

Due to the fact that replacement of outdated boiler units with new ones requires significant capital investments, a promising direction is the modernization of existing boiler units. It is a low-cost and efficient way of rational use of fuel while simultaneously reducing the level of harmful substances in exhaust gases. It remains relevant to ensure the functioning of the control systems for the composition of the air-fuel mixture (AFM) with a given speed and high reliability of maintaining the excess air ratio (EAR) at the stoichiometric level.

In the article the high-quality algorithm is proposed for the operation of an automatic control system for the combustion of fuel in boilers of medium and low power by regulating the ratio of the components of the AFM for the burner with feedback according to the signals of the oxygen sensor. The algorithms for the operation of the frequency regulator of the ratio of the components of the AFM in various operating modes are considered. The developed algorithms allowed maintaining the stoichiometric air-fuel ratio in the boiler furnace, reducing the level of toxic emissions into the atmosphere and increasing the boiler efficiency by optimizing the fuel combustion process. The AFM ratio programmer is made in the LM Programmer technical programming environment and works with Windows operating systems (XP, Vista, 7, 8, 10) and oxygen sensors manufactured by Bosch. The visualization of the control process of the fuel combustion process is made in the technical programming environment LogWorks 3 and operates in the environment of Windows operating systems.

Keywords: boiler; control; monitoring; fuel combustion; algorithms; software; oxygen sensor.

Надійшла до редакції
25 червня 2021 року

Рецензовано
28 липня 2021 року

УДК 681.121

ПРО ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ФОРМИ ТІЛА ОБТІКАННЯ ВИХРОВОГО ВИТРАТОМІРА

Писарець А. В., Мельник А. М., Драчук О. О.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

E-mail: anna.v@ukr.net, melnik.anastasiya@i.ua, o.drachuk@kpi.ua

Усе більшого поширення у багатьох галузях промисловості набувають вимірювачі витрат і кількості плинних середовищ, що ґрунтуються на застосуванні вихрового методу. Це пов'язано із простотою і надійністю перетворювача витрати; лінійністю шкали; наявністю частотного вимірювального сигналу, низькими вимогами до співвідношення і забезпечення довжини прямих ділянок тощо. Серед засобів вимірювання вихрового класу найбільшого застосування набули прилади, первинний перетворювач яких містить тіло обтікання. Принцип дії таких витратомірів ґрунтується на вимірюванні частоти утворення вихорів за встановленим у потоці тілом обтікання.

Метрологічні характеристики вимірювачів окреслюються формою тіла обтікання, тому пошук оптимальної форми чутливого елемента і конфігурації гідравлічного каналу витратоміра у цілому для забезпечення високих метрологічних показників залишається актуальною проблемою.

У роботі запропоновано алгоритм вирішення зазначеної проблеми за критеріями максимального діапазону вимірюваних витрат, що окреслюється сталістю числа Струхалія, і ефективності взаємодії тіла обтікання з потоком вимірюваного середовища, що ґрунтується на оцінці витрат тиску потоку вимірюваного середовища і похибки вимірювача, із застосуванням імітаційного моделювання у програмному комплексі Ansys Fluent, що реалізовує методи обчислювальної гідродинаміки.

Здійснено моделювання для трьох форм тіла обтікання: циліндр, призма з трикутним перерізом, призма з перерізом у вигляді трапеції, що дозволило обрати чутливий елемент для подальшого розв'язання задачі багатопараметричної оптимізації на підґрунті наявних особливостей конфігурації гідравлічного каналу витратоміра.

Отримані результати підтвердили запропоновану авторами стратегію. Перспективою подальших досліджень є проведення імітаційних досліджень запропонованої конфігурації гідравлічного каналу для різних класів вимірюваних середовищ.

Ключові слова: вихровий витратомір; перетворювач витрати; чутливий елемент; тіло обтікання; імітаційне моделювання; оптимізація.

