

УДК 681.121.89.082.4

**В. І. Роман, канд. техн. наук; Ф. Д. Матіко, д-р техн. наук, проф.; В. О. Ілючок****КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ДІАМЕТРАЛЬНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ**

Стаття присвячена висвітленню чергового етапу глобальної науково-практичної мети авторів – розробки комп'ютерної системи автоматизованого проєктування ультразвукових витратомірів всіх наявних типів. За базу для поточного етапу взято розроблену раніше авторами комп'ютерну програму для автоматизованого проєктування багатоканальних хордових ультразвукових витратомірів Auto Design USM, до якої додано дві нові функціональні можливості – розрахунок гідродинамічної похибки діаметральних одноканальних однопроменевих ультразвукових витратомірів та розрахунок коефіцієнта поправки на профілю потоку, який повинен усувати цю похибку вимірювання витрати. Щоб розкрити суть доданих до комп'ютерної програми функціональних можливостей, в статті авторами наведено теоретичне обґрунтування появи гідродинамічної похибки в діаметральних одноканальних однопроменевих ультразвукових витратомірах (може досягати більше 30 % для ламінарних, та більше 8 % для турбулентних режимів руху вимірювального потоку) та наявні способи отримання коефіцієнта поправки на профілю потоку (відомі емпірично-отримані аналітичні залежності або застосовуючи деякий теоретичний профілю швидкості потоку і числове його інтегрування). Як результат проведених досліджень, авторами статті удосконалено комп'ютерну програму Auto Design USM, що дозволяє користувачу в консольному вигляді застосовувати її для автоматизованого проєктування діаметральних одноканальних однопроменевих ультразвукових витратомірів. На вході така програма запитує в користувача значення числа Рейнольдса (вказує на швидкість потоку), а на виході дозволяє отримати значення числа Нікурадзе, коефіцієнт поправки на профіль потоку за чотирма емпіричними аналітичними залежностями та величину гідродинамічної похибки діаметрального ультразвукового витратоміра. Також, в статі сформовані висновки з окресленням подальших етапів роботи по цій тематиці, задля досягнення глобальної науково-практичної мети з розробки системи автоматизованого проєктування ультразвукових витратомірів.

**Ключові слова:** діаметральні ультразвукові витратоміри, система автоматизованого проєктування, комп'ютерна програма, гідродинамічна похибка, коефіцієнт поправки, профіль швидкості потоку.

**Постановка проблеми**

Ультразвукові витратоміри (УЗВ), зокрема і ті, що використовуються для вимірювання витрати дороговартісних газоподібних енергоносіїв, знаходять широке застосування в різних галузях промисловості, таких як нафтогазова, хімічна, енергетична та комунальні послуги. До прикладу, на початок 2022 року українська компанія АТ «Укргазвидобування» замовила високоточні УЗВ для облаштування вузлів обліку на суму близько 130 мільйонів гривень [1]. Завдяки високій точності та надійності вимірювань, УЗВ набули значної популярності по всьому світу, про що свідчать дані експертів [2]: обсяг глобального ринку УЗВ у 2021 році становив 690 мільйонів доларів США та, за прогнозами, досягне 1 080 мільйонів до 2030. Проте, для забезпечення такого економічного темпу і таких метрологічних характеристик, необхідно приділяти велику увагу процесу проєктування нових та оптимізації наявних конструкцій УЗВ, а також науковим дослідженням тих задач в галузі ультразвукової витратометрії, які досі залишаються невирішеними.

Сучасний рівень розвитку комп'ютерних технологій, спонукає проєктантів та науковців ставати залежними від використання програмного забезпечення, зокрема в галузі ультразвукової витратометрії: для моделювання та симуляції впливу потоків на покази УЗВ; аналізу механічних і акустичних характеристик; оптимізації конструкції; теплового аналізу

тощо. Часто описані інструменти реалізовані як окремі комп'ютерні програми (Ansys Fluent, Flow Simulation Solid Works), або мають обмеження для певних типів УЗВ. Відтак, виникає потреба у створенні єдиної комп'ютерної системи автоматизованого проектування, яка б дозволила значно скоротити час розробки нових конструкцій УЗВ чи оптимізації (наукового дослідження) наявних. При цьому, така система повинна бути гнучкою, і дозволяти користувачу працювати з різними типами УЗВ, за різних варіантів реалізації інтерфейсу та мати можливість постійно розвиватись, додаючи нові функціональні можливості (до прикладу, застосування штучних нейронних мереж для проектування конструкції УЗВ на базі результатів CFD-моделювання).

