

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-24>

УДК 681.121.89.082.4

Роман Віталій Іванович, доцент, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-8546-6752>

Ілючок Віктор Олександрович, студент бакалаврату

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КООРДИНАТ РОЗТАШУВАННЯ ТА ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ АКУСТИЧНИХ КАНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

Роман В.І., Ілючок В.О. Удосконалення комп'ютерної програми для розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів. На базі нових числових методів інтегрування удосконалено комп'ютерну програму, яка дозволяє розрахувати координати розташування та вагові коефіцієнти акустичних каналів багатоканальних хордових ультразвукових витратомірів. Програма дозволяє спростити процес проектування нових конструкцій багатоканальних хордових ультразвукових витратомірів.

Ключові слова: комп'ютерна програма, ультразвуковий витратомір, акустичні канали, хордова схема, числові методи інтегрування.

Roman V., Iliuchok V. Improving of the software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. Based on new numerical integration method, a software is improved, which allows you to calculate the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of multipath chordal ultrasonic flow meters. The software makes it possible to simplify the process of designing new designs of multipath chordal ultrasonic flow meters.

Keywords: software, ultrasonic flow meter, acoustic paths, chordal scheme, numerical integration methods.

Проблематика питання. Оскільки ультразвукові витратоміри (УЗВ) працюють за швидкісним принципом вимірювання витрати [1], розрахунок витрати виконується за вимірними значенням швидкості потоку. При цьому, якщо УЗВ є хордовим і багатоканальним, то витрату розраховують за вимірними значеннями швидкості потоку вздовж усіх його акустичних каналів (АК). Значення цих швидкостей підсумовують із застосуванням вагових коефіцієнтів АК. Згідно основного стандарту щодо ультразвукової витратометрії газу ISO17089-1 [1], вагові коефіцієнти АК УЗВ можуть бути постійними або змінними. При цьому, змінні вагові коефіцієнти визначають за вимірними параметрами потоку (до прикладу, швидкість потоку), а постійні вагові коефіцієнти визначаються на підставі відомих числових методів інтегрування (ЧМІ) [2-5]. Також слід зауважити, що ЧМІ використовуватись для розрахунку координат розташування хордових АК УЗВ відносно осі вимірювального трубопроводу (ВТ) [1].

В роботі [6] нами було обґрунтовано розробку комп'ютерної програми *NumericalMethods* (версія 1.0), яка б у зручній формі дозволяла користувачу швидко та миттєво отримувати координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ на базі класичних ЧМІ. Розроблена програма базується на таких ЧМІ: Гауса-Лежандра, Гауса-Чебишева та Гауса-Якобі. Проте, логічно припустити, що класичні ЧМІ для задач ультразвукової витратометрії, рано чи пізно, повинні були породити нові методи на їх основі або піддатись удосконаленню. В даній роботі поставлено за мету дослідити такі ЧМІ та доповнити ними комп'ютерну програму *NumericalMethods*. При цьому основним критерієм при відборі ЧМІ має бути той факт, що цей метод використовується науковцями/розробниками задля проектування нових УЗВ, або дослідження існуючих витратомірів. Також нами сформовано другорядну мету роботи – удосконалити комп'ютерну програму *NumericalMethods* з позиції взаємодії з користувачем, адже в існуючій (версія 1.0) при введенні неправильних значень, користувачу не надається жодних повідомлення про подальші дії.

Аналіз публікацій. Аналізуючи наукову літературу в галузі ультразвукової витратометрії [2-4], нами було відібрано два ЧМІ, які будуть додані до удосконаленої програми *NumericalMethods* (версія 2.0). Розглянемо детальніше ці ЧМІ.

