

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-44>

УДК 681.121.89.082.4

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

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

Прокопів Володимир Олександрович, студент

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

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНОГО МАКЕТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА ДЛЯ ЙОГО CFD-АНАЛІЗУ

Роман В.І., Прокопів В.О. Алгоритм побудови тривимірної моделі ультразвукового витратоміра для його CFD-аналізу. В роботі авторами розроблено покроковий алгоритм побудови тривимірної моделі ультразвукового витратоміра в САПР SolidWorks для його CFD-аналізу. Даний алгоритм є складовою частиною узагальненої процедури CFD-аналізу ультразвукових витратомірів. На основі даного алгоритму, авторами показано розрахунок важливих з конструктивної точки зору параметрів двоканального хордового УЗВ, при побудові його тривимірної моделі в САПР SolidWorks. Для двоканального хордового ультразвукового витратоміра з наведеного в роботі прикладу, авторами отримано дві калібрувальні криві – на повітрі та на метані.

Ключові слова: алгоритм, CFD-аналіз, ультразвуковий витратомір, тривимірний макет, хордові акустичні канали, калібрувальна крива

Roman V., Prokopiv V. Algorithm for constructing a three-dimensional model of an ultrasonic flowmeter for its CFD analysis. The authors of the paper have developed a step-by-step algorithm for constructing a three-dimensional model of an ultrasonic flowmeter in the CAD system SolidWorks for its CFD analysis. This algorithm is a component of the generalized procedure for CFD analysis of ultrasonic flowmeters. Based on this algorithm, the authors have demonstrated the calculation of important parameters of a two-path chordal ultrasonic flowmeter from a design standpoint, when building its three-dimensional model in the SolidWorks CAD system. For the two-path chordal ultrasonic flowmeter in the example provided in the paper, the authors obtained two calibration curves – for air and methane.

Keywords: algorithm, CFD analysis, ultrasonic flowmeter, three-dimensional model, chordal acoustic paths, calibration curve

Проблематика питання. За даними сайту straitsresearch.com, обсяг глобального ринку ультразвукових витратомірів (УЗВ) у 2021 році становив 690 мільйонів доларів США та, за прогнозами експертів, досягне 1 080 мільйонів доларів США до 2030 року, зростаючи в середньорічному темпі на 5,1 % протягом прогнозованого періоду (2022–2030 роки) [1]. В Україні ця тенденція теж існує, що підтверджується періодом до повномасштабного вторгнення. Ось кілька прикладів станом на кінець 2021 року: ТОВ «Оператор ГТС України» з початку року встановило УЗВ на 27 газорозподільних станціях для підвищення точності та достовірності обліку газу [2]; оператор газосховищ України розпочав реалізацію масштабного проекту з будівництва пунктів вимірювання витрати природного газу, зокрема на Більче-Волицько-Угерському газосховищі із використанням УЗВ. Бюджет робіт, які мали тривати до 2025 року, сягав 1,4 млрд. гривень [3]; в березні 2019 року «Укртрансгаз» ввів в експлуатацію після реконструкції газорозподільну станцію «Калуш-2» (Івано-Франківська область), яка є однією з найпотужніших у газотранспортній системі України. Загальна сума інвестицій склала 82 млн. грн., а основою для станції стала новітня технологія вимірювання витрат газу ультразвуковим методом [4]; на початок 2022 року АТ «Укргазвидобування», через систему Prozorro, замовив високоточні ультразвукові лічильники для облаштування вузлів обліку на суму близько 130 млн. гривень [5].

Для вирішення різноманітних задач, які виникають в цій галузі, науковці та виробники використовують безліч технік, одна з яких – комп'ютерно-математичний апарат методів обчислювальної гідродинаміки (так зване CFD-моделювання / CFD-аналіз) [6-8]. Особливо це доцільно в період проектування нових чи дослідження діючих типів УЗВ. Часові, фінансові, людські затрати при застосуванні CFD-моделювання значно менші, в порівнянні з аналогічним підходом на реальних прототипах продуктів (на вимірювальних установках в лабораторіях чи на полігоні, та ще й під час можливих обстрілів ворога). Поєднуючи попит на УЗВ для потреб величезної газотранспортної системи України та наявність розвинутої комп'ютерної технології моделювання потоків, можна з певністю говорити, що наукові дослідження в цій сфері є вкрай актуальними.

Попри популярність УЗВ, що викликана в першу чергу їх перевагами (мають більш широкий діапазон вимірювання та вдвічі більшу точність, завдяки калібруванню на метрологічних стендах [2]; малі втрати тиску, двонапрямленість потоку та інші [9-11]), цей тип витратомірів має і свої недоліки, серед яких основний – чутливість до збурень структури профілю швидкості потоку

різного роду місцевими опорами (МО) чи регулюючою арматурою [12]. Першим способом усунення цього впливу, є забезпечення достатньої відстань між УЗВ і джерелом спотворення [9, 11]. Другий спосіб – ускладнення конструкції УЗВ додавання пристроїв підготовки або «кондиціонування» потоку [9, 11]. Як в першому, так і другому випадку, зручним інструментом стає потужний комп'ютерно-математичний апарат, який перебуває на такому рівні, що дозволяє вирішувати широкий спектр наукових та практичних задач [6-8].