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Ідея створення нами комп'ютерної системи автоматизованого проектування УЗВ базується на праці авторів Per Lunde, Kjell-Eivind Froysata Magne Vestheim [3], в якій вони зокрема висвітлили роботу консольної програми GARUSO (версія 1.0). Ця програма призначалась для розрахунку відносної розширеної невизначеності вимірювання витрати 4-канального УЗВ газу. В подальшому, Per Lunde та Kjell-Eivind Froysav рамках роботи для Норвезького товариства вимірювання нафти і газу (Norwegian Society of Oil and Gas Measurement, NFOGM) розробили довідник [4] для розрахунку невизначеності УЗВ, що працюють на газорозподільчих станціях комерційного обліку (назва довідника англійською «Handbook of uncertainty calculations. Ultrasonic fiscal gas metering stations»). На базі цього довідника авторами розроблено відповідну комп'ютерну програму, яку можна безкоштовно завантажити як excel-файл (найновіша версія за 2003 рік) із сайту товариства за посиланням [www.nfogm.no](http://www.nfogm.no).

В статті [5] нами проаналізовано стан програмного забезпечення в галузі ультразвукової витратометрії, і теоретично обґрунтовано потребу в розробці вітчизняної комп'ютерної програми-калькулятора для розрахунку конструктивних характеристик багатоканальних хордових УЗВ на базі класичних числових методів інтегрування (ЧМІ). В подальшому ця програма пройшла два етапи удосконалення:

- додано два некласичні ЧМІ, які використовуються для розрахунку конструктивних характеристик 2, 3 4-канальних хордових УЗВ[6];
- отримала назву Auto Design USM, додано розрахунок конструктивних характеристик 5- і 6-канальних хордових УЗВ та розроблено інтерфейс користувача [7].

### **Постановка мети**

Як результат, в статтях [5 – 7] показано етапи розроблення вітчизняної консольної комп'ютерної програми Auto Design USM, яка дозволяє користувачу отримати значення координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів (АК) багатоканальних хордових УЗВ. Такий підхід дозволив автоматизувати процес проектування хордових УЗВ, і звести помилки користувача до мінімуму. В цій роботі поставлено за мету продовжити удосконалення цієї програми, додаючи до неї нові функціональні можливості, а саме ті, що стосуються проектування діаметрального типу УЗВ:

- розрахунок гідродинамічної похибки (ГДП) діаметральних УЗВ;
- розрахунок коефіцієнта поправки на профіль швидкості потоку діаметральних УЗВ, який використовується для усунення ГДП.

### **Виклад основного матеріалу**

Оскільки робота присвячена дослідженню діаметральних УЗВ, слід коротко нагадати суть роботи цього типу витратомірів. Діаметральні УЗВ, що вперше представлені широкому загалу Японії та світу в 1963 році, використовують акустичні коливання частотою більше 16 – 20 кГц (ультразвук) для визначення швидкості потоку [8]. Контактуючи з потоком

прямим (занурені в потік, «мокрі») або непрямим способом (через трубопровід, «сухі»), два електроакустичні перетворювачі (ЕАП) УЗВ попарно випромінюють / приймають ультразвукові коливання (УЗК). Фіксуючи час проходження УЗК вздовж певної сталої відстані  $L$  (між парою ЕАП, яку ще називають АК), визначають швидкість потоку, яка безпосередньо впливає на швидкість руху УЗК у потоці: при русі УЗК за потоком (червона стрілка на рис. 1), швидкість потоку додається до швидкості УЗК, і навпаки, при русі УЗК проти потоку (жовта стрілка на рис. 1), швидкість потоку віднімається від швидкості УЗК. Знаючи час руху УЗК за і проти потоку, через їх різницю визначають швидкість руху потоку ( $U_L$ ) за формулою (1) [8 – 12]:

$$U_L = \frac{L}{2 \cos(\varphi)} \left( \frac{1}{t_{ЗА}} - \frac{1}{t_{ПР}} \right), \quad (1)$$

де  $t_{ЗА}$  – час проходження УЗК за потоком;  $t_{ПР}$  – час проходження УЗК проти потоку. Оскільки УЗК проходять по центру ВТ або діаметру (рис. 1), то такі УЗВ часто називають *діаметральними*.

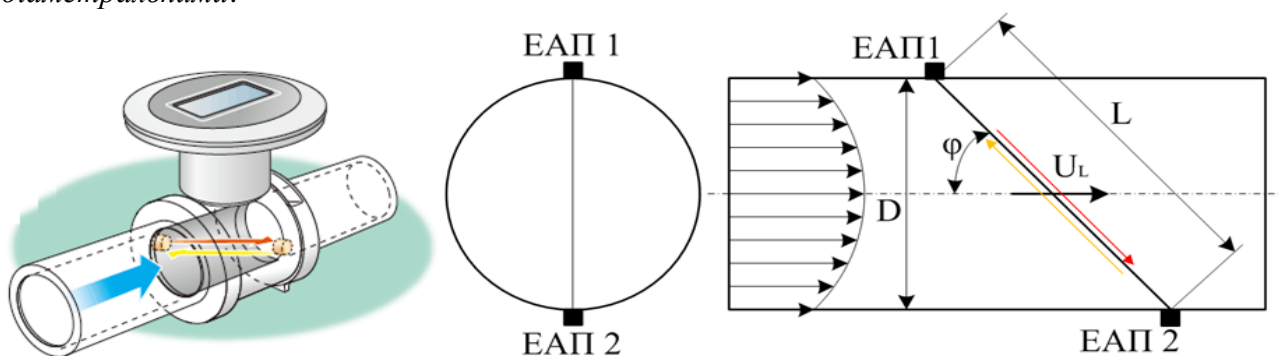


Рис. 1. Принцип вимірювання швидкості потоку з використанням УЗК:  
D – діаметр трубопроводу;  $\varphi$  – кут нахилу АК відносно осі трубопроводу