В науковій праці [2] зазначено, що в найрізноманітніших ситуаціях застосування класичних ЧМІ (так звана стандартна квадратура Гауса [5], яку ще називають ЧМІ Гауса-Лежандра; квадратура на базі полінома Чебишева другого порядку [5], яка є базою для класичного ЧМІ Гауса-Якобі) для визначення усередненої швидкості потоку багатоканального хордового УЗВ за швидкостям вздовж його АК, не завжди дає хороші результати. Натомість, С.Г. Harris та W.A.V. Evans пропонують свій метод («tailored to velocity profiles method»), детально описаний в [7] (в цій роботі він буде мати назву ЧМІ Гарріса-Еванса), і згідно якого, знаючи заздалегідь функціональну форму профіля швидкості потоку, можна розрахувати оптимальні координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ. Згідно ЧМІ Гарріса-Еванса, вагові коефіцієнти та координати розташування АК УЗВ в певному сенсі «приспосовуються» до функціональної

форми профілю швидкості [7]. Провівши дослідження, викладені в [7], автори показали, що ЧМІ Гарріса-Еванса дозволяє спроекувати багатоканальний хордовий УЗВ, що дає менші похибки вимірювання витрати для заданої кількості АК у порівнянні з ЧМІ Гауса-Лежандра і ЧМІ Гауса-Якобі: для двоканальних УЗВ (в діапазоні числа Рейнольдса $Re = 10^3 \dots 10^7$) ЧМІ Гауса-Лежандра призводить до пікової похибки приблизно в -7,5 %, ЧМІ Гауса-Якобі майже 4 %, а ЧМІ Гарріса-Еванса призводять до найменшої пікової похибки в 2 % в кінці діапазону; при цьому похибка вимірювання витрати один раз дорівнює нулю при $Re \approx 10^4$ для ЧМІ Гарріса-Еванса; для три-, чотири- і п'ятиканальних УЗВ пікова похибка вимірювання витрати (в діапазоні $Re = 10^3 \dots 10^7$) за ЧМІ Гауса-Якобі показує гірші результати за ті, які отримані за ЧМІ Гауса-Лежандра; у всіх випадках ЧМІ Гарріса-Еванса створює менший та рівномірний розподіл похибки, для понад чотирьох порядків числа Re , що становить 0,1 % або ще менше, для чотири- і п'ятиканальних УЗВ.

Що стосується другого відібраного методу, то про нього детально описано в науковій праці [3]. В ній Voser пропонує дещо модифікувати ЧМІ Гауса-Якобі для інтегрування швидкостей потоку УЗВ – визначати координати розташування та вагові коефіцієнти АК на базі зміненої вагової функції поліному Якобі. Тим самим, Voser пропонує відмовитись від ідеї застосування рівномірного розподілу швидкостей (ступінь вагової функції поліному Якобі $k = 0,5$) на користь нерівномірного (турбулентного) розподілу швидкостей (ступінь вагової функції поліному Якобі $k = 0,6$) [3, 4]. Це дозволяє отримати підінтегральну функцію ЧМІ максимально ідентичному реальному турбулентному профілю потоку (враховується нульова пристінна швидкості). Цей ЧМІ отримав назву OWICS (Optimized Weighted Integration Method for Circular Sections) і дозволяє зменшити похибку інтегрування швидкості потоку на 0,1...0,2 % відносно класичного ЧМІ Гауса-Якобі. Крім того, Voser включив у свій метод фактичні, виміряні координати розташування АК УЗВ, чим виключив похибку позиціонування. Даний ЧМІ був включений до стандарту CEI/IEC 60041 як один із таких, що використовується при акустичному вимірюванні водостоків гідроелектростанцій (Acoustic Discharge Measurement, ADM) [8].

Викладення основного матеріалу. Удосконалення ЧМІ для задач ультразвукової витратометрії, в першу чергу стосуються того, щоб мінімізувати похибку вимірювання витрати спроекуваного УЗВ в реальних умовах експлуатації. І тут виникають два напрямки дослідження: 1) ЧМІ для УЗВ, які даватимуть найменшу похибку вимірювання витрати в умовах неспотвореної структури потоку; 2) ЧМІ для УЗВ, які даватимуть найменшу похибку вимірювання витрати в умовах спотвореної структури потоку (під впливом місцевих опорів, регуляторів тиску, фільтрів та іншого технічного обладнання, що інстальоване у вимірювальний трубопровід).