До комп'ютерних програмних пакетів, що реалізують саме методи обчислювальної гідродинаміки (CFD-пакети), належить і Flow Simulation, що є складовою частиною САПР SolidWorks. Щоб провести описані вище дослідження способів усунення спотворень структури потоку перед УЗВ, користувачу необхідно виконати так звану процедуру CFD-аналізу [13], серед кроків якої, передбачена побудова адекватної щодо реального об'єкта CFD-моделі цього об'єкта (тривимірний макет). Саме розробці алгоритму побудови CFD-моделі УЗВ в САПР SolidWorks присвячена дана робота.

Викладення основного матеріалу. Узагальнена процедура CFD-аналізу об'єктів дослідження (рис.1), яку запропонував Shaw [13], містить шість етапів:

1. Початкові судження та міркування про проблему, що моделюється, щоб точно її окреслити та визначити. На цьому етапі досліднику потрібно зібрати якомога більше необхідної інформації для моделювання (геометрії об'єкту аналізу, властивості та характеристики плинних речовин, граничні та початкові умови). В контексті УЗВ, дослідник повинен зібрати паспортні дані витратоміра та вимірювальної ділянки, де він працюватиме, якщо аналізується реальний тип. Якщо проектується новий УЗВ, то необхідно обрати методіку для визначення координат розташування акустичних каналів (АК) та їх вагових коефіцієнтів, до прикладу на базі якогось із класичних числових методів інтегрування (ЧМІ), як от метод Гауса-Якобі [9-11, 14].

2. Побудова геометрії. Під геометрією розуміється просторова область течії, як от вимірювальний трубопровід (ВТ) у випадку моделювання УЗВ. Тривимірна геометрія створюється за допомогою спеціалізованого креслярського програмного забезпечення (до прикладу, САПР AutoCad, SolidWorks [15] та інші подібні продукти).

3. Створення розрахункової сітки. На цьому етапі геометрія (неперервний простір області течії) розбивається на елементарні малі дискретні комірки, розподіл яких визначає позиції, в яких повинні обчислюватися і зберігатися змінні потоку. Градієнти змінних, як правило, більш точно розраховуються на дрібній сітці, ніж на грубій. Тому, дрібна сітка особливо важлива в областях, де очікуються значні коливання змінних потоку (до прикладу, типові МО, робочі органи регулювальної арматури, «кишені» електроакустичних перетворювачів УЗВ, тощо). Дрібна сітка, однак, вимагає збільшення обчислювальної потужності комп'ютерної техніки і, що логічно, часу на розрахунок.

4. Характеристика потоку. Набір характеристик (специфікація) потоку включає визначення фізичних властивостей плинного середовища (рідина, газу, чи суміші), моделі (режиму) потоку (турбулентний, перехідний чи ламінарний), граничних і початкових умов, визначених на початковій стадії проектування (до прикладу, за паспортними даними вимірювальної установки).

5. Обчислення числового розв'язку. Коли вся інформація, необхідна для моделювання, вказана, CFD-пакет виконує ітераційні обчислення для отримання розв'язку числових рівнянь, що описують потік (рух, теплообмін, тощо). Користувач також повинен надати інформацію, яка буде контролювати процес числового розв'язку (до прикладу, критерії збіжності).

Оскільки УЗВ є витратоміром за швидкісним принципом вимірювання витрати, деталізуємо те, яким чином відбувається CFD-моделювання руху потоку. Математичні рівняння, що використовуються для опису руху потоку (течії плинного середовища) в CFD-пакеті Flow Simulation SolidWorks – це рівняння нерозривності та рівняння імпульсу (також відомі як рівняння Нав'є-Стокса), які описують збереження маси та імпульсу відповідно. Для потоків з теплопередачею, потрібен інший набір рівнянь, який описує збереження енергії [16].

Оскільки комп'ютерна техніка оперує лише числовими даними, названі рівняння не можна розв'язати безпосередньо, а лише у формі диференціальних рівнянь в часткових похідних (ДРЧП). Далі ці рівняння перетворюються в числові (містять тільки числа і не мають похідних) – відбувається так звана числова дискретизація. Процес дискретизації пов'язаний з похибкою, оскільки числові члени є лише наближенням до вихідних членів диференціала в частинних похідних. Однак, цю похибку можна мінімізувати до дуже низького значення, а отже, до

прийняттю рівня [13].

