

УДК 681.123

В.В. Остапів, Н.М. Піндус, С.А. Чеховський

Івано-Франківський університет нафти і газу, Івано-Франківськ

КРИТЕРІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФОРМИ ТІЛ ОБТІКАННЯ ВИХОРОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

Здійснено аналіз впливу форми тіла обтікання вихорового витратоміра на стабільність числа Струхаля та частоти утворення вихорів. Проведено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження, сформульовано критерії оптимізації тіл обтікання вихорових витратомірів.

Ключові слова: вихоровий витратомір, тіло обтікання, число Струхаля.

Вступ

Постановка проблеми. Питання вибору оптимальної геометрії тіла обтікання (ТО) для вихорових витратомірів та лічильників, що працюють за принципом доріжки Кармана, є досить актуальним з огляду на все більше поширення таких засобів вимірювання витрати, зумовлене рядом їх переваг. Проте експериментальні дослідження впливу форми ТО на характеристики вихорових витратомірів пов'язане зі значними складностями, зокрема і фінансового плану, тому багато виробників при конструюванні вихорових засобів вимірювання витрати користуються вже відомими і традиційними рішеннями. Всі тіла обтікання, що використовуються у вихоровій витратометрії можна умовно поділити на призматичні та циліндричні: перші у поперечному перерізі являють собою багатокутник (як правило, трикутник чи трапецію, рідше Т-подібні тіла, повернуті основою назустріч потокові, рис. 1, е), другі – колоподібні фігури (зазвичай, різноманітні варіанти усічених кіл). При аналізі патентів виявлено також пропозиції стосовно використання тіл обтікання складної форми (найчастіше Т-подібних, з різними виступами та отворами), проте, внаслідок проблем виготовлення та дослідження, такі ТО зазвичай розглядаються суто теоретично і є малоприматними для використання в серійних приладах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В технічній документації вихорових витратомірів провідних світових виробників форма використаного тіла обтікання згадується тільки опосередковано, стосовно ж розмірів ТО інформація зазвичай взагалі відсутня. На підставі аналізу технічних описів було встановлено, що у більшості закордонних вихорових витратомірів та лічильників використовується тіло обтікання, що має форму трикутної призми, оберненої основою назустріч потокові (дельтаподібне тіло обтікання рис. 1, а) [1], або близьку до такої, наприклад ТО, що в перерізі має форму трапеції [2, 3] (рис. 1, б). Призматична форма тіла обтікання забезпечує високу стабільність частоти зриву

вихорів за рахунок наявності різкого переходу та технологічність і простоту виготовлення. У роботі [4] було проведено аналіз доцільності використання тіл обтікання різної форми та розмірів у вихорових витратомірах та досліджено залежність втрат тиску від числа Рейнольдса для різних ТО із використанням програмного забезпечення для комп'ютерної гідроаеродинаміки. Оптимальними за результатами досліджень названо тіла обтікання з перерізом у вигляді рівностороннього трикутника чи ромба (рис. 1, д), як такі, що мають мінімальний коефіцієнт лобового опору потокові з усіх досліджуваних тіл з гострими кромками. При використанні найбільш поширених ТО з перерізом у формі трикутника чи трапеції постає ще одна важлива проблема: вплив зносу гострих країв тіла обтікання на зміну точності витратоміра з часом, особливо при вимірюванні витрати агресивних середовищ та речовин із абразивними домішками. З метою зменшення зношування гострих кромки їх трохи заокруглюють [5], що суттєво збільшує довговічність ТО, проте таке рішення є компромісом між надійністю та стабільністю вихроутворення (рис. 1, в, г).

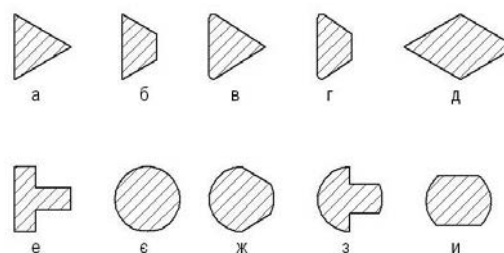


Рис. 1. Найбільш поширені та оптимальні перерізи тіл обтікання вихорових витратомірів.

Також показано, що коефіцієнт опору та втрати тиску для тіл у формі циліндра (рис. 1, е) є значно меншим [4], проте недоліком циліндричної форми вважається відсутність чіткої точки відриву пограничного шару, що може порушувати когерентність частоти сходу вихорів вздовж циліндра. В той же час, обтікання круглого циліндра потоком вивчено

значно більш детально як теоретично, так і експериментально; більш того, саме така задача є одним із класичних прикладів, що застосовуються для верифікації програмних кодів обчислювальної гідроаеродинаміки, тому можна вважати, що використання у витратометрії ТО саме циліндричної форми є досить актуальним.