Описаний принцип вимірювання швидкості потоку із використанням УЗК, в науковій та спеціалізованій літературі називають *часо-імпульсним* («transit time» в англійських джерелах [8 – 12]). УЗВ на базі цього принципу є найбільш поширеними на ринку. На додачу, в залежності від того, яку траєкторію має рух УЗК між парою ЕАП, часо-імпульсний тип УЗВ може мати два способи реалізації одиничного АК [8 – 12]:

- однопроменевий або Z-подібні (рис. 2а);
- багатопроменевий з рефлекторним режимом або V-/W-подібні (рис. 2б).

До прикладу, в двопроменевому одиничному АК (рис. 2б), УЗК рухаються спочатку по одній прямолінійній траєкторії (перший промінь), а потім відбиваючись від внутрішньої стінки трубопроводу чи якогось пристрою-дзеркала (рефлектора), рухаються по другій прямолінійній траєкторії (другий промінь).

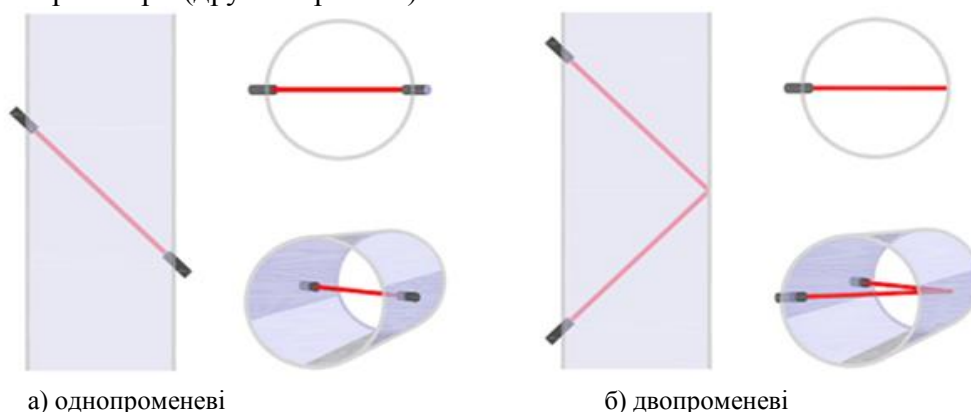


Рис. 2. Типи діаметральних УЗВ за способом формування АК [10]

На вимірювання витрати діаметральних УЗВ впливає ряд зовнішніх та внутрішніх факторів [8 – 12]. Внутрішні – залежать від самого УЗВ як виробу, що приходить із конвеєра заводу-виробника. Зовнішні – існують поза УЗВ, і ніяк не залежать від його типу: профіль швидкості потоку (структура потоку), шорсткість внутрішньої стінки трубопроводу, завади звукового характеру, що генеруються ззовні трубопроводу або на ньому, температура та тиск вимірювального середовища, тип середовища та режим руху потоку (число Рейнольдса,  $Re$ ) та інші [8 – 12].

Враховуючи мету цієї статті, варто детально розглянути останній фактор – число Рейнольдса. При  $Re < 2000$  течія є ламінарною (домінують в'язкі сили), а при  $Re$  від 2000 до 4000 – перехідною, в той час як при  $Re > 4000$  – це турбулентна течія (домінують інерційні сили). Чому це важливо для діаметральних УЗВ? УЗВ в умовах ламінарного потоку за допомогою одного діаметрального АК усереднює значення на піку параболического профілю потоку. Проте для турбулентного потоку, діаметральний АК усереднює набагато плоскіший («квадратний») профіль (рис. 3а). Отже, результати вимірювань швидкості потоку будуть відрізнятися. Це означає, що, наприклад, на нафтохімічному/хімічному заводі по одній і тій же трубі проходять декілька рідин, кожна з яких має різну густину – якщо густини сильно відрізняються, то може виникнути ламінарний і турбулентний потік. Тому природно, що при використанні одноканальних діаметральних УЗВ буде виникати ГДП («profile change error» в англійській мові джерелах [8 – 12]). Для усунення зазначеної похибки вимірювання, можна використовувати два способи [10]:

1) збільшити кількість АК (рис. 3, б, в) розміщених один відносно одного на певній відстані (хордова схема) або під іншим кутом (якщо це діаметральні АК), щоб точніше (повніше) відстежувати весь профіль швидкості потоку;

2) введення у формулу об'ємної чи масової витрати діаметральних УЗВ коефіцієнта поправки на профіль потоку («meter factor» в англійській мові джерелах [8 – 12]), який призначений для корекції вимірюваної швидкості згідно такої формули:

$$k_v = \frac{U_s}{U_L}, \quad (2)$$

де  $U_s$  – усереднена по всьому перерізу швидкість потоку. Опісля формула для розрахунку об'ємної витрати діаметрального УЗВ ( $q_v$ ) виглядатиме наступним чином:

$$q_v = A k_v U_L, \quad (3)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу трубопроводу ( $A = \pi R^2$ , де  $R = D/2$  – радіус трубопроводу).