Вступ. Постановка проблеми

Усе більшого поширення у багатьох галузях промисловості набувають вимірювачі витрат і кількості плинних середовищ, що ґрунтуються на застосуванні вихрового методу. Це пов'язано з суттєвими перевагами методу, такими як: універсальність конструкції (застосовність одної конструкції для вимірювання витрат рідин, газів і пари); відсутність у потоку частин, які обертаються; простота і надійність перетворювача витрати; незалежність результатів вимірювання від зміни тиску, густини, температури і в'язкості контрольованого потоку в межах певного діапазону чисел Рейнольдса (Re); широкий діапазон температур вимірюваного середовища; широкий діапазон вимірювання; лінійність шкали; висока точність; частотний вимірювальний сигнал; стабільність показань; відсутність вимог до шорсткості трубопроводу, низькі вимоги до співвісності і забезпеченню довжини прямих ділянок [1 – 6].

Серед засобів вимірювання вихрового класу [4 – 6] найбільшого застосування набули прилади, первинний перетворювач яких містить тіло обтікання (ТО). Принцип дії таких перетворювачів полягає у наступному. Тіло, яке знаходиться на шляху потоку, змінює напрямок руху струменів, що його обтікають, і збільшує їх швидкість за рахунок відповідного зменшення тиску. За міделевим перерізом тіла починається зворотний процес зменшення швидкості і збільшення тиску. Одночасно з цим на передній стороні тіла створюється підвищений, а на задній стороні – знижений тиск. Граничний шар, що обтікає тіло, після проходження його міделева перерізу відривається від тіла і під впливом зниженого тиску за тілом змінює напрямок руху, утворюючи вихор. Це відбувається як у верхніх, так і в нижніх точках тіла обтікання. Але оскільки розвиток вихору з одного боку перешкоджає такому ж розвитку з іншого боку, то утворення вихорів відбувається по чергову [5, 6]. При цьому за ТО утворюється так звана «вихрова доріжка Кармана». Частота утворення вихорів пропорційна швидкості потоку. Отже вимірювальний ланцюг складається з первинного перетворювача витрати і вторинного перетворювача, що вимірює частоту створення вихорів (витратоміри) або обчислює їх кількість (лічильники) [7].

У вихрових вимірювачах витрат різних виробників застосовуються різні способи вимірювання частоти утворення вихорів: манометричний, термальний, з осцилюючим елементом, електромагнітний, ультразвуковий, емнісний, метод згинальних напруг та інші [8 – 13].

Поряд із зручністю вимірювання частоти вихроутворення, саме стабільність утворення вихорів є визначальним чинником, що окреслює метрологічні характеристики приладу. Частота вихроутворення визначається локальною швидкістю потоку на ТО, зв'язок між цією частотою та значеннями

витрати залежить від незмінності профілю швидкостей за перерізом потоку під час вимірювання.

Недоліками таких приладів є непридатність для вимірювань за малих швидкостей потоку через складності вимірювання сигналу малої частоти; відсутність стійкого вихроутворення у випадку малих діаметрів; складність застосування у випадку великих діаметрів; числа Рейнольдса, менші за $10^3 \div 10^4$ [3, 4].

Різноманітність конструкцій ТО, застосовуваних у вихрових витратомірах, свідчить про складність і актуальність проблеми вибору їх оптимальної форми [5, 6, 14]. Прилади різних виробників можуть мати однакову конструкцію ТО, що є свідченням не оптимальності цієї форми, а великої вартості потрібних досліджень для її визначення [14].

Від форми ТО залежать метрологічні характеристики вихрового витратоміра (чутливість, динамічний діапазон, втрати тиску).

Метою роботи є пошук оптимальної конфігурації гідравлічного каналу вихрового витратоміра з тілом обтікання.

Вибір конфігурації гідравлічного каналу витратоміра

Для досягнення поставленої мети доцільно розв'язати задачу багатопараметричної оптимізації, що передбачає: окреслення критеріїв оптимізації; формалізацію їх у вигляді цільових функцій; виявлення найбільш впливових проєктних параметрів цільових функцій; обґрунтування граничних умов (обмежень) на зміну проєктних параметрів; розробку алгоритму оптимізації; аналіз отриманих результатів [15].

