

УДК 681.121.89.082.4

Ф.Д. Матіко, доктор технічних наук, доцент

В.І. Роман, кандидат технічних наук

А.І. Дмитришин

Національний університет «Львівська політехніка»

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА В КОМПЛЕКТІ З ПРИСТРОЄМ ПІДГОТОВКИ ПОТОКУ

Матіко Ф.Д., Роман В.І., Дмитришин А.І. Удосконалення математичної моделі ультразвукового витратоміра в комплекті з пристроєм підготовки потоку. В статті на базі комп'ютерних засобів тривимірного моделювання в поєднанні із методами обчислювальної гідродинаміки (CFD-моделювання) удосконалено математичну модель двоканального ультразвукового витратоміра з пристроєм підготовки потоку типу «Zanker» (для двох випадків їх взаємного розташування). Отримані таким чином математичні моделі дозволять в подальшому дослідити вплив спотворення структури потоку на похибку вимірювання витрати двоканальними ультразвуковими витратомірами в комплекті з пристроєм підготовки потоку типу «Zanker».

Ключові слова: ультразвуковий витратомір; пристрій підготовки потоку; математична модель; обчислювальна гідродинаміка.

Матико Ф.Д., Роман В.И., Дмитришин А.И. Усовершенствование математической модели ультразвукового расходомера в комплекте с устройством подготовки потока. В статье, на базе трехмерного компьютерного моделирования в сочетании с методами вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование), усовершенствована математическая модель двухканального ультразвукового расходомера с устройством подготовки потока типа «Zanker» (для двух случаев их взаимного расположения). Полученные таким образом математические модели позволят в дальнейшем исследовать влияние искажения структуры потока на погрешность измерения расхода двухканальными ультразвуковыми расходомерами в комплекте с устройством подготовки потока типа «Zanker».

Ключевые слова: ультразвуковой расходомер; устройство подготовки потока; математическая модель; вычислительная гидродинамика.

Matiko FD, Roman V.I., Dmitrishin A.I. Improvement of mathematical model of ultrasonic flowmeter complete with flow conditioner. In the article on the basis of computer means of three-dimensional modeling in combination with methods of computational fluid dynamics (CFD simulations), the mathematical model of a two-channel ultrasonic flowmeter with a Zanker flow conditioner (for two cases of their mutual arrangement) has been improved. The mathematical models thus obtained will allow further investigation of the effect of distortion of the flow structure on the error of measurement of flow through two-channel ultrasonic flowmeters, complete with a Zanker flow conditioner.

Key words: ultrasonic flow meter; flow conditioner; mathematical model; computational fluid dynamics.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Як відомо, серед недоліків ультразвукових витратомірів (УЗВ) основним виділяють високу чутливість до відхилень умов потоку під час експлуатації від умов їх калібрування. За результатами досліджень цих відхилень, що викладені в багатьох наукових працях [1-6], виявлено суттєвий вплив саме спотворень структури потоку (профіль швидкості) на похибку вимірювання витрати УЗВ.

В багатьох наукових працях та основних нормативних документах по ультразвуковій витратометрії [1], запропоновано два способи вирішення цієї проблеми:

- 1) встановлення перед УЗВ прямолінійної ділянки трубопроводу достатньої довжини;
- 2) застосування спеціальних струминовипрямлячів, які усувають закручення потоку або пристроїв підготовки потоку (ППП), які дають змогу усувати як закручення потоку, так і зменшити деформацію профілю швидкості перед витратоміром [2, 7, 8].

Перший спосіб може бути застосований за умови, що відомі вимоги до довжин прямолінійних ділянок для конфігурацій ВТ із різними типами місцевих опорів.

Другий спосіб – застосування ППП призводить до значного збільшення втрат тиску. Слід відмітити, що встановлення ППП не знімає повністю питання вибору довжини прямолінійної ділянки вимірювального (ВТ), оскільки для УЗВ із встановленим ППП також необхідно витримати певну мінімальну її довжину [1]. Також в окремих випадках встановлення ППП та зміна їх характеристик під час експлуатації (зокрема із-за засмічення і неточності виготовлення) призводить до збільшення похибки вимірювання [9].

Зважаючи на вище сказане **метою** даної роботи є удосконалення математичної моделі УЗВ в комплекті із ППП конкретного типу (в подальшому буде застосовано абревіатуру УЗВк, де к – комплект із ППП). Наявність математичної моделі в подальшому дозволить визначити мінімально-допустиму відстань між ППП та УЗВ числове значення якої не є чітко прописаним у основному нормативному документу по ультразвуковій витратометрії [1].