Основними методами, що використовуються в CFD-аналізі для дискретизації, є [17]:

- метод скінченних різниць або метод сіток, що перетворює диференціальні оператори на різниці, а функції неперервного аргументу на функції дискретного аргументу; така заміна переводить ДРЧП в систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, які зрештою зводяться до лінійної системи деяким ітераційним методом;

- метод скінченних елементів, що перетворює ДРЧП в апроксимуючу систему звичайних диференціальних рівнянь, які потім розв'язуються використанням якої-небудь стандартної техніки (метод Ейлера, Рунге-Кутти тощо); вся геометрія розбивається на скінченну кількість невеликих підобластей (елементів), і припускається, що залежні змінні змінюються в межах кожного елемента, і ці зміни потім використовуються для створення опису того, як змінні змінюються в усій області; метод генерує рівняння для кожного елемента незалежно від інших елементів, а взаємодія між елементами враховується лише тоді, коли рівняння елементів зібрані в матриці;

- метод скінчених об'ємів, що працює за схожим принципом з методом скінчених елементів; тут теж використовується сітка, але не елементів, а скінчених об'ємів навколо кожної вузлової точки сітки; як і в методі кінцевих різниць, числові рівняння в даній точці базуються на значеннях в сусідніх точках.

Метод скінчених об'ємів для дискретизації використовується в CFD-пакеті Flow Simulation САПР SolidWorks.

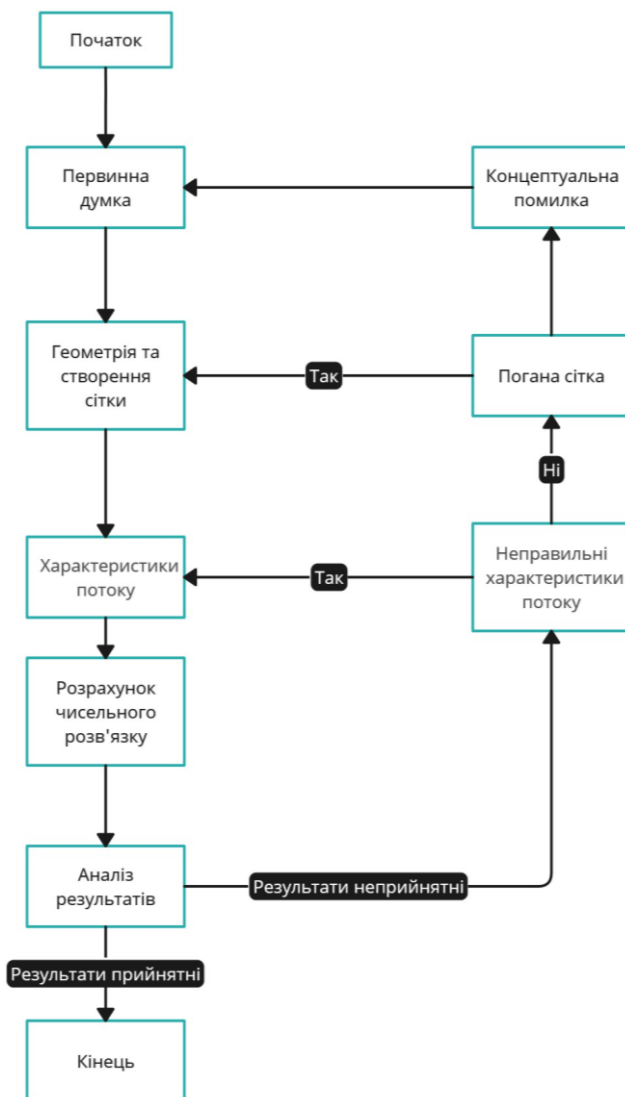


Рис.1. Блок-схема CFD-аналізу [13, 18]

Після отримання дискретних числових рівнянь вони розв'язуються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для отримання набору числових значень змінних у

множині дискретних точок, визначених сіткою [18]. Якщо проблема, яку розв'язують, є нестационарною, тобто залежною від часу, реальний час потоку розбивається на менші часові інтервали, які називаються часовими кроками, і на кожному кроці має бути досягнуте наближене рішення потоку, перш ніж переходити до наступного часового кроку. Це додає ще один цикл ітерацій до процесу розв'язання [18].

6. Аналіз (обробка) отриманих даних. Отримавши розв'язок, користувач може проаналізувати результат, щоб перевірити, чи є він задовільним, і визначити необхідні подальші кроки. Якщо отримані результати є незадовільними, необхідно визначити джерело помилки (неправильна специфікація потоку, низька якість сітки або концептуальна помилка у формулюванні задачі) [13].

Для CFD-аналіз УЗВ слід розглянути коротко суть роботи даного типу витратомірів. Як відомо, класичний УЗВ це витратомір, що для визначення швидкості (витрати) потоку використовує ефекти взаємодії ультразвуку з рухомих потоком. Якщо УЗВ працює за часорізницевим методом (*transit-time*), то фіксується різниця проходження ультразвукових коливань за і проти потоку [9]. Якщо витрата нульова, то і різниця нульова. Але як тільки з'являється рух, різниця починає рости.

Рівняння об'ємної витрати УЗВ отримують за швидкісним принципом вимірювання, коли витрата залежить від усередненої по перерізу ВТ (u_{ser}) швидкості потоку [9]:

$$q_v = Au_{ser}, \quad (1)$$

де $A = \pi R^2$ – площа поперечного перерізу ВТ; $R = D/2$, де D – внутрішній діаметр ВТ.

