

УДК 621.317

Білинський Й.Й., Стасюк М.О., Керсов О.П.  
Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА НА ТОЧНІСТЬ ДОПЛЕРІВСЬКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА

**Білинський Й.Й., Стасюк М.О., Керсов О.П. Дослідження впливу температури середовища на точність доплерівського ультразвукового витратоміра.** Проаналізовано основні недоліки доплерівських витратомірів. Встановлено найбільш суттєві фактори, які впливають на точність вимірювання. Розраховано вплив температури середовища на величину доплерівського зсуву. Запропоновано метод підвищення точності доплерівського ультразвукового витратоміра.

**Ключові слова:** витратомір, ефект Доплера, доплерівський зсув, швидкість звуку в середовищі, температура середовища.

**Билинский Й.Й., Стасюк М.А., Керсов А.П. Исследование влияния температуры среды на точность доплеровского ультразвукового расходомера.** Проанализировано основные недостатки доплеровских расходомеров. Определены наиболее существенные факторы, которые влияют на точность измерений. Рассчитано влияние температуры среды на величину доплеровского сдвига. Предложено метод повышения точности доплеровского расходомера.

**Ключевые слова:** расходомер, эффект Доплера, доплеровский сдвиг, скорость звука в среде, температура среды.

**Bilynsky Y.Y., Stasiuk M.O., Kersov O.P. Investigation the influence of temperature of the medium on accuracy of Doppler ultrasonic flowmeter.** The basic disadvantages of Doppler flowmeters are analyzed. The most significant factors affecting measurement accuracy are defined. Temperature of the medium effect on the value of the Doppler shift is computed. A method of increasing the accuracy of the Doppler ultrasonic flowmeter is proposed.

**Keywords:** flowmeter, Doppler effect, Doppler shift, velocity of sound in the medium, temperature of the medium.

**Постановка наукової проблеми.** Енергозбереження, енергоефективність, оптимальне використання виробничих потужностей і природних ресурсів стали ключовими напрямками розвитку сучасного промислового підприємства. Максимально точне визначення витрати рідких і газоподібних середовищ є одним із головних способів підвищення енергоефективності. Відомі на сьогодні методи вимірювання витрат не є універсальними, кожен з них має свою область застосування.

Основною проблемою комерційних відносин при поставках плинних і газоподібних середовищ є дисбаланс, що виникає при фізичному обліку від постачальника до споживача. Загальними факторами, що визначають виникнення цього дисбалансу, є похибки у вимірюванні об'єму речовини, відсутність достовірного обліку через невисоку точність і обмежений діапазон лічильників, несправності вузлів обліку [1, 2].

Основна проблема практичного використання ультразвукових доплерівських витратомірів пов'язана з тим, що швидкість розповсюдження звуку залежить від таких параметрів середовища, як температура, тиск, концентрація і т. д. [3, 4]. Для рідин швидкість розповсюдження ультразвуку практично залежить лише від температури і концентрації [5]. Проте, найбільший вплив на результати вимірювань має температура, так як навіть невеликі її перепади можуть вплинути на точність. Тому актуальним завданням є дослідження впливу температури на точність доплерівського ультразвукового витратоміра.

### **Аналіз досліджень.**

В [1, 2] описано загальні проблеми сучасних методів контролю витрат.

В [3, 4, 5] наведено основні похибки вимірювання витрат ультразвуковим методом. В [5] проаналізовано похибки ультразвукових витратомірів і запропоновано способи їх усунення. Наведено формули розрахунку сумарних похибок для різних методів ультразвукового контролю витрат.

В [6] наведено основні параметри доплерівських витратомірів. Описана математична модель вимірювання витрат методом Доплера. Наведено швидкості розповсюдження звуку у різних рідинах та газах для розрахунку доплерівського зсуву.

