставивши рівняння (4.4) виражені для еталонного та робочого ВЗПТ, в формулу (4.3) отримаємо спрощену формулу для визначення відносного відхилення коефіцієнта витікання δ_c :

$$\delta_c = \left[\frac{\sqrt{T \cdot K} \cdot (d_0^2 \cdot E_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\Delta p_0 \cdot p_0})}{\sqrt{T_0 \cdot K_0} \cdot (d^2 \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\Delta p \cdot p})} - 1 \right] \cdot 100\% . \quad (4.5)$$

У формулі (4.5) індексом "0" позначено характеристики та параметри, що відносяться до еталонного ВЗПТ.

На основі значень розрахованих за формулою (4.5) формуються масиви даних миттєвих значень відносного відхилення коефіцієнта витікання δ_c . Для кількісної оцінки впливу виступів в внутрішню порожнину ВТ на коефіцієнт витікання стандартної діафрагми, із значень відносного відхилення коефіцієнта витікання δ_c , які отримані під час експериментальних досліджень із встановленим кільцем-імітатором, вилучаємо (віднімаємо) значення, які отримані під час експерименту без встановленого кільця-імітатора, та формуємо масив значень $\delta_{c\epsilon}$, що відповідають впливу виступу у внутрішні порожнини трубопроводу на

значення коефіцієнта витікання, з подальшим їх усередненням $\bar{\delta}_{C_6}$, для кожного інтервалів вимірювання, протягом якого витрата була незмінною.

Нижче представлено результати досліджень впливу виступу в внутрішню порожнину ВТ на значення витрати та коефіцієнта витікання для діафрагми з відносним діаметром $\beta=0,67$.

В результаті проведення ряду експериментальних вимірювань, згідно п.2-5 вищезгаданої методики, отримано масиви даних зміни витрати газоподібного середовища в часі при різних значеннях висоти виступу у внутрішню порожнину ВТ, а також і без такого виступу. Для прикладу наведено графік масиву значень витрати в часі, при різних режимах роботи установки (згідно табл.4.2), отриманий при встановленому кільці-імітаторі, який імітує виступ висотою $0,1D$ на відстані від ЗП $10D$ (рис.4.5).

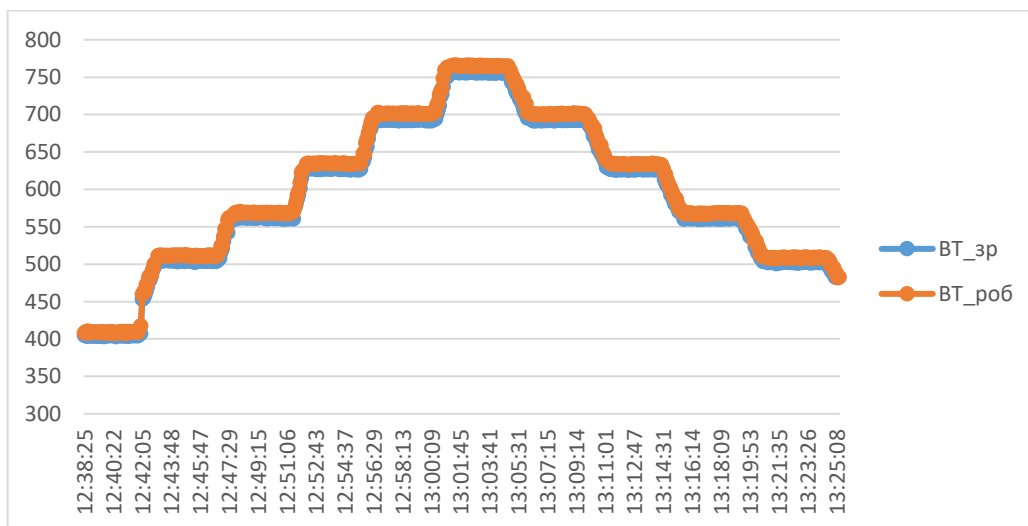


Рис.4.5. Графік зміни витрати в часі при різних режимах роботи джерела витрати з встановленим в ВТ кільцем, яке імітує висоту виступу $0,1D$, на відстані $10D$ від ЗП.

Згідно п.1 алгоритму опрацювання експериментальних даних, по кожному з режимів роботи виділено масиви експериментальних даних, які відповідають інтервалам фіксованого значення витрати середовища (рис. 4.6) та проведено усереднення значення витрат в часі робочого та еталонного ВЗПТ. На основі отриманих усереднених значень, згідно формули (4.1) проведено розрахунок

відносного відхилення середнього значення витрати еталонного та робочого ВЗПТ (див. табл. 4.3).

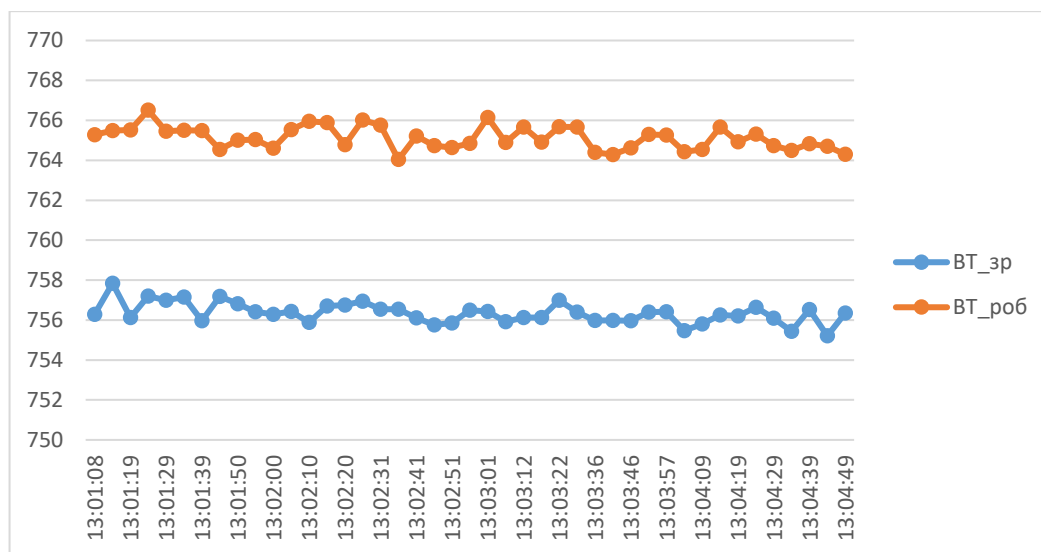


Рис.4.6. Графік зміни витрати в часі при режимі роботи джерела витрати №6 з встановленим в ВТ кільцем, яке імітує висоту виступу 0,1D, на відстані 10D перед ЗП.

Таблиця 4.3

Порівняння результатів вимірювання витрати еталонним та робочим витратоміром із встановленим в ВТ кільцем, яке імітує висоту виступу 0,1D на відстані 10D перед ЗП

№	Назва показника	Позначення, одиниця вимірювання	Значення для режиму роботи джерела витрати					
			1	2	3	4	5	6
1	Середнє значення витрати еталонного витратоміра	\bar{q}_{vE} , м ³ /год (за с.у.)	404,53	504,65	561,87	627,46	692,94	756,27
2	Середнє значення витрати робочого витратоміра	$\bar{q}_{vРОБ}$, м ³ /год (за с.у.)	409,17	511,46	568,51	634,68	701,43	765,11
3	Відносне відхилення середніх значень витрати робочого та еталонного витратомірів	δq_v , %	1,147	1,35	1,182	1,151	1,226	1,17

Для дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на вимірне значення витрати, згідно п.3 алгоритму опрацювання результатів вимірювання, для кожного з режимів роботи джерела витрати, розраховано масив значень відносних відхилень δq_{v_B} , який відповідатиме впливу виступу у внутрішню порожнину ВТ на значення вимірювання витрати (табл. 4.4).

На основі отриманих значень δq_{v_B} , побудовано графік залежності відносного відхилення витрати від числа Рейнольдса, для кожного з значень висоти виступу в внутрішню порожнину ВТ, а також відстані від виступу до ЗП (рис. 4.7).

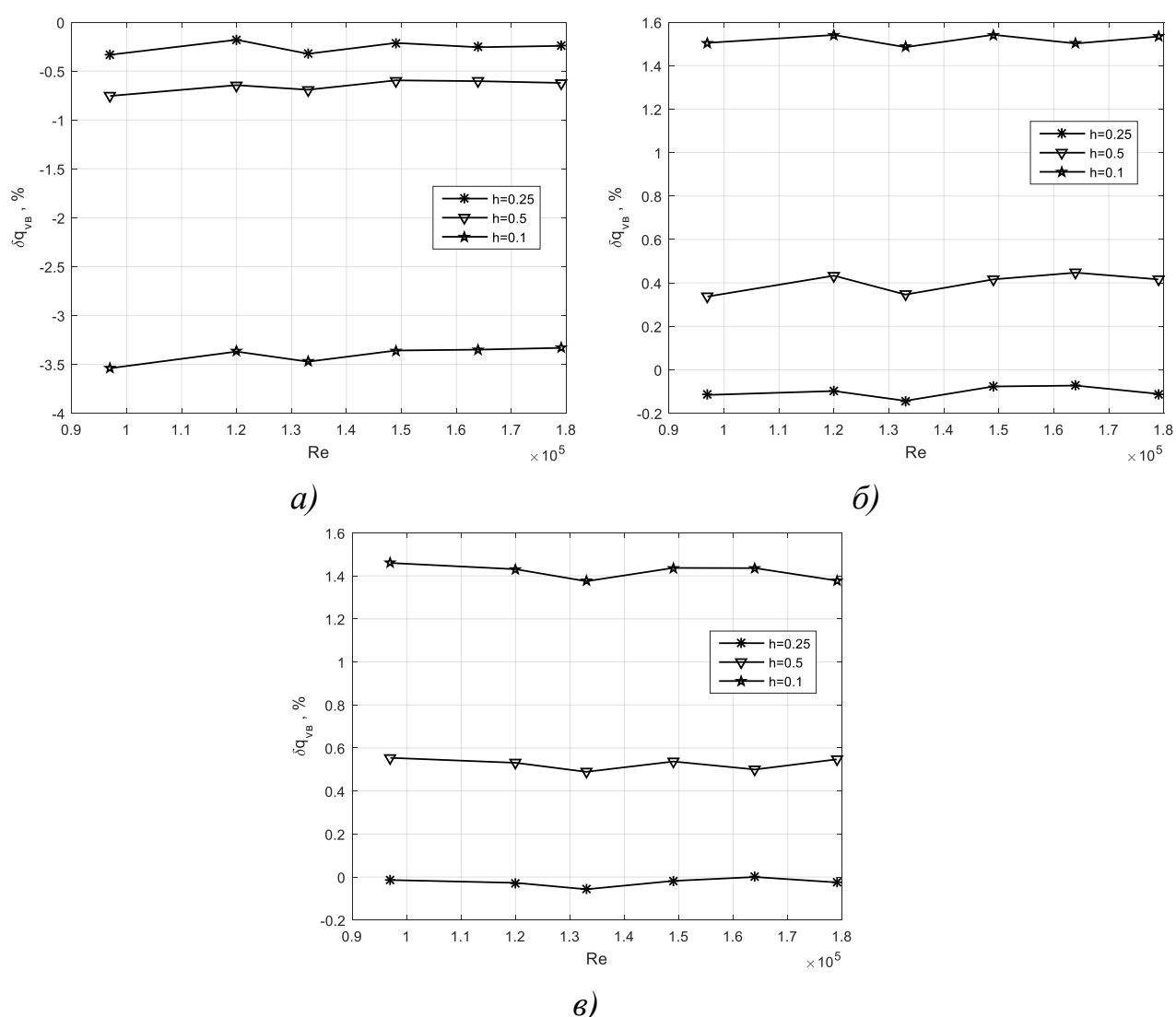


Рис.4.7. Графіки залежності відносного відхилення витрати δq_{v_B} від числа Рейнольдса Re для довжини прямолинійної ділянки ВТ між торцем камери "+" та кільцем-імітатором виступу:

а) $L = 2D$, б) $L = 5D$, в) $L = 10D$

Як видно з рис. 4.7, залежність значень відносного відхилення δq_{v_B} від числа Рейнольдса Re є близькою до лінійної, для досліджуваних значень висоти виступу h , довжини прямолінійної ділянки ВТ між торцем камери "+" та кільцем-імітатором виступу L . Зміна значення δq_{v_B} в залежності від зміни числа Re є незначною, тому вплив висоти виступу для кожного фіксованого значення h та L може бути відтворена усередненим значенням відхилення $\bar{\delta q}_{v_B}$ по числу Re . Значення усередненого відхилення $\bar{\delta q}_{v_B}$ по числу Re наведено в табл. 4.3.