Критерії оптимізації можуть бути самими різними: похибка вимірювання, надійність роботи, технологічність конструкції, швидкодія, діапазон вимірювання, вплив на вимірюваний потік, вартість виготовлення приладу тощо [15, 16].

У випадку вихрового витратоміра з ТО необхідно за мінімальної втрати тиску забезпечити високу точність вимірювань у широкому динамічному діапазоні.

Відповідно до [16] застосуємо критерій ефективності взаємодії ТО з потоком вимірюваного середовища, що описується залежністю

$$K_{\text{ЕФ}} = \frac{\Delta P}{1 - \delta},$$

де ΔP – втрати тиску потоку вимірюваного середовища; δ – похибка перетворювача. Для цього критерію шукаємо мінімальне значення.

Частота утворення вихорів f пропорційна швидкості потоку і визначається співвідношенням

$$f = Sh \frac{v}{d},$$

де Sh – число Струхалія; v – середня за перерізом швидкість потоку, м/с; d – характерний розмір ТО [5, 6].

У свою чергу, для числа Струхалія можна записати

$$Sh = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \frac{d}{l},$$

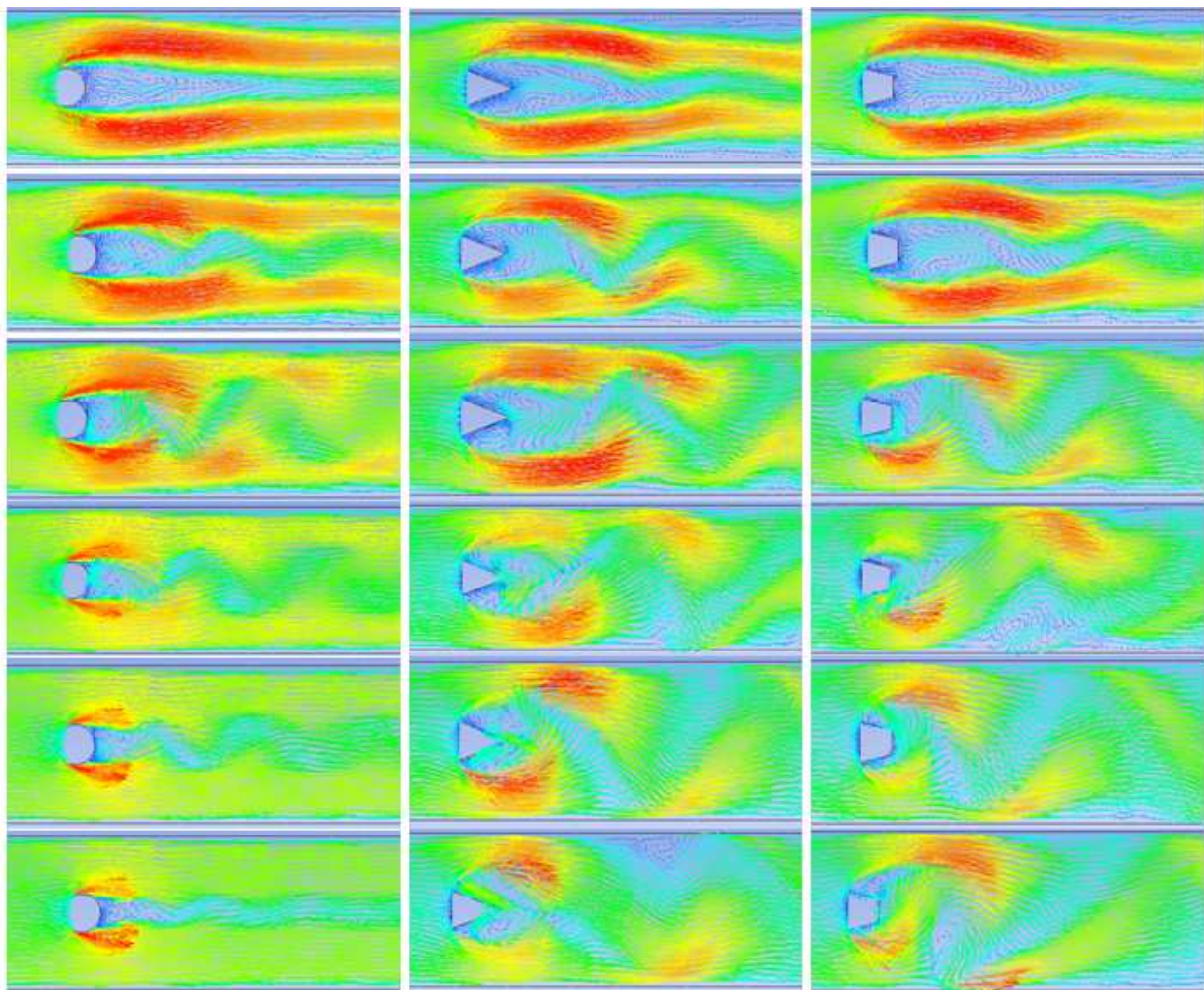
де u – швидкість вихору; l – відстань між вихорами.