В [7] наведено модифіковане рівняння стану реального газу Ван-дер-Ваальса. Виведено залежності констант рівняння від параметрів газу. Практично доведено правильність математичної моделі. Та наведено параметри різних газів, які можуть бути використані для розрахунків.

В [8] експериментально перевірено адекватність розрахунку швидкості розповсюдження звуку у газах. Наведено значення показника адиабати різних газів та рідин при різних температурах та фізичних станах.

В [9] наведено локаційний варіант формули ефекту Доплера.

В [10] проведено порівняльний аналіз ультразвукових витратомірів для чистих і забруднених середовищ. Наведено методику розрахунку акустичного перетворювача та електронних вимірювальних схем ультразвукових витратомірів.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

У більшості випадків п'єзоелементи доплерівських витратомірів розміщуються ззовні труби. Це особливо необхідно у випадку вимірювання забруднених і абразивних середовищ, але необхідно враховувати додаткові похибки, спричинені заломленням хвилі на розділі двох середовищ [5].

Принцип дії доплерівського витратоміра полягає у вимірюванні різниці частот (доплерівського зсуву), яка визначається за формулою:

$$\Delta f = \frac{2 \cdot v_p \cdot f_1 \cdot \cos \alpha}{c} \quad (1)$$

де  $\Delta f$  – різниця частоти падаючої і відбитої ультразвукової хвилі,  $v_p$  – швидкість частинки в потоці,  $f_1$  – частота падаючої хвилі,  $\alpha$  – кут, під яким опромінюється частинка в потоці,  $c$  – швидкість звуку в середовищі.

Ширина доплерівського спектру залежить від діаграми спрямованості, яка формується випромінювачем і приймачем ультразвуку, тобто чим вона ширша, тим ширшим є спектр сигналу.

$$\Delta f = 2f_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot v_{pn} \cdot \cos \alpha_n}{c} \quad (2)$$

На основі теоретичних даних [6] для швидкості розповсюдження ультразвуку у різних середовищах розраховано різницю частот, яка виникає при проходженні через доплерівський витратомір для таких газів, як повітря, хлорин, метан, гідроген та рідин – вода, метанол, керосин, гліцерин. Розраховано чутливості плинних і газоподібних середовищ при зміні швидкості на 1 м/с. На рис.1 подано графіки залежностей, отримані за допомогою розробленої програми на мові Python, різниці частот опромінюючої і відбитої частинкою потоку ультразвукових хвиль від зміни швидкості речовини для різних газів, на рис. 2 – для рідин. Доплерівський витратомір працює при швидкостях потоку речовини від 0,1 м/с до 6 м/с.