Як видно з таблиці 4.3, внаслідок впливу виступів на вимірювальне значення витрати, при використанні стандартної діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta=0,67$, відносне відхилення може бути, як в додатню, так і в від'ємну сторону в залежності від відстань до торця камери "+" так і висоти виступу, тим самим зменшуючи, або збільшуючи вимірювальне значення витрати.

Як вже було сказано, внаслідок впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ, відбувається зміна значення вимірювання витрати газоподібних середовищ, а отже і відбувається зміна коефіцієнта витікання ЗП.

Для дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на зміну коефіцієнта витікання стандартної діафрагми, згідно п.4 алгоритму опрацювання результатів досліджень, визначено значення миттєвих відхилень коефіцієнта витікання стандартної діафрагми δ_C за формулою (4.4), а також проведено усереднення цих значень відносно часу для кожного з режимів роботи джерела витрати, висоти виступу та відстані до торця камери "+" ВЗТП (табл. 4.4.).

На основі отриманих усереднених значень δ_C згідно формули (4.5) п.4 алгоритму опрацювання результатів досліджень, визначено відносні відхилення δ_{C_e} , які враховують вплив виступу на значення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми (табл.4.5), та побудовано графіки залежності δ_{C_e} від числа Re (рис.4.8).

Таблиця 4.3

Відносні відхилення витрати δq_{v_B} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,67$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δq_{v_B} (%) для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення, $\bar{\delta q}_{v_B}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,97	1,20	1,33	1,49	1,64	1,79	
2	L = 2D	h = 0,025D	-0,333	-0,18	-0,323	-0,212	-0,256	-0,242	-0,258
3		h = 0,05D	-0,754	-0,644	-0,691	-0,595	-0,603	-0,621	-0,651
4		h = 0,1D	-3,54	-3,37	-3,473	-3,359	-3,35	-3,332	-3,404
5	L = 5D	h = 0,025D	-0,116	-0,098	-0,143	-0,077	-0,073	-0,111	-0,103
6		h = 0,05D	0,337	0,433	0,346	0,416	0,447	0,416	0,399
7		h = 0,1D	1,505	1,541	1,485	1,542	1,502	1,534	1,518
8	L = 10D	h = 0,025D	-0,014	-0,027	-0,057	-0,018	0	-0,025	-0,024
9		h = 0,05D	0,554	0,531	0,489	0,537	0,5	0,547	0,526
10		h = 0,1D	1,46	1,431	1,375	1,437	1,436	1,378	1,420

Таблиця 4.4

Відносне відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми δ_c робочого та еталонного ВЗПТ, для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,67$

№	Вістань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δ_c для режиму роботи джерела витрати					
			1	3	4	5	6	7
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,97	1,20	1,33	1,49	1,64	1,79
1	Без встановлення кілець-імітаторів (без виступів)		0,291	0,075	0,182	0,278	0,194	0,207
2	L = 2D	h = 0,025D	0,676	0,246	0,539	0,492	0,473	0,457
3		h = 0,05D	1,084	0,722	0,889	0,885	0,813	0,836
4		h = 0,1D	4,022	3,587	3,839	3,806	3,712	3,691
5	L = 5D	h = 0,025D	0,455	0,187	0,321	0,372	0,271	0,292
6		h = 0,05D	-0,034	-0,363	-0,160	-0,146	-0,243	-0,218
7		h = 0,1D	-1,221	-1,459	-1,303	-1,256	-1,299	-1,310
8	L = 10D	h = 0,025D	0,316	0,085	0,253	0,322	0,210	0,234
9		h = 0,05D	-0,222	-0,463	-0,315	-0,245	-0,328	-0,342
10		h = 0,1D	-1,163	-1,313	-1,183	-1,147	-1,221	-1,160

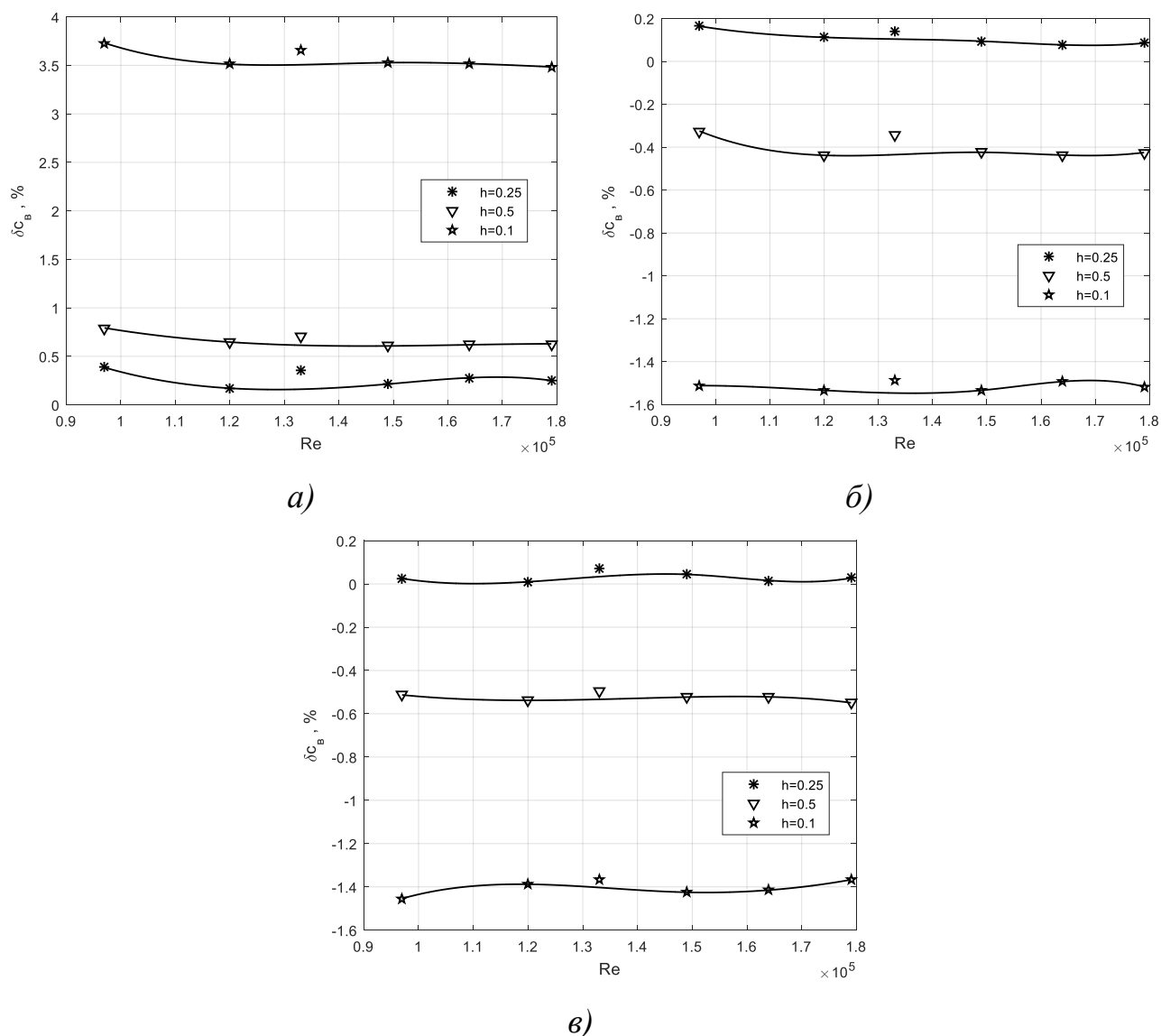


Рис.4.8. Графіки залежності відносного відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми δ_{C_B} від числа Рейнольдса Re для довжини прямолінійної

ділянки ВТ між торцем камери "+" та кільцем-імітатором виступу:

а) $L = 2D$, б) $L = 5D$, в) $L = 10D$

Як видно з табл. 4.5 та рис. 4.8 значення відносного відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми δ_{C_B} є близькими за модулем та протилежними за знаком до відхилень витрати δq_{v_B} , що відповідає фізичному змісту процесів, які відбуваються у витратомірах. Залежність δ_{C_B} від числа Рейнольдса Re є близькою до лінійної для досліджуваних значень висоти виступу h , довжини ділянки L та відповідного значення відносного діаметра отвору діафрагми ($\beta = 0,67$).

Таблиця 4.5

Відносні відхилення коефіцієнта витікання δ_{C_B} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,67$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δ_{C_B} , % для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення $\bar{\delta}_{C_B}$, %
			1	3	4	5	6	7	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,97	1,20	1,33	1,49	1,64	1,79	
2	L = 2D	h = 0,025D	0,385	0,171	0,357	0,214	0,279	0,25	0,276
3		h = 0,05D	0,793	0,647	0,707	0,607	0,619	0,629	0,667
4		h = 0,1D	3,731	3,512	3,657	3,528	3,518	3,484	3,572
5	L = 5D	h = 0,025D	0,164	0,112	0,139	0,094	0,077	0,085	0,112
6		h = 0,05D	-0,325	-0,438	-0,342	-0,424	-0,437	-0,425	-0,398
7		h = 0,1D	-1,512	-1,534	-1,485	-1,534	-1,493	-1,517	-1,513
8	L = 10D	h = 0,025D	0,025	0,01	0,071	0,044	0,016	0,027	0,032
9		h = 0,05D	-0,513	-0,538	-0,497	-0,523	-0,522	-0,549	-0,524
10		h = 0,1D	-1,454	-1,388	-1,365	-1,425	-1,415	-1,367	-1,402

Зміна значення δ_{C_B} в залежності від зміни числа Re є незначною, тому вплив висоти виступу для кожного фіксованого значення h та L може бути відтворена усередненим значенням відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми $\bar{\delta}_{C_B}$ по числу Re (табл. 4.5).

Аналогічні дослідження були проведені і для стандартних діафрагм з відносним діаметром отвору $\beta=0,2; 0,4; 0,5$ згідно п.1 методики виконання експериментальних досліджень. Результати наведені в додатку Г.

На основі отриманих експериментальних результатів усереднення значень відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми $\bar{\delta}_{C_B}$ по числу Re для стандартних діафрагм з відносним діаметром отвору $\beta=0,2; 0,4; 0,5$ та $0,67$, сформовано таблицю значень усереднених відхилень коефіцієнта витікання стандартної діафрагми $\bar{\delta}_{C_B}$ (табл.4.6).

Таблиця 4.6

**Усереднене значення відхилення коефіцієнта витікання $\bar{\delta}_{C_B}$
для досліджуваних значень відносного діаметра стандартної діафрагми β**

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Усереднене значення відхилення $\bar{\delta}_{C_B}$ (%) для відносного діаметра отвору діафрагми β			
			0,2	0,4	0,5	0,67
1	L = 2D	h = 0,025D	0,008	0,063	0,144	0,276
2		h = 0,05D	0,050	0,253	0,431	0,667
3		h = 0,1D	0,108	1,031	1,848	3,572
4	L = 5D	h = 0,025D	-0,004	0,028	0,021	0,112
5		h = 0,05D	-0,014	-0,023	-0,134	-0,398
6		h = 0,1D	-0,002	-0,218	-0,527	-1,513
7	L = 10D	h = 0,025D	-	-0,039	0,002	0,032
8		h = 0,05D	-	-0,094	-0,195	-0,524
9		h = 0,1D	-0,005	-0,331	-0,627	-1,402

Для оцінювання додаткової невизначеності коефіцієнта витікання $\bar{\delta}_{C_B}$, зумовленої впливом виступів у внутрішній порожнині ВТ, на підставі результатів наведених в табл.4.6 отримано формули, для оцінювання абсолютної величини відхилення $\bar{\delta}_{C_B}$, які мають вигляд:

- для довжини ділянки $L=2D$

$$\bar{\delta}_{C_6} = (-51,2 + 34,2 \cdot e^{3,14 \cdot \beta}) \cdot (h/D)^{1,8}, \quad (4.6)$$

- для довжини ділянки $L=5D$

$$\bar{\delta}_{C_6} = (-4,8 + 1,88 \cdot e^{5,94 \cdot \beta}) \cdot (h/D)^{1,8}, \quad (4.7)$$

- для довжини ділянки $L=10D$

$$\bar{\delta}_{C_6} = (-5,9 + 3,24 \cdot e^{4,1 \cdot \beta}) \cdot (h/D)^{1,5}, \quad (4.8)$$

де h/D – відносна висота виступу у внутрішній порожнині трубопроводу.