Особливість роботи вихрових витратомірів полягає у тому, що у певному діапазоні чисел Рейнольдса число Струхалія практично залишається незмінним, завдяки чому коефіцієнт перетворення швидкості потоку в частоту зриву вихорів стає незалежним від густини та в'язкості вимірюваного середовища і однаковим для усіх класів середовищ

[17]. При цьому діапазон вимірювання оцінюється за сталістю числа Струхалія [17].

Процес взаємодії потоку вимірюваного середовища і ТО описується дуже складними математичними моделями, тому для вивчення особливостей роботи вихрових перетворювачів витрати усе частіше застосовується імітаційне моделювання за допомогою прикладних програмних застосунків обчислювальної гідродинаміки.

Для досягнення мети проведено імітаційне моделювання для трьох форм ТО [18]: циліндр (ТО 1), призма з трикутним перерізом (ТО 2), призма з перерізом у вигляді трапеції (ТО 3), розміри яких обрано відповідно до рекомендацій [5] (табл. 1, рис. 1).



а)

б)

в)

Рис. 1. Епюри розподілу швидкості вздовж вимірювальної ділянки за витрат 1, 2, 5, 15, 25 і 30 м³/год:

а) для ТО 1; б) для ТО 2; в) для ТО 3

Моделювання проводились для вимірюваного середовища – вода за стандартних умов: температура – 20° С, тиск – 101,325 кПа.

За результатами моделювання визначено се-

редню за перерізом швидкість потоку і відстань між вихорами за певної витрати, що дозволило обчислити значення критеріїв.

Таблиця 1. Геометрія досліджуваних ТО.

ТО*	Діаметр	Основа	Висота
ТО 1	10 мм	-	-
ТО 2	-	10 мм	13 мм
ТО 3	-	10 мм, 6 мм	10 мм

Для проведення подальших досліджень обрано ТО 3, оскільки саме така форма забезпечує найбільш широкий діапазон вимірювання, що підтверджується незмінністю числа Струхала (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2. Відповідність між числом Рейнольдса і діапазоном витрат

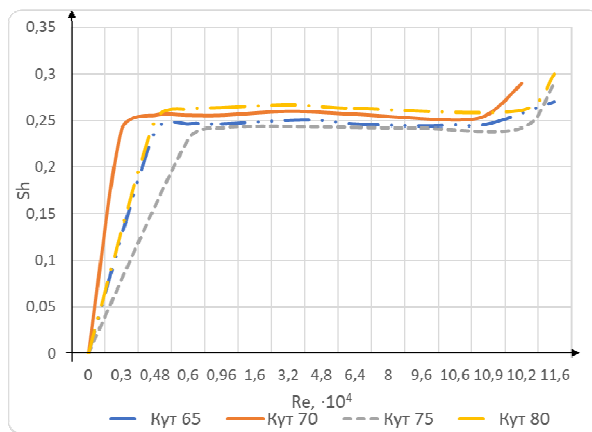
	Діапазон зміни, $Re \cdot 10^4$	Діапазон вимірюваних витрат, $m^3/год$
ТО 1	0,6788 ÷ 10,18	2 ÷ 30
ТО 2	0,9071 ÷ 10,58	3 ÷ 35
ТО 3	0,6415 ÷ 11,23	2 ÷ 35

