

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

КОСТИК ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 681.121.84

**ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ
ЗМІННОЮ ГАЗОДИНАМІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ**

05.11.01 - прилади та методи вимірювання механічних величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська політехніка", Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Матіко Федір Дмитрович,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська політехніка".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Коробко Іван Васильович,
директор Інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського";

кандидат технічних наук
Бас Олександр Анатолійович,
старший науковий співробітник Державного підприємства "Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації".

Захист відбудеться « 17 » грудня 2020р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. Устияновича, 5, Х учбовий корпус, ауд.51).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий « 10 » листопада 2020р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.04,
кандидат технічних наук, доцент



Вашчурак Ю.З.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 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».

Мета і задачі 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.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою.

Предметом дослідження є точність вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску.

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 одержаних результатів 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.

Практичне значення одержаних 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.

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 [1, 7] проведено аналіз причин виникнення додаткових похибок, які виникають внаслідок вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку; в роботах [9, 13] проведено аналіз додаткових складників невизначеності результату вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку; в роботах [2, 4, 14, 15, 16] розроблення математичної моделі ПНК, а також експериментальної установки для дослідження динамічних характеристик ПНК, визначення похибки математичної моделі; в роботах [4, 10, 12, 14] 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 [3, 11] проведення досліджень додаткових складових невизначеності результату вимірювання витрати в умовах нестационарного потоку; в роботах [5, 17] 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 [1, 8] проведено аналіз та дослідження похибки вимірювання усередненого значення витрати за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску.

Апробація результатів дисертації. 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); XIX 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 науково-метричної бази Index Copernicus International. 12 публікації у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, які вищезазначені.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та основні задачі наукових досліджень, наведено зв'язок дисертації з науковими програмами та планами, визначено об'єкт та предмет досліджень, наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в одержаних результатах, наведено відомості про їх апробацію та впровадження.

В першому розділі проведено аналіз сучасного стану вимірювання витрати та кількості газоподібного середовища із змінною газодинамічною структурою потоку методом змінного перепаду тиску. Під змінною газодинамічною структурою потоку в даній дисертаційній роботі розглядається зміна профілю швидкості потоку, яка може виникати внаслідок впливу конструктивних характеристик ВТ, а також зміна профілю швидкості потоку та параметрів середовища (тиску, перепаду тиску на звужувальному пристрої) внаслідок наявності нестационарного потоку середовища.

За результатами аналізу встановлено, що вплив змінної газодинамічної структури потоку на точність вимірювання витрати може бути суттєвим та

призводить до виникнення додаткових невизначеностей, які можуть сягати десятки відсотків, а отже, дослідження таких невизначеностей є важливим завданням, виконання якого дасть можливість оцінити точність вимірюваного значення витрати газоподібного середовища.

Також встановлено, що виступи у внутрішню порожнину ВТ безпосередньо перед діафрагмою викликають 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 $0,01D$. Для $\beta=0,7$ вплив виступів є ще більшим і їх слід уникати взагалі або забезпечувати висоту меншу ніж $0,0038D$, щоб зберегти відхилення коефіцієнта витікання в межах основної складової невизначеності.

Наявні нормативні та теоретичні джерела не дають чітких рекомендацій та залежностей, які б дозволяли провести кількісне оцінювання додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати, зумовлених змінною структурою потоку. Зокрема, потребує удосконалення методика оцінювання невизначеності результату вимірювання витрати в умовах нестационарного потоку, що представлена в ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Також в наявних працях, які присвячені дослідженню впливу виступу у внутрішню порожнину ВТ, розглядаються виступи тільки на відстані $2D$ до ЗП. У сучасних витратомірах вимірювальна ділянка трубопроводу довжиною $10D$ до ЗП може складатися з різних секцій, тому такі виступи можуть виникати вздовж цієї ділянки. Тому виникає актуальна задача дослідження впливу виступів, розташованих на відстанях $2D \div 10D$ до ЗП, а також розроблення залежностей і рекомендацій, які б дозволяли оцінити невизначеність, зумовлену впливом виступів у внутрішню порожнину ВТ.

На підставі викладеного, сформувану мету та завдання дисертаційних досліджень.

У другому розділі викладено особливості застосування методу змінного перепаду тиску для вимірювання витрати нестационарного потоку газоподібного середовища. На основі рівняння моменту потоку середовища та нерозривності потоку отримують диференціальне рівняння, яке зв'язує миттєву витрату та перепад тиску на звужувальному пристрої:

$$\Delta p = K_1 \cdot \frac{dq_m}{dt} + K_2 \cdot q_m^2, \quad (1)$$

де Δp – перепад тиску на ПЗП; q_m - масова витрата; K_1, K_2 – коефіцієнти, значення яких залежать від конструктивних та газодинамічних характеристик ЗП.

Розглядаючи потік середовища як квазістационарний, приймають, що інерційний член $K_1 \cdot \frac{dq_m}{dt}$ у рівнянні (1) дорівнює нулю, а витрата зв'язана з перепадом тиску рівнянням:

$$q_m = \sqrt{\frac{\Delta p}{K_2}}. \quad (2)$$

Із врахуванням виразу для визначення коефіцієнта K_2 , а також враховуючи ефект розширення газоподібного середовища, отримано рівняння масової витрати газоподібного середовища:

$$q_m = \frac{\pi \cdot d^2}{4} C E \varepsilon \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}, \quad (3)$$

де E – коефіцієнт швидкості входу; C – коефіцієнт витікання ЗП; ε – коефіцієнт розширення потоку; d – діаметр отвору ЗП; ρ – густина вимірюваного середовища в робочих умовах; p_1 та p_2 – тиск вимірюваного середовища до та після ЗП відповідно.

Залежності та методологія розрахунку коефіцієнтів E , C , ε наведена в стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009.

Оскільки під час отримання рівняння (3) не враховано інерційного члена $K_1 \cdot \frac{dq_m}{dt}$, то застосування цього рівняння для вимірювання витрати нестационарного потоку призводить до виникнення додаткової складової невизначеності вимірюваного значення витрати.