Для перевірки даних формул (4.6) - (4.8), побудовано графіки залежності усередненого відносного відхилення коефіцієнта витікання $\bar{\delta}_{C_6}$ від відносного діаметра отвору стандартної діафрагми β для довжини прямолінійної ділянки ВТ між торцем камери "+" та кільцем-імітатором виступу $L=2D$; $5D$ та $10D$, які представлені на рис.4.9.

Як видно з рис.4.9, рівняння (4.6) - (4.8) описують зміну відносного відхилення коефіцієнта витікання $\bar{\delta}_{C_6}$ від відносного діаметра отвору стандартної діафрагми β і можуть бути застосовані для визначення додаткової відносної розширеної невизначеності, яка виникає внаслідок впливу виступу у внутрішню порожнину ВТ.

Враховуючи, що відносну розширену невизначеність вимірювання (обчислення) величини u за 95 % довірчого рівня обчислюють за формулою

$$U'_y = 2u'_y = abs(\delta_y) \quad (4.9)$$

отримано формулу для обчислення додаткової відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання, яка виникає внаслідок наявності виступу в внутрішню порожнину ВТ перед діафрагмою:

$$U'_{h_B} = abs(\bar{\delta}_{C_6}) \quad (4.10)$$

Застосовуючи залежності (4.6) - (4.8) та (4.10), обчислено значення невизначеності U'_{h_B} для ряду значень відносного діаметра отвору діафрагми та відносної висоти виступу. Результати обчислень представлено у таблиці 4.7. Для розрахункових значень, для яких $U'_{h_B} < 0.03\%$ прийнято $U'_{h_B} = 0$.

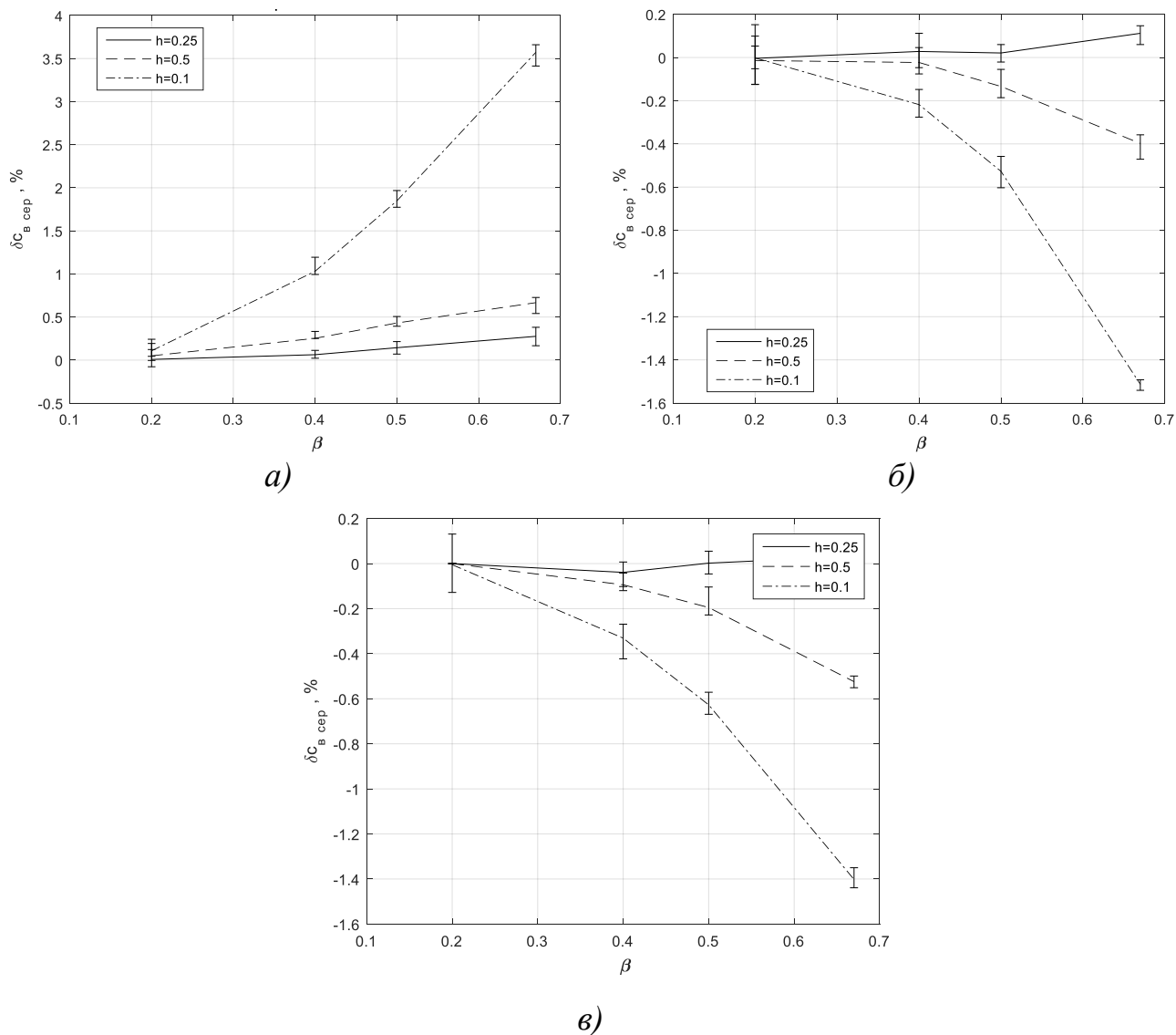


Рис. 4.9. Залежність усередненого відносного відхилення коефіцієнта витікання $\bar{\delta}_{C_v}$ від відносного діаметра отвору стандартної діафрагми β для довжини прямолінійної ділянки ВТ між торцем камери "+" та кільцем-імітатором виступу:

а) $L = 2D$, б) $L = 5D$, в) $L = 10D$

Для проміжних значень довжини L ділянки ВТ між виступом та переднім торцем діафрагми (або камери усереднення тиску), не наведених у таблиці 4.7, складник невизначеності U'_{h_B} пропонується визначати таким чином:

- для довжини ділянки $2D < L < 5D$ складник невизначеності U'_{h_B} визначають лінійною інтерполяцією значень U'_{h_B} з рядків " $L = 2D$ ", " $L = 5D$ " для

відповідного значення відносної висоти виступу h/D та значення відносного діаметра отвору стандартної діафрагми β ;

- для довжини ділянки $5D < L \leq 10D$ значення складника невизначеності U'_{h_B} приймають рівним значенню з рядка " $L = 5D$ " для відповідного значення відносної висоти виступу h/D та значення відносного діаметра отвору СД β .

Для проміжних значень відносного діаметра СД β , не наведених у таблиці 4.7, значення складника невизначеності U'_{h_B} визначають лінійною інтерполяцією даних цієї таблиці.

Таблиця 4.7

Значення додаткового складника невизначеності U'_{h_B} коефіцієнта витікання стандартної діафрагми з кутовим способом відбору тиску

Відносна висота виступу h/D	Довжина ділянки ВТ між стандартною діафрагмою та виступом L	Додатковий складник невизначеності U'_{h_B} коефіцієнта витікання СД для β					
		$\leq 0,3$	0,4	0,5	0,6	0,67	0,75
0,01	$l_B = 2D$	0	0	0,03	0,04	0,06	0,08
	$l_B = 5D$	0	0	0	0	0,03	0,04
0,02	$l_B = 2D$	0,03	0,06	0,10	0,15	0,20	0,27
	$l_B = 5D$	0	0	0,03	0,06	0,09	0,14
0,03	$l_B = 2D$	0,07	0,13	0,21	0,32	0,42	0,56
	$l_B = 5D$	0	0,03	0,06	0,12	0,18	0,30
0,04	$l_B = 2D$	0,11	0,21	0,34	0,53	0,70	0,94
	$l_B = 5D$	0	0,05	0,11	0,20	0,31	0,50
0,05	$l_B = 2D$	0,17	0,31	0,52	0,79	1,04	1,41
	$l_B = 5D$	0,04	0,08	0,16	0,30	0,46	0,75
0,06	$l_B = 2D$	0,23	0,44	0,72	1,10	1,45	1,95
	$l_B = 5D$	0,05	0,11	0,22	0,41	0,64	1,04
0,07	$l_B = 2D$	0,30	0,57	0,94	1,45	1,91	2,58
	$l_B = 5D$	0,07	0,15	0,29	0,55	0,84	1,37
0,08	$l_B = 2D$	0,39	0,73	1,20	1,84	2,43	3,28
	$l_B = 5D$	0,09	0,19	0,37	0,69	1,07	1,74
0,09	$l_B = 2D$	0,48	0,90	1,48	2,28	3,00	4,05
	$l_B = 5D$	0,11	0,23	0,45	0,86	1,32	2,16
0,10	$l_B = 2D$	0,58	1,09	1,79	2,75	3,63	4,90
	$l_B = 5D$	0,13	0,28	0,55	1,04	1,60	2,61

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Для виконання експериментальних досліджень впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на точність вимірювання витрати, розроблено експериментальну витратовимірювальну установку на основі методу змінного перепаду тиску, аксонометрична схема та загальний вигляд якої представлено на рис.4.1, та 4.3.

2. Розроблено методику виконання експериментальних досліджень, а також алгоритм опрацювання отриманих масивів даних;

3. На основі експериментальних даних проведено дослідження впливу виступів у внутрішній порожнині ВТ, на вимірюване значення витрати, а також на коефіцієнт витікання стандартної діафрагми. За результатами досліджень встановлено, що наявність виступів в внутрішній порожнині ВТ має значний вплив на точність вимірювання витрати, а відповідно і на значення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми.

4. Для кількісної оцінки впливу виступів в внутрішній порожнині ВТ на точність вимірювання витрати розроблено аналітичні залежності (4.6)-(4.8) та (4.10), як дозволяють провести оцінку додаткової невизначеності коефіцієнта витікання від геометричних характеристик ВТ, ЗП та висоти виступу у внутрішню порожнину ВТ.

5. На основі експериментальних досліджень сформовано рекомендації для визначення та усунення даної невизначеності при різних значеннях геометричних характеристик ВТ.

Результати досліджень представлених в даному розділі опубліковано в наукових працях [19, 69].

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ МЕТОДОМ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ СТРУКТУРИ

За результатами виконаних досліджень встановлено, при вимірюванні витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску в умовах змінної газодинамічної структури на результати вимірювання впливають невизначеності, які виникають внаслідок впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу (ВТ) U'_{h_B} , а також наявності нестационарного потоку U'_D .

Для врахування цих невизначеностей під час вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску в умовах змінної газодинамічної структури, рекомендуємо виконати такі заходи.

1. Ввести до рівняння відносної стандартної невизначеності коефіцієнта витікання (10.17) ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7], додаткову складову невизначеності U'_{h_B} , яка враховуватиме вплив виступів у внутрішній порожні ВТ

$$u'_C = 0,5 \cdot (U'_{C_0} + U'_L + U'_{l_t} + U'_{e_x} + U'_h + U'_{h_B}), \quad (5.1)$$

де U'_{C_0} – початкова невизначеність коефіцієнта витікання стандартної діафрагми, яка обчислюється згідно п.5.3.3.1 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:20009 [4];

U'_L – складник невизначеності, який виникає внаслідок зменшення довжин прямолінійних ділянок, який визначають згідно ДСТУ ГОСТ 8.586.2:20009 (розділ 6) [4];

U'_{l_t} – складник невизначеності, зумовлений скороченням довжини прямолінійних ділянок між ЗП і гільзою термометра, який визначають обчислюється згідно п. 6.3.5 ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7];

U'_{e_x} – невизначеність, яка враховує зміщення центру стандартної діафрагми, яка обчислюється згідно п.6.5.3 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:20009 [4];

U'_h – невизначеність, яку визначають згідно п.6.4.4 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:20009 [4].