Для першого напрямку досліджень, у випадку комерційного обліку, обійтись без калібрування спроекуваного УЗВ перед його запуском в експлуатацію, не вийде. Завдяки множенню вимірюваного значення витрати УЗВ на калібрувальний коефіцієнт, вдається отримати задовільний результат не зважаючи на те, яким чином отримані координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ – тобто тип ЧМІ не є важливим. Слід зауважити, що можуть існувати випадки, коли ЧМІ зовсім не застосовують. При цьому АК УЗВ розміщують рівномірно і пропорційно до їх кількості, це стосується і визначення вагових коефіцієнтів. В такому випадку калібрування нового УЗВ вкрай необхідне [1].

Для другого напрямку, застосування класичних ЧМІ та процесу калібрування УЗВ, на нашу думку, не завжди даватиме бажані результати вимірювання без додаткового калібрування по місцю. Це викликано тим, що дотепер не існує вичерпного списку стандартизованих рекомендацій щодо розміщення відкаліброваного УЗВ відносно джерел спотворення структури потоку [1]. Цьому є кілька логічних причин: велика варіативність конструкцій розташування АК УЗВ (хордові, Δ -схема, комбіновані); велика варіативність застосування АК УЗВ (2, 3, 4, 5, 6 та їх комбінації; перехрещування); велика варіативність джерел спотворення структури потоку, зокрема типових місцевих опорів та їх комбінації; непередбачуваність режиму течії вимірюваного середовища (значення числа Рейнольдса), на який впливає стан внутрішньої поверхні стінок ВТ та засмічення потоку. Також існує випадок, коли необхідної довжини прямолінійної ділянки між УЗВ і джерелом спотворення просто не вистачає із-за особливостей технологічної площадки. В такому випадку калібрування по місцю дозволяє мінімізувати похибку вимірювання витрати [1].

Як у першому, такі особливо і у другому дослідженні, існує один фактор, який спонукає науковців до удосконалення класичних ЧМІ – вони несуть в собі долю похибки. Це викликано тим, що математичний апарат класичних ЧМІ (до прикладу, вагова функція ортогонального поліному Якобі в класичному ЧМІ Гауса-Якобі), не враховує напряму природи потоку [2-3]. Оскільки дана проблема відома, науковці намагаються удосконалювати класичні ЧМІ для визначення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК УЗВ із врахуванням теорії розподілу швидкості потоку (застосовують закони

розподілу швидкості потоку в поперечному перерізі ВТ). Проте навіть у цьому випадку емпірично-виведені закони розподілу швидкості потоку функціонально залежать від числа Рейнольдса та шорсткості внутрішніх стінок ВТ. В цьому випадку точність проєктованого УЗВ залежатиме від того, яку функціональну залежність і як саме, застосує науковець [2-3]. Тому поява нових ЧМІ для проєктування УЗВ неминуча.

Як відомо, обчислення об'ємної витрати багатоканальних хордових УЗВ (q_v) може відбуватись із застосуванням наступної формули [3-4]:

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4} \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2 - x(i)^2}}{\pi R} w(i)v(i) \right), \quad (1)$$

де $D = 2R$ – внутрішній діаметр ВТ (або корпусу УЗВ); R – внутрішній радіус ВТ; $x(i)$, $w(i)$ – координата розташування та ваговий коефіцієнт i -го АК; $v(i)$ – усереднена вздовж i -го хордового АК швидкість потоку; N – кількість АК УЗВ. Для реалізації формули (1) необхідно мати значення $x(i)$ та $w(i)$, а також значення середньої швидкості потоку $v(i)$ вздовж кожного хордового АК.