Виклад основного матеріалу. Для удосконалення математичної моделі УЗВк в цій роботі застосовано розроблену авторами відповідну методику [10]. Розглянемо її детальніше на прикладі удосконалення математичної моделі конкретного УЗВк:

1. Побудова тривимірного макету та CFD-моделювання

Побудова тривимірного макету відбувається в САПР SolidWorks. CFD-моделювання виконується в CFD-модулі САПР SolidWorks під назвою Flow Simulations.

Використовуючи інструменти SolidWorks відтворюється тривимірний макет (ТВМ) вимірювальної установки: прямолінійна ділянка ВТ на якій встановлено УЗВк та засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) – для вимірювання тиску та температури.

1.1. Відтворення конструктивних характеристик

До основних конструктивних характеристик ТВМ відносять [1]:

- 1) довжина та діаметр ВТ;
- 2) кількість, схема розташування та кут нахилу акустичних каналів (АК) УЗВ (див.рис.1,а); роботу АК імітують лініями згідно [11];
- 3) тип та конструкція ППП (див.рис.2);
- 4) відстані на якій встановлено ЗВТ по відношенню до АК УЗВ (див.рис.1,б);
- 5) відстань між ППП та УЗВ.

Удосконалення математичної моделі УЗВк згідно [10], вимагає знаходження калібрувального коефіцієнта. Даний процес, як і при експериментальному методі, проводиться на потоках із повністю встановленою (ідеалізованою) структурою. Для цієї задачі довжина ТВМ повинна бути достатньою щоб установилась ділянка із стабільною швидкістю потоку по його довжині. В даній роботі довжина ВТ з діаметром $D = 100$ мм вибирається такою, щоб до і після основних компонентів ТВМ знаходилась прямолінійна ділянка ВТ довжиною як мінімум $1... 2D$.

Геометричні характеристики ТВМ наведено на рис.1-2

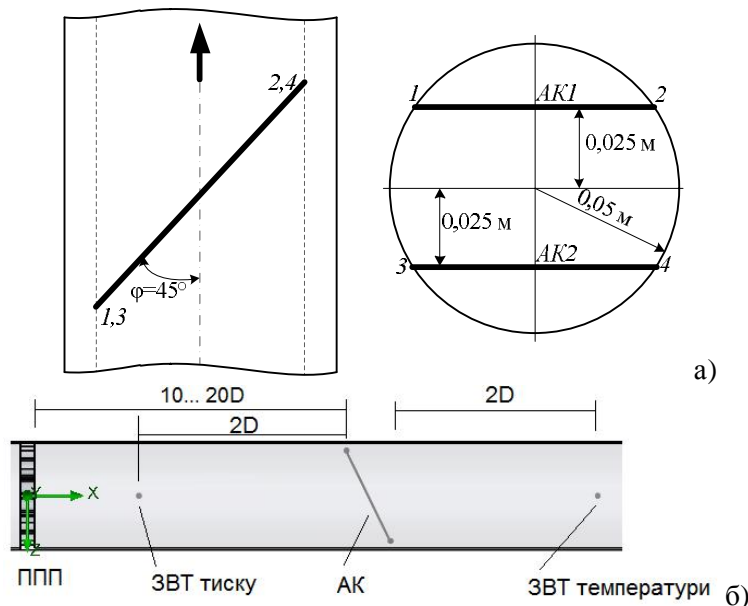


Рис.1. Геометричні характеристики ТВМ: а) схема розташування двоканального хордового УЗВ; б) взаємне розташування ЗВТ, АК УЗВ та ППП