2. У рівняння (10.35) та (10.36) ввести невизначеність $u'_D = 0,5 \cdot U'_D$, яка враховуватиме додаткові складові невизначеностей, що виникають в результаті наявності нестационарного потоку газоподібного середовища. Відповідно ці рівняння будуть записані наступним чином:

$$u'_{q'} = \left\{ u_{K_q}^{\prime 2} + u_C^{\prime 2} + u_{K_m}^{\prime 2} + u_{K_n}^{\prime 2} + u_D^{\prime 2} + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 u_D^{\prime 2} + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 u_d^{\prime 2} + u_\varepsilon^{\prime 2} + 0,25 \left(u_{\Delta p}^{\prime 2} + u_p^{\prime 2} + u_T^{\prime 2} + u_{p_c}^{\prime 2} + u_K^{\prime 2} \right) \right\}^{0,5}, \quad (5.2)$$

$$u'_{q'} = \left\{ u_{o_q}^{\prime 2} + u_C^{\prime 2} + u_{K_m}^{\prime 2} + u_{K_n}^{\prime 2} + u_D^{\prime 2} + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 u_D^{\prime 2} + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 u_d^{\prime 2} + u_\varepsilon^{\prime 2} + 0,25 \left(u_{p_c}^{\prime 2} + u_K^{\prime 2} \right) \right\}^{0,5}, \quad (5.3)$$

де $u_{K_q}^{\prime 2}$ – невизначеність, яка вноситься обчислювальним пристроєм і встановлюється за паспортними даними;

$u_{o_q}^{\prime 2}$ – невизначеність, яка вноситься вимірювальним комплексом і встановлюється за паспортними даними;

$u_C^{\prime 2}$ – невизначеність коефіцієнта витікання стандартної діафрагми і розраховується за формулою (5.1);

$u_{K_m}^{\prime 2}$ – невизначеність, яка враховує вплив шорсткості ВТ, яку визначають згідно п.5.3.3.3 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:20009 [4];

$u_{K_n}^{\prime 2}$ – невизначеність, яка враховує вплив притуплення вхідного канта стандартної діафрагми, яку визначають згідно п.5.3.3.4 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:20009 [4];

$u_\varepsilon^{\prime 2}$ – невизначеність коефіцієнта розширення потоку, яку визначають з формули (10.18) ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7];

$u_{\Delta p}^{\prime 2}$ – невизначеність вимірювання перепаду тиску на звужувальному пристрої, яку визначають з формули (10.19) або (10.20) ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7] в залежності від способу вимірювання;

u_p^2 – невизначеність вимірювання тиску, яку визначають з формули (10.21) (для вимірювальних перетворювачів абсолютного тиску) або (10.22) (для вимірювальних перетворювачів надлишкового тиску) ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7];

u_T^2 – невизначеність вимірювання температури, яку визначають з формули (10.23) ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7];

$u_{\rho_c}^2$ – невизначеність вимірювання густини газоподібного середовища, яку визначають з формули (10.24-10.26) ДСТУ ГОСТ 8.586.5:20009 [7] в залежності від способу вимірювання;

u_K^2 – невизначеність обчислення коефіцієнта стисливості середовища, залежить від невизначеностей параметрів, які є складовими, під час обчислення даного коефіцієнта.

u_D^2 , u_d^2 – невизначеності, значення яких приймаються рівними $u_D^2 = 0,1\%$, $u_d^2 = 0,02\%$.

Для усунення впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ, а відповідно і додаткової невизначеності, яка при цьому виникає, рекомендується під час виконання монтажних та складальних робіт витратомірів змінного перепаду тиску проводити контроль за якістю робіт, та унеможливити виникнення виступів у внутрішню порожнину, або за допомогою абразивних інструментів ці виступи зачищати (видаляти).

Варто зазначити, при вимірюванні витрати витратовимірювальною установкою з роздільним вимірюванням параметрів (СРП), для визначення сумарної невизначеності вимірювання слід застосовувати формулу (5.2). При застосуванні систем з автоматизованим вимірюванням параметрів (САП) (у випадку коли унормовано похибку комплексу з врахуванням похибок обчислювача і параметрів потоку середовища) – слід застосовувати формулу (5.3).

Також, згідно досліджень і аналізу літературних джерел, внаслідок наявності нестационарного потоку, в пневматичному каналі (ПНК) вимірювальних перетворювачів перепаду тиску (ППТ) та тиску (ПТ) можуть виникати явища

резонансу, які спричиняють завищення вимірюваних значень тиску, та перепаду тиску.

Беручи до уваги графіки залежності частоти резонансу від конструктивних характеристик наведених на рис. 3.7 та рис. 3.8, рекомендується для вимірювання параметрів середовища (тиску, перепаду тиску) в умовах нестационарного потоку, використовувати ПНК, в яких з'єднувальні трубки (ЗТ) є якомога більшого діаметру та меншої довжини, а також використовувати ПТ, та ППТ з малим об'ємом вимірювальної камери. Також при проектуванні ПНК вимірювання тиску (перепаду тиску) слід провести розрахунок резонансної частоти $f_{рез}$ за формулою (3.35) та порівняти отримане значення $f_{рез}$ із значеннями гармонік спектру сигналу перепаду тиску (тиску) у вимірювальному трубопроводі. Якщо значення частоти $f_{рез}$ та частот основних гармонік спектру сигналу перепаду тиску (тиску) є близькими, слід змінити конструктивні характеристики ПНК таким чином, щоб змінити частоту $f_{рез}$ та, за можливості, "вивести" її за межі спектру сигналу перепаду тиску (тиску).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

Проведено розробку рекомендацій, які необхідно враховувати під час вимірювання витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску в умовах змінної газодинамічної структури потоку, а саме:

- удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірювання витрати, а також коефіцієнта витікання для стандартної діафрагми, які дозволять кількісно оцінити невизначеність вимірювання витрати, враховуючи вплив виступів в внутрішню порожнину ВТ, а також додаткові складники невизначеності, які виникають в умовах нестационарного режиму потоку середовища;

- наведено рекомендації, які дозволяють усунути причину виникнення явища резонансу в ПНК ПТ (ППТ).

Дані рекомендації, а також залежності (5.1) - (5.3) дозволяють підвищувати точність вимірювання витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску в умовах змінної газодинамічної структури потоку, що в свою чергу розширює межі застосування даного методу вимірювання витрати.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення точності та розширення області застосування витратомірів змінного перепаду тиску шляхом виявлення, оцінювання та зменшення додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою.

На основі виконаних досліджень отримані такі результати та висновки:

1) виконано аналіз відомих результатів досліджень впливу нестационарних потоків газоподібного середовища та конструктивних характеристик ВТ на точність вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску; виділено задачі, які необхідно вирішити для підвищення точності вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою;

2) за результатами аналізу фізичної суті процесу вимірювання витрати нестационарного потоку виявлено причини виникнення та виконано класифікацію додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати нестационарного потоку, що дало можливість сформулювати підходи до оцінювання кожної з цих складових для витратомірів змінного перепаду тиску;

3) розроблено нову математичну модель пневматичного каналу (ПНК), яка дає можливість дослідити зміну тиску в камері вимірювального перетворювача тиску (ПТ) та перепаду тиску (ППТ) під час нестационарного режиму потоку газоподібного середовища;

4) розроблено експериментальну установку для дослідження динамічних характеристик вимірювальних каналів ПТ (ППТ); виконано дослідження динамічних характеристик вимірювального каналу з перетворювачем тиску типу ППС.3-РН, за результатами яких підтверджено адекватність математичної моделі вимірювального каналу і встановлено, що граничне значення похибки цієї моделі не перевищує 6,4%;

5) на основі лінеаризованої математичної моделі ПНК отримано аналітичну залежність частоти резонансу від конструктивних характеристик ПНК

та досліджено вплив резонансу, який виникає в ПНК в умовах нестационарного режиму потоку на результат вимірювання тиску (перепаду тиску на звужувальному пристрої (ЗП)) середовища, що дало можливість розробити рекомендації для уникнення резонансу в ПНК;

6) досліджено додаткові складові невизначеності вимірюваного значення витрати в умовах нестационарного потоку, удосконалено методика їх оцінювання;

7) розроблено витратовимірювальну установку для дослідження впливу конструктивних характеристик витратоміра на точність вимірювання витрати; виконано експериментальні дослідження для виявлення впливу конструктивних характеристик вимірювального трубопроводу витратоміра змінного перепаду тиску на результат вимірювання витрати;

8) на основі результатів експериментальних досліджень розроблено нові аналітичні залежності та методика для оцінювання додаткової невизначеності коефіцієнта витікання ЗП, яка зумовлена впливом виступів у внутрішню порожнину ВТ; отримані залежності дають можливість оцінити цю складову невизначеності в залежності від геометричних характеристик ВТ, ЗП, та висоти виступу;

9) удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірювального значення витрати, шляхом введення додаткових складових невизначеності, які зумовлені нестационарністю потоку газоподібного середовища та виступами у внутрішню порожнину ВТ, що дає можливість оцінити невизначеність вимірюваного значення витрати газоподібного середовища із змінною газодинамічною структурою потоку.

10) розроблено рекомендації, щодо зменшення додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати, які виникають в умовах потоків зі змінною газодинамічною структурою, що дає можливість підвищити точність вимірювання витрати таких потоків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков В., Константинов Ю., Попов В., Даденков В. Справочник по гидравлике. Киев: Вища школа, 1977. - 279 с.
2. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. Межгосударственный стандарт. – Минск.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – С. 72.
3. ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 (ИСО 5167-1:2003) Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги (ГОСТ 8.586.1-2005, IDT; ISO 5167-1:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с.– (Національний стандарт України).
4. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ИСО 5167-2:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2-2005, IDT; ISO 5167-2:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с.– (Національний стандарт України).
5. ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009 (ИСО 5167-3:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 3. Сопла та сопла Вентурі. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.3-2005, IDT; ISO 5167-3:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 68 с.– (Національний стандарт України).
6. ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009 (ИСО 5167-4:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 4. Труби Вентурі. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.4-2005, IDT; ISO 5167-4:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 53 с.– (Національний стандарт України).

7. ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань (ГОСТ 8.586.5-2005, IDT) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 196 с.– (Національний стандарт України).

8. Дробышева Н.А., Никифоров А.Н. Измерение нестационарных расходов с помощью сужающих устройств // Метролог. обесп. измер. М.: ВНИИКИ, 1984. Вып. 3. 32 с.

9. Костик І. В., Матіко Ф. Д. Дослідження динамічних характеристик пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Методи та прилади контролю якості. - 2014. - № 1. - С. 83-92.

10. І.В.Костик, Ф.Д.Матіко, В.І.Роман. Дослідження додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати нестационарного потоку // Метрологія та прилади. – 2020. - №2(82). – С.25-33

11. Костик І. Встановлення причин виникнення пульсацій потоку і їх впливу на вимірювання витрати витратомірами змінного перепаду тиску // Друга Міжнародна конференція молодих вчених Енергетика та системи керування (EPECS-2010) в межах II-го міжнародного молодіжного фестивалю науки Litteris Et Artibus: Матеріали конференції. 25-27 листопада 2010р. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – с.20- 21.

12. Костик І.В., Матіко Ф.Д. Аналіз похибки вимірювання усередненого значення витрати за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску // Перша всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, студентів та аспірантів Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології - 2011 АКІТ-2011: Матеріали конференції. 20-21 квітня 2011р. – К.: НТУУ КПІ, 2011. – С.28-29.

13. І.В. Костик, Ф.Д. Матіко Аналіз додаткових складників невизначеності вимірюваного значення витрати пульсуючого потоку // Автоматика/Automatics – 2011. XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління, 28-30 вересня 2011 року: матеріали конференції / Відп. за вип. М.Д. Кіселичник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – с. 158.

14. Костик І.В., Лесовой Л.В. Визначення додаткових невизначеностей результату вимірювання витрати середовища в умовах пульсуючого потоку // Збірник тез доповідей одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи. 24-25 квітня 2012р., м.Київ, ПБФ, НТУУ КПІ. – 2012. – С.245-246.

15. Костик І.В., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Дослідження резонансних явищ у пневматичних лініях вимірювальних перетворювачів систем обліку газу // Тези доповіді XII Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи" – Київ, 23 - 24 квітня 2013 р. - С.252.