Використання у вихорових витратомірах тіл обтікання у формі модифікацій круглого циліндра традиційно розглядалося вітчизняними спеціалістами як перспективний напрям [6]. З метою стабілізації частоти зриву вихорів на твірних циліндра просвердлюють наскрізні отвори (канали перетоку), що забезпечують часткове відсмоктування пограничного шару, для локалізації точки відриву, бокові грані зрізають (рис. 1, ж, и) або надають тілу обтікання Т-подібної форми, зберігаючи при цьому округлену частину, розташовану назустріч потоковій (рис. 1, з). Подібна форма ТО використовується у ряді вітчизняних вихорових витратомірів, зокрема у приладах виробництва компанії «ІРВІС» [7], інженерами якої було проведено численні дослідження, за результатами яких можна стверджувати, що така форма не лише сприяє зменшенню втрат тиску, але й забезпечує більшу довговічність геометрії ТО, сприяє його самоочищенню від наявних у газі домішок та робить менш чутливим до абразивних часток.

Формулювання мети статті. Як можна зробити висновок з проаналізованих літературних джерел, детальні порівняльні дослідження двох найбільш перспективних форм ТО з різних класів не проводились, тому постає питання їх аналізу. В роботі [8] запропоновано наступні критерії оптимальності форми тіла обтікання:

- стійкість частоти утворення вихорів при якомога менших швидкостях потоку;
- незмінність числа Струхала в робочому діапазоні витратоміра;
- поява кавітаційних процесів при якомога більших швидкостях;
- технологічність конструкції тіла обтікання.

Виклад основного матеріалу

Явище кавітації значною мірою є проблемою виключно при вимірюванні витрати рідин, крім того відомо [8], що кавітаційне число залежить від втрат тиску на ТО, тому доцільно розглядати у якості критерію оптимальності саме величину втрати тиску. Стосовно ж технологічності конструкції, то при сучасному рівні розвитку промисловості виготовлення усіх розглянутих тіл обтікання можна вважати достатньо простим. З огляду на вказані поправки сформулюємо критерії порівняння оптимальності форми тіл обтікання:

- стійкість частоти утворення вихорів при малих швидкостях потоку;

- стабільність числа Струхала в робочому діапазоні витратоміра;
- мінімальні втрати тиску на тілі обтікання.

З метою порівняння тіл обтікання за зазначеними вище критеріями було проведено ряд числових експериментів, суть яких полягає у визначенні мінімального числа Рейнольдса, при якому відбувається утворення доріжки Кармана та побудові графіків залежності числа Струхала та втрати тиску на ТО від числа Рейнольдса. При моделюванні вважалося, що частота сходу вихорів незмінна по всій довжині тіла обтікання, тобто розглядалася двомірна нестационарна задача обтікання тіл необмеженим рівномірним потоком; для порівняння було обрано тіла обтікання з перерізом, зображеним на рис. 1, а, б, з – як найбільш поширені у серійних моделях вихорових витратомірів.

Для моделювання вихорової доріжки використовувався програмний комплекс FlowVision із геометричним препроцесором SolidWorks, за допомогою яких проводилась візуалізація обтікання перешкод різної конфігурації (рис. 2) та визначення частоти сходу вихорів для цих тіл.

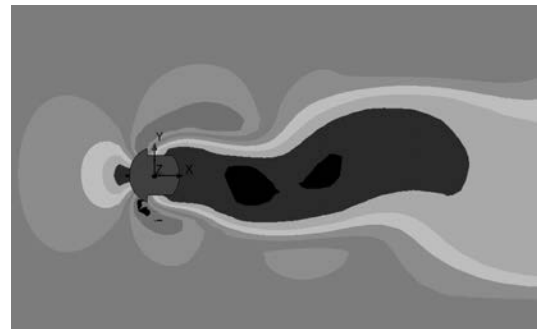


Рис. 2. Візуалізація утворення вихорової доріжки Кармана за тілом обтікання, що використовується у витратомірах ІРВІС

В результаті експериментальних досліджень було отримано наступні результати: стійке утворення вихорів для тіла обтікання циліндричної форми починається значно раніше (при $Re \approx 300$), в той час, як для призматичних ТО стійка доріжка Кармана спостерігається при числах Рейнольдса порядку 800.

В робочому діапазоні чисел Рейнольдса при обтіканні безмежним рівномірним потоком тіла у формі трикутної призми число Струхала змінюється в межах від 0,15 до 0,165, що складає приблизно 9%; при обтіканні ТО циліндричної форми спостерігається зміна числа Струхала у межах від 0,2 до 0,21, що складає приблизно 5%. Таким чином для ТО, що мають форму, близьку до циліндричної, забезпечують меншу нестабільність числа Струхала і більшу лінійність залежності $Sh = f(Re)$ у робочому діапазоні витратоміра.