УЗВ не можуть виміряти u_{ser} безпосередньо (напряму), тому він вимірюють середню швидкість потоку (u_L) вздовж (і в напрямку) АК (рис.2,а) довжиною L . Дану швидкість необхідно перетворювати до u_{ser} за допомогою поправкового коефіцієнта профілю k [9]:

$$q_v = Au_{ser} = Aku_L, \quad (2)$$

де k – залежить від гідродинаміки потоку та стану внутрішньої поверхні труби. В основному документі Американської газової асоціації (AGA) по УЗВ [11], на базі напівемпіричного профілю Нікурадзе (степеневим законом) [16], розроблено формулу для визначення коефіцієнта k [11]:

$$k = \frac{2n}{(2n+1)}, \quad (3)$$

де n – число Нікурадзе (є функцією числа Рейнольдса і шорсткості труби або коефіцієнта тертя) [11, 16].

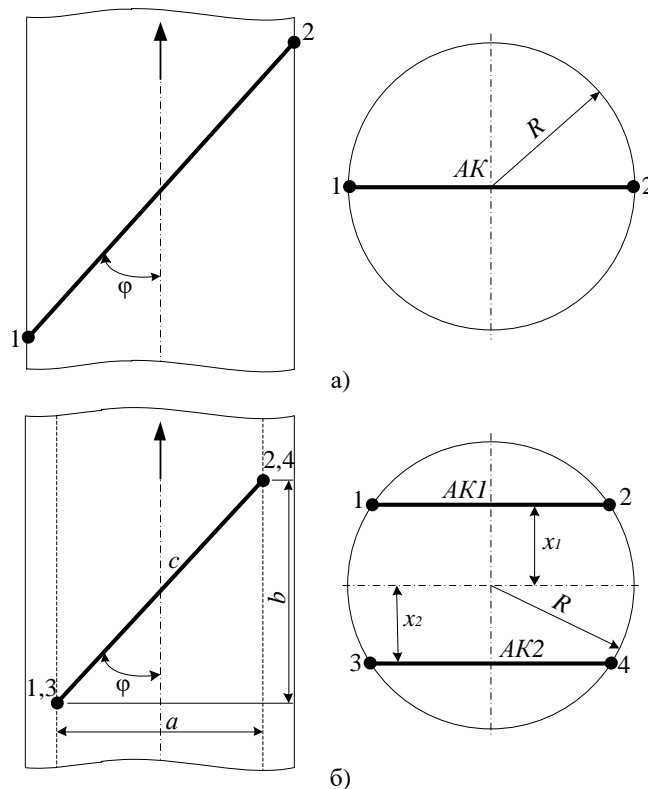


Рис.2. Вимірювальна схема УЗВ: а) одноканального діаметрального; б) двоканального хордового

У випадку, якщо УЗВ має кілька АК, до прикладу два, то формулу (2) можна модифікувати

до такого вигляду [14]:

$$q_v = Au_{ser} = A(w_1u_{L1} + w_2u_{L2}), \quad (4)$$

де u_{L1} та u_{L2} – усереднені швидкості потоку вздовж АК1 АК2 (рис.2,б), w_1 та w_2 – вагові коефіцієнти першого і другого АК, які вираховують із застосуванням спеціальних формул та ЧМІ, що враховують значення координат розташування АК (x_1 та x_2 на рис.2,б). Вагові коефіцієнти в цій формулі замінюють за своєю суттю коефіцієнт k .

Оскільки в роботі було поставлено за мету розробити алгоритм побудови адекватної щодо реального об'єкта CFD-моделі цього об'єкта (тривимірний макет). Нами розроблено такий алгоритм для випадку, коли об'єктом дослідження виступає одно каналний діаметральний УЗВ (рис.2,а) або багатоканальний хордовий УЗВ (рис.2,б). Алгоритм адаптований для побудови тривимірного макету УЗВ в САПР SolidWorks.

Алгоритм побудови тривимірного макету УЗВ. Розглянемо детально алгоритм побудови тривимірного макету УЗВ в САПР SolidWorks:

1. Визначення типу УЗВ: хордовий / діаметральний.
2. Визначення кількості АК УЗВ: один / багато.
3. Визначення наявності кишень електроакустичних перетворювачів: наявні / відсутні.
4. Розрахунок геометрії АК УЗВ

Для цього можна використовувати паспортні дані реального УЗВ, або теоретичні дані (до прикладу, застосувавши методологію із використанням ЧМІ [10]).

- 4.1. Розрахунок ширини площини, в якій проходять АК (a) за формулою:

$$a = 2\sqrt{R^2 - (Rx)^2}, \quad (5)$$

де x – відносна координата розташування АК УЗВ (його відносна відстані до осі ВТ); для діаметрального УЗВ $x = 0$.

- 4.2. Розрахунок довжини АК (c) за формулою:

$$c = \frac{a}{\cos(\varphi)}, \quad (6)$$

де φ – кут нахилу АК відносно осі ВТ в радіанах.

- 4.3. Розрахунок довжини вимірювальної бази УЗВ (b) за формулою:

$$b = \sqrt{c^2 - a^2}. \quad (7)$$

5. Побудова тривимірного макету ВТ для калібрування УЗВ

- 5.1. Будуємо коло радіусом R (мм).

