

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Моделювання вимірювання витрати вихоровим методом засобами flowvision та labview

ОСТАПІВ В.В.

Івано-Франківський університет нафти і газу, Івано-Франківськ

Здійснено моделювання обтікання потоком нестисливої рідини тіл різної форми, побудовано залежності числа Струхалія від числа Рейнольдса. Проведено комп'ютерне моделювання процесу вимірювання витрати вихоровим витратоміром та здійснено обробку результатів засобами Labview.

Ключові слова: вихоровий витратомір, тіло обтікання, число Струхалія, Flowvision, Labview.

Осуществлена моделирование обтекания тел разной формы потоком несжимаемой жидкости, определены зависимости между числами Струхалія и Рейнольдса для данных тел. Проведена компьютерное моделирование процесса измерения расхода при помощи вихревого расходомера и осуществлена обработка выходного сигнала средствами Labview.

Ключевые слова: вихревой расходомер, тело обтекания, число Струхалія, Flowvision, Labview.

Carried out simulations of incompressible fluid flow around bodies of different shapes, defined the relationship between the Strouhal and Reynolds numbers for these bodies. A computer simulation of the flow measurement using a vortex flowmeter was processed and processing the output signal was implemented with Labview software.

Keywords: vortex flowmeter, bluff body, Strouhal number, Flowvision, Labview.

Постановка проблеми. З розвитком обчислювальної техніки все більш актуальним стає питання заміни чи доповнення експериментальних досліджень фізичних процесів та явищ методами та засобами, що базуються на використанні математичного і комп'ютерного моделювання. У витратометрії серед таких засобів насамперед слід відзначити обчислювальну гідродинаміку (Computational Fluid Dynamics, CFD), яка використовується для побудови та дослідження комп'ютерних моделей течій рідин та газів із різними характеристиками з метою доповнення результатів теоретичних розрахунків та фізичних експериментів [1].

Особливо перспективним є використання засобів обчислювальної гідродинаміки при розробці витратомірів, принцип дії яких базується на явищах, що мають місце при обтіканні потоком розміщеної у ньому перешкоди, зокрема вихорових [2]. Параметри таких пристроїв у першу чергу залежать від їх геометричних характеристик, оптимальний вибір параметрів яких вимагає численних експериментів. Але проведення таких досліджень навіть для одного типорозміру витратоміра вимагає виготовлення набору тіл обтікання (ТО) різних форм та розмірів, що робить їх економічно недоцільними, в той час як комп'ютерне моделювання дозволяє здійснити дослідження аеродинамічних характеристик складових витратоміра без виготовлення реальних зразків деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача моделювання роботи вихорового перетворювача витрати в загальному випадку включає моделювання процесу обтікання потоком рідини чи газу нерухомого тіла із утворенням вихорової доріжки Кармана, що здійснюється засобами обчислювальної гідродинаміки, та подальшу

обробку його результатів за допомогою спеціалізованих програмних засобів.

Питанням практичного застосування програмних засобів, призначених для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки, присвячено значну кількість публікацій, які переважно стосуються перевірки адекватності моделей на класичних задачах (обтікання круглого циліндра, сфери або пластини [3-5], обтікання стандартних аеродинамічних профілів) – верифікації програмних продуктів, чи вирішення вузькоспеціалізованих задач.

Окремо слід відзначити роботи, метою яких є уточнення відомих співвідношень між числами Струхалія та Рейнольдса [7] для обтікання круглого циліндра чи встановлення нових рівнянь взаємозв'язку для вказаних величин [8], оскільки стабільність числа Струхалія у якомога більшому діапазоні чисел Рейнольдса є ключовою. В той же час власне циліндричні тіла обтікання у конструкції вихорових витратомірів не використовуються, що пов'язано насамперед із неможливістю чіткої фіксації точки відриву вихорів [9], натомість домінуючою формою тіл обтікання у сучасних вихорових перетворювачах витрати є призматична, з перерізом у формі трикутника чи трапеції [2].

Єдиним джерелом інформації про характер залежності між числами Струхалія та Рейнольдса для призматичних тіл обтікання є результати досліджень провідних виробників вихорових витратомірів: Krohne, Rosemount, Yokogawa [10].

Формулювання мети статті. З огляду на відсутність достатньої інформації про вплив форми тіла обтікання вихорового перетворювача витрати на його харак-

теристики доцільним є проведення досліджень із використанням засобів обчислювальної гідродинаміки для встановлення залежності між числами Струхала та Рейнольдса для призматичних тіл обтікання та оцінки впливу геометричних характеристик ТО, а саме кута при вершині, на стабільність та інтенсивність утворення ви-хорів.

Виклад основного матеріалу. Чисельне моделювання процесів, що відбуваються у вихоровому витратомірі, здійснювалося у програмному пакеті Flowvision 2.5; розв'язувалася двовимірна (2D) зовнішня задача обтікання тіла нестисливою рідиною із застосуванням $k - \epsilon$ моделі турбулентності, оскільки ця модель найбільш часто використовується для вирішення реальних інженерних задач.