16. Костик І.В., Матіко Ф.Д. Аналіз невизначеності вимірювання витрати нестационарного потоку витратомірами змінного перепаду тиску // Тези доповіді XIII Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи – Київ, 23 - 24 квітня 2014 р. - С.228.

17. Костик І.В., Федоришин Р.М., Матіко Ф.Д. Моделювання пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Тези доповіді XV Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи – Київ, 17 - 18 травня 2016 р. - С.203.

18. Костик І.В., Матіко Ф.Д. Дослідження впливу характеристик пневматичних ліній на вимірювальне значення тиску газового потоку // Тези доповіді XVIII Міжнародної науково-технічної конференції Приладобудування: стан і перспективи – Київ, 15 - 16 травня 2019 р. - С.178.

19. Костик І.В., Матіко Ф.Д., Роман В.І. Дослідження впливу конструктивних особливостей вимірювального трубопроводу на точність вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску // Тези доповіді XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020)» – Київ, 19 - 20 травня 2020 р. - С.104.

20. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества : справочник / П. П. Кремлевский ; [гл. ред. Е. А. Шорников]. – Изд. 5-е. – СПб. : Политехника, 2004. – 412 с. – ISBN 5-7325-0709-4.

21. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник.-Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. — 616с. ISBN 966-8347-38-2

22. Ф.Д. Матіко, Я.В. Грень, М.Б. Гутник. Аналіз похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. -2007. - № 581. - С. 94-104.

23. Ф. Матіко, Р. Федоришин, І. Костик, Я. Грень. Аналіз причин виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку // Вісник: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. - 2011. - № 677. - С. 79-86.

24. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Костик І.В. Дослідження резонансних явищ в імпульсних трубках витратомірів // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції Вимірювання витрати та кількості газу. - Івано-Франківськ. - 25 – 27 жовтня 2011 р. - С. 21.

25. Никитина Т.А., Сичети А.И. Определения среднего расхода пульсирующих потоков. // Гидромеханика. 1974. Вып. 27. С. 65-70.

26. Н.А. Николаев, А.Н. Сабирзянов, Р.А. Тырышкин, В.А. Фафурин, В.Б. Явкин. Влияние местных сопротивлений на коэффициент истечения стандартной диафрагмы // Законодательная и прикладная метрология, №2(105), 2010, С. 20-23.

27. Островский Э.С. Влияния локального ускорения на погрешность измерения пульсирующего расхода с помощью сужающих устройств. // Расчет и конструирование расходомеров. Л., 1978. С. 28-30.

28. Пистун Е. П. О погрешностях определения среднесуточного значения расхода газа, измеренного методом переменного перепада давления. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Контрольно-измерительная техника. - Львов: «Выща школа», 1985. - Вып. 37 С. 11-14. - Библиогр.: с. 14. – УДК 681.121.84.

29. Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів: ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. –576 с.

30. Пістун Є. П. Облік та економія природного газу // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 2. – С. 43–47.

31. Пістун Є.П., Костик І.В. Аналіз впливу параметрів пульсуючого потоку на точність витратомірів змінного перепаду тиску // Вимірювання витрати та кількості газу: Шоста всеукраїнська науково-технічна конференція, 20-21 жовтня 2009 р., Івано-Франківськ : збірник тез доповідей. - Івано-Франківськ, 2009. - С.56-57.

32. Ю.В. Пономарев, Ю.В. Назаренко, В.П. Борисенко. Неопределенность измерения основных параметров нестационарного газового потока в измерительном трубопроводе газоизмерительной станции // Системы обработки информации, 2009, выпуск 5 (79). 75-77 с.

33. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Издательство стандартов, 1982.

34. Ю.И. Ситницкий Измерение пульсирующих расходов газа. Автореферат. – Львов: «Типография Львовского политехнического института», 1951. – 22 с.

35. Р.А. Тырышкин, А.Н. Сабирзяпов, В.А. Фафурин, В.В. Фефелов, В.Б. Явкин. Применение RANS моделей турбулентности для расчета коэффициента расхода в расходомере со стандартной диафрагмой // Вестник удмуртского университета, 2010, Выпуск 2, С. 109-116.

36. В.А. Фафурин, В.В. Фефелов, И.А. Яценко. Анализ параметров численных методов при расчете метрологических характеристик расходомеров на базе стандартной диафрагмы // Вестник Казанского технологического университета, Выпуск 23, 2011, С. 136-141.

37. Федоришин Р. М., Грень Я.В., Матіко Ф. Д. Моделювання динамічних характеристик пневматичних ліній витратомірів змінного перепаду тиску // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. -2009. - № 645. - С. 29-33.

38. Akshay Dandwate, Sagar Mittal, Oshin Umale, Pallavi Shelar, Rahul Bajaj. Effect of orifice plate shape on performance characteristics // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Vol.13, Issue 4. Ver.7, 2016, pp. 50-55.

39. Behrouz Ebrahimi, Guoliang He, Yingjie Tang, Matthew Franchek, Dong Liu, Jay Pickett, Frank Springett, Dan Franklin. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section // *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.114, 2017, pp.229-240.
40. K.K. Botros, W.W. Jungowski, G.Petela. Gauge line effects and DP transmitter response to flow pulsation through orifice plate // *Flow Measurement and Instrumentation*, 3 (3), 1992, pp. 130-144.
41. Brennan, J.A., Mcfaddin, S.E., Sindt, C.F. and Wilson, R.R. Effect of pipe roughness on orifice flow measurement. National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, 1989 (NIST Technical Note 1329).
42. Chakraborty G. Effect of various parameters on natural gas measurement and its impact on UFG, World gas conference, Kuala Lumpur, 2012. – 12 pages.
43. Clark, W.J. and Stephens, R.C. Flow measurement by square edged orifice plates: pipe roughness effects. *Proc. Inst. Mech. Eng.*1957, 171(33), pp. 895-904.
44. C.Clark. The measurement of dynamic differential pressure with reference to the determination of pulsating flows using DP devices // *Flow Measurement and Instrumentation*, 3 (3), 1992, pp. 145-150.
45. Denghui He, Bofeng Bai. Numerical investigation of wet gas flow in Venturi meter // *Flow Measurement and Instrumentation*, 28, 2012, 6 p.
46. Deutsche Normen DIN 1952. Durchflus - smessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen // VDI. – Durchflussmessregeln. – August 1971.
47. Dobrowolski B., Kabza Z., Pospolita J. The analysis of metrology performance of constriction flow-meters under pulsating flow-condition // *The Proceedings of the X-th IMEKO World Congress*. 1985. Vol.8. P. 25-32.
48. Downing P.M., Mottram R.C. The effects of flow pulsations on orifice plate flowmeters // *Fluid Flow Measur. Proc. Conf.* 1975. 1977. P. 25-52.
49. Earles W.E., Zarek J.M. Use of sharp-edged orifices for metering pulsating flow // *Proc. Inst. Mech. Eng.* 1963. Vol. 177. N37. P. 937-1024.
50. E.van Bokhorst and M.C.A.M. Peters. Optimisation of floe measurements in a pulsating flow // *19th International North Sea Flow Measurement Workshop*. – Kristiansand, Norway, 22-25 October, 2001.

51. Estel E. Durchflusszahl von Normdusen und Druckfall in Rohren bei pulsierender Stromung // Physika-lische Zeitsrift. 1937. Bd.38. S. 748-758.

52. Roman Fedoryshyn, Fedir Matiko, Ihor Kostyk and Yevhen Pistun. Systematic Error of Gas Flow Rate Measurement Caused by Flow Pulsation // 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Arlington, Virginia, April 14 to 17, 2015

53. Floyd J.H. The effect of high frequency pulsations on differential meter accuracy // Pipe Line News. 1963. Vol.35. N 2. P. 19-23.

54. Gajan P., Mottram R.C., Hebrard P, Andriamihafy H. and Platet B. The influence of pulsating flow on orifice plate flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 3 (3), 1992, pp. 1118-1129.

55. Grimson J., Hay H. Errors due to pulsation in orifice meters // J. of the Royal Aeronaut. Society. 1971. Vol.75. N 4. P. 284-287.

56. Hobbs , J.M., J. A. Sattary, and A.D. Maxwell, Experimental data for the determination of basic 250 mm orifice meter discharge coefficients, Commission of the European Communities, BCR Information Applied Metrology, Report EUR 10979 (1987).

57. ISO 5167-1:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: part 1 - General principles and requirements. ISO, 2003. – 36 p.

58. ISO 5167-2:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: part 2 - Orifice plates. ISO, 2003. – 52 p.

59. ISO 5167-3:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: part 3 - Nozzles and Venturi nozzles. ISO, 2003. – 38 p.

60. ISO 5167-4:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: part 4 - Venturi tubes. ISO, 2003. – 32 p.

61. ISO/TR 3313:1998 Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments.

62. ISO/TR 9464:2008 Guidelines for the use of ISO 5167:2003.
63. ISO/TR 12767:2007 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices — Guidelines on the effect of departure from the specifications and operating conditions given in ISO 5167.
64. Jepson, P. and Chipchase, R. The effect of plate buckling on orifice meter accuracy, *J. Mech. Eng. Sci.* 1975, 17(6).
65. Johansen, W.R. Effects of thin film of liquid coating orifice plate surfaces on orifice flowmeter performance, Report GRI-96/0375, Gas research institute, Dec., 1996.
66. Kostyk I., Matiko F., Fedoryshyn R. Effect of flow pulsations on the accuracy of differential pressure flowmeters // *Challenges of Modern Technology*. – 2017. – Vol. 8, № 1. – P. 23–31. (Index Copernicus International).
67. Martin, C.N.B. Effects of upstream bends and valves on orifice plate pressure distributions and discharge coefficients. National Engineering Laboratory, Glasgow, 1986. 50 p. (NEL Report 702).
68. Mateusz Turkowski. *Metrologia przeplywow*. – Warszawa: Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej, 2018. – 281p. – ISBN 978-83-7814-697-1.
69. F.Matiko, I.Kostyk, H.Matiko, V.Roman. Investigating the additional uncertainty of flowrate measurement caused by symmetrically disturbed flow // *Праці Одеського політехнічного університету*. – 2020. - №1(60). – С. 142-152
70. Mohamed A. Siba, Wan Mohd Faizal Wan Mahmood, Mohd Z. Nuawi, Rasidi Rasani, Mohamed H. Nassir. Wall pressure due to turbulent flow through orifice plate // *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, Vol.15, No.2, 2015, pp. 36-41.
71. Nam-Seok Kim, Sang-Kyu Lee, Byung-Soo Shin, and O-Hyun Keum. Investigation on Fluid Flow Characteristics of the Orifice in Nuclear Power Plant // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol.5, No.4, 2011, pp. 812-816.
72. Natural Gas Fluids Measurement, API MPMS Chapter 14, Section 3, Part 2- Specification and Installation Requirements, Third Edition, February 1991.

73. T. Nithin, Nikhil Jain, Adarsha Hiriyannaiah. Optimization of Venturi flow meter model for the angle of divergence with minimal pressure drop by computational fluid dynamics method // International Conference on Challenges and Opportunities in Mechanical Engineering, Industrial Engineering and Management Studies (ICCOMIM – 2012), 11-13 July, 2012, pp. 658-670.

74. Numerical Computation of Internal and External Flows. Volume 1 - Fundamentals of Computational Fluid Dynamics (Second edition) / by Charles Hirsch, John Wiley & Sons, Ltd, 2007, 696 pages.

75. Numerical simulation of gas pipeline networks: theory, computational implementation, and industrial applications / Ed. by V.E. Seleznev. – Moscow : KomKniga, 2005. – 720 p.

76. Oppenheim A.K., Ghilton E.G. Pulsating Flow Measurement- a literature survey // Trans. ASME. 1955. Vol.77. N 2. P.231-248.

77. Pistun, Y., Matiko, H., Krykh H., Matiko F. Structural modelling of throttle diagrams for measuring fluid parameters // Metrology and Measurement Systems, Volume 25, Issue 4, 2018, Pages 659-673. ISSN 0860-8229

78. Ramya B.N., Yogesh Kumar K.J., V Seshadri. Numerical analysis of the performance characteristics of conical entrance orifice meter // International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, Vol.4(12), 2015, pp. 209-2017.