Проектними параметрами ТО 3 є його геометричні особливості: кут при основі трапеції α (змінюється в межах від 65° до 80° , оскільки за менших значень кута трапеція перетворюється на трикутник, за більших значень – на прямокутник); висота трапеції h (відповідно до [4] значення цього параметру близьке до 1,3 довжини більшої основи, оберненої проти потоку).

Для зазначених умов здійснено імітаційне моделювання за номінальної витрати, що дозволило оцінити діапазон вимірюваних витрат (рис. 3) і перепад тиску, а також розрахувати частоту вихорутворення, похибку вимірювання і коефіцієнт ефективності для досліджуваної модельної геометрії.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що найбільш широкий діапазон витрат спостерігається за $\alpha = 80^\circ$ і $h = 13$ мм.

Для подальшого розширення діапазону вимірювань запропоновано доповнити геометричну модель первинного перетворювача конфузornoю і дифузornoю ділянками.



а)

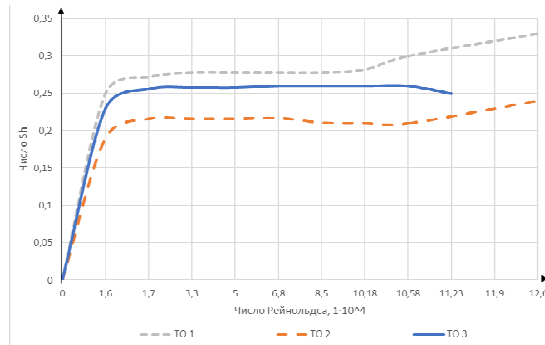


Рис. 2. Залежність числа Струхала від числа Рейнольдса

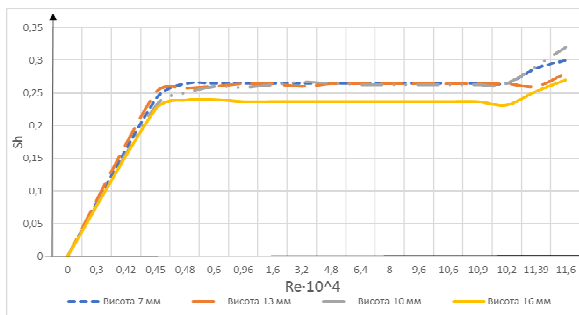
При цьому необхідно обрати кут звуження конфузору β з умов безвідривної течії [19] і максимального діапазону вимірюваних витрат. Відповідно до [19] значення β змінюється у межах від 8° до 24° .

Отримані результати свідчать, що найбільш ефективним є конфузор за $\beta=24^\circ$, при цьому досягаються широкий діапазон вимірювання витрат, найменший перепад тиску, найкраща чутливість (рис. 4).

Завершальним етапом досліджень є вибір кута сходження дифузору γ , який обирається з умов безвідривної течії [19], що визначається зміною γ у межах від 6° до 24° , і мінімальної втрати тиску у гідравлічному каналі перетворювача витрати (рис. 5).

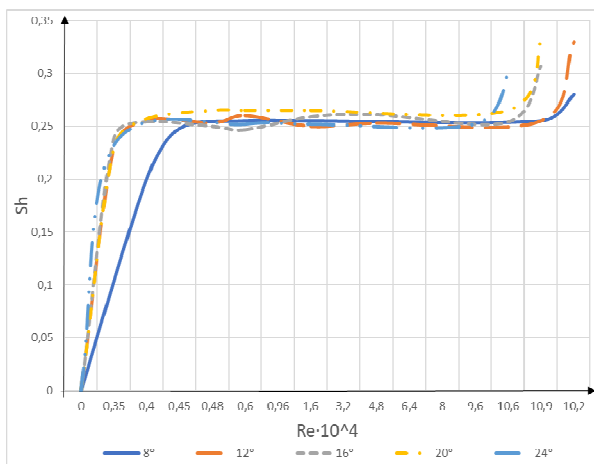
Здійснене моделювання дозволяє окреслити конфігурацію гідравлічного каналу перетворювача витрати, що забезпечує найбільш широкий діапазон зміни витрати і мінімальні втрати тиску за високої точності вимірювань (рис. 6).