Під час експлуатації витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарності потоку, статичний тиск середовища, зазвичай, є високим, а відповідно відносна амплітуда пульсацій тиску є незначною. Температура вимірювального середовища є інерційним параметром, тому відносна амплітуда пульсацій температури в більшості випадків також є незначною. Отже, для оцінювання нестационарності потоку середовища, доцільно розглянути зміну перепаду тиску на ЗП, відносна величина якої може бути значною.

Для характеристики нестационарних потоків застосовано такі параметри:

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

$$\tilde{\Delta}(\Delta p) = \pm \frac{\Delta(\Delta p)}{\overline{\Delta p}} = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta p_i - \overline{\Delta p}|}{n \overline{\Delta p}}; \quad \overline{\Delta p} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{n}, \quad (4)$$

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

- відносна середньоквадратична амплітуда пульсацій перепаду тиску – середньозважена відносна амплітуда частини АЧС Δp , яка характеризує середньоквадратичне відхилення значень перепаду тиску Δp на ЗП за проміжок часу вимірювань:

$$\tilde{\sigma}(\Delta p) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_i - \overline{\Delta p})^2}{n}}}{\overline{\Delta p}}. \quad (5)$$

Застосовуючи підходи ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 щодо класифікації режимів протікання потоку та параметри (4) і (5) у якості критеріїв класифікації, виділено такі

режими протікання потоку: квазістаціонарний, пульсуючий, змінний, нестаціонарний. Характеристики кожного з режимів протікання представлено на рисунку 1.

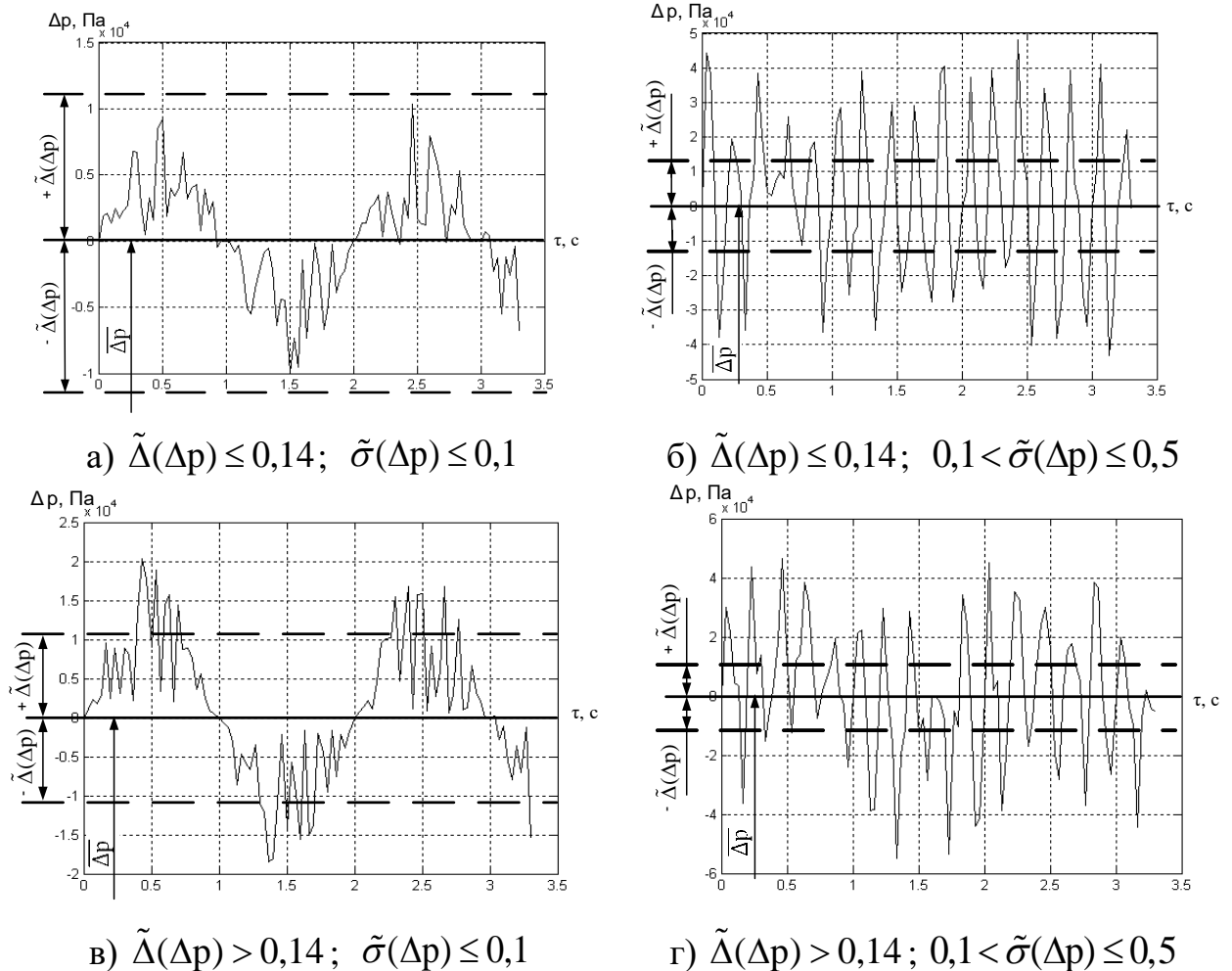


Рисунок 1. Режими протікання потоку газоподібного середовища:
а) квазістаціонарний; б) пульсуючий; в) змінний; г) нестаціонарний

За результатами аналізу технологічних режимів транспортування газових потоків виявлено причини появи нестаціонарного потоку, а також введено їх класифікацію, згідно якої всі причини поділено на дві групи:

- 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 нестаціонарні режими потоку тільки при протіканні газу у вимірювальному трубопроводі;

- 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 нестаціонарних режимів потоку цієї групи є активними і здатні самостійно вносити збурення в потік газу під час своєї роботи, незалежно від режиму протікання середовища.