Як зазначено в стандарті ISO17089-1 та звітах Американської газової асоціації (AGA Report No.7) та Європейської групи по дослідженню газу (GERG Technical Monograph No.11), значення $x(i)$ та $w(i)$ можуть бути розраховані із застосуванням ЧМІ. Як вже було зазначено, в роботі [6] нами розглянуто класичні ЧМІ, які найчастіше зустрічаються в наукових працях по ультразвуковій витратометрії, і на їх основі розроблено комп'ютерну програму (консольний калькулятор) для зручного їх використання.

Зважаючи на результати виконаного аналізу наукових праць, значення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК УЗВ (для $N = 2, 3$ та 4) за ЧМІ Гарріса-Еванса та ЧМІ OWICS зведено в таблицю 1. Саме ці дані будуть додані до оновленої комп'ютерної програми *NumericalMethods* (версія 2.0) для проєктування багатоканальних хордових УЗВ.

Таблиця 1. Координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ

N	ЧМІ Гарріса-Еванса [2]		ЧМІ OWICS [3]	
	$x(i)$	$w(i)$	$x(i)$	$w(i)$
2	$\pm 0,4782$	0,8695	$\pm 0,4879$	0,8908
3	$\pm 0,7794$	0,5035	$\pm 0,6956$	0,5537
	0	0,9304	0	0,7687
4	$\pm 0,8893$	0,2273	$\pm 0,7996$	0,3719
	$\pm 0,4067$	0,7441	$\pm 0,3038$	0,5882

Удосконалена комп'ютерна програма *NumericalMethods 2.0*, як і попередня її версія, в режимі консольного спілкування запитує від користувача інформацію про внутрішній радіус ВТ (r), кількість АК УЗВ (N) та тип ЧМІ (M). На додачу, якщо користувач обирає ЧМІ Гауса-Якобі, програма запитує значення k . На виході програма видає:

- 1) масив значень відносних координат розташування АК УЗВ $x(i)$;
- 2) масив значень реальних координат розташування АК УЗВ $X(i)$;
- 3) масив значень вагових коефіцієнтів АК УЗВ $w(i)$.

Спрощена блок-схема удосконаленої програми наведено на рис.1. Комп'ютерна програма *NumericalMethods 2.0* розроблена в середовищі розробки Visual Studio Community 2019 із використанням мови програмування C#.