Якщо діаметральний УЗВ має кілька АК, формула 3 матиме такий вигляд:

$$q_v = A k_v \frac{\sum_{i=1}^N U_L(i)}{N}, \quad (4)$$

де  $N$  – кількість діаметральних АКУЗВ.

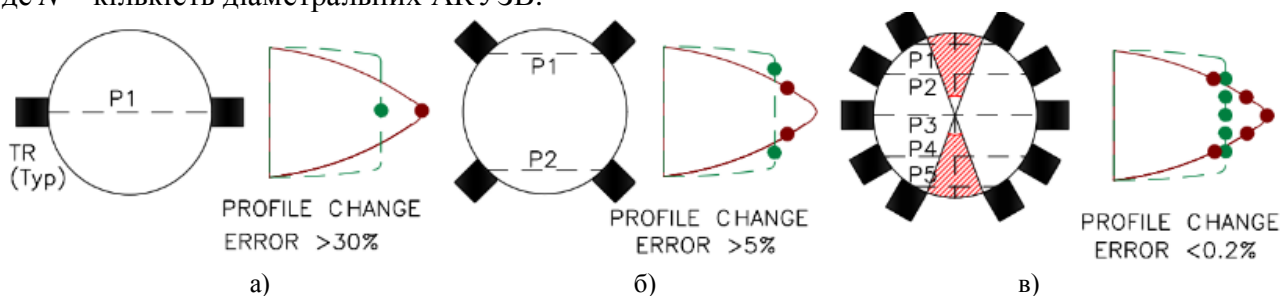


Рис. 3. Профіль швидкості потоку та продуктивність УЗВ за різної кількості АК [8]:

а) один діаметральний АК; б) два хордові АК; в) п'ять хордових АК; P – «path» (АК УЗВ)

Підставивши у (3) формулу для розрахунку швидкості  $U_L$  (1), отримаємо рівняння об'ємної витрати діаметрального одноканального однопроменевого УЗВ, що має такий вигляд [9 – 10]:

$$q_v = \frac{\pi R^2 k_v L}{2 \cos(\varphi)} \left( \frac{1}{t_{3A}} - \frac{1}{t_{ПП}} \right). \quad (5)$$

Як було сказано раніше, коефіцієнта  $k_v$  приводить виміряну швидкість  $U_L$  до необхідної для розрахунку об'ємної витрати швидкості  $U_S$ . Існує випадок, коли швидкості  $U_L$  і  $U_S$  можуть бути рівними, у випадку прямокутного трубопроводу, до того ж, нескінченно широкого [8]. Для трубопроводів круглого перерізу, необхідно вводити коефіцієнт  $k_v$ . На практиці цей коефіцієнт для діаметральных УЗВ заміщують калібрувальним коефіцієнтом, який отримують під час калібрування на спеціальних установках [9, 10]. Проте калібрування не завжди є обов'язковою вимогою, особливо для технічних процесів з низькою точністю вимірювання витрати. Це так звані УЗВ класу 3 та 4 для технологічних процесів (максимальна допустима похибка  $\pm 1,5 \dots 5 \%$ ) та факельних газів й викидів (максимальна допустима похибка  $\pm 5 \dots 10 \%$ ) [9, 10]. Для таких УЗВ процес калібрування на спеціальних установках можна замінити застосуванням аналітичної залежності для визначення коефіцієнта  $k_v$ . Згідно формули (2), для визначення коефіцієнта  $k_v$  треба знати аналітичні формули для визначення  $U_L$  і  $U_S$  відповідно. Такі аналітичні формули є відомі [11, 12]:

$$U_S = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_R 2\pi r dr, \quad (6)$$

$$U_L = \frac{1}{R} \int_0^R U_R dr, \quad (7)$$

де  $U_R$  – закон розподілу швидкості потоку в трубопроводі з внутрішнім радіусом  $R$ .

Враховуючи вирази (6) та (7), формула для визначення коефіцієнта  $k_v$  отримає вигляд:

$$k_v = \frac{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_R 2\pi r dr}{\frac{1}{R} \int_0^R U_R dr}. \quad (8)$$

В залежності від того, яким є закон розподілу швидкості потоку в трубопроводі, аналітичні залежності коефіцієнта  $k_v$  будуть відрізнятися одна від одної. Більшість законів розподілу швидкості потоку отримані за результатами поєднання теорії потоку та апроксимації експериментальних даних (таких як експерименти Нікурадзе) [8, 13]: Базен (1902) запропонував закон розподілу, виражений четвертиною еліпса; Хрістен (1904) запропонував взяти параболу восьмого порядку; Крей (1927) запропонував взяти логарифмічну криву; Карман (1928), Нікурадзе (1926), Кірстен (1929), Стантон (1911) пропонували степеневий закон розподілу, який в роботах Дарсі, Паннел та Мебіус був експериментально підтверджений.