В даній роботі для дослідження вибрано ППП типу «Zanker» [24]. Конструктивні особливості ППП «Zanker» наведено на рис.2, де (а) – 4 отвори діаметром $(0,141 \pm 0,001) * D$, центри яких розташовано на колі діаметром $(0,25 \pm 0,002) * D$, (б) 8 отворів діаметром $(0,139 \pm 0,001) * D$, центри яких розташовано на колі діаметром $(0,56 \pm 0,005) * D$, (с) 4 отвори діаметром $(0,1365 \pm 0,001) * D$, центри яких розташовано на колі діаметром $(0,75 \pm 0,0075) * D$, (д) 8 отворів діаметром $(0,11 \pm 0,001) * D$, центри яких розташовано на колі діаметром $(0,85 \pm 0,0085) * D$, (е) 8 отворів діаметром $(0,077 \pm 0,001) * D$, центри яких розташовано на колі діаметром $(0,9 \pm 0,009) * D$. Оскільки УЗВк це УЗВ в комплекті із ППП, необхідно визначити мінімальну відстань між ними. В ISO 17089-1 як такої конкретної рекомендації не дано, а тільки вказано відстань між ППП і УЗВ при двонаправленому режимі потоку – і це значення рівне $10D$. Оскільки існують наукові праці [12] де це число вважають недостатнім, в цій роботі досліджено два варіанти ТВМ:

- 1) УЗВк1 – мінімальною відстанню між ППП та УЗВ складає 10D;
- 2) УЗВк2 – мінімальною відстанню між ППП та УЗВ складає 20D.

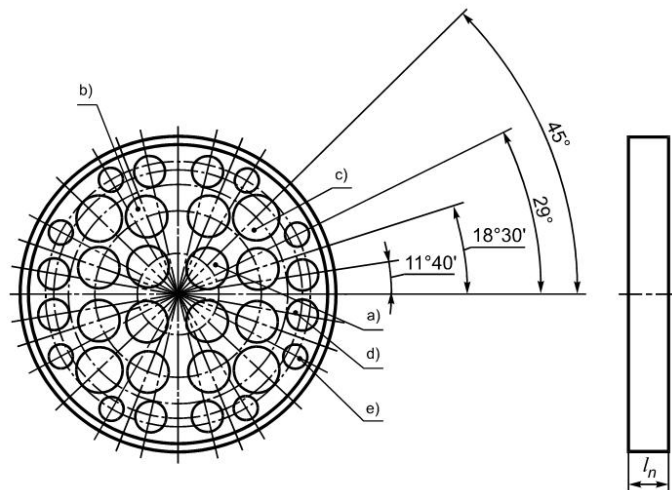


Рис.2. Конструкція дискового ППП типу «Zanker»

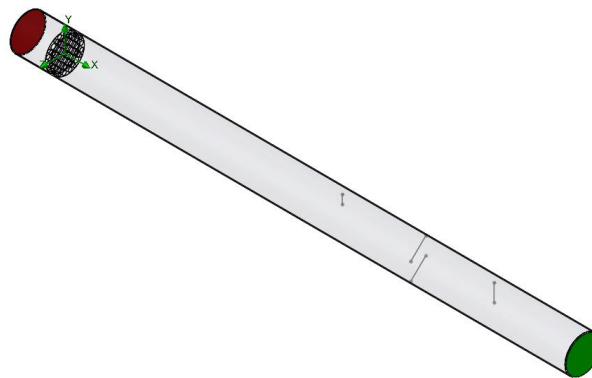


Рис.3. Вигляд ТВМ УЗВк1 в середовищі САПР SolidWorks

Завершальним етапом побудови ТВМ УЗВк є перевірка його герметичності за допомогою інструменту Check Geometry CFD-модуля Flow Simulations. Якщо побудова виконана правильно і ТВМ є герметичним, то можна розпочинати наступний етап.

1.2. Визначення параметрів вимірюваного середовища

Для того щоб виконати CFD-моделювання, розв'язати систему рівнянь Нав'є-Стокса (знайти швидкість потоку в кожній точці ТВМ) числовим методом кінцевих об'ємів, необхідно задати початкові умови. Граничні умови задає сам ТВМ. В даній роботі використано наступні початкові умови – параметри вимірювального середовища (див.табл.1).

Таблиця 1

Параметри вимірювального середовища

№	$q_{m,et}$, кг/с	T_{et} , К	p_{et} , Па	середовище
1	0,3267	293,2	101325	gases, air (повітря)
2	0,1306	293,2	101325	
3	0,0653	293,2	101325	
4	0,0326	293,2	101325	

Параметри вимірювального середовища з індексом *et*, це ті параметри які задаються на вхідних отворах ТВМ (на кришках-заглушках).

1.3. Налаштування CFD-модуля

CFD-модуль Flow Simulations автоматично інтерпретує ТВМ як простір, заповнений вимірювальним середовищем. В залежності від взаємного розміщення ТВМ і середовища (всередині або зовні) в Flow Simulations всі задачі поділяють на два типи: внутрішні (internal) та зовнішні (external). В даній роботі розглянуто внутрішню задачу.

