

**Прокопенко О.О.**

Українська інженерно-педагогічна академія

**Антоненко Н.С.**

Українська інженерно-педагогічна академія

**Гулей О.Б.**

Українська інженерно-педагогічна академія

## **ВИХРОВИЙ ВИТРАТОМІР ОБ'ЄМНИХ ТА МАСОВИХ ВИТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ**

*Статтю присвячено впровадженню перспективних вихрових методів вимірювання витрат природного газу газоперекачувальними агрегатами (ГПА). Ці вимірювання передбачені в обсязі штатної системи управління та контролю ГПА, і вони мають відповідати високим вимогам до сучасного магистрального транспорту газу.*

*В підґрунті дії таких витратомірів лежить взаємодія з потоком газу ланцюжків вихорів («доріжок» Кармана), частота утворення яких є прямо пропорційною швидкості потоку. У статті описано фізичні механізми вихроутворення за тілом обтікання (турбулізатором) в потоці газу.*

*Але загальними недоліками для таких вимірювальних засобів є вузький частотний діапазон корисного сигналу, наявність збурень у вигляді вібрації зовнішнього корпусу та коливань у потоці газу, створених компресором та іншими елементами ГПА. Також для оцінки масової витрати газу необхідно визначити його щільність, що є самостійним метрологічним завданням.*

*За результатами літературного пошуку в статті представлено комбінований витратомір газу (об'ємний та масовий), в якому на апаратному та алгоритмічному рівнях вирішено задачу підвищення метрологічних характеристик вимірювальної системи, утвореної турбулізатором, датчиками вихроутворення, вимірювальною ділянкою корпусу газопроводу та елементом потоку газу, обмеженим цією ділянкою.*

*В свою чергу, для оцінки щільності газу в конструкції вимірювальної ділянки встановлено джерело ударно-імпульсного навантаження, що виконане у вигляді стрижня електромагніту, на обмотку якого подають посилений сигнал з виходу датчика частоти вихроутворення. Стрижень створює амплітудно-модульовану послідовність прямокутних механічних ударних імпульсів, частота проходження яких дорівнює частоті зриву вихорів, і удари якого викликають вібрацію корпусу витратоміру. Автоколивання цього корпусу оцінюють за допомогою спектрального аналізу сигналу п'єзоелектричного датчика вібрації. Частоти автоколивань, в свою чергу, залежать від щільності газу. Все це дозволяє більш точно оцінити частоту вихроутворення, власну частоту коливань корпусу та щільність газу, що підвищує точність вимірювання об'ємної та масової витрат газу.*

*За рахунок керованої взаємодії зазначеними елементами у цифровому блоці обробки сигналів, забезпечено задовільні метрологічні характеристики витратоміра, що підтверджують результати його практичних випробувань.*

**Ключові слова:** вихровий витратомір, турбулізатор, вихрова доріжка Кармана, датчик вібрації, частота, імпульс, резонанс, витрати, природний газ.

**Постановка проблеми.** Стандартне та поширене вимірювання витрат природного газу за рахунок використання дросельних шайб, на компресорних станціях (КС) не завжди забезпечує метрологічні характеристики вимірювань витрат обсягів газу, які є потрібними для роботи ГПА. Необхідність створення та впровадження в енергетичній галузі вітчизняних витратомірів природного газу, які відповідають умовам сучасного

виробництва, обумовлює актуальність [1, 2] розробки методів, що зможуть забезпечити вимоги до їх характеристик та якості роботи.

Фізичні принципи, особливості конструкції та сфери застосування витратомірів докладно обговорено у сучасній науково-технічній літературі [1–5]. Аналіз витратомірів технологічного середовища показує, що перспективними є такі, що використовують ефект «доріжки» Кармана (названо на честь

її відкривача). В підґрунті дії таких витратомірів лежить взаємодія ланцюжків вихорів, які утворюються під час обтікання потоком речовини нерухомого твердого тіла. Пульсацію тиску вихорів уловлюють сенсорами, частота їх утворення є прямо пропорційною швидкості потоку. Функціональну схему такого вимірювання показано на рис. 1.

За малими числами  $Re < 30$  обтікання такого тіла відбувається з утворенням стаціонарної замкнутої зривної зони (сліду) у його кормовій частині. При збільшенні числа  $Re$  по ходу сліду потік рідини стає нестійким, що призводить до руйнування зривної зони та відриву завихрених елементів (вихорів) по черзі то праворуч, то ліворуч.

