Новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ

© **Й.Й. Білинський**
д-р техн. наук
М.В. Гладишевський
MGLadyshevskyi@naftogaz.com
Метрологічний центр Національної акціонерної компанії «Нафтогаз України»

УДК 681.121:621.643.8

Проведено дослідження математичної моделі поширення ультразвукових хвиль у плинному середовищі та на її основі запропоновано новий амплітудно-частотний метод вимірювання, що базується на використанні ближньої зони ультразвукового перетворювача. Описано експериментальну установку та проведено експериментальні дослідження.
Ключові слова: ультразвук, амплітудно-частотний витратомір, ближня зона, лічильник, витрата.

Проведено исследование математической модели распространения ультразвуковых волн в текучей среде и на ее основе предложен новый амплитудно-частотный метод измерения, который базируется на использовании ближней зоны ультразвукового преобразователя. Описана экспериментальная установка и проведены экспериментальные исследования.
Ключевые слова: ультразвук, амплитудно-частотный расходомер, ближняя зона, счетчик, расход.

It is proposed a new amplitude frequency method for the measurement of flow speed based on the use of ultrasonic transducer near zone, as well as a mathematical model of ultrasonic waves' distribution in fluid environments. We have conducted experimental research, which allowed to confirm the mathematical model's adequacy and effectiveness of the proposed method.
Key words: ultrasound, amplitude frequency flow meter, near zone, meter, flow rate.

Через стрімке зростання цін на різні види енергоносіїв важливим завданням сьогодення є високоточний контроль витрат рідких і газоподібних середовищ.

Існує велика кількість витратомірів, які використовують для комерційного і технологічного контролю потоків рідин, газу та пари. Широкого застосування на сьогодні отримали камерні, турбінні, вихрові, ротаційні, змінного перепаду тиску, ультразвукові витратоміри. Аналіз науково-технічної та патентованої літератури показує, що переважна більшість витратомірів має ряд спільних недоліків, до яких відносять низьку чутливість у момент спотворення потоку, достатньо велику зону нечутливості, високу чутливість до зміни геометрії вимірювальних перетворювачів, залежність від складу газового або рідинного середовища, високу вартість [1–4].

Останнім часом широкого застосування набувають ультразвукові витратоміри (УЗВ), які, незважаючи на очевидні переваги, мають також і свої недоліки [5].

За результатами аналізу сучасних УЗВ, їхніх конструктивних особливостей установлено, що переважна більшість лічильників, побудованих за різницевим принципом (вимірювання параметрів ультразвукової хвилі за та проти потоку), використовує часовий або часово-частотний метод вимірювання. Крім того, відомі лічильники, в основі роботи яких лежить ефект Доплера. Але найбільшого застосування набули часово-імпульсні УЗВ, основною перевагою яких є проста конструктивна реалізація, завдяки якій не спотворюються потоки рідини або газу. Але часовий метод вимірювання не завжди задовольняє поставлені вимоги й, незважаючи на очевидні переваги, має практично такі ж недоліки, про які було сказано вище. Окрім того, часово-імпульсні чи частотні витратоміри застосовують, як правило, для вимірювання витрат у трубопроводах великого діаметра. А в трубопроводах малого діаметра або в хордових каналах мають достатньо велику зону нечутливості [5].

Метою нашої роботи є розроблення нового ультразвукового методу вимірювання витрат плинних середовищ, який забезпечує нижчий поріг чутливості вимірювання швидкості плинних середовищ і може бути покладений в основу УЗВ для малого діаметра трубопроводів.

У роботі запропоновано ультразвуковий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку, який базується на використанні ближньої зони ультразвукового перетворювача, тобто на визначенні останнього дифракційного максимуму ближньої зони. Такий підхід дає можливість зменшити зону нечутливості і тим самим підвищити точність вимірювання.

