

5.3 Analysis of influence of constructive features of pipeline on measurement result of flow rate by means of pressure differential devices

Вимірювання витрати природного газу у газотранспортних підприємствах України здійснюють за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску на основі стандартних звужувальних пристроїв. Необхідною умовою досягнення високої точності обліку природного газу за допомогою цих витратомірів є наявність їх якісного нормативного забезпечення [204, 205].

Оскільки до газотранспортної системи України входять магістральні газопроводи, якими природний газ транспортують до європейських держав, то нормативні документи нашої держави щодо обліку природного газу повинні бути гармонізовані із нормативними документами цих держав. Враховуючи вказані вимоги, а також з метою усунення цілого ряду недоліків старих документів щодо вимірювання витрати та кількості плинних середовищ, за участю Національного університету “Львівська політехніка” у 2005 році розроблено комплекс міждержавних стандартів ГОСТ 8.586.1-5:2005. Вказані стандарти введені в дію і чинні в Україні з 1 квітня 2010 р. наказом Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики № 486 від 30.12.2009, як Національні стандарти ДСТУ ГОСТ 8.586.1–5:2009 «Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв» [206-210].

Розроблені стандарти базуються на міжнародних стандартах ISO 5167:2003 [211-215], вони максимально наближені до цих стандартів, а відмінності полягають лише у розширенні застосування методу вимірювання, зокрема, для вітчизняних умов застосування. Повне впровадження стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1–5:2009 дає можливість підвищити точність обліку природного газу та зменшити наявні в газотранспортних та газорозподільних мережах дисбаланси об’єму газу. Однак залишається недослідженим вплив відхилень окремих геометричних характеристик трубопроводів і витратомірів від значень, що визначені вимогами ДСТУ ГОСТ 8.586.1–5:2009. Отже, актуальним є виконання досліджень щодо визначення впливу геометричних характеристик

вимірювальних трубопроводів і діафрагм на вимірюване значення витрати та об'єму газу. Зокрема, потрібно виконати дослідження впливу конструктивних особливостей трубопроводу на вимірюване значення витрати, а саме виступів, заглиблень, прокладок та конусних секцій трубопроводу.

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 вимірювального трубопроводу (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 в [215] 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 [216] якісно розглянуто ефекти, що виникають у випадку, коли внутрішній діаметр з'єднувального кільця або прокладок менший від діаметра труби. За умови що такі елементи розміщені на ділянці ВТ до звужуючого пристрою (ЗП), 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 трубопроводу перед ЗП.

Вивченню впливу виступів та виїмок у порожнину трубопроводу присвячена робота [217]. Виїмки або виступи поблизу місця встановлення діафрагми можуть виникати тоді, коли діафрагма та пов'язане з нею обладнання монтують за допомогою з'єднувачів кільцевого типу, які використовують для експлуатації при високому тиску, внаслідок невідповідності внутрішнього

діаметру фланців і труби, внаслідок застосування ущільнюючих кілець на певних типах арматури, діафрагми тощо.

Виїмку зазвичай не вважають впливовим фактором, який формує суттєві збурення потоку [217]. Навпаки, наявність виступів у внутрішній порожнині трубопроводу можуть бути причиною суттєвих похибок вимірювання витрати.

Сучасні стандарти [206-211, 212-214] не мають чітких вказівок про допустимі виїмки або виступи. І американські [218, 219], і міжнародні [212-214] норми вказують, що слід застосовувати прокладки, внутрішній діаметр яких рівний внутрішньому діаметру трубопроводу D , або більший від нього (прокладка розташована на рівні поверхні ВТ або нижче від неї). Стандарти США [218, 219] дозволяють деяку виїмку в безпосередній близькості від діафрагми для обох фланців і ділянок труб (на відстані $2,5D$ вгору за течією, та $8D$ вниз за течією). Виїмка менше 6,4 мм (1/4 дюйма) дозволена для всіх значень відносного діаметра отвору діафрагми $\beta = d/D$ (де d – діаметр отвору звужувального пристрою в умовах експлуатації). 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 [212], а відповідно і національний стандарт [207], містять вимоги стосовно діаметра та ширини камери усереднення для діафрагм 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 діафрагми). Однак немає жодної інформації щодо діафрагм з фланцевим способом відбору тиску.