Вихори захоплюються потоком за течією і протягом деякого часу зберігають свою форму. В потоці їх розташовано у шаховому порядку у вигляді двох ланцюжків (рядків) за тілом (див. рис. 1).

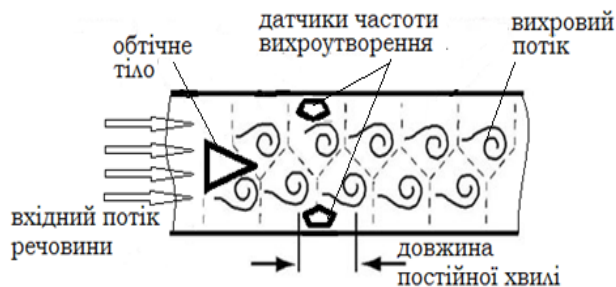


Рис. 1. Функціональна схема вимірювання частоти хвиль вихорів, що створюють доріжку Кармана в потоці речовини

Ці рядки формують доріжку Кармана за обтічним об'єктом, поки повільно не зникають в потоці внаслідок дисипації енергії за рахунок тертя. Самі вихори обертаються в протилежних напрямках, та рухаються зі швидкістю  $U$ , яка є меншою від швидкості потоку  $W$ . В реальних умовах вихрова доріжка стабільно існує в діапазоні чисел  $Re$  від 30 до 300.

Таким чином, оцінка витрат потоку речовини вихровими датчиками ґрунтована на визначенні частоти вихрових хвиль. Такі витратоміри мають ряд суттєвих переваг перед іншими варіантами [2].

Це, перш за все, висока точність, широкий діапазон вимірювання, мала залежність показань від впливу в'язкості, щільності і температури вимірюваного середовища, простота конструкції і висока надійність роботи, можливість вимірювання витрати як рідких, так і газоподібних середовищ. Також вихрові витратоміри мають лінійні характеристики перетворення, що є справедливими для швидкостей потоку в діапазоні від 2 м/с до 40 м/с.

До недоліків вихрових витратомірів можна віднести, перш за все, вплив коливань (акустичні та

вібраційні пульсації), характерних для ГПА КС природного газу: корпусу трубопроводів, турбін, компресорів, насосів, пристроїв систем автоматики та інших. Цей вплив спотворює результати вимірів витрати незалежно від вибору методу вимірювань та характеристик речовини, що перекачують. Також, ці витратоміри мають відносно високу інерційність, яка є властивою для електромеханічних систем взагалі. Застосування вихрових витратомірів обмежено трубопроводами, що мають діаметр від 25 мм до 300 мм, також їм притаманна порівняно велика втрата тиску – від 30 кПа до 50 кПа.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розглянемо приклади сучасних витратомірів для контролю об'ємних та масових витрат рідини та газу, заснованих на ефекті «доріжки Кармана».

Так, в роботі [7] для оцінки витрати потоку рідини використано вихровий витратомір, в якому встановлено протяжний плоский генератор вихорів Кармана (турбулізатор) з трапецієподібним поперечним перерізом і поздовжньою віссю, що є перпендикулярною до напрямку потоку. Інтенсивність вихроутворення визначають відповідним датчиком вібрації, встановленим в потоці нижче турбулізатора. Також виконують вимірювання вібрації трубопроводу датчиком вібрації, розташованим на зовнішній його поверхні відповідно до розташування датчика вихроутворення.

Відповідно до вимірювальної схеми, негативний вплив вібрації трубопроводу на результат вимірювання витрати знижується за рахунок включення вихідних сигналів датчика вихроутворення та датчика вібрації на вхід диференціального підсилювача. Вихідний сигнал цього підсилювача подають на вхід блоку перетворення та обробки сигналів. Фур'є-аналіз результатів цього перетворення використовують для розрахунку частоти вихроутворення, швидкості потоку і, відповідно, об'ємної витрати перекачуваної рідини.

Недоліком розглянутого витратоміру є вузький діапазон зміни частоти корисного сигналу, який не завжди забезпечує необхідну точність вимірювань. Самостійним завданням є контроль характеристик вібрації вимірювальної ділянки витратоміра. Також можливі похибки внаслідок збігу частоти вільних коливань турбулізатора з власною частотою цієї ділянки. Пристрій дозволяє обчислити тільки об'ємну витрату потоку.