Як зазначається в роботі [6], для акустичних хвиль, що поширюються в плинному середовищі, швидкість (швидкість звуку) викликана поширенням поздовжніх хвиль й представляється як зміна тиску в середовищі. Оскільки швидкість плинного середовища є набагато менша, ніж швидкість звуку в ньому, то

поширення акустичних хвиль описується як флуктуація тиску P від статичного тиску P_S (тиск без поширення акустичних хвиль). Зміна тиску в результаті поширення хвилі в точці визначається як тиск звуку:

$$p(x, t)=P - P_S. \quad (1)$$

Величина звукового тиску представлена як ефективний звуковий тиск:

$$P_в = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(t)dt}\,. \quad (2)$$

Акустичні хвилі, викликані змінами об'єму, описуються зміщенням d невеликого об'єму середовища в точці $x(x, y, z)$ у вигляді:

$$p = -K\nabla d, \quad \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right), \quad (3)$$

де $d=(\xi, \zeta, \eta)$ – вектор зміщення і K – об'ємний модуль пружності середовища. Підставивши це в рівняння Ейлера, яке є рівнянням руху для нев'язкої рідини, і використовуючи відношення $\partial(\nabla d)/\partial t = \nabla u$ (де u – вектор швидкості частинок рідини від поширення звукової хвилі), отримаємо:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\rho}\Delta p, \; \Delta = \nabla \cdot \nabla. \quad (4)$$

Це рівняння називається рівнянням хвилі і показує, що p поширюється зі швидкістю хвиль c:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (5)$$

Для одновимірних хвиль, що поширюються в напрямку x, рівняння (4) буде мати загальний вигляд:

$$p(x, t) = F(t - x/c) + G(t + x/c). \quad (6)$$

Перший і другий члени рівняння (6) представляють хвилі, що рухаються за потоком та проти потоку відповідно. Хвиля, що рухається за потоком з амплітудою A та початковою фазою φ_{0+}, представлена як:

$$p_+(x, t) = \mathrm{A}_+ \sin(2\pi ft - kx + \varphi_{0+}), \quad (7)$$

де f та k – це частота (кількість осциляцій на одиницю часу) та номер хвилі (кількість осциляцій на довжину одиниці). Залежність між f, k та c представлена як:

$$c = \frac{\omega}{k}. \quad (8)$$

Таким чином, $\varphi = \omega t - kx + \varphi_0$ називається фазою, і хвиля забезпечує таке ж значення для тієї ж фази навіть у різні моменти t та на позиціях x. Відстань поширення хвиль протягом одного циклу (T=1/f)

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}, \quad (9)$$

і називається довжиною хвилі.

Зміщення частинок рідини або газу в результаті поширення хвилі для одновимірних хвиль описується

$$\xi(x, t) = \xi(t - x/c), \quad (10)$$

швидкість частинок рідини визначається як:

$$u(x, t) = \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{d\xi}{d(t - x/c)}. \quad (11)$$

Тоді рівняння 1.3 для звукового тиску матиме вигляд:

$$p(x, t) = -K\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{K}{c}\frac{d\xi}{d(t - x/c)}. \quad (12)$$

Як і в попередньому рівнянні, звуковий тиск і швидкість частинок рідини або газу в точці завжди є в пропорційній залежності та однаковій фазі для одновимірних хвиль. Відношення тиску до швидкості частинок $Z=p/u$ називається акустичним імпедансом і визначається як:

$$Z = \frac{p}{u} = \rho c. \quad (13)$$

На рис.1 показано ультразвукову хвилю, сформовану періодичними осциляціями дископодібного