Класифіковано причини виникнення додаткових невизначеностей, зумовлених нестаціонарністю потоку середовища (див. рис. 2):



Рисунок 2. Класифікація причин виникнення додаткових невизначеностей при вимірюванні витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку.

У третьому розділі розроблено математичну модель ПНК ПТ (ППТ) та досліджено додаткові складові невизначеності, зумовлені нестационарністю потоку газоподібного середовища.

Під ПНК розуміється сполучний канал, утворений камерою ПТ (ППТ) та з'єднувальною трубкою (ЗТ), яка сполучає камеру ПТ (ППТ) з плюсовою або мінусовою камерою ЗП (за їх наявності), або з внутрішньою порожниною ВТ.

На основі принципової схеми ПНК (рис.3) та застосовуючи закон збереження маси а також закони гідродинаміки, отримано математичну модель ПНК у вигляді:

$$\begin{cases} A \frac{dP_K}{dt} = q_v \cdot \rho; \\ k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_2 \cdot q_v^2 = P_{BX} - P_K, \end{cases} \quad (6)$$

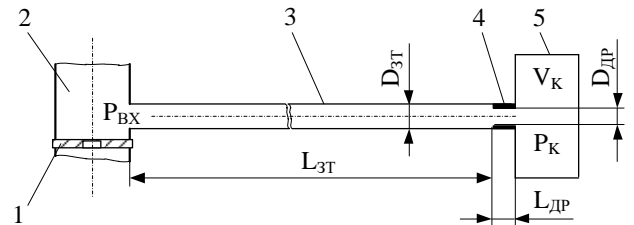


Рисунок 3. Принципова схема пневматичного каналу:
1 – звужувальний пристрій;
2 – вимірювальний трубопровід;
3 – з'єднувальна трубка;
4 – штуцер ПТ чи ППТ (дросель);
5 – камера ПТ (ППТ).

де A , k_1 та k_2 – коефіцієнти, які визначаються з наступних рівнянь:

$$A = \frac{V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}, \quad k_1 = \frac{\rho \cdot L_{ЗТ}}{S_{ЗТ}}, \quad k_2 = \frac{\frac{\rho}{2} \cdot (\lambda_{ДР} \cdot \frac{L_{ДР}}{D_{ДР}} + \lambda_{ЗТ} \cdot \frac{L_{ЗТ}}{D_{ЗТ}})}{S_{ЗТ}^2},$$

V_K – об'єм камери ПТ (ППТ); M – молярна маса газоподібного середовища;
 R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура газоподібного середовища;

z – фактор стисливості, який може бути визначений за одним із методів, представлених у ГОСТ 30319.2-96; ρ – густина вимірюваного середовища; $L_{ЗТ}$, $D_{ЗТ}$, $S_{ЗТ}$ – довжина, внутрішній діаметр та площа поперечного перерізу з'єднувальної трубки відповідно; $L_{ДР}$, $D_{ДР}$ – довжина та внутрішній діаметр штуцера ПТ (ППТ) (дроселя) відповідно; $\lambda_{ЗТ}$, $\lambda_{ДР}$ – коефіцієнти гідравлічного тертя по довжині з'єднувальної трубки та дроселя відповідно.

Для перевірки адекватності математичної моделі (6) розроблено експериментальну установку, загальний вигляд та функціональна схема якої представлено на рисунку 4.

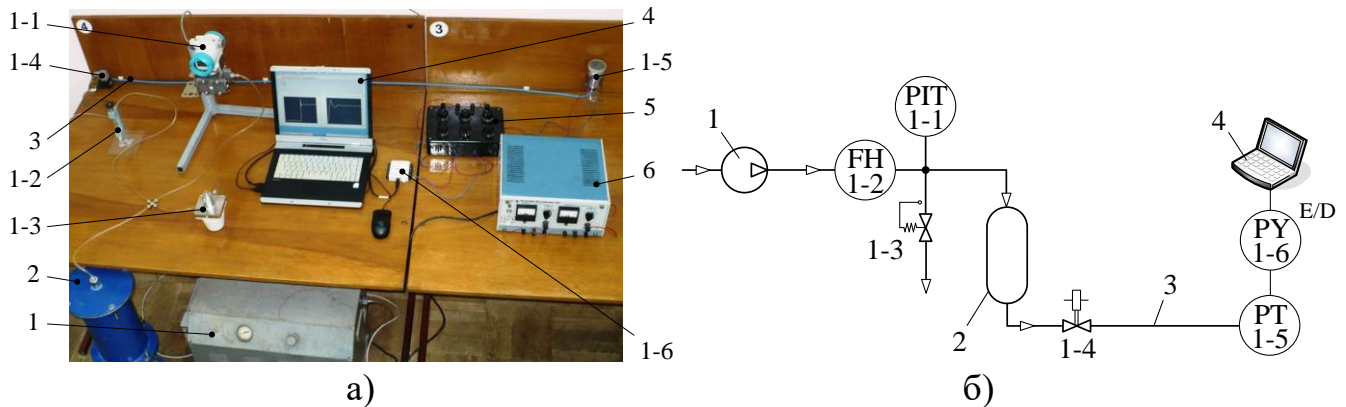


Рисунок 4. Експериментальна установка для дослідження динамічних характеристик ПНК ПТ: а) загальний вигляд, б) функціональна схема

До складу експериментальної установки входить: 1 – компресор (УК25-16М); 2 – ємність ($D=180\text{мм}$, $H=310\text{мм}$, $V=0,0079\text{ м}^3$); 3 – з'єднувальна трубка; 4 – персональний комп'ютер; 5 – магазин опорів; 6 – блок живлення; 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.

Під час виконання експериментальних досліджень ПНК виконано серію експериментів для кожної із ЗТ фіксованої довжини. У рамках кожної серії вимірювань для ЗТ одної із вказаних довжин отримано 10 перехідних процесів при однаковій стрибкоподібній зміні тиску на вході ЗТ. За результатами усереднення цих десяти процесів отримано перехідний процес, який застосовано для перевірки адекватності математичної моделі (6).