79. Reader-Harris, M.J. Pipe roughness and Reynolds number limits for the orifice plate discharge coefficient equation. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Fluid Flow Measurement, Calgary, AB, Canada, 6-9 June 1990, pp. 29-43. American Gas Association, Arlington, VA, 1990.

80. Dr. M.J. Reader-Harris, D. Hodges. The effect of contaminated orifice plates on the discharge coefficient // TUV NEL (Project No. FFRE45; Report No. 2008/266), 2008, 20 p.

81. Studzinski, W., Berg, D., Bell, D. and Karwacki, L. Effect of meter run roughness on orifice meter accuracy. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Fluid Flow Measurement, Calgary, AB, Canada, 6-9 June 1990, pp. 1-15. American Gas Association, Arlington, VA, 1990.

82. Studzinski, W., Karnik, U., Lanasa, P., Morrow, T., Goodson, D., Husain Z., and Gallagher, J. White paper on “orifice meter installation configurations with and without flow conditioners”. American Petroleum Institute, Washington, DC, 1997. 252 p. (Available as GRI Report 99/0262 from Gas Technology Institute, Des Plaines, IL, USA).

83. Studzinski, W., Weiss, M., Attia, J. and Geerligs, J. Effect of reducers, expanders, a gate valve, and two elbows in perpendicular planes on orifice meter performance. In: Flow Measurement 2001: Creating efficiency across industry sectors, international conference, Peebles, UK, May 2001, paper 3.1. National Engineering Laboratory, Glasgow, 2001.

84. Teyssandier R.G. The effects of symmetric steps and gaps on orifice measurement, North Sea Flow Measurement Workshop, 1985.

85. Tural Tunay. Investigation of the effects of different numerical methods on the solution of the orifice flow // Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, Vol.27(1), 2012, pp. 39-51.

86. Walid Ahmed Mohammad. Pulsating flow effects on flowmeters in pipelines. A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Guildford, U.K. – July, 1982.

87. Weiss, M., Studzinski, W. and Attia, J. Performance evaluation of orifice meter standards for selected T-junction and elbow installations. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Washington, DC, April 2002.

88. Radoslaw Werszko, Krzysztof Tomczuk. Pomiar składowej zmiennej pulsującego ciśnienia powietrza // Pomiary Automatyka Robotyka, 2018, N 4. P. 13-18.

89. Williams T.J. Pulsation damping in pressure gauge connections // The Engineer. 1959. Vol.207. P. 378-379.

ДОДАТОК А

**ПРОТОКОЛИ ВІДПОВІДНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ
ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ ТА КАМЕР
УСЕРЕДНЕННЯ**

ДП «Львівстандартметрологія»

МБУ 043/01-2011

Назва організації, що проводила вимірювання

ПРОТОКОЛ № 104 Т

ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 46

Матеріал: ст.20

При вимірюванні застосовувались такі засоби вимірювальної техніки, допоміжні пристрої та технічні засоби: нутромір індикаторний НИ-100; кутомір з ноніусом 2-2; профілометр мод. 171621

0

Умови вимірювань:

- температура повітря 17 °С;

- атмосферний тиск 97,4 кПА;

- відносна вологість 61 %.

Зовнішній огляд: відповідає

відповідає / не відповідає

Результати вимірювань внутрішнього діаметра ВТ

Переріз j, в якому проводились вимірювання	Напрямок, в якому проводились вимірювання та їх значення, мм				Результат розрахунків	Висновок (відповідає / не відповідає)
	D_{j1}	D_{j2}	D_{j3}	D_{j4}		
1	100,13	100,22	100,18	100,04	$D = 99,93$	відповідає
2	99,87	99,89	99,88	99,87		
3	99,75	99,77	99,77	99,76		
4	100,02	100,04	100,04	100,02		
5	99,92	99,95	99,96	99,91	-	
D'	100,02	99,97	99,97	99,97	$D' = 99,98$	відповідає

Примітка: D' – діаметр ВТ після діафрагми

$$D_{20} = 99,93 \text{ мм}$$

Висновок: Внутрішній діаметр ВТ на ділянці довжиною 2D до та після діафрагми відповідає вимогам п.6.4.1 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.

Результати вимірювань шорсткості внутрішньої поверхні ВТ

Переріз	1	2	3	4
$Ra, \text{ мкм}$	0,25	0,16	0,14	0,21

$$Ra = 0,19 \text{ мкм}$$

Результати визначення шорсткості за додатком Д ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 нова

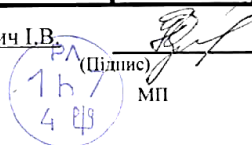
(вказати тип та стан внутрішньої поверхні ВТ)

Результати визначення відхилення від перпендикулярності торця ВТ

Найменування параметра	Результати спостережень, '					Висновок (відповідає / не відповідає)
	1	2	3	4	макс.	
Максимальне відхилення від 90° між віссю ВТ та торцем вхідного фланця	12	8	10	12	12	відповідає

Виконавець:

пров. інженер Юськевич І.В.
(посада, П.І.Б.)



11.12.17 р.

ДП «Львівстандартметрологія»

МВУ 043/01-2011

Назва організації, що проводила вимірювання

ПРОТОКОЛ № 105 Т

ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Власник: НУ "Львівська політехніка"Номер: 47Матеріал: ст.20При вимірюванні застосовувались такі засоби вимірювальної техніки, допоміжні пристрої та технічні засоби: нутромір індикаторний НИ-100; кутомір з ноніусом 2-2; профілометр мод. 171621

0

Умови вимірювань:

- температура повітря 16 °С;- атмосферний тиск 98,3 кПа;- відносна вологість 57 %.Зовнішній огляд: відповідаєвідповідає / не відповідає

Результати вимірювань внутрішнього діаметра ВТ

Переріз j, в якому проводились вимірювання	Напрямок, в якому проводились вимірювання та їх значення, мм				Результат розрахунків	Висновок (відповідає / не відповідає)
	D_{j1}	D_{j2}	D_{j3}	D_{j4}		
1	100,09	100,07	100,03	100,05	$D = 99,83$	відповідає
2	99,81	99,81	99,85	99,80		
3	99,55	99,61	99,67	99,56		
4	99,89	99,91	99,95	99,94		
5	99,68	99,75	99,71	99,74		
D'	100,06	100,04	100,09	100,08	$D' = 100,07$	відповідає

Примітка: D' – діаметр ВТ після діафрагми

$$D_{20} = 99,83 \text{ мм}$$

Висновок: Внутрішній діаметр ВТ на ділянці довжиною 2D до та після діафрагми **відповідає** вимогам п.6.4.1 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.

Результати вимірювань шорсткості внутрішньої поверхні ВТ

Переріз	1	2	3	4
$Ra, \text{ мкм}$	0,1	0,16	0,19	0,15
$Ra = 0,15 \text{ мкм}$				

Результати визначення шорсткості за додатком Д ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009
нова

(вказати тип та стан внутрішньої поверхні ВТ)

Результати визначення відхилення від перпендикулярності торця ВТ

Найменування параметра	Результати спостережень, '					Висновок (відповідає / не відповідає)
	1	2	3	4	макс.	
Максимальне відхилення від 90° між віссю ВТ та торцем вхідного фланця	8	8	10	8	10	відповідає

Виконавець:

проф. інженер Юськевич І.В.
(посада, П.І.Б.)

21.12.17 р.

ПРОТОКОЛ № 104 К

ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ КАМЕР УСЕРЕДНЕННЯ

Власник: НУ "Львівська політехніка"
 Номер: 46
 Матеріал: ст.20
 При вимірюванні застосовувались такі засоби вимірювальної техніки, допоміжні пристрої та технічні засоби: нутромір індикаторний НИ-100; штангенциркуль ШЦ-I; мікрометр МК-50

0

Умови вимірювань:

- температура повітря 17 °С;
- атмосферний тиск 97,4 кПа;
- відносна вологість 61 %.

Вхідні дані контролю:

- внутрішній діаметр трубопроводу $D_{20}^* =$ 99,93 мм;
- діаметр отвору діафрагми $d_{20}^{**} =$ _____ мм

Тип щілини: переривиста, з кількістю 4 щілин в одній камері
 (суцільна / переривиста, з кількістю N щілин в одній камері)

Зовнішній огляд:

відповідає
 відповідає / не відповідає

Вимірювання геометричних розмірів

№ п. за МВУ	Найменування параметра та одиниця вимірювань	Результати спостережень								Результат розрахунків		Висновок (відповідає / не відповідає)
		Камера до СД				Камера після СД				$\bar{b}_k =$	$\bar{b}'_k =$	
9.2.2	Внутрішній діаметр камер, мм	$b_{k1} =$	100,16	$b_{k3} =$	100,17	$b'_{k1} =$	100,12	$b'_{k3} =$	100,12			100,17
		$b_{k2} =$	100,16	$b_{k4} =$	100,17	$b'_{k2} =$	100,12	$b'_{k4} =$	100,12			
9.2.3	Довжина камер, мм	$c =$	30	$c' =$	28,5	-	-	-	-	-	-	відповідає
9.2.4	Діаметр посадкового місця для встановлення СД, мм	$D_d =$	135	-	-	-	-	-	-	-	-	відповідає
9.2.5	Розміри внутрішніх порожнин та кільцевих щілин, мм	$g =$	21,7	$g' =$	21,65	-	-	-	-	-	-	відповідає
		$h =$	9,2	$h' =$	9,25							
		$a =$	1,3	$a' =$	1,3							
		$f =$	3,2	$f' =$	3,2							
		$w =$	30	$w' =$	30							
9.2.6	Діаметри отворів для передачі тиску, мм	$j =$	6	$j' =$	6	-	-	-	-	-	-	відповідає
		$d_p =$	-	$d'_p =$	-	$\varphi =$	$\varphi' =$	-	-	-	-	-
	Діаметри продувних (дренажних) отворів та їх розташування	$D_k =$	-	$I_\delta =$	-	$D'_k =$	-	$I'_\delta =$	-	-	-	-

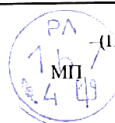
Примітки: * - значення D_{20} дозволяється приймати рівним номінальному діаметру трубопроводу (DN); ** - Якщо в комплекті з камерою усереднення використовуються декілька СД, то вказують максимальне значення d_{20} з усіх СД.

Висновок: Геометричні параметри камер до та після діафрагми відповідає
 вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.

У разі негативних результатів вказати причину невідповідності: _____

Виконавець:

пров. інженер Юськевич І.В.
 (посада, П.І.Б.)



(Підпис)

11.12.17 р.

ДП «Львівстандартметрологія»

Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПРОТОКОЛ № 105 К

ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ КАМЕР УСЕРЕДНЕННЯ

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 47

Матеріал: ст.20

При вимірюванні застосовувались такі засоби вимірювальної техніки, допоміжні пристрої та технічні засоби: нутромір індикаторний НИ-100; штангенциркуль ШЦ-I; мікрометр МК-50

0

Умови вимірювань:

- температура повітря 16 °C;
- атмосферний тиск 98,3 кПа;
- відносна вологість 57 %.

Вхідні дані контролю:

- внутрішній діаметр трубопроводу $D_{20}^* = 99,83$ мм;
- діаметр отвору діафрагми $d_{20}^{**} =$ мм

Тип щілини: переривиста, з кількістю 4 щілин в одній камері
(суцільна / переривиста, з кількістю N щілин в одній камері)

Зовнішній огляд:

відповідає
відповідає / не відповідає

Вимірювання геометричних розмірів

№ п. за МВУ	Найменування параметра та одиниця вимірювань	Результати спостережень						Результат розрахунків		Висновок (відповідає / не відповідає)		
		Камера до СД			Камера після СД			$\bar{b}_k =$	$\bar{b}'_k =$			
9.2.2	Внутрішній діаметр камер, мм	$b_{k1} =$	100,10	$b_{k3} =$	100,10	$b'_{k1} =$	100,11			$b'_{k3} =$	100,11	100,10
		$b_{k2} =$	100,10	$b_{k4} =$	100,10	$b'_{k2} =$	100,11	$b'_{k4} =$	100,11			
9.2.3	Довжина камер, мм	$c =$	30,15	$c' =$	28,5	-	-	-	-	-	-	відповідає
9.2.4	Діаметр посадкового місця для встановлення СД, мм	$D_d =$	135,05	-	-	-	-	-	-	-	-	відповідає
9.2.5	Розміри внутрішніх порожнин та кільцевих щілин, мм	$g =$	21,6	$g' =$	21,55	-	-	-	-	-	-	відповідає
		$h =$	9,1	$h' =$	9							
		$a =$	1,25	$a' =$	1,25							
		$f =$	3,35	$f' =$	3,4							
		$w =$	30,1	$w' =$	30							
9.2.6	Діаметри отворів для передачі тиску, мм	$j =$	6	$j' =$	6	-	-	-	-	-	-	відповідає
		$d_p =$	-	$d'_p =$	-	$\varphi =$	$\varphi' =$	-	-	-	-	
9.2.6	Діаметри продувних (дренажних) отворів та їх розташування	$D_k =$	-	$I_\delta =$	-	$D'_k =$	-	$I'_\delta =$	-	-	-	-
		$D_k =$	-	$I_\delta =$	-	$D'_k =$	-	$I'_\delta =$	-	-	-	-

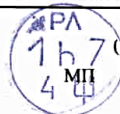
Примітки: * - значення D_{20} дозволяється приймати рівним номінальному діаметру трубопроводу (DN); ** - Якщо в комплекті з камерою усереднення використовуються декілька СД, то вказують максимальне значення d_{20} з усіх СД.