В іншому прикладі [8] задачу підвищення точності вихрового витратоміру вирішують за рахунок виконання стрижньових елементів турбулізатора з поперечним перерізом у вигляді трикутного, трапецієдального і сегментного профілів. Ці еле-

менти встановлюють вздовж потоку газу. Принципова схема розміщення турбулізатора і датчика вібрації відповідає наведеній у [7]. За результатами вимірювання частот вихроутворення для всіх турбулізаторів після перетворення та обробки сигналів на персональному комп'ютері (ПК) оцінюють витрати газу. Такі витратоміри призначені для труб діаметром від 50 мм до 300 мм. Похибка виміру становить від 0,5 % до 2 %.

Недоліком пристрою є виникнення через складності конструкції турбулізатора декількох резонансних частот, що потребує додаткового аналізу. Отримання сигналу в резонансі є утрудненим і не дає можливості забезпечити необхідну точність виміру витрати газу. Самостійним завданням є контроль характеристик вібрації вимірювальної ділянки витратоміра. Пристрій дозволяє обчислити тільки об'ємні витрати потоку.

З урахуванням потреби забезпечення якості первинного сигналу при контролі потоків газу необхідно, на наш погляд, розглянути метод оцінки щільності потоку природного газу, наведений в [9]. Позитивний результат у цьому випадку досягнуто за рахунок використання диференціального датчика щільності, що містить два здвоєні камертони із збудниками, встановленими між гілками камертонів. Знімання сигналів коливання гілок здійснюють вібродатчиками з передачею сигналу до змішувача частот і пристрою обробки інформації на ПК. Для збудження автоколивань камертона використовують магнітокеровані контакти. В свою чергу, власна частота електро-механічної системи камертону залежить і від щільності потоку, яка пов'язує частоту коливань у потоці з його щільністю. Основна похибка відомих на ринку щільномірів газу такого типу починається від  $\pm 0,1$  % відносної похибки (але є меншою від абсолютної похибки  $\pm 0,0015$  кг/м<sup>3</sup>), що є досить високим показником [10]. Недоліком розглянутого щільноміру є відсутність обліку вібрації трубопроводу, що збурює результати вимірювань. Також пристрій не дозволяє обчислити масову та об'ємну витрати потоку.

**Постановка завдання.** За результатами літературного огляду сформульовано базові вимоги до витратоміру газового потоку. Це дає змогу запропонувати створений та досліджений на практиці комбінований витратомір об'ємних та масових витрат газу, в якому в одній конструкції поєднано функції вихрового витратоміру і вібраційного щільноміру [2].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Наведемо основні дані та положення, що опи-

сують дію комбінованого витратоміру, функціональну схему якого показано на рисунку 2.

У потоці газу встановлено лінійний турбулізатор із трикутним поперечним перерізом (поздовжня вісь є перпендикулярною потоку). Потік газу створює доріжку Кармана за турбулізатором, коливання тиску якої вимірюють електромагнітними датчиками. Сигнали датчиків після обробки в ПК поступають на перший електромагніт, сердечник якого здійснює коливання з частотою зриву вихорів. В свою чергу, коливання цього сердечника синхронно керують джерелом живлення електричного ланцюга, до якого підключено обмотку другого електромагніту. Таким чином, сердечник другого електромагніту рухається синхронно сердечнику першого електромагніту, а той, в свою чергу, – синхронно пульсаціям тиску газу.

Сердечник другого електромагніту створює послідовність прямокутних механічних ударних імпульсів, частота проходження яких дорівнює частоті зриву вихорів, і яка збуджує автоколивання корпусу витратоміру.