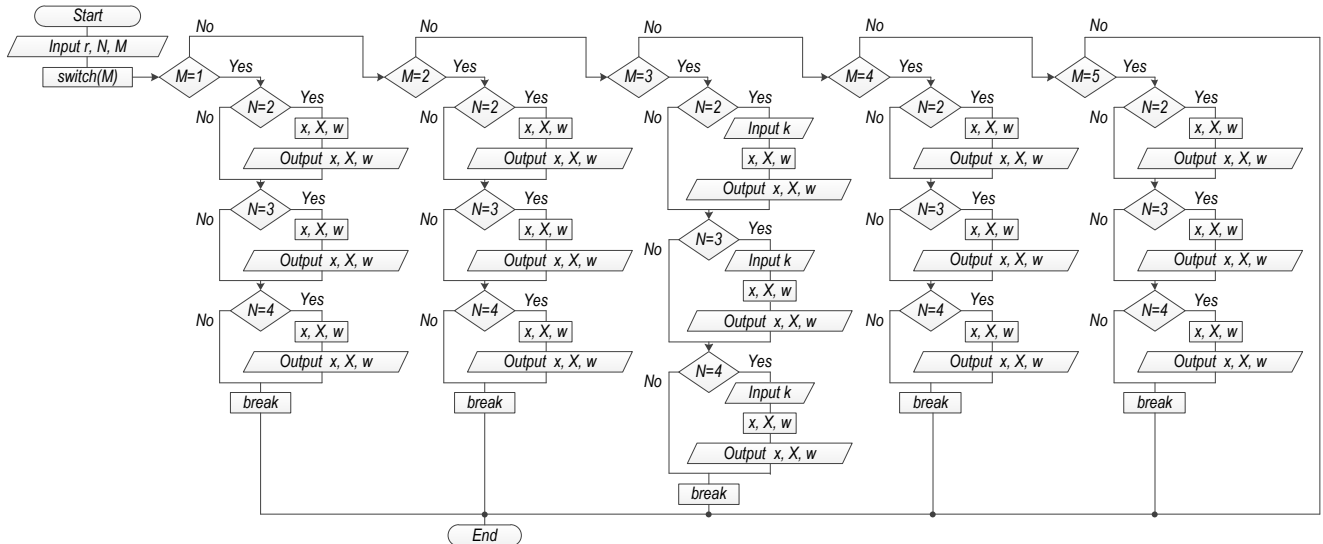


Рис.1. Спрощена блок-схема «логіки» програми *NumericalMethods 2.0*

У випадку $M = 1$ та $M = 2$, значення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів (w) АК УЗВ отримано за табличними (довідковими) даними [2, 3, 5], а для $M = 4$ та $M = 5$ за даними з таблиці 1 – ЧМІ Гарріса-Еванса та ЧМІ OWICS відповідно. Значення реальних координат розташування (X) АК УЗВ отримано множенням x на внутрішній радіус ВТ. Для складнішого випадку, коли значення $M = 3$, де користувач додатково повинен увести значення степеня вагової функції поліному Якобі (k), координати розташування (x) та вагові коефіцієнти (w) АК УЗВ отримано за відповідними поліноміальними аналітичними залежностями $x = f(k)$ та $w = f(k)$ [6]. Опісля, значення реальних координат розташування (X) АК УЗВ так само отримано множенням x на внутрішній радіус ВТ.

На рис.2 зображено консольне вікно програми *NumericalMethods 2.0* в режимі «запиту».

```

*****
                NumericalMethods 2.0
* The program for calculating the coordinates of the location (x) *
* and the weighing coefficients (w) of the acoustic paths of *
* chordal ultrasonic flow meters (USM). Out of user choice, *
* the calculation is performed by one of the three numerical *
* methods of integration (NMI) - Gauss-Legendre, Gauss-Chebyshev, *
* Gauss-Jacobi, Harris-Evans and OWICS.
*
* -----
* Lviv Polytechnic National University, 2023
*****

1. Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm: 100
2. Enter the number of acoustic paths USM (N = 2, 3 or 4): 2
3. Choose a NMI (enter the number):
    1 - Gauss-Legendre
    2 - Gauss-Chebyshev
    3 - Gauss-Jacobi
    4 - Harris-Evans
    5 - OWICS
5
    
```

Рис.2. Вікно програми *NumericalMethods 2.0* в режимі «запиту»

На рис.3 зображено консольне вікно програми *NumericalMethods 2.0* в режимі «відповіді».

```

r: 100 mm
N: 2
NMI: OWICS
x: 0,4879 -0,4879
X: 48,7900 -48,7900 (mm)
w: 0,8908 0,8908

To repeat - enter 1. To exit - enter 0 and then any key:
    
```

Рис.3. Вікно програми *NumericalMethods 2.0* в режимі «відповіді»

З метою удосконалення комп'ютерної програми *NumericalMethods 2.0* з позиції взаємодії з користувачем, передбачено вивід попереджувальних повідомлень і прохання повторного введення коректних даних для таких ситуацій:

- 1) якщо значення внутрішнього радіуса ВТ має від'ємне значення або рівне нулю;
- 2) якщо невірно введено номер ЧМІ (ціле число M);
- 3) якщо невірно введено кількість АК УЗВ (ціле число N).

Приклад таких попереджувальних повідомлень показано на рис.4.

```
1. Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm: -100
Wrong! The value of the internal radius is negative or zero. Enter the correct value
1. Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm: 100
2. Enter the number of acoustic paths USM (N = 2, 3 or 4): 1
Wrong! Enter the correct number of acoustic paths
2. Enter the number of acoustic paths USM (N = 2, 3 or 4): 2
3. Choose a NMI (enter the number):
    1 - Gauss-Legendre
    2 - Gauss-Chebyshev
    3 - Gauss-Jacobi
    4 - Harris-Evans
    5 - OWICS
6
Wrong! Enter the number of the available method
3. Choose a NMI (enter the number):
    1 - Gauss-Legendre
    2 - Gauss-Chebyshev
    3 - Gauss-Jacobi
    4 - Harris-Evans
    5 - OWICS
```

Рис.4. Вікно програми *NumericalMethods 2.0* в режимі виводу попереджувальних повідомлень

На останок, коли програма завершила вивід результатів на екран, передбачено дві ситуації для продовження – завершення програми (вихід з програми), або початок нового розрахунку (повторення розрахунків). Дана опція супроводжується візуальним попередженням користувачу (рис.3).