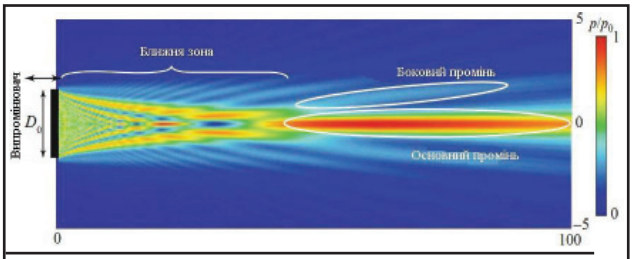

Рис. 1. Форма ультразвукової хвилі

випромінювача діаметром D_0, яка представлена в роботі [7]. Зображене поле звукового тиску є числовим відображенням рівняння хвилі (4). Акустичні хвилі, генеровані випромінювачем, розглядаються як група сферичних хвиль, генерованих численними джерелами звуку вздовж пластини. Поблизу випромінювача розташована так звана ближня зона, складне звукове поле формується в результаті інтерференції хвиль. Далі від випромінювача звуковий тиск поступово стає стабільним і створює променеподібний розподіл із більш високою направленою когеренцією; цей променеподібний розподіл звукового тиску називається основним променем. Віддалено від основного променя відповідно утворюються більш високі звукові тиски, так звані бокові промені.

Розподіл звукового тиску в ультразвуковому промені сформований випромінювачем уздовж центральної осі поширення ξ, наводиться як:

$$p / p_0 = 2\sin\left\{\frac{\pi}{\lambda}\left[\sqrt{(a^2) + \xi^2} - \xi\right]\right\}. \quad (14)$$

Рівняння показує, що зміна звукового тиску залежить від довжини хвилі λ та радіуса випромінювача a.

На рис. 2 показано зміну звукового тиску вздовж осі.

Рис. 2. Варіації звукового тиску на центральній осі ультразвукового променя

Звуковий тиск складно змінюється поблизу випромінювача та має багато екстремальних значень, але зміна стає монотонною після мінімальної точки $a^2/2\lambda$. Ця зона в ультразвуковій хвилі називається ближньою зоною, а зона далі цієї точки називається дальньою. Довжина ближньої [8] зони визначається так:

$$\lambda_{бл} = \frac{a^2}{\lambda}. \quad (15)$$

Із використанням пари ідентичних ультразвукових перетворювачів довжина ближньої зони подвоюється. Тоді $\xi_{бл} = \frac{2a^2}{\lambda}$.

Профіль швидкості потоку, який є предметом вимірювання, виражається як набір значень швидкостей у різних просторових положеннях у момент $V(x,t)$. Таким чином, швидкість потоку визнається як функція від частоти за умови знаходження максимального значення амплітуди ультразвукового сигналу, що відповідає останньому максимуму ближньої зони.

На рис. 3 показано схематичний принцип такого методу.

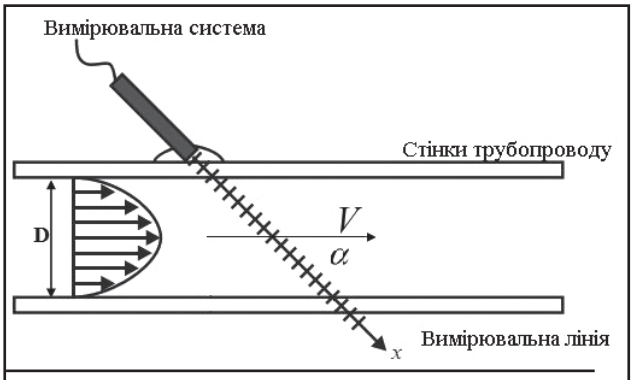

Рис. 3. Схема принципу вимірювання

У роботі [9] запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі.

Із урахуванням (9) та швидкості потоку довжина хвилі визначається так:

$$\lambda = \frac{(V_{узх} + V\cos\alpha)}{f}. \quad (16)$$

Довжина ближньої зони із використанням двох ідентичних перетворювачів на підставі (15) визначається як

$$\xi_{бл} = \frac{2a^2 f}{V_{узх} + V\cos\ \alpha}. \quad (17)$$

Частоту ультразвукової хвилі за потоком з урахуванням діаметра D трубопроводу, де $\xi_{бл} = D/\sin\alpha$, можна отримати як:

$$f = \frac{D(V_{узх} + V\cos\ \alpha)}{2a^2\sin\alpha}. \quad (18)$$

Тоді частота ультразвукової хвилі проти потоку визначається аналогічно

$$f = \frac{D(V_{узх} - V\cos\ \alpha)}{2a^2\sin\alpha}. \quad (19)$$

Рівняння (18) і (19) описують залежність частоти поширення ультразвукової хвилі від швидкості потоку. При цьому амплітудне значення ультразвукової хвилі, яке аналізується приймачем, повинно бути максимальним з метою дотримання умови ближньої зони.