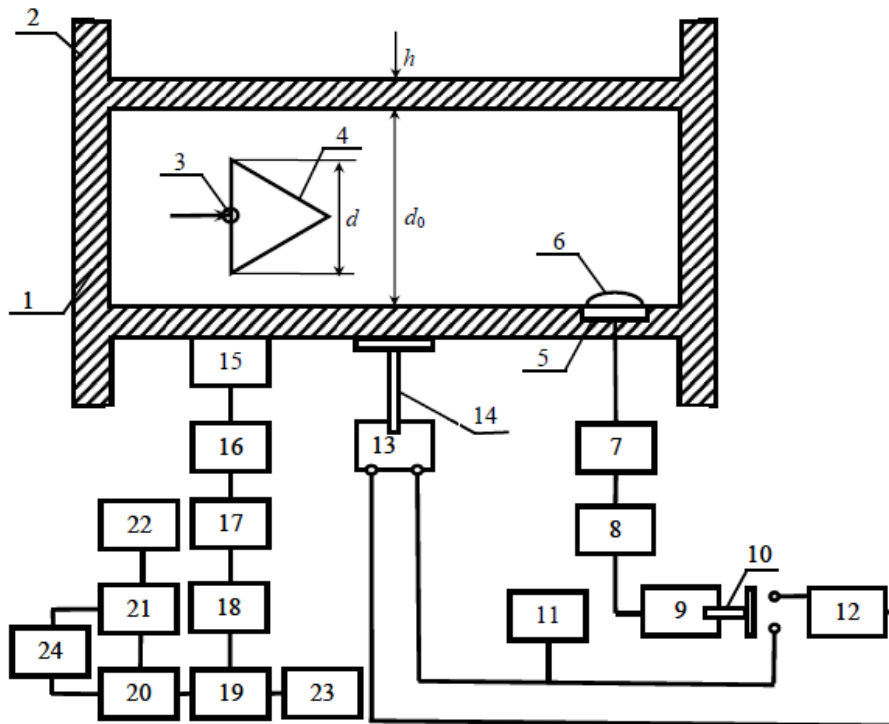
Характеристики цих автоколивань фіксують п'єзоакселерометром з подальшим спектральним аналізом вібрації корпусу, це дозволяє за наявності резонансу більш точно виділити частоту вихроутворення і власну частоту коливань корпусу і підвищує точність вимірювання витрати газу.

При цьому частота вихроутворення є однозначно пов'язаною зі швидкістю потоку і, відповідно, з об'ємною витратою газу.

Розглянемо більш детально роботу цього витратоміру (див. рис. 2). Витратомір містить корпус 1 з фланцями 2 для жорсткого закріплення на газових трубах. У середині корпусу 1 на вертикальній осі 3 закріплено турбулізатор 4 у вигляді вертикальної призми, від якого на відстані величини зони вихроутворення розташовано електромагнітний датчик 5 з мембраною 6, що має власну частоту у діапазоні можливих резонансних частот корисного акустичного сигналу.

Всі електронні пристрої вимірювальної схеми з'єднані через підсилювач заряду 7, смуговий фільтр нижніх частот 8 і плату АЦП 18 з ПК 19. В свою чергу, датчик 5 через елементи 7 і 8 сполучено з обмоткою електромагніту 9.

Сердечник 10 електромагніту 9 здійснює механічні коливання з частотою  $f_s$  зриву вихорів у потоці турбулізатора та замикає і розмикає електричне коло 11, яке є сполученим з джерелом живлення 12 і обмоткою електромагніту 13. Сердечник 14 електромагніту 13 створює послідовність прямокутних механічних ударних імпульсів,



**Рис. 2. Схема функціональна комбінованого витратоміра:**

- 1 – корпус; 2 – фланці для закріплення; 3 – поворотна вертикальна ось;  
 4 – турбулізатор; 5 – електромагнітний датчик; 6 – мембрана; 7 – підсилювач заряду; 8 – фільтр нижніх частот; 9 – перший електромагніт; 10 – сердечник першого електромагніту; 11 – електричне коло; 12 – джерело живлення;  
 13 – другий електромагніт; 14 – управління сердечника другого електромагніту;  
 15 – п'єзоакселерометр; 16 – підсилювач заряду; 17 – фільтр верхніх частот;  
 18 – плата аналогово-цифрового перетворювача (АЦП);  
 19 – ПК; 20 – блок спектрального аналізу; 21 – блок виділення частоти зриву вихорів і власної частоти корпусу; 22 – блок обчислення витрат;  
 23, 24 – блоки ручного та автоматичного управління

частота проходження яких дорівнює частоті  $f_s$ , і які порушують автоколивання корпусу витратоміру на його власній частоті  $f_{кв}$ . Ця схема забезпечує амплітудно-імпульсну модуляцію власної частоти  $f_{кв}$  за частотою зриву вихорів  $f_s$ .