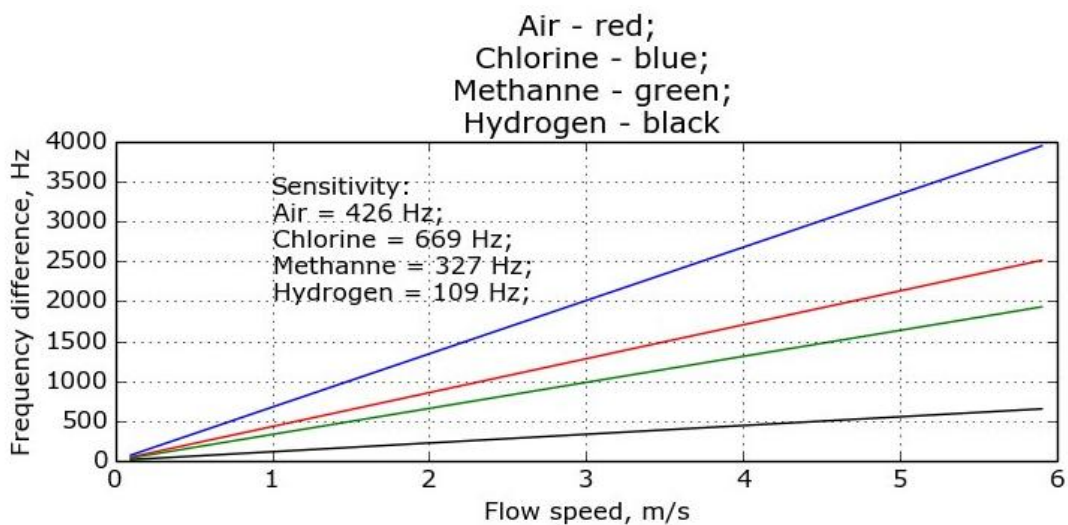


Рис. 1. Залежності різниці частот від зміни швидкості потоку газів від 0,1 м/с до 6 м/с

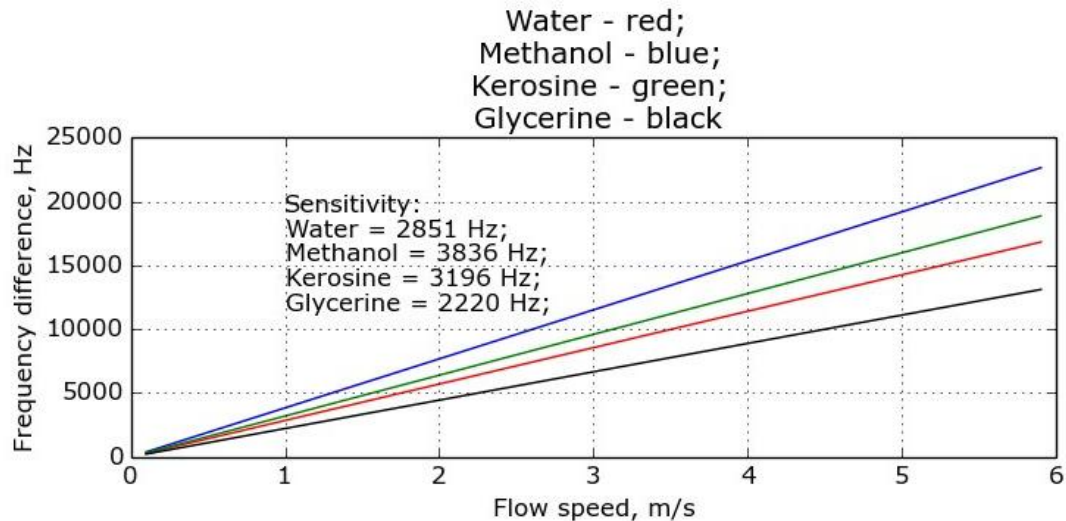


Рис. 2. Залежності різниці частот від зміни швидкості потоку від 0,1 м/с до 6 м/с

Проте, при вимірюванні витрат газів і рідин в реальних умовах існують різні похибки, які залежать від фізико-хімічних властивостей середовища. Сумарна похибка вимірювання витрат для ультразвукових частотних витратомірів розраховується за формулою [5]:

$$Q_o = \frac{\pi D^3 k V f}{2 \sin 2\alpha}, \quad (3)$$

де  $D = L \sin \alpha$ ,  $L$  – довжина акустичного шляху у вимірюваній речовині,  $k = v_c / v_D$  – відношення середньої швидкості  $v_c$  по січенню до середньої швидкості по діаметру  $v_D$ ,  $\Delta f$  – різниця частоти падаючої і відбитої ультразвукової хвилі,  $\alpha$  – кут, під яким опромінюється частинка в потоці.

З формули сумарної похибки (5) можна зробити висновок, що похибка вимірювання найбільше залежить від довжини акустичного шляху у вимірюваній речовині  $L$  та від доплерівської різниці частот  $\Delta f$ , яка у свою чергу залежить від частоти падаючої хвилі  $f_1$  та швидкості розповсюдження звуку у середовищі  $c$ . Врахувавши ці параметри у розрахунках можна досягти підвищення точності доплерівського ультразвукового витратоміра.