Проведено моделювання отриманої залежності в середовищі MatLab. Вхідні параметри моделювання такі: α=60°, *f*=90–215 кГц, B=0,025м, $V_{узх}$=340 м/с, *V*=0–20 м/с, *a*=0,005 м.

На рис. 4, *а* та *б* показано результати моделювання.

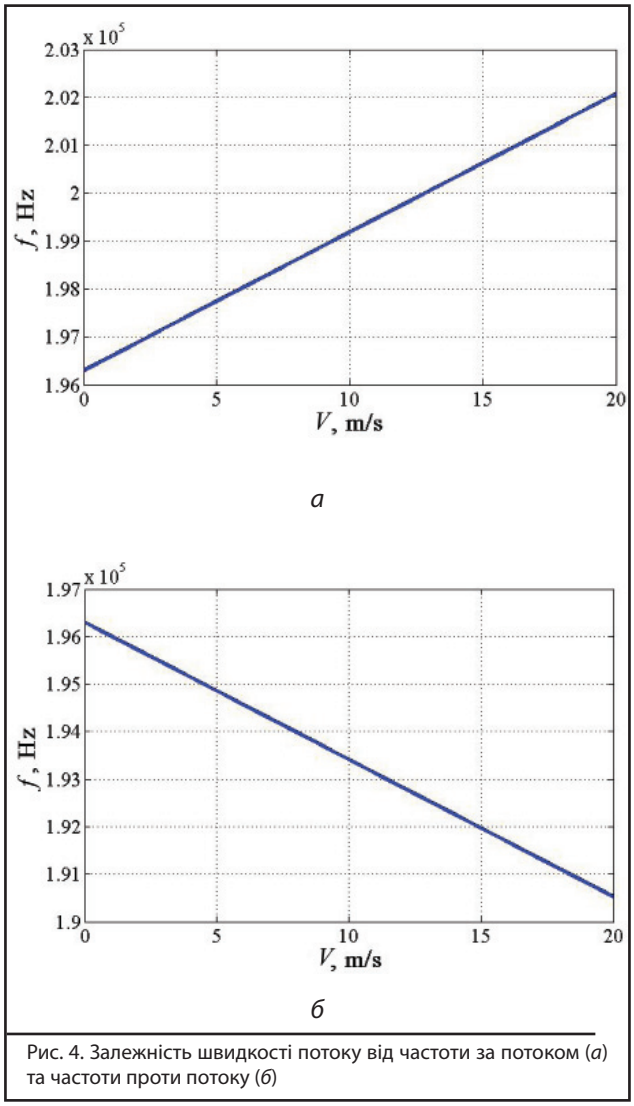

Рис. 4. Залежність швидкості потоку від частоти за потоком (*а*) та частоти проти потоку (*б*)

Із графіків видно, що залежність частоти ультразвукового сигналу від швидкості носить лінійний характер, чутливість методу досить висока й становить 280 $м^{-1}$.

Аналіз рівнянь (18) та (19) свідчить про високу чутливість такого підходу від стану плинного середовища, а отже, від швидкості $V_{узх}$ ультразвукової хвилі у цьому середовищі. Для усунення такої залежності доцільно використати різницеву схему. У такому варіанті залежність різниці частот за та проти потоку набуде вигляду:

$$\Delta f = \frac{DV}{a^2\,\mathrm{tg}\alpha}. \quad (20)$$

На рис. 5 показано залежність різниці частот ультразвукової хвилі за та проти потоку від швидкості потоку. Залежність носить лінійний характер, але при цьому практично вдвічі зростає чутливість.