5.2. Будуємо пряму, довжина L_{mak} (мм) якої пропорційна достатній довжині прямолінійної ділянки ВТ для калібрування УЗВ. Ця пряма є перпендикулярна до площини, в якій лежить коло, і виходить з центру цього ж кола. Для вибору оптимальної значення L_{mak} , потрібно відштовхуватися від того факту, що довжина прямолінійної ділянки ВТ для калібрування УЗВ не може бути меншою за довжину вимірювальної бази УЗВ b . Тобто, L_{mak} може бути рівна b , або бути більшою. Провівши дослідження, нами виведено емпіричну формулу для розрахунку L_{mak} :

$$L_{mak} = 12b. \quad (8)$$

5.3. Будуємо макет видавлюванням кола вздовж прямої, з утворенням циліндра. Надаємо цьому циліндру пустотілості шляхом утворення стінки у напрямку назовні (довільної товщиною в міліметрах).

6. Побудова імітаторів АК УЗВ

6.1. Будуємо «прозорі» площини на відстані xR та $-xR$ відносно осі ВТ. Кількість площин пропорційна кількості АК УЗВ.

6.2. Будуємо в площинах лінії, які слугуватимуть імітаторами АК – вздовж них буде виконуватися «збір» параметрів потоку після CFD-моделювання. Довжина ліній конкретного АК тотожна величині c цього ж АК. Головне, що потрібно виконати на цьому етапі, визначити координати початку імітатора АК, тобто визначити місце встановлення УЗВ при калібруванні (l_{mak}). Оскільки оптимальний L_{mak} є більшим за b , нами проведено дослідження варіантів встановлення УЗВ на ВТ: початок, середина та кінець макету, виражені в міліметрах. Як показали результати моделювання, оптимальним є варіант розміщення імітаторів АК (до прикладу, 1 на рис.2,а), розрахований за емпіричною формулою виду:

$$l_{mak} = 0,5L_{mak}. \quad (9)$$

Зауваження №1. Перед CFD-моделюванням, імітатори АК УЗВ весь час повинні бути «виключені» з макету. Опісля, їх «включать», і знімають дані вздовж них.

Зауваження №2. Для чого потрібен тривимірний макет УЗВ для калібрувати УЗВ?

Під час CFD-аналізу в рівняння об'ємної витрати УЗВ (2) або (4) потрапляють значення швидкостей потоку, які отримані за результатами CFD-моделювання простим усередненням даних вздовж імітаторів АК. Однак, при такому застосуванні, ці рівняння можуть мати систематичні похибки внаслідок таких причин:

1) неточності відтворення геометрії АК УЗВ, внаслідок складності конструкції, та у випадках, коли деяка інформація відсутня, або неправильно визначена;

2) неточності відтворення методами CFD-моделювання ефектів турбулентності потоку та похибки дискретизації розрахункової сітки [6];

3) вибір недостатньої кількості точок для усереднення значень вздовж імітаторів АК.

З метою усунення вказаних недоліків, запропоновано виконувати удосконалення рівнянь (2) та (4) за допомогою введення в них калібрувального коефіцієнта k_{cal} який залежить від значення еталонної витрати, при якій відбувається CFD-моделювання. Згідно [9], визначення калібрувального коефіцієнта УЗВ слід виконувати для умов відсутності спотворень структури потоку – за достатньої довжини прямолінійної ділянки ВТ. Значення k_{cal} для фіксованої витрати пропонується визначати на основі еталонних значень масової витрати за формулою:

$$k_{cal} = \frac{q_{m.et}}{q_{m.CFD}}, \quad (10)$$

де $q_{m.et}$ – еталонне значення масової витрати, яке задаємо на етапі налаштування CFD-паketу перед CFD-моделюванням; $q_{m.CFD} = q_v \rho_{ser}$ – значення масової витрати УЗВ; q_v – отримуємо за формулою (2) або (4), в яких швидкість знайдена за результатами CFD-моделювання вздовж імітаторів АК, як і ρ_{ser} (густина).

Слід зазначити, що еталонне значення масової витрати вибираємо на основі відомостей про робочий діапазон об'ємної витрати реальних УЗВ такої ж конструкції та типорозміру, із врахуванням термодинамічних параметрів потоку (тиск, температура, тип середовища), за яких працює УЗВ. Також слід зауважити, що значення цих параметрів використовуються для налаштування CFD-паketу перед CFD-моделюванням.

7. Побудова заглушок

Зглушки, це наче кришка для пляшки, тільки тут вони з обох боків. Вони слугують граничними умовами, які довершать геометрію (з ВТ включно), в середині якої відбувається CFD-моделювання.

7.1. Будемо два кола радіусом $R = R + 0,5$ (мм) на кінцях макету ВТ.