Оскільки отримані перехідні процеси є залежностями напруги на виході вимірювального перетворювача від часу, то для перевірки математичної моделі ПНК (6) її доповнено третім диференціальним рівнянням (7), яке описує зміну напруги U на виході ПТ (ППТ) при зміні тиску в камері ПТ (ППТ)

$$T_3 \cdot \frac{dU}{dt} + U = k(P_K - P_{K_0}), \quad (7)$$

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; $T_3 = 0,00425\text{ с}$ – стала часу ПТ; $k = 0,0008\text{ В/Па}$ – коефіцієнт передачі ПТ. Параметри рівняння (7) визначено за експериментальною кривою розгону ПТ.

За результатами розв'язування об'єднаної системи рівнянь (6) та (7) числовим методом отримані розрахункові перехідні функції каналу вимірювання тиску $U = f(t)$. Порівняння розрахункових перехідних функцій та усереднених перехідних функцій, отриманих експериментальним шляхом, представлено на рисунку 5. Встановлено, що максимальне відносне відхилення між значеннями розрахункових та експериментальних перехідних процесів не перевищує 6,4%, отже математична модель ПНК (6) є адекватною і може застосовуватись для дослідження динамічних характеристик пневматичного каналу.

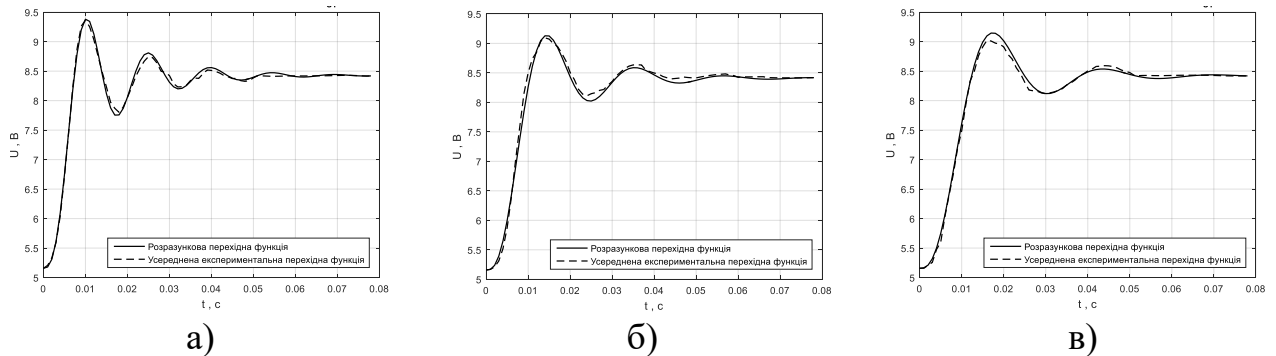


Рисунок 5. Порівняння розрахункових (-) та експериментальних (--) перехідних процесів у каналі вимірювання тиску повітря при стрибкоподібній зміні тиску на вході ПНК для ЗТ довжиною: а) $L_{ЗТ}=2,1$ м, б) $L_{ЗТ}=4,2$ м, в) $L_{ЗТ}=6,3$ м.

Для дослідження впливу резонансу на вимірюване значення тиску (перепаду тиску), проведено лінеаризацію моделі (6) та отримано функцію передачі ПНК ПТ (ППТ) (8):

$$W(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (8)$$

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

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

Із (8) видно, що лінеаризована модель ПНК ПТ (ППТ) є аперіодичною ланкою другого порядку. Підтверджено, що для геометричних характеристик ПНК, характерних для застосування ПТ (ППТ) у складі систем вимірювання витрати, може виконуватись умова $T_1 < 2T_2$, тобто ПНК є об'єктом з коливними властивостями, а отже в ньому можливе виникнення резонансу.

Застосовуючи модель (8) отримано залежності частоти резонансу в ПНК від довжини та внутрішнього діаметру ЗТ (див. рис. 6а), а також від об'єму камери V_K ПТ (ППТ) та внутрішнього діаметру $D_{ЗТ}$ ЗТ (див. рис. 6б).

Результати моделювання, представлені на рисунку 6, дають можливість оцінити значення частоти резонансу для заданих значень конструктивних характеристик ПНК, а відповідно встановити можливість виникнення резонансу у певних технологічних умовах. Застосовуючи ці результати розроблено рекомендації щодо вибору конструктивних характеристик ПНК під час проектування системи вимірювання витрати нестационарного потоку. Зокрема, рекомендовано використовувати ЗТ якомога більшого діаметру, та меншої довжини, а також ПТ

(ППТ) з найменшим об'ємом камери. При виконанні цих вимог, частота резонансу буде значно більшою, від частоти коливань вимірюваного параметру, що дасть можливість уникнути явища резонансу.

За результатами виконаних досліджень встановлено, що нестационарний потік може зумовити появу значної додаткової невизначеності вимірюваного значення

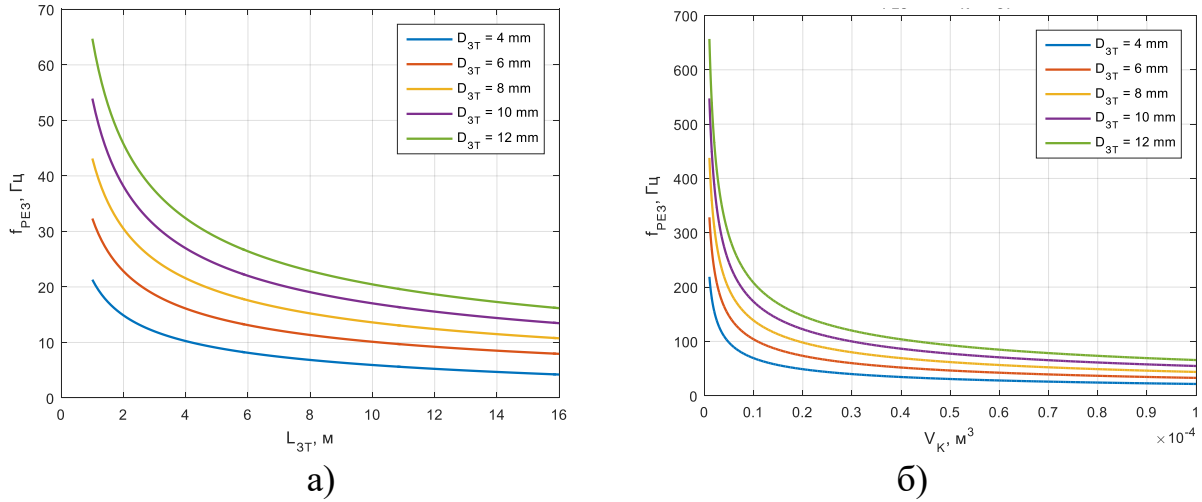


Рисунок 6. Графік залежності частоти резонансу $f_{рез}$ від:

а) довжини $L_{зт}$ та внутрішнього діаметру $D_{зт}$ ЗТ;

б) об'єму камери $V_{к}$ ПТ (ППТ) та внутрішнього діаметра $D_{зт}$ ЗТ

витрати U'_D . Зокрема, для сучасної системи вимірювання витрати, реалізованої на основі мікропроцесорного обчислювача, в умовах нестационарного потоку

$$U'_D = \sqrt{U'_{Ду}{}^2 + U'_{Дін}{}^2}, \quad (9)$$

де $U'_{Ду}$ - невизначеність, яка зумовлена нелінійністю залежності витрати від перепаду тиску, зокрема, зумовлену застосуванням усереднених значень параметрів потоку під час обчислення витрати за нелінійною залежністю (3); $U'_{Дін}$ - невизначеність, що виникає внаслідок відсутності інерційного члена у підкореному виразі квазістационарного рівняння витрати.

В роботі проведено математичний експеримент для оцінювання невизначеності $U'_{Ду}$ шляхом опрацювання сигналів тиску (перепаду тиску), отриманих для різних режимів протікання середовища (див. рис.1) та обчислення витрати за миттєвими та усередненими значеннями параметрів середовища. Виконано порівняння результатів математичного експерименту та результатів обчислення невизначеності $U'_{Ду}$ за формулою (8), що отримана на основі розгляду сигналів тиску, перепаду тиску, температури як випадкових ергодичних процесів:

$$U'_{Ду} = \delta \overline{q_v} = \frac{100}{8 \cdot [\tilde{\sigma}(\Delta p)^2 + \tilde{\sigma}(P)^2 - 3 \cdot \tilde{\sigma}(T)^2]^{-1} - 1}, \quad (10)$$

де $\tilde{\sigma}(\Delta p)^2$, $\tilde{\sigma}(P)^2$, $\tilde{\sigma}(T)^2$ – відносні дисперсії перепаду тиску на ЗП, тиску та температури вимірюваного газоподібного середовища. За результатами математичного експерименту встановлено, що формула (10) дає можливість адекватно оцінити додаткову невизначеність $U'_{Ду}$, та може бути рекомендована для

обчислення цієї невизначеності під час експлуатації діючих систем вимірювання витрати з роздільним вимірюванням параметрів потоку. Для автоматизованих систем вимірювання витрати слід оцінити невизначеність $U'_{Ду}$ за методикою ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Також підтверджено, що застосування усереднених значень тиску та перепаду тиску на ЗП для визначення витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску приводить до завищення вимірюваного значення витрати пропорційного до дисперсії сигналів тиску та перепаду тиску на ЗП.