На корпусі 1 встановлено п'єзоакселерометр 15, який фіксує амплітуду автоколивань корпусу і генерує корисний інформативний сигнал. Цей сигнал піддають обробці в ланцюгу, утвореному підсилювачем заряду 16, смуговим фільтром верхніх частот 17, платою АЦП 18, і передають до ПК 19.

В свою чергу, ПК сполучено з блоком результатів спектрального аналізу 20, блоком виділення частоти зриву вихорів і власної частоти корпусу 21, а також блоком обчислення об'ємної і масової витрати 22. Витратомір містить пристрої ручного 23 і автоматичного 24 управління.

У ланцюгу, утвореному ПК із зазначеними елементами, з результуючого сигналу за програмою спектрального аналізу вібрації (на основі перетворення Фур'є) виділяють частоти зриву

вихорів турбулізатора і власної частоти коливань корпусу.

Відомо [2, 3, 6], що турбулізатори правильної геометричної форми поперечного перетину при обтіканні поперечним потоком газу піддаються дії аеродинамічних збурюючих сил, які виникають унаслідок утворення вихрової доріжки Кармана. Коли частота зриву вихорів є близькою до власної частоти механіко-акустичного каналу, який утворений всіма елементами, що входять до складу вимірювальної ділянки газопроводу (поверхня стінок каналу, турбулізатор, датчики, газ), відбувається резонанс коливань на частоті вихроутворення. Поблизу резонансу основної власної частоти коливань цього каналу процес зриву виявляється надзвичайно впорядкованим, вихори йдуть в подовжньому напрямі, а частота зриву «захоплюється» власною частотою турбулізатора, що приводить до його самозбудження, виникає складна нелінійна взаємодія між ними. Все це істотно посилює циркуляцію вихорів і підсос їх

до турбулізатора. При цьому значно зростають амплітуди коливань газу, що підвищує точність вимірів корисного сигналу первинними датчиками, а також суттєво зменшує вплив зовнішніх та внутрішніх збурень у широкому діапазоні частот.

Зрештою, сам процес вимірювання витрати базований на вимірі частоти вихроутворення, яка є пропорційною витраті (швидкості) газу. При роботі у лінійному діапазоні щільність і в'язкість середовища не впливає на цю частоту виникнення вихорів за тілом обтікання, впливає тільки швидкість потоку (об'ємна витрата). Область стійкого існування доріжки вихорів відповідає закону Кармана. За числом  $Re > 300$  це явище характеризує значення числа Струхалія ( $Sh$ ):

$$Sh = \frac{f_s d}{w} \approx 0,2; \quad (1)$$

де:  $f_s$  – частота зриву вихорів;  
 $d$  – діаметр поперечного перетину турбулізатору;  
 $w$  – швидкість потоку газу.

Частоту вихроутворення обчислюють з виразу (1). При постійному числі  $Sh$  лінійність характеристики перетворення частоти в швидкість зберігається при числах  $Re$  від  $2 \cdot 10^4$  до  $7 \cdot 10^6$ .

Використовуючи (1), отримаємо вираз для об'ємної витрати газу:

$$Q_w = \frac{\pi d_0 f_s d}{4 Sh}; \quad (2)$$

де:  $d_0$  – внутрішній діаметр корпусу витратоміру.

За умовою резонансу  $f_s = f_{кв}$  (власна частота корпусу), що забезпечує амплітудну модуляцію частоти вихроутворення  $f_s$  за амплітудою власних коливань корпусу. Спектр амплітудно-модульованого сигналу коливань корпусу витратоміру представлено на рисунку 3. Спектр містить набір комбінаційних частот  $f_{кв} \pm k f_s, (k = 1, 2, \dots)$  з огинаючою у формі резонансної кривої гармонійного осцилятора [4].