Втрати тиску на тілі обтікання окрім форми ТО залежать від фактору «захарщення» трубопроводу, тобто від співвідношення розмірів перешкоди та

діаметру трубопроводу. Тому при аналізі конструкції вихорових витратомірів слід врахувати вплив стінок труби на процес утворення вихорової доріжки. Для порівняння втрат тиску, зумовлених тілами обтікання різної форми, використовувалася модель, що являла собою прямолінійну ділянку трубопроводу з розміщеними у ньому ТО з однаковими характеристичними розмірами. Коефіцієнт втрати тиску визначався за виразом:

$$C = \frac{P_b - P_{wb}}{\frac{1}{2} \rho v^2}, \quad (1)$$

де P_b – різниця тисків на вході та виході трубопроводу без ТО; P_{wb} – різниця тисків на вході та виході трубопроводу при наявності ТО; ρ – густина середовища; v – швидкість потоку.

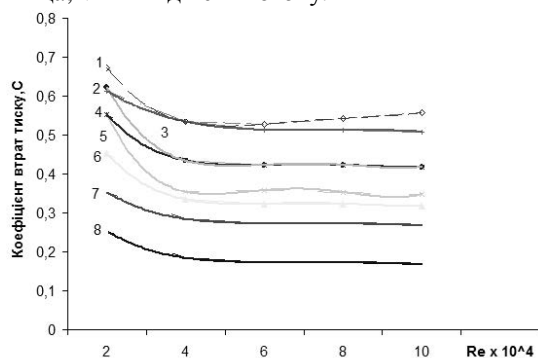


Рис. 3. Залежність коефіцієнта втрат тиску від форми тіла обтікання:

- 1-3 – обтікання чотирикутної призми;
4-6 – обтікання трикутної призми;
7-8 – обтікання тіл циліндричної форми

На рис. 3 наведено графіки залежностей коефіцієнта втрат тиску від числа Рейнольдса при обтіканні тіл різної форми для коефіцієнта перекриття трубопроводу 1:8; як видно із графіків, аеродинамічна форма лобової частини перешкоди забезпечує зменшення втрат при обтіканні, що зумовлює кращу придатність циліндричних ТО з точки зору мінімізації втрат тиску.

Висновки

В результаті експериментальних досліджень було сформульовано наступні критерії оптимізації

форми тіл обтікання вихорових витратомірів:

1. *Стійкість частоти утворення вихорів* при малих швидкостях потоку, що досягається за рахунок фіксації точки відриву доріжки Кармана шляхом конструктивного забезпечення різких переходів геометрії в кормовій частині ТО.

2. *Стабільність числа Струхаля* в робочому діапазоні витратоміра – реалізується шляхом експериментального підбору перерізу ТО зі сталим числом Струхаля у робочому діапазоні витратоміра.

3. *Мінімізація втрат тиску* на тілі обтікання забезпечуються за рахунок зменшення коефіцієнта лобового опору за рахунок аеродинамічної форми передньої частини ТО.

Отримані експериментально графічні залежності втрат тиску та числа Струхаля від числа Рейнольдса для різних форм тіл обтікання дають можливість стверджувати про існування зв'язку між геометричними характеристиками перешкоди та частотою утворення вихорів при її обтіканні.

Список літератури

1. *Расходомер-счетчик вихревой «Ирга-РВ»*. Руководство по эксплуатации.
2. *Вихревые расходомеры компании «ИОКОГАВА»* // Законодательная и прикладная метрология. – 2006. – Номер 6. – С. 37-44.
3. *Vortex Flowmeter VFM 1091(I) K+F DataSheet.*
4. *Effect of bluff body shape on vortex flow meter performance* / B.K. Gandhi, S.N. Singh, V. Seshadri, Jeeot Singh // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.* – October 2004. – Vol. 11. – P. 378-384.
5. *Effects of Shape Change due to Wear on the Accuracy of Vortex-Shedding Flow Meters* / Ernst von Lavante, Udo Banaszak, Marie Lefebvre // *International Conference on Multiphase Flow.* – 2004.
6. *Киясбейли А.Ш. Вихревые измерительные приборы* / А.Ш. Киясбейли, М.Е. Перельштейн. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
7. *Преобразователи расхода вихревые ИРВИС-К300* Руководство по эксплуатации ИРВС 9102.0000.00 РЭ
8. *Лурье М.С. Тела обтекания вихревых расходомеров* / М.С. Лурье, О.М. Лурье // *Датчики и системы.* – 2008. – № 10. – С. 21-23.

Надійшла до редколегії 28.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ТЕЛ ОБТЕКАНИЯ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

В.В. Остапов, Н.Н. Пиндус, С.А. Чеховский

Осуществлен анализ влияния формы тела обтекания вихревого расходомера на стабильность числа Струхаля и частоты образования вихрей. Проведено компьютерное моделирование и экспериментальные исследования, сформулированы критерии оптимизации тел обтекания вихревых расходомеров.

Ключевые слова: вихревой расходомер, тело обтекания, число Струхаля.

CRITERIA FOR VORTEX FLOW METER BLUFF BODY FORM OPTIMIZATION

V.V. Ostapiv, N.M. Pindus, S.A. Chehovskiy

The analysis of the impact body shape on the flow stability of Vortex flow Strouhal numbers and frequency of vortex formation. A computer simulation and experimental research, optimization criteria formulated body wrap vortex flowmeters.

Keywords: vortex flow meter, body of flowing around, number of Strukhal.