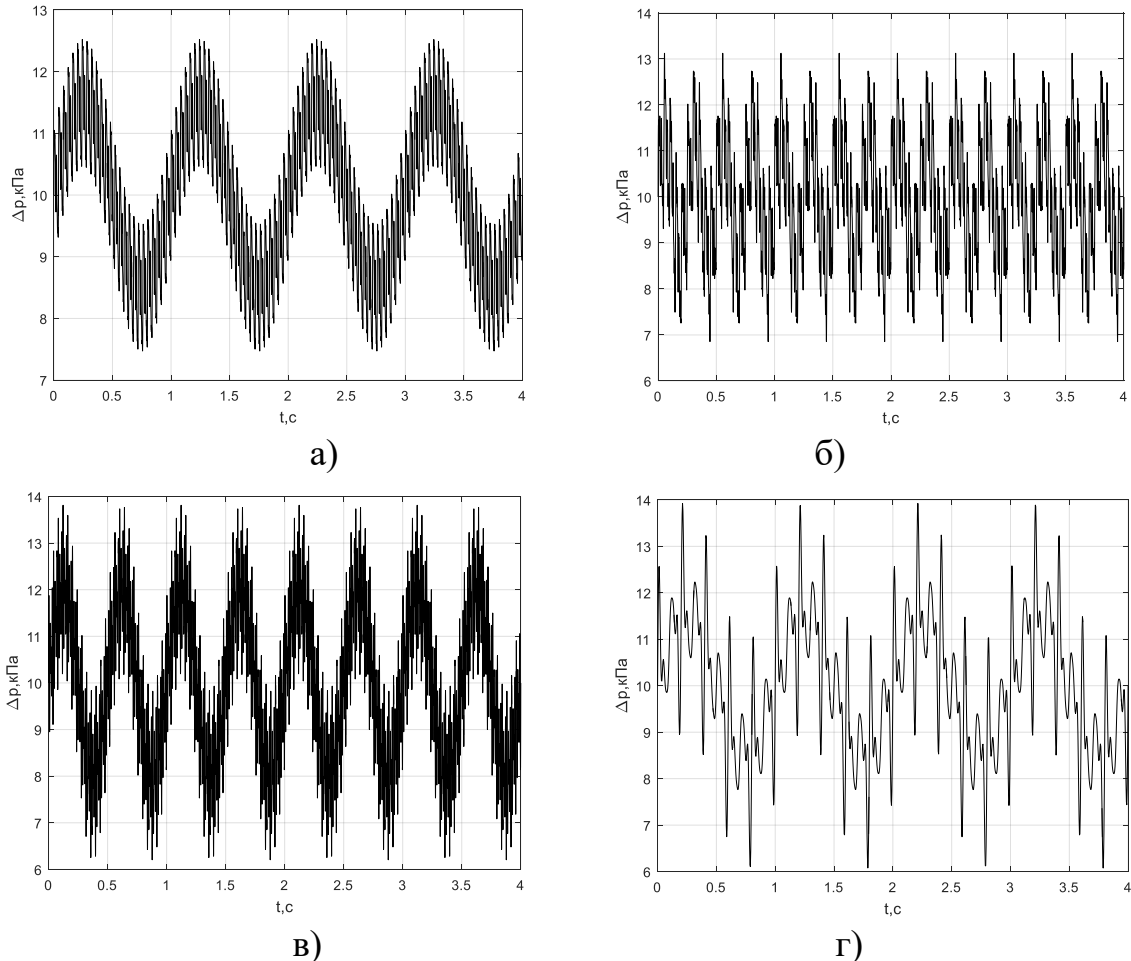


Рисунок 7. Графіки сигналів перепаду тиску на ЗП для різних режимів потоку:
 а) пульсуючого; б) нестационарного з переважанням середньочастотних складових;
 в) нестационарного з переважанням високочастотних складових;
 г) нестационарного з переважанням низькочастотних складових.

Розроблено методику оцінювання невизначеності $U'_{Дін}$, яка пов'язана з відсутністю інерційного члена у підкореновому виразі квазістационарного рівняння витрати, на основі опрацювання частотного спектру сигналу перепаду тиску. Методика передбачає застосування швидкого перетворення Фур'є для формування частотного спектру сигналу перепаду тиску, визначення амплітуди та частоти гармонік цього спектру та обчислення коефіцієнта інерції J та коефіцієнта гармонічних спотворень H вимірюваного сигналу перепаду тиску. Для обчислення $U'_{Дін}$ рекомендовано застосовувати формулу

$$U'_{Дін} = \left\{ \sqrt{1 + \frac{(\tilde{\sigma}(\Delta p))^2}{4 \cdot (1 + H^2 \cdot J^2)}} - 1 \right\} \cdot 100. \quad (11)$$

Застосовуючи розроблену методику, досліджено невизначеність $U'_{Дін}$ та встановлено, що вона суттєво залежить від середньоквадратичної амплітуди пульсацій $\tilde{\sigma}(\Delta p)$, а також максимального відносного відхилення перепаду тиску $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ (див.табл.1). Зростання цих характеристик сигналу призводить до зростання складових $U'_{Ду}$ та $U'_{Дін}$, а, відповідно, і результуючої додаткової невизначеності $U'_д$. Зокрема, виконано оцінювання $U'_{Дін}$ для сигналів перепаду тиску (див. рис.7), для яких значення $\tilde{\Delta}(\Delta p)$ та $\tilde{\sigma}(\Delta p)$ не перевищують 20% від середнього значення перепаду тиску на ЗП. За результатами оцінювання $U'_{Ду}$ та $U'_{Дін}$ встановлено, що такі зміни перепаду тиску призводять до виникнення додаткової невизначеності вимірюваного значення витрати $U'_д$, що не перевищує 0,5%. Виконано порівняння результатів оцінювання $U'_{Дін}$ з відомими результатами інших дослідників, що представлені кривою 1 на рисунку 8, чим підтверджено коректність розробленої методики оцінювання невизначеності $U'_{Дін}$.

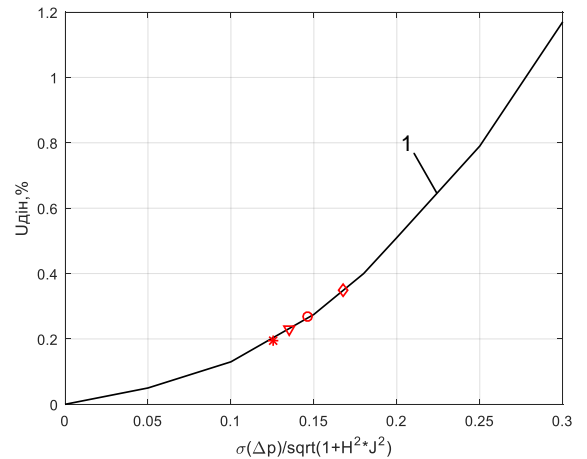


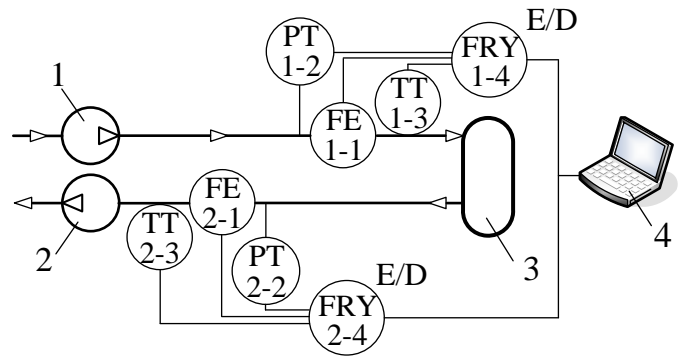
Рисунок 8. Залежність невизначеності $U'_{Дін}$ від модифікованої амплітуди пульсацій перепаду тиску :
 * - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “7а”;
 ∇ - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “7б”;
 ○ - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “7в”;
 ◇ - значення $U'_{Дін}$ для сигналу “7г”

Таблиця 1

Результати оцінювання додаткових складових невизначеності

Графіки перепаду тиску на ЗП	Максимальне відносне відхилення перепаду тиску на ЗП	Відносна середньоквадратична амплітуда пульсацій	Режим протікання середовища	Невизначеність $U'_{Ду}, \%$	Невизначеність $U'_{Дін}, \%$	Сумарна невизначеність $U'_д, \%$
Сигнал “7а”	0,126	0,125	Пульсуючий	0,1399	0,1964	0,2412
Сигнал “7б”	0,157	0,135	Нестаціонарний	0,0777	0,2288	0,2416
Сигнал “7в”	0,190	0,168	Нестаціонарний	0,0751	0,3500	0,3580
Сигнал “7г”	0,196	0,146	Нестаціонарний	0,4196	0,2667	0,4971

Четвертий розділ присвячений дослідженню впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на вимірюване значення витрати, а також на коефіцієнт витікання стандартної діафрагми. Для проведення досліджень розроблено експериментальну витратовимірювальну установку на основі методу змінного перепаду тиску, яку представлено на рисунку 9.