Обрано конструкцію витратоміра з випромінювальним і приймальним елементами, які розташовані на протилежних поверхнях труби. У цьому випадку довжина акустичного шляху хвилі буде найменшою, а тому відхилення та заломлення хвиль будуть зведені до мінімуму. До того ж паразитні коливання, які розповсюджують по поверхні труби від випромінювача до приймача в обхід плинного середовища будуть затухати через досить велику відстань між п'єзоелементами. Також для усунення паразитних коливань можуть використовуватись різні конструкторські рішення для відведення цих коливань.

Однак, найбільші похибки можуть виникати при вимірюванні доплерівської різниці частот  $\Delta f$ , яка залежить від швидкості розповсюдження звуку у середовищі  $c$ . Саме швидкість розповсюдження звуку у середовищі є не табличним значенням і залежить в першу чергу від температури. Швидкість розповсюдження звуку у середовищі розраховується за формулою Лапласа:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{V_m \rho}}, \quad (4)$$

де  $\gamma$  – показник адиабати,  $R$  – універсальна газова стала,  $T$  – абсолютна температура,  $V_m$  – молярний об'єм,  $\rho$  – густина.

В свою чергу молярний об'єм  $V_m$  розраховується з модифікованого рівняння стану реального газу Ван-дер-Ваальса [7]:

$$RT = (V_m - b) \left[ P + \frac{a}{(V_m + c)^k T^m} \right], \quad (5)$$

де  $P$  – тиск газу,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – змінні, які залежать від фізико-хімічного стану конкретного газу  $k$ ,  $m$  – табличні дані для різних газів.

На основі аналізу літературних джерел і математичної моделі розраховано доплерівський зсув для повітря і гідрогену при різних значеннях температури і швидкості потоку 3 м/с. Також розраховано зміну доплерівського зсуву при зміні температури на 1 градус. Отримані графіки залежності доплерівського зсуву від температури наведено на рисунках 3, 4.