Запропонована методика побудови гідравлічного каналу витратоміра дозволила отримати прилад з широким діапазоном вимірювання, мінімальними втратами тиску за високої точності.

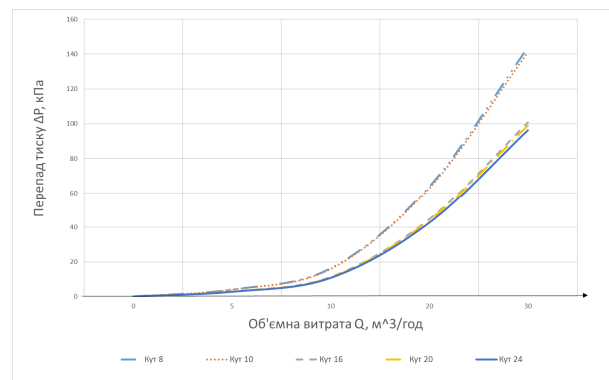


б)

Рис. 3. Оцінка діапазону вимірювань: а) при зміні α ; б) при зміні h



а)



б)

Рис. 4. Результати оцінки ефективності застосування конфузornoї ділянки: а) діапазон вимірювання; б) перепад тиску

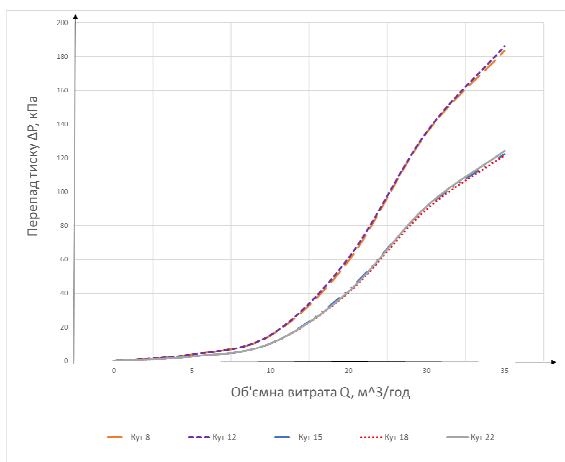
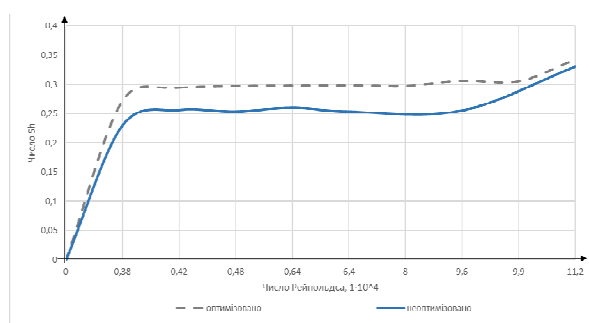
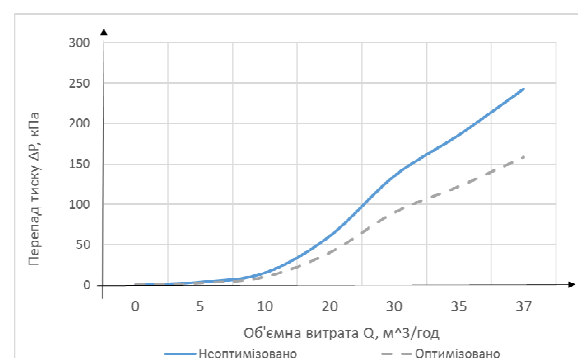


Рис. 5. Перепад тиску перетворювача витрати за наявності дифузornoї ділянки



а)