7.2. Будемо видавлюванням з цих кіл твердотілі циліндри довільної товщини в напрямку «назовні». Внутрішня поверхня заглушок слугуватиме для задавання початкових умов CFD-моделювання (вхідна або вихідна витрата / швидкість середовища; вхідний або вихідний тиск середовища). За результатами наших досліджень, найкраще обирати як вхід – масову витрату, а вихід – статичний тиск.

8. Побудова тривимірного макету для дослідження УЗВ в реальних умовах

Зауваження №3. Після отримання калібрувальної кривої УЗВ, тривимірний макет ВТ для його калібрування, може бути використаний для дослідження ефектів роботи витратоміра в реальних умовах. Або, може бути побудований зовсім новий макет. В яких ситуаціях найчастіше використовують CFD-аналіз УЗВ:

а) дослідження впливу спотворень структури потоку на вході існуючих або нових УЗВ; джерелом спотворень найчастіше виступають типові МО [10, 12];

б) дослідження впливу відмінності типу вимірювального середовища калібрування (до прикладу, повітря) від середовища в реальних умовах (до прикладу, метан).

Як у випадку а) так і у випадку б), конструкція ВТ відрізняється від тої, яка була під час калібрування УЗВ.

Будемо новий або модифікуємо тривимірний макет ВТ для калібрування (до УЗВ за напрямком руху добудуємо МО згідно його геометричних характеристики, взятих з відповідних стандартів [9, 14]).

Приклад застосування алгоритму побудови тривимірного макету УЗВ. Для наочності запропонованого нами алгоритму, розглянемо його реалізацію для побудови тривимірного макету двоканального хордового УЗВ на ВТ діаметром 100 мм ($R = 50$ мм). Координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ взяти за ЧМІ Гауса-Якобі [10], згідно якого $x_1 = x_2 = 0,5R = 25$ мм, а $w_1 = w_2 = 0,5$.

Кут $\varphi = 45^\circ$.

Рівняння об'ємної витрати згідно формулі (4):

$$q_v = 0,5\pi R^2(u_{L1} + u_{L2}).$$

1. Визначення типу УЗВ: хордовий.
 2. Визначення кількості АК УЗВ: багатоканальний (два канали).
 3. Визначення наявності кишень електроакустичних перетворювачів: відсутні.
 4. Розрахунок геометрії АК УЗВ
 - 4.1. Ширина площини, в якій проходять АК1 і АК2 (рис.2,б): $a_{1,2} = 86,6025$ мм.
 - 4.2. Довжина АК1 та АК2: $c_{1,2} = 122,4744$ мм.
 - 4.3. Довжина вимірювальної бази УЗВ: $b = 86,6025$ мм.
 5. Побудова тривимірного макету ВТ для калібрування УЗВ: $L_{mak} = 1039$ мм ≈ 1040 мм.
 6. Побудова імітаторів АК УЗВ: $l_{mak} = 520$ мм.
- Вигляд тривимірного макету ВТ з УЗВ для заданих в прикладі умов, зображено на рис.3.

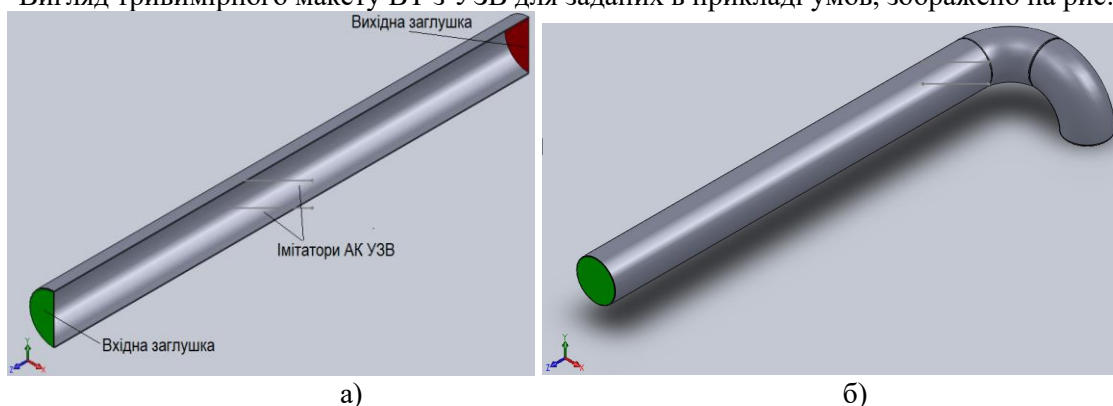


Рис.3. Тривимірний макету ВТ з УЗВ в САПР SolidWorks: а) для калібрування; б) для дослідження

Як можна побачити з результатів проведених нами досліджень, наведених на рис.4, значення калібрувального коефіцієнта, знайденого за формулою (10), не перевищує значення 1,003 одиниці в майже усьому діапазоні витрати, окрім однієї точки (першої). Це свідчить про те, що ця точка є точкою переходу між ламінарним та турбулентним режимами руху течії. На малих швидкостях необхідно особливо враховувати різні фактори впливу. Також цікавим є той факт, що тип середовища не сильно вплинув на результати – криві калібрування для повітря та метану майже однакові.