Відповідно в роботі [217] 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 діафрагми, в безпосередній близькості після діафрагми, на відстані двох діаметрів до діафрагми (вище за потоком), на відстані двох діаметрів після діафрагми (нижче за потоком).

За результатами досліджень, викладених в [217], зроблено такі висновки:

1. У трьох з вивчених інсталяцій, наявність виступу викликало збільшення коефіцієнта витікання C_d . Це значення збільшувалось як із зростанням висоти виступу, так і зростанням β . Єдиний виняток становлять виступи на відстані $2D$ нижче за течією, де не було виявлено ніякого ефекту.

2. Виступи на відстані $2D$ перед діафрагмою можуть мати істотний вплив на коефіцієнт витікання C_d . Варіація похибки аналогічна випадку із виступами безпосередньо перед діафрагмою, однак, величини менші. Наприклад, значення похибки C_d 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.

3. Як і очікувалося, виступи безпосередньо перед діафрагмою викликають найбільш значні відхилення коефіцієнта витікання C_d 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 вище, ніж $1,6\%$ при висоті виступу рівному $12,5\%D$. 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_d 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. Отже, 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 діафрагми мали набагато менший ефект, ніж виступи перед нею. 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 $6,25\%D$ і але значення відхилення коефіцієнта витікання вищі 5% були отримані з виступом $12,5\%D$. На підставі даних [217] можна зробити висновок, що виступ повинен бути нижче $3\%D$, щоб досягати відхилення в межах

відтворюваності даних для цього β .

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

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

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

- для $\beta=0,7$ отримано відхилення коефіцієнта витікання $0,32\%$ 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 меншої виїмки, ці результати вимагають перевірки.

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

8. Безпосередньо після діафрагми, виїмки до $6,25\%D$ не роблять жодного впливу на коефіцієнт витікання для всіх значень відносного діаметра діафрагми, 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 діафрагми не виявлено ніякого впливу на коефіцієнт витікання для всіх β .

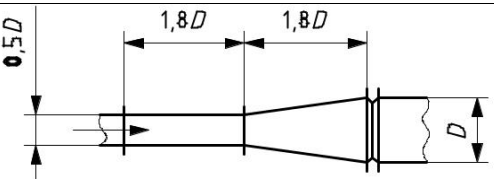
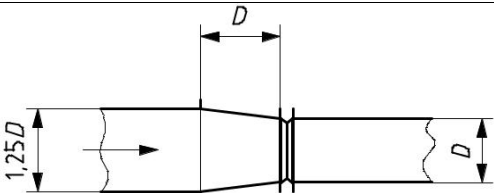
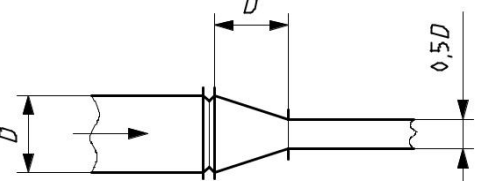
Для дослідження впливу конусних секцій ВТ на значення витрати проаналізовано стандарти ДСТУ ГОСТ 8.586:1-5:2009 [207-209], в яких визначено мінімальні довжини прямолінійних ділянок ВТ між місцевими опорами та ЗП для різних типів місцевих опорів. Зокрема, встановлено вимоги щодо розміщення різких звужень або розширень потоку, конфузоров чи дифузоров.

В ISO/TR 12767:2007 [216] наведено деякі результати досліджень зміни коефіцієнта витікання діафрагми в умовах, коли розміщення конусних секцій ВТ

не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586:1-5:2009 [207]. Згідно з [216], 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).