б)

Рис. 6. Досліджувані характеристики перетворювача витрати до і після оптимізації: а) діапазон вимірювання; б) перепад тиску

Метрологічні характеристики вихрових витратомірів окреслюються формою тіла обтікання, вибір якої досі залишається актуальною проблемою

Авторами запропоновано алгоритм визначення конфігурації гідравлічного каналу вихрового

витратоміра із застосуванням імітаційного моделювання, за якого досліджено особливості взаємодії тіла обтікання з потоком вимірюваного середовища, що обумовлюють метрологічні характерис-

тики приладу. Отримані результати підтвердили запропоновану авторами стратегію.

Перспективою подальших досліджень є проведення імітаційних досліджень запропонованої конфігурації гідравлічного каналу для різних класів вимірюваних середовищ.

Література

- [1] Vortex flowmeters. Vortex flow measurement: Robust and universally applicable for liquids, gases and steam. [Online]. Available at: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/flow-measurement-product-overview/vortex-flowmeters>
- [2] Vortex flowmeters: Optimizing a tried-and-true technology. [Online]. Available at: <https://www.piprocessinstrumentation.com/industry-processing/article/15563817/vortex-flowmeters-optimizing-a-triedandtrue-technology>
- [3] Вихревые расходомеры. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.emerson.ru/ru/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-vortex>
- [4] П. П. Кремлевский, *Расходомеры и счетчики количества*. Ленинград, СССР: Машиностроение, 1989.
- [5] А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн, *Вихревые счетчики-расходомеры*. Москва, СССР: Машиностроение, 1974.
- [6] А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн, *Вихревые измерительные приборы*. Москва, СССР: Машиностроение, 1978.
- [7] Б. П. Маштаков, А. В. Грикевич, “Вихревые расходомеры с телом обтекания. Перспективы вихревой расходомерии”, *Приборы и системы управления*, no 12, с. 24-26, 1990.
- [8] Датчик многопараметрический Метран-335. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides--335-metran-ru-61522.pdf>
- [9] Термальный расходомер ЕРІ-540. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://datchiki.com/product/termal-rashodomer-epi-540/>
- [10] Преобразователи расхода вихревые электромагнитные ВЭПС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/14646-05-veps-6571>
- [11] Вихреакустические преобразователи расхода Метран-300ПР, Метран-320, Метран-305ПР, Метран-303ПР. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pea.ru/docs/fileadmin/files/emerson/rashodomery/Vihreakusticheskie.pdf>
- [12] Prowirl F 200. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://celmet.com.ua/index.php?route=product/product&path=71_170&product_id=436
- [13] Вихревой расходомер Digital YEWFLO. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.dselectric.com.ua/yokogawa/measurement_analysis/measurement/measurement_charge/detail/44
- [14] М. С. Лурье, “Оптимизация тел обтекания вихревых расходомеров для целлюлозно-бумажного производства”, *Химия растительного сырья*, № 4, с. 173 – 176, 2010.
- [15] А. Pisarets, I. Korobko, “Optimization of turbine type flow rate transducer with hydrodynamic balancing of sensitive element”, *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, Вып. 54(2), с. 65 – 71, 2017. DOI: 10.20535/1970.54(2).2017.119574
- [16] І. В. Коробко, “Оцінка ефективності вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*, Вып. 44, с. 111 – 117, 2012.
- [17] М. С. Лурье, *Вихревые расходомеры и счетчики количества жидкости с контактно-кондуктометрическим приемником-преобразователем вихревых колебаний*. Красноярск, РФ: СибГТУ, 1999.
- [18] А. М. Мельник, “Моделювання роботи вихрового витратоміра” на XVII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні, Київ, 2021, с. 155-158.
- [19] И. Е. Идельчик, *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва, СССР: Машиностроение, 1975.