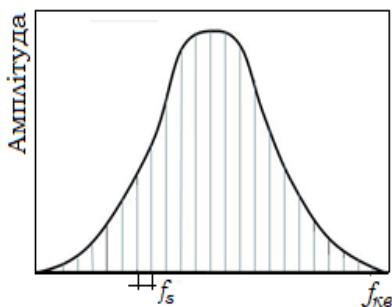


Рис. 3. Спектр амплітудно-імпульсної модуляції

Щільність газу,  $\alpha$ , отже, і масову витрату, визначають з формули, що пов'язує різницю частот  $\Delta f$

між власною частотою корпусу порожнього витратоміру і частотою корпусу витратоміру з газом зі щільністю газу:

$$\Delta f = f_{кпв} - f_{кпг} = f_{кпв} \cdot \alpha; \quad \alpha = m_r / 2 \cdot m_m, \quad (3)$$

де:  $f_{кпв}, f_{кпг}$  – власна частота порожнього корпусу витратоміру і корпусу з газом;  
 $m_m, m_r$  – маса порожнього корпусу і газу відповідно.

Для циліндрового корпусу заповненого природним газом з робочим тиском  $P$  відношення мас ( $\alpha$ ) дорівнює:

$$\alpha = \frac{\rho_{гн} \cdot d_0 \cdot P}{4 \cdot \rho_m \cdot h}, \quad (4)$$

де:  $\rho_{гн}, \rho_m$  – щільність газу (за нормальних умов) і матеріалу стінки витратоміру;  
 $h, d_0$  – товщина стінки і внутрішній діаметр корпусу (рисунок 2);  $P$  – тиск газу при подачі в ГПА на КС (відома величина).

Із співвідношень (3) і (4) отримаємо вираз для визначення щільності газу за нормальних умов і з робочим тиском  $P$ :

$$\left. \begin{aligned} \rho_{г.н.} &= \frac{4 \Delta \tilde{f} \rho_m h}{P d_0} \\ \rho_r &\cong \rho_{г.н.} \cdot P \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де:  $\Delta \tilde{f} = \frac{f_{кпв} - f_{кпг}}{f_{кпв}}$  – відносна частота.

Це дозволяє обчислити масову витрату  $Q_m$ :

$$Q_m = m_r \cdot Q_w. \quad (6)$$

Промислові випробування витратоміру проводилися на ГПА ГТК 10-2 (КС Дашава УМГ «Львівтрансгаз») для оцінки витрати паливного газу. Загальний вигляд змонтованого на ГПА витратоміру показано на рис. 4.

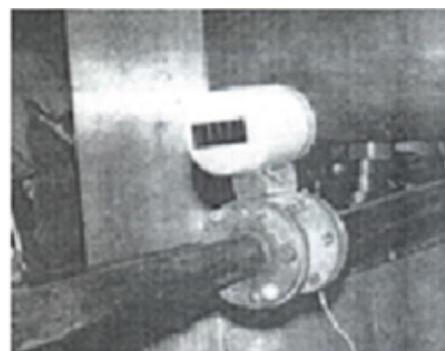


Рис. 4. Загальний вигляд витратоміру, змонтованого на газоперекачувальному агрегаті ГТК 10-2

При проведенні вимірювань витримували прямолінійність ділянки труби довжиною у десять її діаметрів. Внутрішній діаметр корпусу  $d_0 = 50$  мм, товщина  $h = 5$  мм. Поперечний переріз турбулі-

затору має вигляд трикутної призми, основа якої дорівнює 16 мм, а висота 8 мм.

Швидкість потоку газу при робочому тиску в трубі  $P \approx 1,8$  МПа забезпечувала чіткі спектральні викиди при зміні частоти зриву потоку доріжки Кармана в діапазоні від 300 Гц до 390 Гц. У всьому досліджуваному частотному діапазоні сторонні частотні викиди в спектрі пульсації тиску не спостерігалися, а були присутні в спектрі вібрації на корпусі витратоміра.

Середнє відношення мас газу до мас порожнього корпусу складало  $\alpha = 0,05$ , власна частота корпусу  $f_{\text{кпв}} = 15$  кГц. Такі дані забезпечували інформативну різницю частот  $\Delta f = 750$  Гц.

Сумарна похибка кола обчислення об'ємної витрати, отримана за методикою [11], стано-

вить  $\pm 0,7$  % з довірчою ймовірністю 0,95. Коло складається з електромагнітного датчика власної конструкції, плати АЦП і програми швидкого перетворення Фур'є віброакустичного сигналу на ПЕОМ. При контрольних вимірах за допомогою зразкових приладів похибка по витраті при одnorазовому вимірі становить: 2,8%.