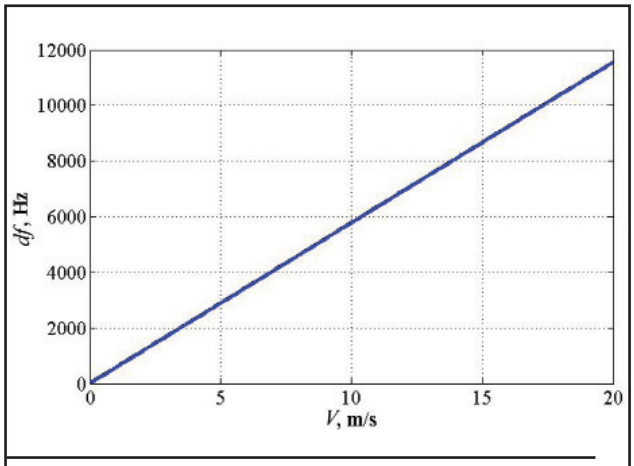

Рис. 5. Залежність різниці частот за та проти потоку від швидкості потоку

Для оцінки швидкодії запропонованого методу продиференціюємо рівняння (20) із урахуванням того, що $D/\sin\alpha = (V_{узх} + V)t$, й отримаємо:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\cos\alpha}{2a^2}\left(V\frac{D}{t\sin\alpha} + \frac{dV}{dt}\frac{D}{\sin\alpha} + \frac{dV}{dt}Vt\right). \quad (21)$$

На рис. 6 показано графік залежності зміни частоти ультразвукового сигналу від часу, за допомогою якого

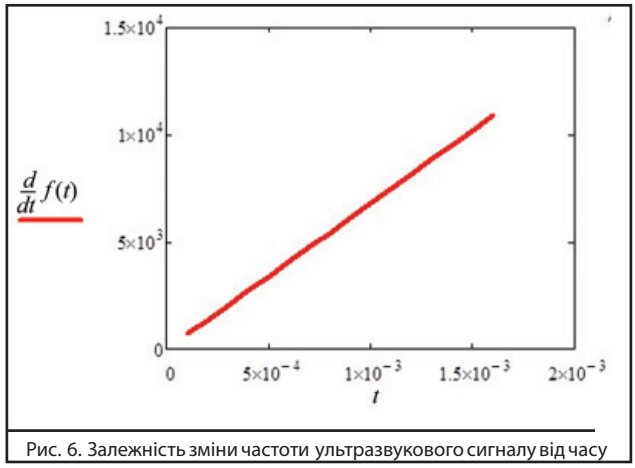

Рис. 6. Залежність зміни частоти ультразвукового сигналу від часу

можна зробити висновок про достатньо високу швидкодію, яка знаходиться в допустимих межах працездатності апаратних засобів вимірювання швидкості потоку.

На основі запропонованої моделі розроблено структурну схему вимірювача швидкості потоку [10], яку наведену на рис. 7.

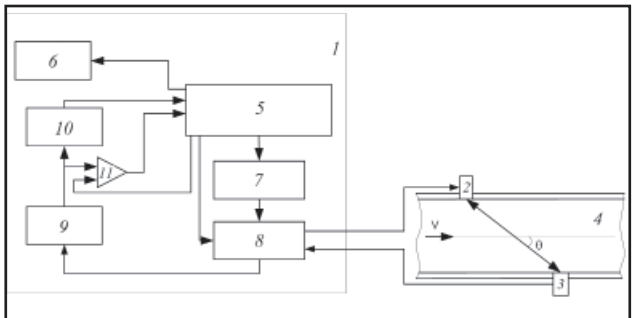

Рис. 7. Схема ультразвукового вимірювального перетворювача: *1* – блок обробки сигналів; *2* та *3* – електроакустичні перетворювачі; *4* – вимірювальна ділянка трубопроводу; *5* – контролер; *6* – індикатор; *7* – генератор змінної частоти; *8* – комутатор; *9* – підсилювач; *10* – АЦП та *11* – компаратор