Таблиця 1

Вплив конусних секцій на коефіцієнт витікання діафрагми [216]

Положення діафрагми	β	Очікувана зміна коефіцієнта витікання, %
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 табл. 1 видно, що безпосередньо перед діафрагмою не рекомендують застосовувати конусну секцію ВТ, яка розширюється в напрямку потоку, оскільки 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, призводить до зміни коефіцієнта

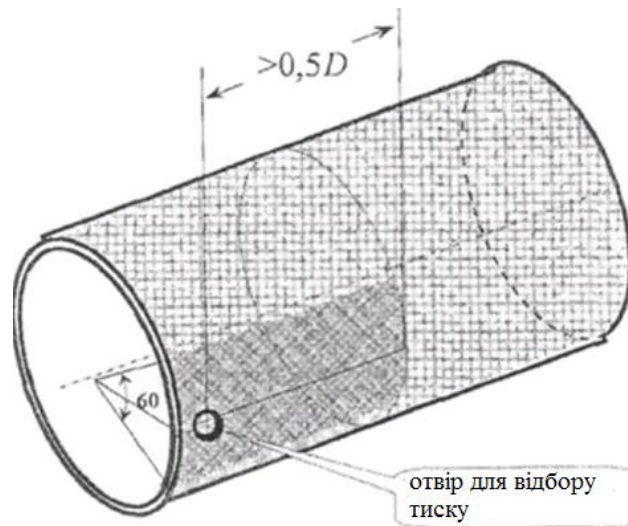
витікання, як правило, менш ніж на 2%.

Для дослідження впливу зварних швів, що виступають у внутрішню порожнину ВТ на вимірюване значення витрати, проаналізовано стандарт ISO/TR 12767:2007 [216], в якому 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 відповідно до [215, 216] зварна труба може бути використана, за умови, що внутрішній зварний шов паралельний осі труби по всій довжині ВТ, необхідний 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 (рис.1). 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 [211] (ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [206]).

На малюнку 1 наведені зони розташування поздовжнього шва ВТ щодо окремого отвору для відбору тиску.



Малюнок. 1. Положення поздовжнього шва щодо окремого отвору для відбору тиску

Згідно з вимогами стандартів ISO 5167-1:2003 [211] (ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 [206]) у випадках застосування прямошовної труби або звареної конструкції ВТ, або приварки фланців встик до трубопроводу, необхідно на ділянці $2D$ перед ЗП шов зачистити. Крім того, слід виміряти внутрішній діаметр трубопроводу в перетині розташування шва і переконатися, що його величина не відрізняється більше, ніж на 0,3% від значення діаметра D розрахованого відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.2-4 (пункт 6.4.2) [207-209].

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.

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 (див. ДСТУ ГОСТ 8.586.2 – ДСТУ ГОСТ 8.586.4 (пункт 6.4.3)) [207-209].

За результатами аналізу науково-технічної літератури, присвяченої питанням впливу конструктивних особливостей трубопроводів на похибку

вимірювання витрати, встановлено, що такий вплив може бути суттєвим та може призводити до виникнення додаткових похибок. Зокрема, багатьма науково-дослідними роботами підтверджено, що заглиблення (концентричні щілини) на ділянці ВТ довжиною $2D$ до, перед та за діафрагмою не є впливовим фактором, який формує суттєві збурення потоку. Навпаки, наявність виступів у внутрішній порожнині трубопроводу можуть бути причиною суттєвих похибок вимірювання витрати.

Виступи на відстані $2D$ перед діафрагмою можуть мати істотний вплив на її коефіцієнт витікання. Окремими роботами визначено межі висоти виступу, для яких зміна коефіцієнта витікання знаходиться в межах похибки повторюваності даних експериментальних досліджень.

Виступи безпосередньо перед діафрагмою 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 $1,0\%D$. Відхилення коефіцієнта витікання досягають значення $11,5\%$ при висоті виступу рівному $12,5\%D$. Для $\beta=0,7$ вплив виступів є ще більшим і їх слід уникати взагалі або забезпечувати висоту виступів 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, зокрема і експериментальних.