Для застосування в комп'ютерній програмі Auto Design USM нами вирішено обрати для визначення аналітичної залежності коефіцієнта  $k_v$  та ГДП степеневий закону розподілу швидкості, виведеного на основі обробки та інтегрування експериментальних даних (криві розподілу швидкості) отриманих Нікурадзе [13]. Формула степеневого закону розподілу швидкості потоку має такий вид [11 – 13]:

$$U_R = u_{\max} \left( \frac{1-r}{R} \right)^{1/n}, \quad (9)$$

де  $u_{max}$  – максимальна швидкість неспотвореного потоку (осьова швидкість в центрі трубопроводу);  $r$  – відстань від осі до точки визначення швидкості потоку;  $n$  – показник степені, що залежить від числа Рейнольдса (число або експонента Нікурадзе [10]), і буде обчислено за рівнянням виду [14]:

$$n = 11,269 - 3,019 \lg(\text{Re}) + 0,432 \lg^2(\text{Re}). \quad (10)$$

Підставивши вирази (9) у формулу (8), отримаємо рівняння для визначення коефіцієнта  $k_v$  на базі степеневого закону розподілу:

$$k_v = \frac{\frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u_{max} \left( \frac{1-r}{R} \right)^{1/n} 2\pi r dr}{\frac{1}{R} \int_0^R u_{max} \left( \frac{1-r}{R} \right)^{1/n} dr}. \quad (11)$$

Приймаючи до відома, що  $u_{max} = 1$  та  $R = 1$ , нами реалізовано розрахунок коефіцієнта  $k_v$  для різного значення числа Рейнольдса із використанням числового методу інтегрування Сімпсона (покращений варіант методу трапецій, що базується на апроксимації площі під кривою за допомогою параболічних квадратичних апроксимаційних функцій). Метод Сімпсона особливо корисний для обчислення складних інтегралів, де інші методи можуть бути недостатньо точними. До прикладу, для обчислення площі під кривою у фізичних задачах, для визначення об'єму рідини або для аналізу складних економічних моделей [15].

Реалізація методу Сімпсона мовою C#, який використовується в комп'ютерній програмі Auto Design USM, має такий вигляд [16]:

```
private static double Simpson(Func<double, double> f, double a, double b, int n){
    var h = (b - a) / n;
    var sum1 = 0d;
    var sum2 = 0d;
    for (var k = 1; k <= n; k++){
        var xk = a + k * h;
        if (k <= n - 1){
            sum1 += f(xk);
        }
        var xk_1 = a + (k - 1) * h;
        sum2 += f((xk + xk_1) / 2);
    }
    var result = h / 3d * (1d / 2d * f(a) + sum1 + 2 * sum2 + 1d / 2d * f(b));
    return result;
}
```

де  $a$  – нижня межа інтегрування;  $b$  – верхня межа інтегрування;  $n$  – кількість підінтервалів;  $Func$  – делегант, який представляє функцію, яку потрібно інтегрувати.

Приклад застосування методу Сімпсона для знаходження швидкості  $U_s$ , реалізований в комп'ютерній програмі Auto Design USM:

```
double f1(double y){
    return umax * Math.Pow((1 - y) / R, 1 / n) * 2 * Math.PI * y;
}
double uS = Simpson(f1, 0, 1, 1000);
```

Отримані нами масиви значень коефіцієнта  $k_v$  виявились ідентичними значенням, які можна отримати застосувавши аналітичну залежність, яка рекомендована до застосування для діаметральних УЗВ Американською газовою асоціацією (American Gas Association, AGA) [11] та Європейською групою з газових досліджень (European Gas Research Group, GERG) [12] у такому спрощеному вигляді (в умовах розвиненого турбулентного потоку):

$$k_v = \frac{2n}{(2n+1)}. \quad (12)$$

Існують й інші аналітичні залежності коефіцієнта  $k_v$ , як залежності, отримані на основі видозміненого степеневого та логарифмічного закону розподілу [11, 12, 14]:

– залежність Ківіліса-Решетнікова:

$$k_v = \frac{1}{1,12 - 0,011 \lg(\text{Re})}. \quad (13)$$

– залежність Крітца:

$$k_v = \frac{1}{1 + 0,19 \text{Re}^{-0,1}}. \quad (14)$$

– залежність Біргера:

$$k_v = \frac{1}{1 + 0,011 \sqrt{6,25 + 431 \text{Re}^{-0,237}}}. \quad (15)$$

Оскільки метод Сімпсона має недолік, що стосується великих затрат центрального процесора для обрахунків, нами прийнято не використовувати в комп'ютерній програмі Auto Design USM розрахунок коефіцієнта  $k_v$  з використанням формул (11), а пропонувати користувачу результати за аналітичними залежностями (12 – 15). Користувачу потрібно тільки обрати для якого числа Рейнольдса буде здійснено розрахунок, а програма виведе усі чотири варіанти коефіцієнта  $k_v$ .