**Висновки.** Результати вимірювання об'ємної витрати і масової витрати потоку паливного газу запропонованим комбінованим витратоміром узгоджуються з даними прямого, спеціально організованого і метрологічно забезпеченого вимірювання витрат за перепадами тиску на витратомірній шайбі. Рівень похибки одnorазового вимірювання об'ємних та масових витрат природного газу на КС відповідає галузевим нормативним вимогам.

#### Список літератури:

1. Риболини Е.Е. Вихревой расходомер // *Метрология и измерительная техника*. 1988, № 9. С. 60–65.
2. Вихровий витратомір природного газу: пат. 100483 Україна : МКІ G 01 F 1/32 заявл. 18.02.15; опубл. 27.07.15. Бюл. № 14. 4 с.
3. Силин М. Д. Использование метода дорожки Кармана для создания вихревых расходомеров жидкости и газа: дис. ... канд. техн. наук: 15.13.01, 15.13.05. М., 2006. 26 с.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. М.: Машиностроение, 1989. С. 440–443.
5. Лапин А.П., Дружков А.М., Кузнецова К.В. Вихревой метод измерения расхода: история вопроса и направления исследований. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2014. Т. 14. № 3. С. 19–27.
6. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение. 1987. 284 с.
7. Метод вимірювання витрати вихровим витратоміром Кармана та вихровий витратомір Кармана : пат. 204536 Японія : МКІ G01F 1/32; заявл. 29.05.20; опубл. 03.12.20.
8. Вихровий витратомір. пат. 14793 Україна : МКІ G01F1/32, опубл. 30.06.97. Бюл. № 14. 4 с.
9. А. с. СССР № 1392451 МКІ G01N 9/00. Дифференциальный вибрационный плотномер / Ю.К. Тараненко, В.И. Снегур, М.В. Кулаков, И.В. Кораблёв; заявл. 10.06.85; опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.
10. Вихревые расходомеры. *Разработка и производство расходомеров, измерительных систем, поверочного оборудования ООО Прамень* : веб-сайт. URL : [http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/43-hydrodynamic-methods/10-vortex-flowmeters?jsn\\_setmobile=no](http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/43-hydrodynamic-methods/10-vortex-flowmeters?jsn_setmobile=no) (дата звернення 14.12.2022)
11. Самойлович Г.С., Яблоков Л.Д., Измерение периодически пульсирующих потоков в турбомашинах обычными пневмометрическими зондами. *Теплотехника*. 1970. № 9. С. 70-73.

#### **Prokopenko O.O., Antonenko N.S., Huley O.B. VORTEX FLOW METER OF VOLUMETRIC AND MASS FLOW RATES OF NATURAL GAS OF THE GAS COMPRESSOR UNIT AT THE COMPRESSOR STATION**

*The article is devoted to the implementation of vortex methods in measuring the flow of natural gas by gas compressor units (GCU). The article presents an analysis of the physical mechanisms of vortex formation by the flow body in the gas flow and shows the principle of operation of the vortex flowmeter. Conducted literature search and analysis of known engineering solutions, examples of implemented vortex flowmeters are discussed and the task of improving their metrological characteristics and reliability of operation is grounded. A variant of a combined gas flowmeter (volumetric and mass) has been presented, in which the problem of improving the metrological characteristics of the measuring system formed by the flow body, vortex formation sensors, gas flow and the section of the gas pipeline body is solved at the apparatus level. To estimate gas density, a source of shock-impulse load is installed in the design of the measuring section. The source is made in the form of an electromagnet rod, the winding of which is supplied with an amplified signal from the output of the vortex formation frequency sensor. The rod creates an amplitude-modulated sequence of rectangular mechanical shock pulses. The frequency of passage of pulses is equal to the frequency of disruption of vortices. Impacts*

*of the rod cause vibration of the flow meter body. The self-oscillations of this body are evaluated using the spectral analysis of the piezoelectric vibration sensor signal. All this makes it possible to more accurately estimate the frequency of vortex formation, the natural frequency of oscillations of the body and the gas density. The accuracy of measurement of volume and mass flow of gas increases. Due to the controlled interaction of these elements, the metrological characteristics of the system (sensitivity, primary signal power, resistance to external disturbances) have been improved. The results of practical tests of the flowmeter have been presented, confirming the improvement of its metrological characteristics.*

**Key words:** *vortex flow meter; turbulizer; Karman vortex track, vibration sensor; frequency, natural gas, resonance, flow rate.*