Оскільки вирішується пріоритетна завдання моделювання УЗВк газів, то у якості плинного середовища (fluid type) необхідно задати «газ», а режим руху потоку – ламінарний і турбулентний. Flow Simulations дозволяє задавати умови, які будуть існувати на стінках ТВМ (шорсткість; теплові умови на внутрішній і зовнішній частині стінок).

Також необхідно задати параметри, які впливають на розрахункову сітку (розмір елементарного об'єму) і критерії завершення розрахунку, а отже, і на точність розв'язку задачі. Очевидно, що чим дрібніша розрахункова сітка, тим ближчим є дискретний розв'язок системи рівнянь Нав'є-Стокса до неперервної функції зміни параметрів і тим точніше процес CFD-моделювання відтворить реальний процес. При цьому, дрібніша розрахункова сітка, очевидно, вимагає більших обчислювальних ресурсів комп'ютера. Тому, під час встановлення параметрів, що впливають на розрахункову сітку, необхідно досягти компромісу між бажаною точністю і наявними ресурсами комп'ютера.

В даній роботі обрано наступні параметри налаштування CFD-модуля Flow Simulations:

1) стандартні теплові умови на стінці макету (default wall thermal condition) – адіабатична стінка (adiabatic wall);

2) шорсткість внутрішніх стінок ТВМ (roughness) – 0 мікрон;

3) модель турбулентності – сімейства k-ε;

4) рівень дроблення базової розрахункової сітки (level of initial mesh) – 6;

5) додаткове подрібнення базової сітки в місцях згинів – так.

1.4. Обробка отриманих результатів

Необхідні результати CFD-моделювання завантажуються користувачу з допомогою інструменту XY Plot і зберігаються в файлах формату *xls із наступним (приблизним) наповненням (див.табл.2).

Таблиця 2

Приклад результатів CFD-моделювання

Pressure (Pa)		Temperature (K)		Velocity (m/s)	
Length (m)	p@Line1_1	Length (m)	p@Line1_1	Length (m)	p@Line1_1
0	101372,64	0	293,25	0	0
2,5025E-05	101372,64	2,5025E-05	293,251	2,5025E-05	0,2927
5,00501E-05	101372,64	5,00501E-05	293,25	5,00501E-05	0,5865
7,50751E-05	101372,64	7,50751E-05	293,250	7,50751E-05	0,8803
...

Вміст подібних таблиць можна регулювати і наповнювати 16-ма параметрами потоку в конкретній точці потоку. В табл.2 наведений приклад збору параметрів потоку вздовж ліній імітації АК УЗВк певної довжини (Length (m)) в кожній точці цієї лінії. Кожна лінія яка імітує або АК або ЗВТ незалежно від довжини розбивається на 1000 точок в яких і фіксуються параметри потоку. Отримані масиви переносяться в середовище MATLAB ля подальшої обробки.

2. Знаходження калібрувального коефіцієнта

Оскільки як граничні умови на вході в ТВМ за напрямком потоку задається вхідна масова витрата, то її й будемо приймати за еталон при визначенні калібрувального коефіцієнта.

Розрахунок калібрувального коефіцієнта виконується за формулою виду [1]:

$$k_{cal} = \frac{q_{m.et}}{q_{m.УЗВ}} \quad (1)$$

де: $q_{m.УЗВ}$ – масова витрата УЗВк розрахована за формулою виду [1]:

$$q_{m.УЗВ} = q_{v.УЗВ} \left(\frac{\rho_c p T_c}{p_c T K} \right) \quad (2)$$

де: $q_{v.УЗВ}$ – об'ємна витрата УЗВк яка розраховується за рівнянням витрати відповідного УЗВ; p, T – тиск та температура потоку вздовж ЗВТ тиску і температури; p_c, T_c, ρ_c – тиск, температура та густина середовища за стандартних умов.

Оскільки в даній роботі для дослідження обрано двоканальний хордовий УЗВ, розрахунок об'ємної витрати $q_{v.УЗВ}$ виконується за формулою виду [1]:

$$q_{v.УЗВ} = \pi R^2 \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (3)$$

де: v_1, v_2 – швидкість потоку усереднена вздовж лінії i -го хордового АК УЗВ, м/с.

3. Знаходження числа Рейнольдса

Для зручного застосування калібрувального коефіцієнта його зв'язують із числом Рейнольдса залежністю $k_{cal} = f(Re)$.