Як видно з рис. 4, обидві аналітичні залежності коефіцієнта  $k_v$ , що розроблені на базі степеневого закону розподілу (AGA-GERG формула (12) та К-Р формула (13)), мають подібний характер: зі збільшенням швидкості потоку, значення коефіцієнта наближається до 1. Це означає, що чим швидший потік, тим меншим стає різниця між швидкостями  $U_L$  та  $U_S$ .

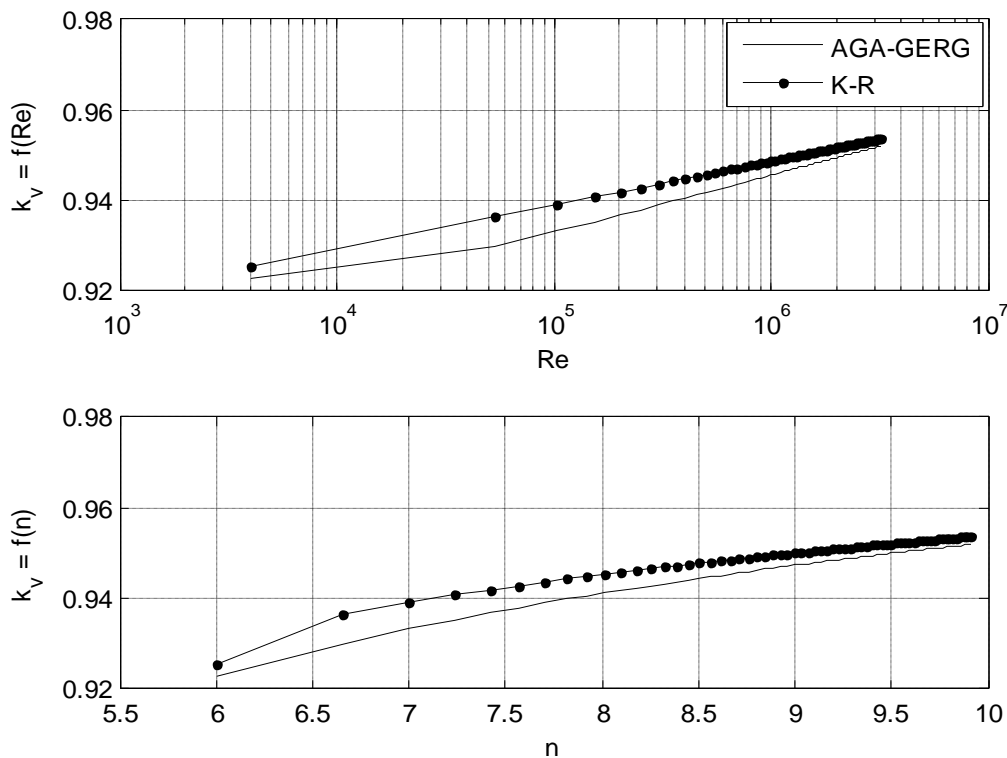


Рис. 4. Залежність коефіцієнта  $k_v$  від числа Рейнольдса (верх) та числа Нікурадзе (низ)

Наступне, що потрібно було додати до комп'ютерної програми Auto Design USM, це Наукові праці ВНТУ, 2024, № 2

розрахунок ГДП для відповідного числа Рейнольдса. Як закон розподілу швидкості потоку, як і для коефіцієнта  $k_v$ , був обраний степеневий закон розподілу. Загалом, ГДП можна розрахувати за класичною формулою відносної похибки вимірювання виду [14]:

$$\delta_{ГДП} = 100 \frac{(q_v - q_s)}{q_s}, \quad (16)$$

де  $q_v$  – об'ємна витрата діаметрального УЗВ;  $q_s$  – об'ємна витрата, розрахована через усереднену швидкість потоку в поперечному перерізі трубопроводу ( $U_s$ ).

Об'ємна витрата діаметрального УЗВ через степеневий закон розподілу можна розрахувати за формулою виду [11, 12]:

$$q_v = \pi \int_0^1 (1-r)^{1/n} dr. \quad (17)$$

Формула для розрахунку  $q_s$  через степеневий закон буде мати такий вигляд [11, 12]:

$$q_s = \frac{1}{\pi} \int_0^1 2\pi r (1-r)^{1/n} dr. \quad (18)$$

Для реалізації формул (17) та (18) в комп'ютерній програмі Auto Design USM, нами застосовано описаний підхід із використанням методу Сімпсона. З рис. 5 легко помітити, що зі збільшенням швидкості потоку, ГДП діаметрального УЗВ зменшуватиметься. Також помітно, що без застосування коефіцієнта поправки на профіль потоку, значення ГДП перевищує 8 %, що є суттєвим показником, і вимагає особливої уваги.