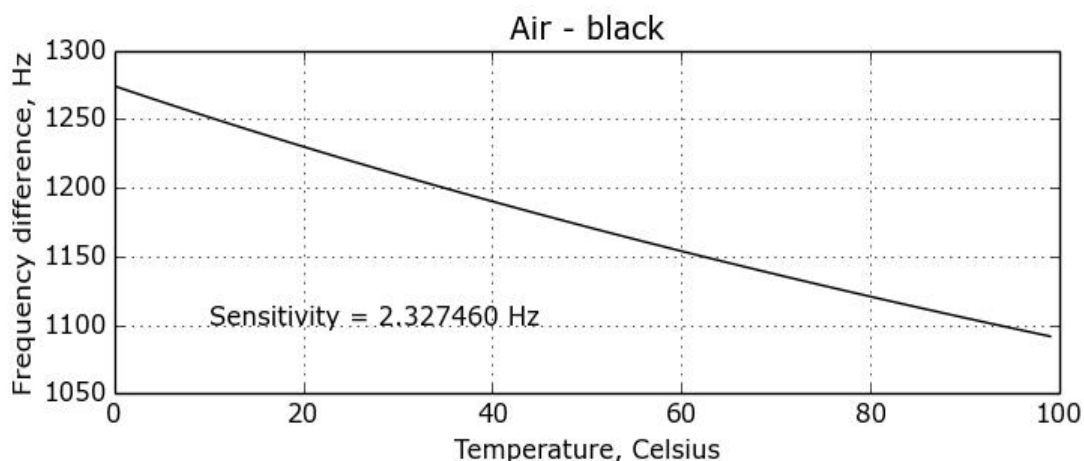


Рис. 3. Залежність доплерівського зсуву від температури повітря

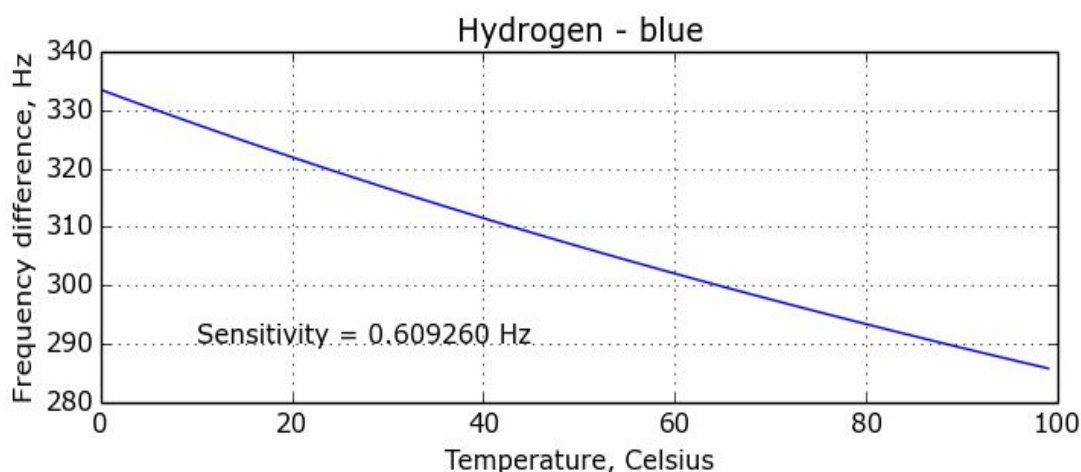


Рис. 4. Залежність доплерівського зсуву від температури гідрогену

Отже, з рис. 3, 4 можна зробити висновок, що зміна температури суттєво впливає на величину доплерівського зсуву. За результатами розрахунків при зміні температури на 1 градус різниця частот змінюється приблизно на 0.2%. Якщо не враховувати температуру газу то похибка при зміні його температури на 10 градусів збільшиться на 1–2 % в залежності від конкретного випадку.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** Введення температури газу, як додаткового параметру, в розрахунки витрат для доплерівського ультразвукового витратоміра дозволить суттєво підвищити точність вимірювання при мінімальних затратах на реалізацію. А подальші дослідження впливу фізико-хімічних параметрів плинних середовищ на точність вимірювання витрат дозволять досягти мінімальної похибки.

1. Ряховский С. В. Основные принципы создания единой системы учета газа в региональной компании поставщика газа / С. В. Ряховский, Л. Г. Паскаль. // Энергосбережение. – 2005. – №10.
2. Тюленев Л. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля / Л. Н. Тюленев, В. В. Шушерин, А. Ю. Кузнецов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ УПИ, 2005. – 83 с.
3. Хансуваров К. И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин. – Москва: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.
4. Друзьякин И. Г. Технические измерения и приборы / И. Г. Друзьякин, А. Н. Лыков. – Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2008. – 412 с.
5. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник / П. П. Кремлевский. – СПб: Политехника, 2004. – 412 с.
6. Fundamentals of ultrasonic flow measurement for industrial applications [Электронный ресурс] // KROHNE. – 2001. – Режим доступа до ресурсу: [http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/HB\\_ULTRASONIC\\_e\\_144.pdf](http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/HB_ULTRASONIC_e_144.pdf).
7. Фогельсон Р. Л. Уравнение состояния реального газа / Р. Л. Фогельсон, Е. Р. Лихачев. // Журнал технической физики. – 2004. – №7.
8. Frank M. White. Fluid Mechanics / Frank M. White. – New York: McGraw-Hill, 2009. – 885 с.
9. Близнюк В. И. Ультразвуковые расходомеры и система учета на их основе / В. И. Близнюк, В. В. Костылев, В. Л. Сорокопуг. // Измерительная техника. – 1998. – №2. – С. 56–57.
10. Биргер Г. И. Ультразвуковые расходомеры / Г. И. Биргер, Н. И. Бражников. – Москва: Металлургия, 1964. – 382 с.