Розрахунок числа Рейнольдса виконується за формулою виду [5]:

$$Re = \frac{4q_{m.et}}{\pi\mu D}, \quad (4)$$

де: μ – динамічна в'язкість середовища, Па*с.

4. Удосконалення математичної моделі

Використовуючи вище наведені формули (1-4) та принципи наведені авторами в [10] отримуємо удосконалену математичну модель УЗВк виду:

$$\begin{cases} Re = \frac{4q_{m.et}}{\pi\mu D}; \\ k_{cal} = f(Re); \\ q_{m.УЗВ} = k_{cal}\pi R^2 \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{\rho_c p T_c}{p_c T K} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Зважаючи на вище загадані типи УЗВк (УЗВк1 та УЗВк2) за результатами CFD-моделювання для них отримано масив значень апроксимований відповідними залежностями $k_{cal} = f(Re)$ виду:

$$k_{cal} = 0,5767 \cdot Re^{-0,2599} + 0,9898, \quad (6)$$

$$k_{cal} = 9,834 \cdot 10^{-14} \cdot Re^{2,055} + 1,001. \quad (7)$$

Висновки. Отримані таким чином удосконалені математичні моделі (5), (6) УЗВк1 та (5), (7) УЗВк2 в подальшому будуть застосовані для дослідження впливу спотворень структури потоку на похибку вимірювання витрати двоканальними ультразвуковими витратомірами в комплекті із пристроєм підготовки потоку типу «Zanker». Такі дослідження дозволять оцінити як доцільність застосування пристроїв підготовки потоку для зменшення похибки вимірювання витрати УЗВ в умовах спотворень структури потоку, так і дозволять розробити конкретні рекомендації щодо взаємного розташування компонентів УЗВк зазначеного типу.

1. Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement : ISO 17089-1 : 2010. – [First edition 2010-11-15]. – Geneva (Switzerland) : International Organization for Standardization (ISO), 2010. – 100 pages. (International standard).
2. GERG Project on ultrasonic gas flow meters, Phase II : technical monograph TM 11 / edit by P. Lunde, K.-E. Froysa, M. Vestrheim. – Brussels : Groupe Europeen de Recherches Gazieres (GERG), 2000. – 110 pages.
3. Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник / П.П. Кремлевский ; [гл. ред. Е. А. Шорников]. – Изд. 5-е. – СПб. : Политехника, 2004. – 412 с.
4. Handbook of fluid flowmetering / edit by C.J. Benard. – Morden : The Trade & Technical Press Limited, 1988. – 422 pages.
5. Industrial flow measurement: Basics and practice / F. Frenzel, H. Grothey, C. Habersetzer (at al.). – Zurich (Switzerland) : ABB Automation Products GmbH, 2011. – 290 pages.
6. Instrument engineers' handbook (4th ed.). Process measurement and analysis (vol. 1) / edit by B.G. Liptak. – Durham (USA) : ISA Press, 2003. – 1828 pages.
7. Fluid flow measurement. A practical guide to accurate flow measurement (3rd ed.) / P.J. Lanasa, E.L. Upp. – Waltham (USA) : Butterworth-Heinemann, 2014. – 296 pages.
8. Installation effects on ultrasonic and electromagnetic flowmeters: a model-based approach / J. Halttunen // Flow Meas. Instrum. – 1990. – Volume 1. – Pages 287–292.
9. Performance testing of ultrasonic flow meters / T. A. Grimley // 15th North Sea Flow Measurement Workshop, 27–31 October 1997 : theses of the report. – Kristiansand (Norway), 1997. – 21 pages.
10. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання / С.П. Пістун, Ф.Д. Матіко, В. І. Роман, А. А. Стеценко // Метрологія та прилади. – 2014. – № 4. – С. 13–23.
11. New criteria for the experimental validation of CFD simulations / M. Turkowski, P. Szufienski // Flow Measurement and Instrumentation. – 2013. – Volume 34. – Pages 1–10.
12. B. Delenne, M. Pritchard, F.J. Lezaun, D. Vieth, M. Huppertz, K. Ciok, A. van den Heuvel, G. Mouton, T. Folkestad, G. Marini (2004) Evaluation Of Flow Conditioners – Ultrasonic Meters Combinations, 22nd North Sea Flow Metering Workshop 2004, Paper 3.2.