а)

б)

Рисунок 9. Експериментальна витратовимірювальна установка:
 а) загальний вигляд; б) функціональна схема; 1-1, 2-1 – звужувальний пристрій (стандартна діафрагма) еталонного і робочого витратоміра змінного перепаду тиску (ВЗПТ); 1-2, 2-2 – вимірювальний перетворювач тиску еталонного і робочого ВЗПТ; 1-3, 2-3 – вимірювальний перетворювач температури еталонного і робочого ВЗПТ; 1-4, 2-4 – HART-модем еталонного та робочого ВЗПТ;
 1 – повітрорудувка ПД1 на вхідній лінії подачі газоподібного середовища; 2 – повітрорудувка ПД2 на вихідній лінії; 3 – ємність;
 4 – персональний комп'ютер.

Для виконання експериментальних досліджень застосовано стандартні діафрагми із значенням відносного діаметра отвору $\beta = 0,2; 0,4; 0,5; 0,67$.

Відповідність геометричних розмірів ВТ еталонного та робочого ВЗПТ, а також діафрагм вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2:2009, підтверджено їх перевіркою в ДП "Львівстандартметрологія" за методикою МВУ 043/01-2011.

Розроблено методику виконання експериментальних досліджень витратомірів та виконано дослідження додаткової невизначеності вимірюваного значення витрати, зумовленої наявністю концентричних виступів перед діафрагмою за такою послідовністю:

1) У еталонному та робочому ВЗПТ по чергово встановлюють діафрагми, які однакові за значеннями відносного діаметра β (в межах допуску на виготовлення);

2) виконують цикл вимірювання для $5 \div 7$ значень витрати із діапазону вимірювання, який реалізує експериментальна установка, для фіксованого β . При цьому до складу робочого ВЗПТ не вводять елементи, які формують додаткову невизначеність вимірюваного значення витрати;

3) між секціями 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;

4) виконують цикл вимірювання для $5 \div 7$ значень витрати із діапазону вимірювання, який реалізує експериментальна установка. При цьому отримують результати вимірювання витрати робочим ВЗПТ із врахуванням впливу газодинамічних явищ, спричинених наявністю виступу у ВТ;

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

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

За результатами проведених експериментальних досліджень, отримано масиви значень витрати для кожного циклу вимірювань, приклад одного з яких графічно представлено на рисунку 10.

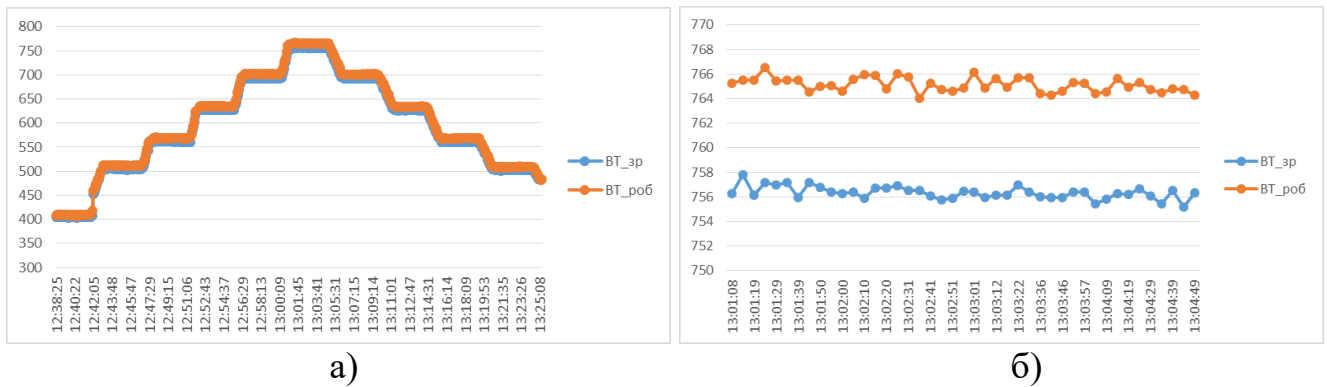


Рисунок 10. Графік зміни витрати в часі з встановленим у ВТ кільцем, яке імітує висоту виступу 0,1D, на відстані 10D від ЗП, для діафрагми з відносним діаметром $\beta=0,67$: а) при різних режимах роботи джерела витрати, б) в режимі роботи джерела витрати №6 (ПД1 + ПД2 (частота живлення двигуна 70 Гц))

Для визначення впливу газодинамічних явищ, зумовлених наявністю перед діафрагмою концентричного виступу, на коефіцієнт витікання діафрагми виконано опрацювання результатів експериментальних досліджень за таким алгоритмом:

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

2) на основі даних отриманих за п.1, обчислено значення відносного відхилення коефіцієнта витікання δ_C , для миттєвих значень параметрів потоку за формулою

$$\delta_C = \frac{C - C_0}{C_0} \cdot 100\% = \left[\frac{\sqrt{T \cdot K} \cdot (d_0^2 \cdot E_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\Delta p_0 \cdot p_0})}{\sqrt{T_0 \cdot K_0} \cdot (d^2 \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\Delta p \cdot p})} - 1 \right] \cdot 100\%, \quad (12)$$

у формулі (12) індексом "0" позначено характеристики та параметри, що відносяться до еталонного ВЗПТ;

3) для дослідження впливу виступів у внутрішню порожнину ВТ на значення коефіцієнта витікання із значень відносного відхилення коефіцієнта витікання δ_C , які отримані під час експериментальних досліджень із встановленим кільцем-імітатором, вилучено значення δ_{C_0} , які отримані під час експерименту без встановленого кільця-імітатора

$$\delta_{C_6} = \delta_C - \delta_{C_0}; \quad (13)$$

4) отримано усереднені значення відносного відхилення $\bar{\delta}_{C_e}$ для кожного інтервалу вимірювання, протягом якого витрата була незмінною.