Ультразвуковий вимірювач швидкості потоку рідких і/або газоподібних середовищ працює так. Ультразвукові коливання, які поширюються за потоком або проти потоку, виробляються і приймаються електроакустичними перетворювачами *2*, *3*. Частоту збудження їх забезпечує генератор змінної частоти *7*. Ці коливання аналізуються за амплітудою за допомогою компаратора *11* і реєструються пікові значення амплітуди за допомогою контролера *5* у заданий момент часу і попередній. Якщо швидкість потоку незмінна, генератор змінної частоти *7* налаштований на частоту, що відповідає останньому максимуму ультразвукової хвилі. Зі зміною швидкості потоку зменшується амплітуда вихідного сигналу, що призводить до переналаштування частоти генератора *7*.

Якщо частота ультразвукових хвиль досягає максимальної амплітуди, реєструється значення частоти, за якою і розраховують швидкість потоку, а отже, й витрату середовища, яке протікає по трубопроводу [11].

Таким чином, можна стверджувати, що запропонований метод вимірювання швидкості плинних середовищ має суттєві переваги порівняно з відомими, оскільки не використовує імпульсних сигналів, є менш інерційним і більш завадозахищеним унаслідок використання власної частоти п'єзоелементів.

Для підтвердження роботи запропонованого методу вимірювання швидкості плинних середовищ розроблено експериментальну установку, яку показано на рис. 8.

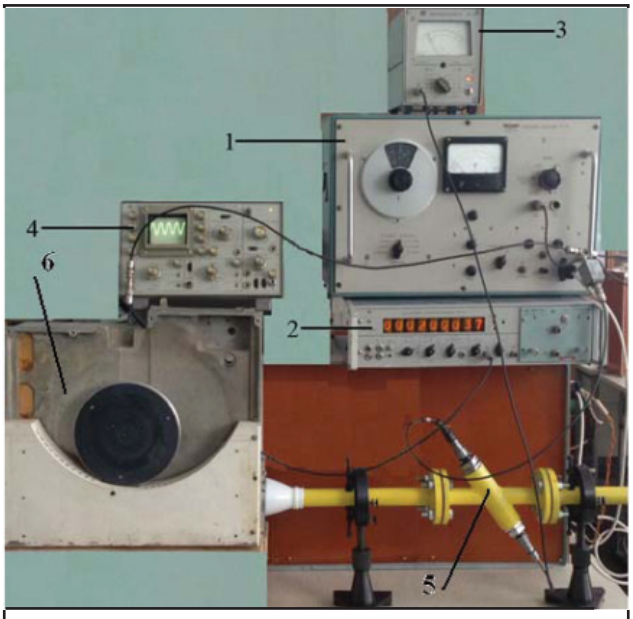

Рис. 8. Експериментальна установка дослідження вимірювального перетворювача швидкості потоку: *1* – генератор сигналів Г3–7А±2 %±2 Гц; *2* – частотомір електронний Ч3–34; *3* – мілівольтметр В3–38; *4* – осцилограф С1–55; *5* – УЗ вимірювальний перетворювач швидкості потоку; *6* – повітряний насос

Ультразвуковий перетворювач швидкості потоку *5* установки містить перетворювачі електроакустичні типу ПЭА-114 із основною резонансною частотою 200 кГц та можливістю роботи в діапазоні 190–210 кГц із питомою чутливістю на відстані 100 мм при атмосферному тиску 47,3 мкВ/В.

Дослідження проводили при температурі 20 °С та тиску 1 атмосфера. Ультразвукові перетворювачі були попередньо протестовані.