Висновок: Геометричні параметри камер до та після діафрагми відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.

У разі негативних результатів вказати причину невідповідності:

Виконавець:

пров. інженер Юськевич І.В.
(посада, П.І.Б.)



(Підпис)

21.12.17 р.

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПРОТОКОЛ № 105 У
ВИМІРЮВАННЯ УСТУПІВ У ВНУТРІШНІЙ ПОРОЖНИНІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО
ТРУБОПРОВОДУ

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 47

При вимірюванні застосовувались такі засоби вимірювальної техніки, допоміжні пристрої та технічні засоби: нутромір індикаторний НИ-100;
рулетка вимірювальна металева, кл.3

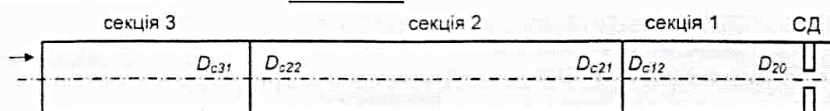
0

Умови вимірювань:

- температура повітря 16 °С;
- атмосферний тиск 98,3 кПА;
- відносна вологість 57 %.

Вхідні дані контролю:

- внутрішній діаметр ВТ $D_{20} =$ 99,83 мм;
- кількість секцій ВТ: 3.



Вимірювання геометричних розмірів

секція ВТ (i)	кінець секції ВТ (j)	Тип з'єднання секцій ВТ	Результат спостережень		Результат розрахунків			Висновок (відповідає / не відповідає)
			$D_{cij}, \text{ мм}$	$I_{ci}, \text{ мм}$	$\bar{D}_{cij}, \text{ мм}$	$L_{ci}, \text{ мм}$	Висота уступу $\Delta h_i, \text{ мм}$	
1	2	фланцеве	$D_{c121} = 100,09$	217,6	100,12	2,18	0,01	відповідає
			$D_{c122} = 100,11$					
			$D_{c123} = 100,15$					
			$D_{c124} = 100,14$					
2	1	фланцеве	$D_{c211} = 100,10$	317,8	100,14	3,18	0,01	відповідає
			$D_{c212} = 100,16$					
			$D_{c213} = 100,18$					
			$D_{c214} = 100,10$					
	2	фланцеве	$D_{c221} = 100,17$	516,8	100,15	3,18	0,01	відповідає
			$D_{c222} = 100,15$					
			$D_{c223} = 100,12$					
			$D_{c224} = 100,16$					
3	1	фланцеве	$D_{c311} = 100,09$	317,8	100,14	3,18	0,01	відповідає
			$D_{c312} = 100,18$					
			$D_{c313} = 100,17$					
			$D_{c314} = 100,13$					
	2	фланцеве	$D_{c321} = 100,10$	516,8	100,15	3,18	0,01	відповідає
			$D_{c322} = 100,10$					
			$D_{c323} = 100,19$					
			$D_{c324} = 100,18$					

Висновок: Висота уступів у внутрішній порожнині вимірювального трубопроводу *відповідає* вимогам п.6.4.3 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.

У разі негативних результатів вказати причину невідповідності:

Виконавець: пров. інженер Юськевич І.В.
(посада, П.І.Б.)



(Підпис)

21.12.17 р.

ДОДАТОК Б**ПАСПОРТИ СТАНДАРТНИХ ДІАФРАГМ ЕТАЛОННОГО
ВИТРАТОМІРА**

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 46-1

Матеріал: 12Х18Н10Т

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		19,993					
Зовнішній діаметр D_H , мм		134,75					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		1,25					
Товщина E_d , мм		2,94					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		45,5					
Ексцентриситет ϵ отвору, мм		0,02					
Шорсткість R_a поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,11					
	- вихідного торця	0,1					
	- циліндричної частини отвору	0,15					
Максимальне відхилення H_d від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,03					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,007					
Дата		06.02.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 6

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 06.02.2018

Діафрагма № 46-1

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24_№ 033

Среда експлуатації: газ

$d_{20} = 19,993$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,008$ мм;

Умови вимірювання: $t = 19^\circ\text{C}$

$P_a = 100,6$ кПа

$\phi = 59\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	9	відсутній	
2	6	відсутній	
3	9	відсутній	
4	8	відсутній	
5	8	відсутній	
6	8	відсутній	
7	6	відсутній	
8	8	відсутній	
Середнє:	7		



Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє:



Юськевич І.В. /

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 46-2

Матеріал: 12X18H10T

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		39,987					
Зовнішній діаметр D_H , мм		134,8					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		0,88					
Товщина E_D , мм		2,95					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		44,2					
Ексцентриситет e отвору, мм		0,025					
Шорсткість Ra поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,09					
	- вихідного торця	0,14					
	- циліндричної частини отвору	0,2					
Максимальне відхилення H_D від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,04					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,008					
Дата		02.02.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 3

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 02.02.2018

Діафрагма № 46-2

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24_№ 033

Среда експлуатації: газ

$d_{20} = 39,987$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,016$ мм;

Умови вимірювання: $t = 19^\circ\text{C}$

$P_a = 99,8$ кПа

$\phi = 57\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	8	відсутній	
2	8	відсутній	
3	8	відсутній	
4	9	відсутній	
5	8	відсутній	
6	8	відсутній	
7	8	відсутній	
8	9	відсутній	
Середнє:	8		



Висновки: придатна

Примітка:

Повіряю:

Юськевич І.В.

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 46-3

Матеріал: 12X18H10T

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		49,995					
Зовнішній діаметр D_{11} , мм		134,8					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		1,07					
Товщина E_D , мм		2,92					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		45					
Ексцентриситет ϵ отвору, мм		0,025					
Шорсткість R_a поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,15					
	- вихідного торця	0,13					
	- циліндричної частини отвору	0,25					
Максимальне відхилення H_D від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,02					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,01					
Дата		03.03.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 17

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 03.03.2018

Діафрагма № 46-3

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24 № 033

Среда експлуатації: газ

$d_{20} = 49,995$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,020$ мм;

Умови вимірювання: $t = 16^\circ\text{C}$

$P_a = 99,7$ кПа

$\varphi = 56\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	9	відсутній	
2	8	відсутній	
3	8	відсутній	
4	10	відсутній	
5	13	відсутній	
6	8	відсутній	
7	13	відсутній	
8	12	відсутній	
Середнє:	10		



Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє:

Юськевич І.В.

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011



ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 46-4

Матеріал: 12X18Н10Т

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		66,987					
Зовнішній діаметр D_{11} , мм		134,65					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		1,21					
Товщина E_d , мм		2,95					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		45					
Ексцентриситет ϵ отвору, мм		0,025					
Шорсткість Ra поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,13					
	- вихідного торця	0,16					
	- циліндричної частини отвору	0,25					
Максимальне відхилення H_d від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,02					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,009					
Дата		03.03.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 18

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 03.03.2018

Діафрагма № 46-4

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24 № 033


Среда експлуатації: газ

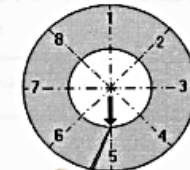
$d_{20} = 66,987$ мм; $r_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,027$ мм;

Умови вимірювання: $t = 16^\circ\text{C}$

$P_a = 99,7$ кПа

$\phi = 56\%$

№ перетину	r_H , мкм	Дефект	Зображення
1	8	відсутній	
2	10	відсутній	
3	8	відсутній	
4	9	відсутній	
5	9	відсутній	
6	13	відсутній	
7	9	відсутній	
8	9	відсутній	
Середнє:		9	



Розміщення перетинів

Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє:





Юськевич І.В.

ДОДАТОК В

**ПАСПОРТИ СТАНДАРТНИХ ДІАФРАГМ РОБОЧОГО
ВИТРАТОМІРА**

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що провела вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"
Номер: 47-1
Матеріал: 12X18H10T
Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		19,982					
Зовнішній діаметр D_H , мм		134,75					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		1,00					
Товщина E_d , мм		2,94					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		45					
Ексцентриситет ϵ отвору, мм		0,02					
Шорсткість R_a поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,1					
	- вихідного торця	0,12					
	- циліндричної частини отвору	0,15					
Максимальне відхилення H_d від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,09					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,008					
Дата		02.02.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		проф. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП «Львівстандартметрологія»

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 2

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 06.02.2018

Діафрагма № 47-1

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24 № 033

Среда експлуатації: газ

$d_{20} = 19,982$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,008$ мм;

Умови вимірювання: $t = 19^\circ\text{C}$

$P_a = 100,6$ кПа

$\phi = 59\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	8	відсутній	
2	8	відсутній	
3	9	відсутній	
4	9	відсутній	
5	8	відсутній	
6	8	відсутній	
7	8	відсутній	
8	8	відсутній	
Середнє:	8		



Розміщення перетинів

Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє:



Юськевич І.В.

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011



ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 47-2

Матеріал: 12Х18Н10Т

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		39,990					
Зовнішній діаметр D_H , мм		134,75					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		0,98					
Товщина E_d , мм		2,94					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		45					
Ексцентриситет e отвору, мм		0,025					
Шорсткість R_a поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,12					
	- вихідного торця	0,15					
	- циліндричної частини отвору	0,2					
Максимальне відхилення H_d від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,06					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,008					
Дата		02.02.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 4

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 02.02.2018

Діафрагма № 47-2

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24_№ 033




Среда експлуатації: газ

$d_{20} = 39,99$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,016$ мм;

Умови вимірювання: $t = 19^\circ\text{C}$

$P_a = 99,8$ кПа

$\phi = 57\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	10	відсутній	
2	9	відсутній	
3	8	відсутній	
4	9	відсутній	
5	8	відсутній	
6	6	відсутній	
7	6	відсутній	
8	8	відсутній	
Середис:	8		



Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє:





Юськевич І.В. /

ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що проводила вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 47-3

Матеріал: 12X18Н10Т

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань		Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм		49,992					
Зовнішній діаметр D_{11} , мм		134,85					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм		0,98					
Товщина E_d , мм		2,92					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °		45					
Ексцентриситет ϵ отвору, мм		0,025					
Шорсткість R_a поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,14					
	- вихідного торця	0,25					
	- циліндричної частини отвору	0,3					
Максимальне відхилення H_d від площинності поверхні вхідного торця, мм		0,03					
Радіус r_H вхідного канта, мм*		0,012					
Дата		03.03.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця		пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис							
МП							

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 19

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 03.03.2018

Діафрагма № 47-3

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24 № 033

Среда експлуатації: газ

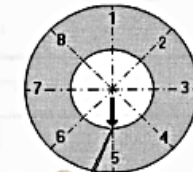
$d_{20} = 49,992$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,020$ мм;

Умови вимірювання: $t = 16^\circ\text{C}$

$P_a = 99,7$ кПа

$\phi = 56\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	16	відсутній	
2	12	відсутній	
3	13	відсутній	
4	13	відсутній	
5	12	відсутній	
6	10	відсутній	
7	11	відсутній	
8	15	відсутній	
Середнє:	12		



Розміщення перетинів

Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє: / Юськевич І.В. /



ДП «Львівстандартметрологія»
Назва організації, що провела вимірювання

МВУ 043/01-2011

ПАСПОРТ
СТАНДАРТНА ДІАФРАГМА

Власник: НУ "Львівська політехніка"

Номер: 47-4

Матеріал: 12X18H10T

Геометричні розміри

Найменування параметра та одиниця вимірювань	Результат вимірювання					
Діаметри d_{20} отвору, мм	66,978					
Зовнішній діаметр D_H , мм	134,8					
Довжина e циліндричної частини отвору, мм	1,10					
Товщина E_D , мм	2,94					
Кут нахилу α твірної конуса до осі отвору, ... °	44,5					
Ексцентриситет e отвору, мм	0,025					
Шорсткість R_a поверхонь, мкм	- вхідного торця	0,12				
	- вихідного торця	0,14				
	- циліндричної частини отвору	0,2				
Максимальне відхилення H_d від площинності поверхні вхідного торця, мм	0,01					
Радіус r_H вхідного канта, мм*	0,015					
Дата	26.03.18 р.					
Посада, П.І.Б. виконавця	пров. інженер Юськевич І.В.					
Підпис						
МП						

Примітка: * - у випадку візуального визначення радіуса вхідного канта, за результат приймають 0,04 мм та позначають зірочкою (*).