За результатами опрацювання експериментальних даних отримано залежності відносного відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми від числа Рейнольдса Re , які для діафрагми з $\beta = 0,67$ представлені на рисунку 11.

Як видно з рисунку 11 зміна значення $\bar{\delta}_{C_e}$ в залежності від зміни числа Re є незначною, тому вплив висоти виступу h для кожного фіксованого його значення та фіксованої відстані від виступу до ЗП L може бути відтворений усередненим значенням відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми $\bar{\delta}_{C_e}$ для всього діапазону числа Re , отриманого під час досліджень. Результати усереднення для всіх досліджуваних значень β наведено в таблиці 2.

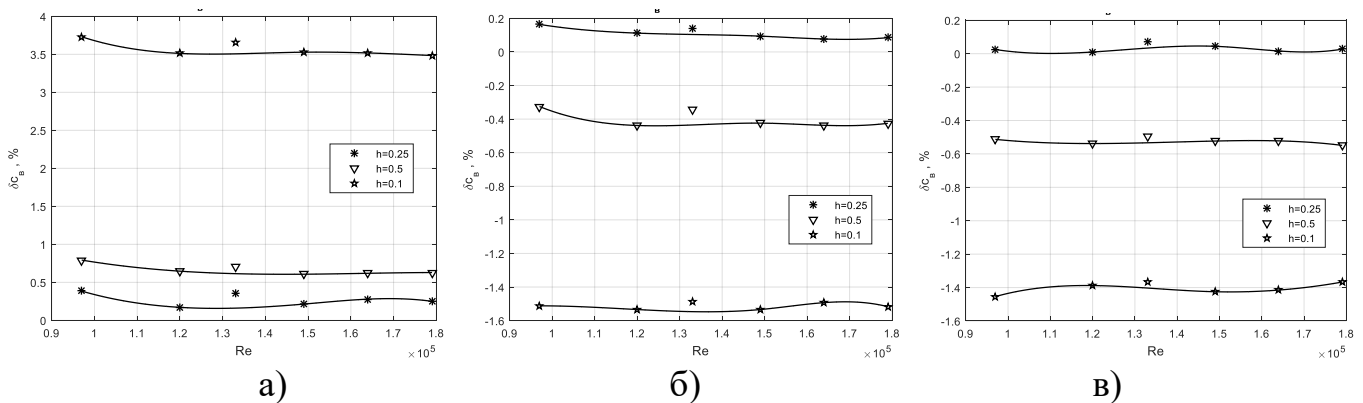


Рисунок 11. Графіки залежності відносного відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми $\bar{\delta}_{C_e}$ від числа Рейнольдса Re для довжини прямолінійної ділянки ВТ між торцем камери "+" та кільцем-імітатором виступу:
 а) $L = 2D$, б) $L = 5D$, в) $L = 10D$

Таблиця 2

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

№	Відстань до торця камери "+"	Висота виступу	Усереднене значення відхилення $\bar{\delta}_{C_e}$ (%) 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 $\bar{\delta}_{C_6}$, зумовленої впливом виступів у внутрішній порожнині ВТ, на підставі результатів наведених в табл. 2 отримано формули, для оцінювання абсолютної величини відхилення $\bar{\delta}_{C_6}$, які мають вигляд:

- для довжини ділянки $L=2D$

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

- для довжини ділянки $L=5D$

$$\bar{\delta}_{C_6} = (-4,8 + 1,88 \cdot e^{5,94\beta}) \cdot (h/D)^{1,8}, \quad (15)$$

- для довжини ділянки $L=10D$

$$\bar{\delta}_{C_6} = (-5,9 + 3,24 \cdot e^{4,1\beta}) \cdot (h/D)^{1,5}, \quad (16)$$

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

Пропонується відносно розширену невизначеність коефіцієнта витікання, яка виникає внаслідок наявності виступу у внутрішню порожнину ВТ перед діафрагмою, оцінити за формулою

$$U'_{h_B} = abs(\bar{\delta}_{C_6}). \quad (17)$$

Залежності (14) - (17) дають можливість кількісно оцінити додаткову невизначеність коефіцієнта витікання від геометричних характеристик ВТ, ЗП та висоти виступу у внутрішній порожнині ВТ.

В п'ятому розділі розроблено рекомендації, які необхідно враховувати під час вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою методом змінного перепаду тиску, а саме:

- удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірювання витрати:

$$u'_q = \sqrt{u'^2_{o_q} + u'^2_c + u'^2_{K_{ш}} + u'^2_{K_n} + u'^2_d + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 u'^2_D + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 u'^2_d + u'^2_\varepsilon + 0,25(u'^2_{\rho_c} + u'^2_K)}, \quad (18)$$

а також коефіцієнта витікання для стандартної діафрагми:

$$u'_c = 0,5 \cdot (U'_{C_0} + U'_L + U'_l + U'_{e_x} + U'_h + U'_{h_B}) \quad (19)$$

шляхом введення додаткових складових невизначеностей, які виникають внаслідок впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу (ВТ) U'_{h_B} , а також внаслідок наявності нестационарного потоку u'_d .

- рекомендації, які дозволяють усунути причину виникнення явища резонансу в пневматичному каналі ПТ (ППТ).

Розроблені рекомендації, а також залежності (18) та (19) дають можливість виконати метрологічне підтвердження результатів вимірювання витрати потоків із змінною газодинамічною структурою за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску, а, отже, розширити область застосування витратомірів змінного перепаду тиску.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА 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 методику 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 методику 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 нестаціонарністю 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Ф. Матіко, Р. Федоришин, І. Костик, Я. Грень. Аналіз причин виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестаціонарного потоку // Вісник: Теплоенергетика. Інженерія доквілля. 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 нестаціонарного 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.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

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 (ПРТК-2020)» – Київ, 19 - 20 травня 2020 р. - С.104.

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.

АННОТАЦИЯ

Костик И.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.