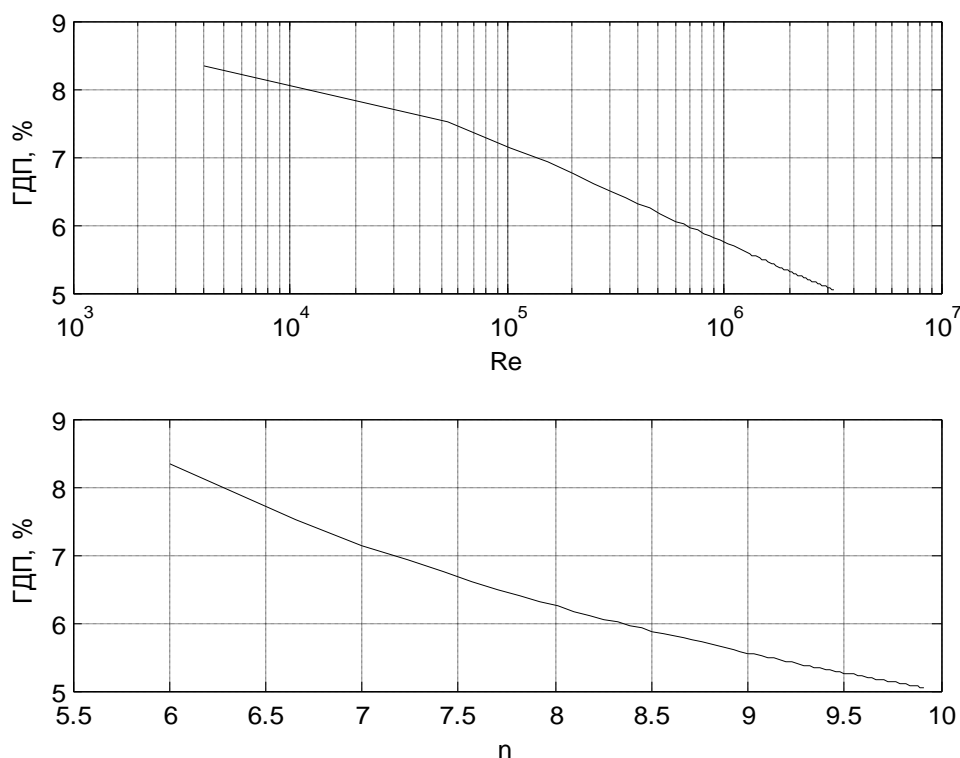


Рис. 5. Залежність ГДП діаметрального УЗВ від числа Рейнольдса (верх) та числа Нікурдзе (низ)

Враховуючи викладений вище матеріал, нами створено алгоритм проектування діаметральних одноканальних однопроменевих УЗВ, який інтегровано до комп'ютерної програми Auto Design USM. Ось кроки цього алгоритму:

1. Вибрати і ввести значення числа Рейнольдса з відповідного діапазону. До прикладу,



$Re = 40000 \dots 100000$ . Цей діапазон обраний так, щоб покрити в першу чергу нижню межу діапазон дії степеневого закону розподілу, а саме зону початку турбулентного режиму.

2. Розрахувати число Нікурадзе за формулою (10).
3. Розрахувати коефіцієнт  $k_v$  за формулою (12) (в програмі позначено як  $k_1$ ).
4. Розрахувати коефіцієнт  $k_v$  за формулою (13) (в програмі позначено як  $k_2$ ).
5. Розрахувати коефіцієнт  $k_v$  за формулою (14) (в програмі позначено як  $k_3$ ).
6. Розрахувати коефіцієнт  $k_v$  за формулою (15) (в програмі позначено як  $k_4$ ).
7. Розрахувати об'ємну витрату  $q_s$  за формулою (18).
8. Розрахувати об'ємну витрату  $q_v$  за формулою (17).
9. Розрахувати похибку  $\delta_{ГДП}$  діаметрального УЗВ за формулою (16).
10. Вивести на екран  $n, k_1, k_2, k_3, k_4$  та похибку  $\delta_{ГДП}$ .

На рис. 6 показано вікно виводу комп'ютерної програми Auto Design USM реалізуючи розрахунок коефіцієнта  $k_v$  та ГДП діаметрального одноканального УЗВ.

```
Enter Re (Re must be within the range of 40000 to 100000): 40000

Calculated values:
n = 6,525
k1 = 0,929
k2 = 0,935
k3 = 0,938
k4 = 0,940
Del = 7,668
```

Рис. 6. Вікно виводу комп'ютерної програми Auto Design USM в консольному виконанні: del – це ГДП

### Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами проведеної роботи, розроблено комп'ютерну програму для автоматизованого проектування діаметральних УЗВ, шляхом удосконалення наявної програми Auto Design USM. Для цього до програми Auto Design USM додано можливість розрахунку важливих для проектування діаметральних УЗВ параметрів – коефіцієнта поправки на профіль потоку та ГДП.