За відсутності потоку визначали частоту ультразвукових коливань за допомогою налаштування генератора сигналів *1* на певну частоту шляхом досягнення максимальної амплітуди сигналу приймача ультразвукових коливань, яку визначали за допомогою мілівольтметра *3*. Після цього вмикали повітряний насос *6* із відомим значенням швидкості потоку. При цьому амплітуда сигналу на виході перетворювача різко зменшувалася, що свідчило про невідповідність частоти ультразвукових коливань, що не відповідало умовам ближньої зони, тобто розмірам ближньої зони пари ультразвуковий передавач-приймач при цій швидкості потоку. Тому необхідно було виконати переналаштування генератора сигналів *1* на частоту, що відповідає умовам ближньої зони і, відповідно, швидкості потоку. Переналаштування відбувається до тих пір, поки амплітуда сигналу на виході перетворювача не стає знову максимальною. Таким чином визначали частоту ультразвукових коливань, що відповідала швидкості потоку.

Цей процес вимірювання частоти ультразвукових коливань повторювався з кожним кроком збільшення швидкості потоку до 20 м/с із дискретністю 0,5 м/с.

Результати порівнювали з даними засобу вимірювання швидкості Ротаметр РЭ-1ЖУЗ із похибкою вимірювання (±2,5 %).

Така методика досліджень дала змогу отримати експериментальну характеристику залежності частоти ультразвукових хвиль від швидкості потоку та підтвердити адекватність запропонованої математичної моделі. Збіжність результатів моделювання з експериментальними даними задовільна.

Висновки

У роботі запропоновано новий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку, оснований на використанні ближньої зони ультразвукового перетворювача. Запропоновано та досліджено математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі та новий ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ на її основі. Запропоновано структурну схему вимірювального перетворювача. Розроблено експериментальну установку та проведено експериментальні дослідження, які дали змогу підтвердити працездатність запропонованого методу та адекватність математичної моделі. Проведені експериментальні дослідження підтверджуються збіжністю отриманих результатів.

Список використаних джерел

1. **LICON** [Електронний ресурс]: Типы расходомеров. – Режим доступу: http://eclicon.ru/?page_id=1450. – Назва з екрану.
2. **Руководство** по эксплуатации 00809-0107-4860 [Електронний ресурс]: Расходомеры вихревые Rosemount 8600D. – Режим доступу: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0107-4860.pdf. – Назва з екрану.
3. **Золотаревский С. А.** Расходомеры: принципы работы и опыт эксплуатации. / С. А. Золотаревский // Энергоанализ и Энергоэффективность. – 2006. – № 4. – С. 11–17.
4. **ETS** [Електронний ресурс]: Основные принципы измерения расхода газа с помощью осредняющей напорной трубки. – Режим доступу: http://www.ets.inf.ua/PDF/Intra/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20ITABAR-%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B4.pdf. – Назва з екрану.
5. **Электротехинфо**. [Електронний ресурс]: Ультразвуковые расходомеры. Устройство, принцип действия, типы и виды ультразвуковых расходомеров. – Режим доступу: http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_529.html– Назва з екрану.
6. **Takeda Y.** Ultrasonic Doppler velocity profile for fluid flow. Fluid mechanics and its applications Volume 101. - Tokyo: Springer Japan, 2012.
7. **TakedaY.** (Onlineservice). Ultrasonic Doppler velocity profile for fluid flow. – Tokyo: Springer Japan, 2012.
8. **Крюков И.И.** О раз мере ближней зоны плоских ультразвуковых преобразователей, находящихся на одной оси // Акустический журнал. – 1995. – Том 41, №1. – С. 101–105.
9. **Білинський, Й.Й.** Розробка ультразвукового методу вимірювання швидкості плинних середовищ [Текст] / Й.Й. Білинський, М.В. Гладишевський // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 4. – С. 19–24.
10. **10. Пат. 99227** Україна МПК G0FB 1/00. Ультразвуковий витратомір/ Білинський Й.Й., Городецька О.С. Гладишевський М.В.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет – № U201413183; заявл.08.12.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10, 3 с.
11. **Пат. 98518** Україна МПК G0FB 1/00. Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ / Білинський Й.Й., Городецька О.С. Гладишевський М.В.; заявник і патентовласник – Вінницький національний технічний університет - № U201413183; заявл.08.12.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8, 5 с.