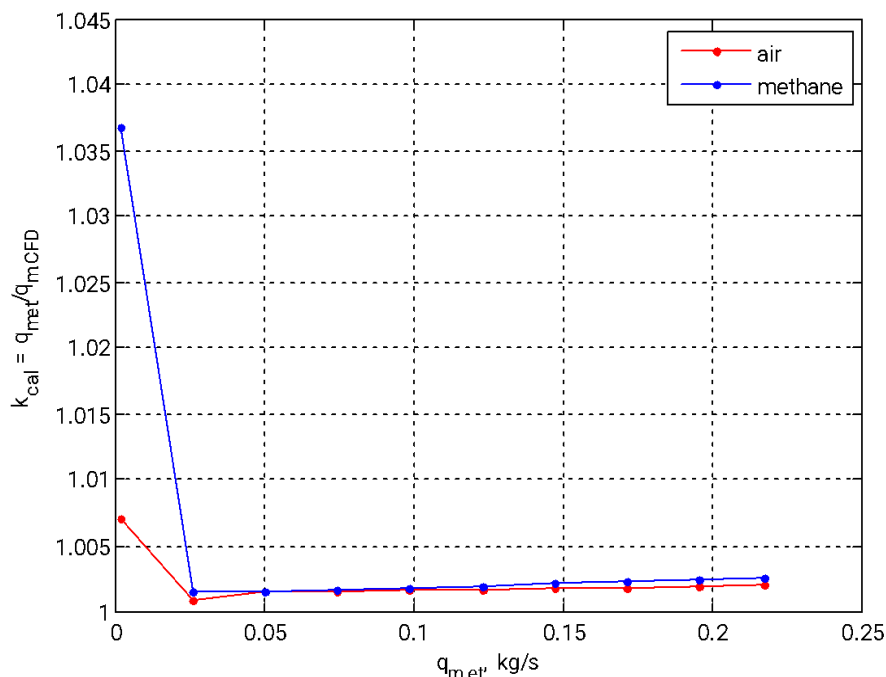


Рис.4. Залежність $k_{cal} = f(q_{m,et})$ двоканального хордового УЗВ отримана для повітря і метану

Висновки та перспективи подальшого дослідження. За результатами аналізу узагальненої процедури CFD-аналізу об'єктів дослідження, нами розроблено алгоритм побудови тривимірного макету УЗВ. Даний алгоритм дозволяє створити максимально наближений до реального УЗВ тривимірний макет (геометрію CFD-аналізу) в САПР SolidWorks, що в подальшому використовується для моделювання. На базі розробленого алгоритму, наведено конкретний приклад розрахунку важливих з конструктивної точки зору параметрів двоканального хордового УЗВ, при побудові його тривимірного макету в САПР SolidWorks. Також нами отримано так звані калібрувальні криві для досліджуваного в прикладі двоканального хордового УЗВ.

Подальші дослідження в цьому напрямі будуть направлені на розробку алгоритму підбору параметрів налаштування CFD-паketу (як частина CFD-аналізу), які будуть максимально наближені до реального УЗВ.

Список бібліографічного опису

1. Straits Research. (2021). Ultrasonic flowmeter market. Отримано з <https://straitsresearch.com/report/ultrasonic-flowmeter-market>.
2. Tsoua. (2021). Operator GTS Ukrainy pidvyshchuye tochnist ta dostovirnist obliku hazu. Отримано з <https://tsoua.com/news/operator-gts-ukrayiny-pidvyshchuye-tochnist-ta-dostovirnist-obliku-gazu/>.
3. UTG. (2021). Operator hazoskhovishcha Ukrayini pobudue punkty vimiru hazu na dev'yati PSG vidpovidno do svitovikh standartiv. Отримано з <https://utg.ua/utg/media/news/2021/09/operator-gazosxovishh-ukrani-pobudu-punkti-vimru-gazu-na-dev'yati-psg-vidpovdno-do-svtovix-standartv.html>.
4. UTG. (2019). Ukrtranzhaz zapustyv hazorozpodilnu stantsiyu Kalush-2 v Ivano-Frankivskiy oblasti. Отримано з <https://utg.ua/utg/media/news/2019/03/ukrtranzgaz-zapustyv-gazorozpodilnu-stanciu-kalush-2-v-ivano-frankivskii-oblasti.html>.
5. Expro. (2022). Ukgazvidobuvannya zakupit visokotochn lchilniki dlya oblashtuvannya vuzliv obliku hazu za 132 mln grn. Отримано з <https://expro.com.ua/novini/ukrgazvidobuvannya-zakupit-visokotochn-lchilniki-dlya-oblashtuvannya-vuzlv-obliku-gazu-za-132-mln-grn>.
6. Turkowski, M., & Szufliński, P. (2013). New criteria for the experimental validation of CFD simulations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 34, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.003>
7. Staubli, T., Luscher, B., Senn, F., & Widmen, M. (2007). CFD optimized acoustic flow measurement and laboratory verification. In *Hydraulics, Water Resources, Coastal and Environmental Engineering (HYDRO-2007)* (pp. 1-7). Granada, Spain.
8. Barton, N. A. (Ed.). (2002). In-service performance of ultrasonic flowmeters – Application and validation of CFD modelling methods (Technical Report No. 2002/72). National Engineering Laboratory.
9. International Organization for Standardization (ISO). (2010). Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement (ISO 17089-1:2010). Geneva.
10. Groupe Europeen de Recherches Gazieres (GERG). (2000). GERG Project on ultrasonic gas flow meters, Phase II (Technical Monograph TM 11). Brussels.
11. American Gas Association (AGA). (2003). Measurement of gas by multipath ultrasonic meters (2nd ed.) (Technical Report No. 9). Washington.
12. Research & Engineering Centre BP International Ltd. (Ed.). (1995). Installation effects on multi-path ultrasonic flow meters (Technical Report EUR 16175 EN). Sunbury, UK.
13. Shaw, C.T. (1992). Using computational fluid dynamics. Prentice Hall International (UK) Ltd.
14. International Organization for Standardization (ISO). (1998). Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods using transit-time ultrasonic flowmeters (ISO/TR 12765:1998).
15. Matsson, J. E. (2022). An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2022. SDC Publications.
16. Merzkirch, W., Gersten, K., Hans, V., et al. (Eds.). (2005). Fluid mechanics of flow metering. Springer.
17. Wilcox, D.C. (2006). Turbulence Modeling for CFD (Third Edition). DCW Industries.
18. Eesa, M. (2009). CFD studies of complex fluid flows in pipes (Doctoral dissertation). University of Birmingham.