Як перспектива подальших досліджень за цією тематикою, що дозволить наявній системі автоматизованого проектування УЗВ стати ще ефективнішою, нами виділено подальші етапи:

1. Розробка графічного інтерфейсу програми та робота з винятками (помилками), коли користувач або несвідомо або від незнання вводитиме невірні значення вхідних параметрів.
2. Застосування інших теоретичних чи емпіричних законів розподілу швидкості потоку – неспотвореного (удосконалений степеневий закон розподілу, що краще враховує пристінний шар) або спотвореного (Грего, Саламі).
3. Можливість виводу графіків програмою та збереження масивів даних (результатів) у зручній користувачу формі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Укргазвидобування закупить високоточні лічильники для облаштування вузлів обліку газу за 132 млн грн [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://expro.com.ua/novini/ukrgazvidobuvannya-zakupit-visokotochnilniki-dlya-oblashtuvannya-vuzlv-oblku-gazu-za-132-mln-grn>.
2. Ultrasonic flowmeter market [Electronic resource]. – Access mode : <https://straitresearch.com/report/ultrasonic-flowmeter-market>.
3. Lunde P. GARUSO Version 1.0. Uncertainty model for multipath ultrasonic transit time gas flow meters (CMR Report no. CMR-97-A10014) / Per Lunde, Kjell-Eivind Froya, Magne Vestrheim. – Bergen : Christian Michelsen Research AS, 1997. – 242 p.
4. Lunde P. Handbook of uncertainty calculations. Ultrasonic fiscal gas metering stations [Electronic resource] : Handbook / Per Lunde, Kjell-Eivind Froya. – Norwegian Society of Oil and Gas Measurement (NFOGM) and the Norwegian Petroleum Directorate (NPD), 2001. – 277 p. – Access mode : <https://nfogm.no/wp->

[content/uploads/2014/04/Handbook-USM-fiscal-gas-metering-stations.pdf](https://content/uploads/2014/04/Handbook-USM-fiscal-gas-metering-stations.pdf).

5. Roman V. Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters [Electronic resource] / V. Roman, F. Matiko, A. Kutsan // Journal of Energy Engineering and Control Systems. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 98 – 103. – Access mode : <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>.

6. Удосконалення комп'ютерної програми для розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів [Електронний ресурс] / В. І. Роман, В. О. Ілючок // Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». – 2023. – № 50. – С. 157 – 162. – Режим доступу : <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-24>.

7. Комп'ютерна програма для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів [Електронний ресурс] / В. І. Роман, В.О. Ілючок // Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». – 2023. – № 52. – С. 24 – 31. – Режим доступу : <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-03>.

8. Plant Flow Measurement and Control Handbook. Fluid, Solid, Slurry and Multiphase Flow / ed. by Swapan Basu. – Academic Press, 2018. – 1268 p.

9. ISO 17089-1:2019. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. – Replaces ISO 17089-1:2010 ; effective from 2019-08-01. – Official edition. – Geneva : International Organization for Standardization, 2019. – 114 p.

10. ISO 17089-2:2012. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 2: Meters for industrial applications. – Effective from 2012-10-01. Official edition. – Geneva : International Organization for Standardization, 2012. – 38 p.

11. AGA Report No. 9. Measurement of gas by multipath ultrasonic meters. Second edition / edit by AGA Transmission Measurement Committee. – Washington : American Gas Association (AGA), 2003. – 84 p.

12. GERG TM 11. GERG Project on ultrasonic gas flow meters, Phase II/ ed. by P. Lunde, K.-E. Froysa, M. Vestheim. – Brussels : Groupe Europeen de Recherches Gazieres (GERG), 2000. – 110 p.

13. Кулик М. С. Математичні моделі пристінної турбулентності / М. С. Кулик, В. Т. Мовчан, Є. О. Шквар. – К. : НАУ, 2012. – 356 с.

14. The Measurement, instrumentation, and sensors: handbook / ed. by J. G. Webster. – Boca Raton : CRC Press, 1999. – 2630 p.

15. Handbook of mathematical function with formulas, graphs and mathematical tables / ed. by Milton Abramovitz, Irene A. Stegun. – New York : NBS, 1964. – 470 p.

16. Метод Сімпсона [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://programm.top/uk/c-sharp/algorithm/numerical-methods/simpsons-rule/>.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2024.

Стаття пройшла рецензування 27.06.2024.

**Роман Віталій Іванович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: [vitalii.i.roman@lpnu.ua](mailto:vitalii.i.roman@lpnu.ua).

**Матіко Федір Дмитрович** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: [fedir.d.matiko@lpnu.ua](mailto:fedir.d.matiko@lpnu.ua).

**Ілючок Віктор Олександрович** – студент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: [viktor.iliuchok.avm.2020@lpnu.ua](mailto:viktor.iliuchok.avm.2020@lpnu.ua).

Національний університет «Львівська політехніка».