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Після теоретичного обґрунтування потреби, авторами удосконалено розроблену ними комп'ютерну програму-калькулятор *NumericalMethods 2.0*, яка в консольному режимі розраховує значення координат розташування та вагових коефіцієнтів АК багатоканальних УЗВ. Користувач для успішного її застосування, вводить три (або чотири, у випадку ЧМІ Гауса-Якобі) вхідні параметри: 1) внутрішній діаметр вимірювального трубопроводу; 2) кількість АК УЗВ; 3) тип ЧМІ; 4) степінь вагової функції поліному Якобі, якщо був обраний ЧМІ Гауса-Якобі. Розроблений алгоритм програми базується як на табличних даних (з математичних довідників), так і на розроблених авторами аналітичних залежностях $x = f(k)$ та $w = f(k)$. Отримання результату відбувається миттєво, що дозволить автоматизувати роботу розробникам, проектантам, науковцям і студентам, які теоретично досліджують майбутній вплив геометричних характеристик УЗВ на їх метрологічну точність в різноманітних умовах експлуатації.

Подальші плани в цьому напрямку стосуються розробки повноцінної програми, з підтриманням візуального інтерфейсу користувача та розширенням функціоналу – можливість розрахунку калібрувального коефіцієнта й витрати УЗВ на базі відомих аналітичних законів розподілу швидкості потоку в трубопроводі.

Список бібліографічного опису

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Pannel, C.N., Evans, C.N., and Jackson, D.A. (1990). A new integration technique for flowmeters with chordal paths. *Flow Measurement Instrumentation*, 1, 216-224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z)
3. Voser, A. (1999). Analysis and error optimization of multipath strength acoustic flow measurement in water turbines. Unpublished master's doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
4. Tresch, T., Gruber, P., and Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHM, Portland Oregon, USA. <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>
5. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). *Handbook of mathematical function*. New York, NY: NBS.

6. Roman, V., Matiko, F., and Kutsan, A. (2022). Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. *Journal of Energy Engineering and Control Systems*, 8(2), 98-103. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>
7. Harris, C.G., and Evans, W.A.B. (1977). Extension of numerical quadrature formulae to cater for end point singular behaviours over finite intervals. *International Journal of Computer Mathematics*, 6(3), 219-227, <https://doi.org/10.1080/00207167708803139>
8. International Electrotechnical Commission. (1991). CEI/IEC 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines. Storage, pumps and pump turbines.

References

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Pannel, C.N., Evans, C.N., and Jackson, D.A. (1990). A new integration technique for flowmeters with chordal paths. *Flow Measurement Instrumentation*, 1, 216-224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z)
3. Voser, A. (1999). Analysis and error optimization of multipath strength acoustic flow measurement in water turbines. Unpublished master's doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
4. Tresch, T., Gruber, P., and Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA. <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>
5. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). Handbook of mathematical function. New York, NY: NBS.
6. Roman, V., Matiko, F., and Kutsan, A. (2022). Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. *Journal of Energy Engineering and Control Systems*, 8(2), 98-103. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>
7. Harris, C.G., and Evans, W.A.B. (1977). Extension of numerical quadrature formulae to cater for end point singular behaviours over finite intervals. *International Journal of Computer Mathematics*, 6(3), 219-227, <https://doi.org/10.1080/00207167708803139>
8. International Electrotechnical Commission. (1991). CEI/IEC 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines. Storage, pumps and pump turbines.