References

1. Straits Research. (2021). Ultrasonic flowmeter market. Received from <https://straitsresearch.com/report/ultrasonic-flowmeter-market>.
2. Tsoua. (2021). Operator GTS Ukrainy pidvyshchuye tochnist ta dostovirnist obliku hazu. Received from <https://tsoua.com/news/operator-gts-ukrayiny-pidvyshchuye-tochnist-ta-dostovirnist-obliku-gazu/>.
3. UTG. (2021). Operator hazoskhovishcha Ukrayini pobudue punkty vimiru hazu na dev'yati PSG vidpovidno do svitovikh standartiv. Received from <https://utg.ua/utg/media/news/2021/09/operator-gazosxovishh-ukrani-pobudu-punkti-vimru-gazu-na-dev'yati-psg-vidpovdno-do-svtovix-standartv.html>.
4. UTG. (2019). Ukrtranzhaz zapustyv hazorozpodilnu stantsiyu Kalush-2 v Ivano-Frankivskiy oblasti. Received from <https://utg.ua/utg/media/news/2019/03/ukrtranzgaz-zapustyv-gazorozpodilnu-stanciu-kalush-2-v-ivano-frankivskii-oblasti.html>.
5. Expro. (2022). Ukgazvidobuvannya zakupit visokotochn lchilniki dlya oblashtuvannya vuzliv obliku hazu za 132 mln grn. Received from <https://expro.com.ua/novini/ukrgazvidobuvannya-zakupit-visokotochn-lchilniki-dlya-oblashtuvannya-vuzlv-obliku-gazu-za-132-mln-grn>.
6. Turkowski, M., & Szufliński, P. (2013). New criteria for the experimental validation of CFD simulations. *Flow*

Measurement and Instrumentation, 34, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.003>

7. Staubli, T., Luscher, B., Senn, F., & Widmen, M. (2007). CFD optimized acoustic flow measurement and laboratory verification. In *Hydraulics, Water Resources, Coastal and Environmental Engineering (HYDRO-2007)* (pp. 1-7). Granada, Spain.
8. Barton, N. A. (Ed.). (2002). In-service performance of ultrasonic flowmeters – Application and validation of CFD modelling methods (Technical Report No. 2002/72). National Engineering Laboratory.
9. International Organization for Standardization (ISO). (2010). Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement (ISO 17089-1:2010). Geneva.
10. Groupe Europeen de Recherches Gazieres (GERG). (2000). GERG Project on ultrasonic gas flow meters, Phase II (Technical Monograph TM 11). Brussels.
11. American Gas Association (AGA). (2003). Measurement of gas by multipath ultrasonic meters (2nd ed.) (Technical Report No. 9). Washington.
12. Research & Engineering Centre BP International Ltd. (Ed.). (1995). Installation effects on multi-path ultrasonic flow meters (Technical Report EUR 16175 EN). Sunbury, UK.
13. Shaw, C.T. (1992). Using computational fluid dynamics. Prentice Hall International (UK) Ltd.
14. International Organization for Standardization (ISO). (1998). Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods using transit-time ultrasonic flowmeters (ISO/TR 12765:1998). Geneva.
15. Matsson, J. E. (2022). An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2022. SDC Publications.
16. Merzkirch, W., Gersten, K., Hans, V., et al. (Eds.). (2005). Fluid mechanics of flow metering. Springer.
17. Wilcox, D.C. (2006). Turbulence Modeling for CFD (Third Edition). DCW Industries.
18. Eesa, M. (2009). CFD studies of complex fluid flows in pipes (Doctoral dissertation). University of Birmingham.