УДК 681.121

А. В. Писарец, А. Н. Мельник, О. А. Драчук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

ПРО ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ТЕЛА ОБТЕКАНИЯ ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА

Все большее распространение во многих отраслях промышленности получают расходомеры и счетчики жидкостей, основанные на применении вихревого метода. Это связано с простотой и надежностью преобразователя расхода, линейностью шкалы, наличием частотного измерительного сигнала, низкими требованиями к соосности и обеспечению длины прямых участков в месте установки и т.д. Среди вихревых средств измерения наиболее распространены приборы с телом обтекания. Принцип действия таких расходомеров основан на измерении частоты срыва вихрей за установленным в потоке телом обтекания.

Метрологические характеристики в этом случае определяются формой тела обтекания, поэтому поиск опти-

мальной формы чувствительного элемента и конфигурации гидравлического канала расходомера в целом остается актуальной проблемой.

В работе предложен алгоритм решения указанной проблемы по критериям максимального диапазона измеряемых расходов и эффективности взаимодействия тела обтекания с потоком измеряемой среды. Первый определяется из условия неизменности числа Струхала, второй – основан на оценке перепада давления измеряемой среды и погрешности измерения. Для реализации алгоритма применяется имитационное моделирование в программном комплексе Ansys Fluent.

Проведено моделирование для трех форм тела обтекания: цилиндр, призма с треугольным сечением, призма с сечением в виде трапеции, что позволило выбрать чувствительный элемент для дальнейшего решения задачи многопараметрической оптимизации.

Обоснованы геометрические особенности выбранной формы чувствительного элемента, пределы их изменения и граничные значения.

Полученные результаты подтвердили предложенную авторами стратегию. Перспективой дальнейших исследований является проведение имитационных исследований предложенной конфигурации гидравлического канала расходомера для разных измеряемых сред.

Ключевые слова: вихревой расходомер; преобразователь расхода; чувствительный элемент; тело обтекания; имитационное моделирование; оптимизация.

A. Pysarets, A. Melnyk, O. Drachuk

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Kyiv, Ukraine*

ABOUT SELECTING THE VORTEX FLOWMETER OPTIMAL BLUFF BODY SHAPE

Vortex flow meters are becoming more widespread in many industries. This is due to the simplicity and reliability of the flow transducer, the scale linearity, the frequency measuring signal presence, low requirements for alignment and ensuring the straight sections length at the installation site, etc. Among the vortex measuring instruments, the most common are instruments with a bluff body. Such flow meters operation principle is based on measuring the vortex stripping frequency behind a streamlined body installed in the flow.

In this case, the metrological characteristics are determined by the bluff body shape. Therefore, the search for the optimal sensing element shape and the hydraulic channel configuration of the flow meter as a whole remains an actual issue.

The paper proposes an algorithm for solving this issue according to the criteria of the measured flow rates maximum range and the interaction efficiency of the bluff body with the measured medium flow. The first criterion value is determined from the condition that the Strouhal's number remains unchanged; the second criterion is based on the estimation of the measured medium pressure drop and the measurement error.

To realize the algorithm, simulation modeling is used in the Ansys Fluent fluid simulation software, which uses computational fluid dynamics methods. Modeling carried out for three shapes of the bluff body: a cylinder, a prism with a triangular section, a prism with a trapezoidal section, which made it possible to choose a sensitive element for further solving the multi-parameter optimization problem.

Geometric features of the selected sensitive element shape, the limits of their change and boundary values are grounded. The simulation made it possible to estimate the measured flow rates range and pressure losses, as well as to determine the vortex stripping frequency, measurement error and efficiency factor for the investigated geometric model.

To further improve the instrument metrological parameters, the authors proposed to supplement the primary transducer geometric model with gradual contraction and diffuser sections. These sections parameters are selected from the conditions of a continuous flow and the maximum measured flow rates range with a minimum pressure loss.

The obtained results confirmed the strategy proposed by the authors. The further research prospect is to carry out simulation studies of the flow meter hydraulic channel proposed configuration for different measured media.

Keywords: vortex flow meter; flow transducer; sensitive element; bluff body; simulation modeling; optimization.

*Надійшла до редакції
08 жовтня 2021 року*

*Рецензовано
11 листопада 2021 року*