ДП "Львівстандартметрологія"

НУ "Львівська політехніка"

ПРОТОКОЛ № 35

вимірювання радіуса вхідної кромки стандартної діафрагми
ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

Дата 26.03.2018

Діафрагма № 47-4

Засіб вимірювання радіусомір LVS -24_№ 033

Среда експлуатації: газ

$d_{20} = 66,978$ мм; $\Gamma_H = 0,0004 \times d_{20} = 0,027$ мм;

Умови вимірювання: $t = 17^\circ\text{C}$

$P_a = 99,6$ кПа

$\phi = 56\%$

№ перетину	Γ_H , мкм	Дефект	Зображення
1	20	відсутній	
2	15	відсутній	
3	11	відсутній	
4	18	відсутній	
5	13	відсутній	
6	16	відсутній	
7	12	відсутній	
8	22	відсутній	
Середнє:	15		



Висновки: придатна

Примітка:

Повіряє:

Юськевич І.В.

ДОДАТОК Г

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІНИ
ВИТРАТИ ТА КОЕФІЦІЄНТА ВИТІКАННЯ СТАНДАРТНОЇ ДІАФРАГМИ
З ВІДНОСНИМ ДІАМЕТРОМ $\beta=0,2; 0,4; 0,5$, ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ
ВИСТУПІВ В ВНУТРІШНІЙ ПЛОЩИНІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО
ТРУБОПРОВОДА**

Таблиця Г.1

Відносні відхилення витрати δq_{vB} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,2$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δq_{vB} (%) для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення, $\bar{\delta}q_{vB}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^4$			0,779	0,949	1,057	1,176	1,295	1,411	
2	L = 2D	h = 0,025D	-0,021	-0,083	-0,039	0,103	0,093	-0,019	0,006
3		h = 0,05D	0,010	-0,082	-0,094	-0,018	0,095	-0,094	-0,031
4		h = 0,1D	-0,071	-0,118	-0,135	-0,085	0,021	-0,176	-0,094
5	L = 5D	h = 0,025D	0,098	-0,037	-0,046	0,048	0,063	-0,015	0,019
6		h = 0,05D	-0,027	0,022	-0,007	0,049	0,126	-0,036	0,021
7		h = 0,1D	-0,011	-0,017	0,012	0,103	0,150	-0,105	0,022
8	L = 10D	h = 0,025D	-	-	-	-	-	-	-
9		h = 0,05D	-	-	-	-	-	-	-
10		h = 0,1D	0,048	0,064	-0,064	0,063	0,153	-0,127	0,023

Таблиця Г.2

Відносні відхилення витрати δq_{vB} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,4$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δq_{vB} (%) для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення, $\bar{\delta}q_{vB}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,33	0,41	0,45	0,50	0,56	0,61	
2	L = 2D	h = 0,025D	-0,096	-0,136	-0,089	-0,073	-0,063	-0,022	-0,079
3		h = 0,05D	-0,448	-0,215	-0,249	-0,197	-0,244	-0,171	-0,256
4		h = 0,1D	-1,222	-0,854	-1,035	-1,012	-1,049	-0,963	-1,021
5	L = 5D	h = 0,025D	-0,071	-0,017	-0,035	-0,096	-0,061	-0,028	-0,040
6		h = 0,05D	-0,058	-0,028	0,054	-0,020	0,023	0,081	0,009
7		h = 0,1D	0,162	0,270	0,155	0,222	0,242	0,266	0,221
8	L = 10D	h = 0,025D	0,093	0,051	-0,005	-0,014	-0,008	0,015	0,029
9		h = 0,05D	-0,001	0,103	0,105	0,077	0,063	0,129	0,086
10		h = 0,1D	0,348	0,208	0,308	0,357	0,343	0,309	0,321

Таблиця Г.3

Відносні відхилення витрати δq_{vB} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,5$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δq_{vB} (%) для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення, $\bar{\delta}q_{vB}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,53	0,59	0,73	0,82	0,90	0,99	
2	L = 2D	h = 0,025D	-0,116	-0,206	-0,155	-0,117	-0,074	-0,158	-0,137
3		h = 0,05D	-0,516	-0,456	-0,405	-0,405	-0,351	-0,368	-0,426
4		h = 0,1D	-1,969	-1,83	-1,822	-1,741	-1,688	-1,728	-1,812
5	L = 5D	h = 0,025D	-0,022	-0,061	-0,019	-0,007	0,018	-0,013	-0,020
6		h = 0,05D	0,144	0,119	0,12	0,136	0,205	0,103	0,130
7		h = 0,1D	0,468	0,445	0,558	0,547	0,581	0,495	0,520
8	L = 10D	h = 0,025D	0,024	-0,047	-0,013	0,002	0,03	-0,051	-0,009
9		h = 0,05D	0,149	0,173	0,191	0,224	0,288	0,187	0,195
10		h = 0,1D	0,638	0,586	0,642	0,641	0,678	0,601	0,626

Таблиця Г.4

Відносні відхилення коефіцієнта витікання δ_{C_B} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,2$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δ_{C_B} , % для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення $\bar{\delta}_{C_B}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^4$			0,779	0,949	1,057	1,176	1,295	1,411	
2	L = 2D	h = 0,025D	0,093	0,084	0,029	-0,107	-0,096	0,042	0,008
3		h = 0,05D	0,07	0,104	0,088	0,027	-0,093	0,103	0,050
4		h = 0,1D	0,138	0,144	0,117	0,101	-0,026	0,172	0,108
5	L = 5D	h = 0,025D	-0,041	0,04	0,044	-0,043	-0,061	0,039	-0,004
6		h = 0,05D	0,097	-0,019	-0,026	-0,057	-0,127	0,049	-0,014
7		h = 0,1D	0,097	0,046	-0,036	-0,083	-0,156	0,12	-0,002
8	L = 10D	h = 0,025D	-	-	-	-	-	-	-
9		h = 0,05D	-	-	-	-	-	-	-
10		h = 0,1D	0,023	-0,037	0,060	-0,054	-0,141	0,118	-0,005

Таблиця Г.5

Відносні відхилення коефіцієнта витікання δ_{C_B} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,4$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δ_{C_B} , % для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення $\bar{\delta}_{C_B}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,33	0,41	0,45	0,50	0,56	0,61	
2	L = 2D	h = 0,025D	0,069	0,026	0,104	0,078	0,082	0,068	0,013
3		h = 0,05D	0,424	0,253	0,210	0,255	0,211	0,248	0,173
4		h = 0,1D	1,228	1,001	0,868	1,043	1,042	1,068	0,969
5	L = 5D	h = 0,025D	0,028	-0,056	-0,005	0,054	0,103	0,063	0,006
6		h = 0,05D	0,001	-0,015	0,006	-0,059	0,030	-0,034	-0,092
7		h = 0,1D	-0,140	-0,237	-0,288	-0,160	-0,208	-0,239	-0,254
8	L = 10D	h = 0,025D	-0,138	-0,085	-0,060	-0,001	0,024	0,003	-0,016
9		h = 0,05D	-0,024	-0,146	-0,104	-0,107	-0,068	-0,070	-0,136
10		h = 0,1D	-0,398	-0,393	-0,239	-0,296	-0,317	-0,358	-0,315

Таблиця Г.6

Відносні відхилення коефіцієнта витікання δ_{C_B} для діафрагми з відносним діаметром отвору $\beta = 0,5$

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Відносне відхилення δ_{C_B} , % для режиму роботи джерела витрати						Усереднене значення відхилення $\bar{\delta}_{C_B}$, %
			1	2	3	4	5	6	
Число Рейнольдса $Re \cdot 10^5$			0,53	0,59	0,73	0,82	0,90	0,99	
2	L = 2D	h = 0,025D	0,126	0,124	0,218	0,182	0,114	0,073	0,170
3		h = 0,05D	0,527	0,469	0,466	0,423	0,399	0,356	0,379
4		h = 0,1D	1,989	1,922	1,880	1,883	1,763	1,728	1,769
5	L = 5D	h = 0,025D	0,022	0,032	0,063	0,026	0,006	-0,018	0,017
6		h = 0,05D	-0,136	-0,136	-0,121	-0,099	-0,150	-0,213	-0,082
7		h = 0,1D	-0,504	-0,570	-0,451	-0,529	-0,556	-0,596	-0,482
8	L = 10D	h = 0,025D	-0,068	-0,006	0,045	0,050	-0,003	-0,051	0,048
9		h = 0,05D	-0,165	-0,165	-0,175	-0,162	-0,233	-0,286	-0,176
10		h = 0,1D	-0,655	-0,597	-0,601	-0,622	-0,647	-0,683	-0,585

ДОДАТОК Д

**АКТ ТА ЛИСТ ВІДГУК ПРО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



Генеральний директор
ТзОВ "Техприлад"

Р.Я.Дубіль

_____ 2020р.

АКТ

про застосування на ТзОВ "Техприлад" результатів дисертаційної роботи Костика І.В. "Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою", виконаної у Національному університеті "Львівська політехніка"

Даний акт складений для підтвердження того, що у ТзОВ "Техприлад" впроваджено наукові результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи на тему "Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою", виконаної в Національному університеті "Львівська політехніка" Костиком І.В., а саме застосовано запропоновані залежності для кількісної оцінки невизначеностей, які виникають внаслідок експлуатації витратовимірювальної установки в умовах змінної газодинамічної структури потоку природного газу під час проектування вузлів обліку природного газу та виконання заходів із зменшення впливу нестационарності потоку газу на результат вимірювання витрати.

Застосування даних залежностей дало можливість підвищити точність вимірювання витрати природного газу методом змінного перепаду тиску, які працюють в умовах змінної газодинамічної структури, а саме в умовах нестационарного потоку і при наявності виступів у внутрішній поверхні вимірювального перетворювача.

Директор по загальних питаннях

 С.А. Соколюк



ПРАТ «ІНСТИТУТ ЕНЕРГОАУДИТУ ТА ОБЛІКУ ЕНЕРГОНОСІЇВ»

79071, м. Львів, вул. Кульпарківська 141/184

Код ЄДРПОУ 33533189, р/р № 26008053711978, АТ КБ "Приватбанк", МФО 325321

тел. моб.: 067-467-82-80, info.ieaa@gmail.com, www.ieaa.com.ua

Лист-відгук

про застосування в ПрАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв» результатів дисертаційної роботи «Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку», виконаної у Національному університеті «Львівська політехніка»

Даним листом підтверджуємо, що у науково-дослідних роботах, які виконувались в ПрАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», впроваджено наукові результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи Костика І.В. «Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку», виконаної в Національному університеті «Львівська політехніка», а саме математичну модель пневматичної лінії перетворювача тиску (перепаду тиску). Ця математична модель застосована для дослідження впливу нещільностей пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску (перепаду тиску) на вимірюване значення тиску (перепаду тиску) і витрати газоподібного середовища. Встановлено, що результати моделювання тиску у камері вимірювального перетворювача тиску (перепаду тиску) добре узгоджуються з результатами вимірювань, а додаткова складова невизначеності вимірювання витрати, зумовлена наявністю виявлених у діючих вузлах обліку нещільностей, є суттєво меншою від основної складової невизначеності вимірюваного значення витрати.

Директор



Г. Е. Гочачко