У якості тіла обтікання використовувалися трикутні та трапецієвидні призми, розміщені основою назустріч потокові. Трапецієвидна призма отримувалася шляхом перетину трикутної площини, нормальною до напрямку потоку. Параметром, що характеризує геометрію ТО, є кут при вершині; для трапецієвидної призми доцільно враховувати також відстань від основи до площини зрізу, яка в даному випадку приймалася сталою і рівною половині ширини основи.

Для порівняння характеру залежності між числами Струхала та Рейнольдса з відомою залежністю для круглого циліндра, при моделюванні задавалися швидкостями, що відповідають числам Рейнольдса у

діапазоні 100–50000; частота утворення вихорів визначалася шляхом аналізу пульсацій сили, що діє на ТО з боку потоку.

Інформація про силу, що діє на ТО, записувалася у файл засобами Flowvision і підлягала подальшому аналізу. Оскільки розрахунок здійснювався з кроком по часу рівним 0,5 мілісекунд, для забезпечення стабілізації вихорової доріжки збір даних починався після проходження 1000 ітерацій. Для оцінки параметрів тіл обтікання використовувалося число Струхала (критерій подібності нестационарних течій, що характеризує постійність їх протікання у часі):

$$Sh = \frac{fL}{v} \quad (1)$$

де f – частота утворення вихорів, L – характерний розмір ТО, v – швидкість потоку.

Для опрацювання отриманих даних було розроблено віртуальний прилад (ВП) у середовищі Labview (рис. 1), що забезпечує завантаження даних із файлу, створеного Flowvision, їх фільтрацію та спектральний аналіз, візуалізацію сигналу та його спектральних складових, розрахунок частоти коливань та відповідного значення числа Струхала, зберігання залежності $Sh=f(Re)$ в табличній формі для подальшого опрацювання в математичних програмних пакетах Mathcad, Excel, тощо.

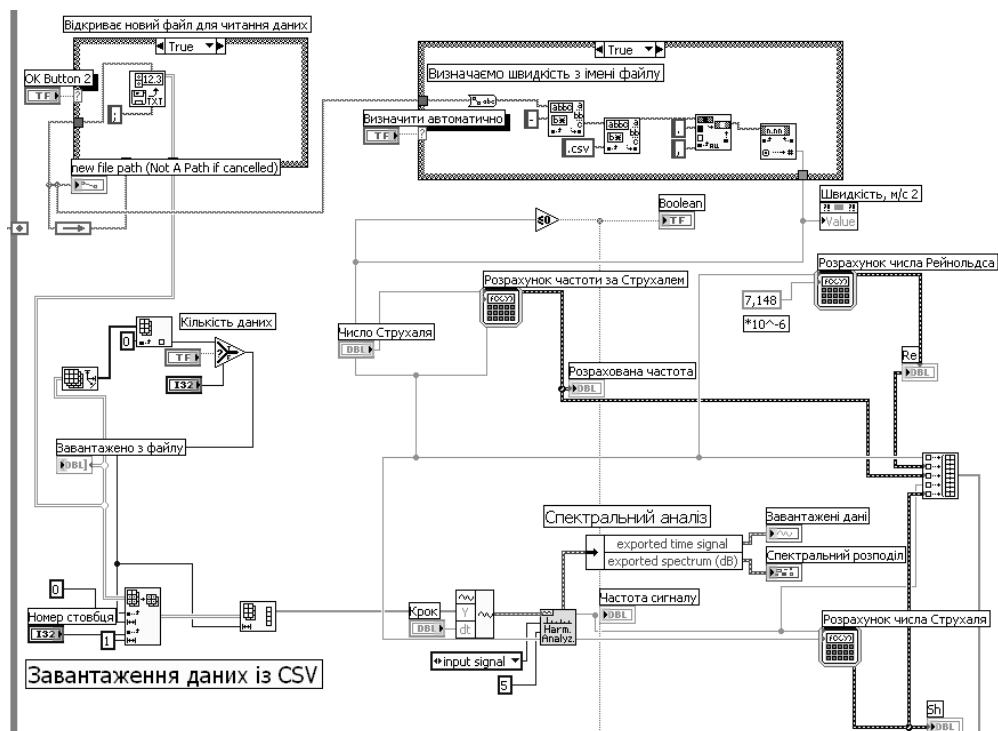


Рис. 1. Блок-діаграма головного циклу розробленого ВП

Візуалізація дає лише загальне уявлення про картину течії за тілом і може використовуватися для якісної оцінки адекватності моделі, проте зі збільшенням швидкості потоку зростає ступінь його турбулізації, яка для чисел Рейнольдса порядку 50 000 повністю охоплює не лише слід за тілом, але й граничний шар. Наявність турбулентності означає

зростання рівня завад і необхідність переходу до розгляду 3D задачі, тому для більш високих чисел Рейнольдса розрахунок не проводився.

В тій чи іншій мірі турбулізація вихорового сліду спостерігається і при значно менших швидкостях потоку, що спотворює вихідний сигнал. Крім того, вимірювання витрати на технологічних об'єктах

характеризується наявністю великої кількості завад: пульсації потоку, вібрація від роботи установок, удари по трубопроводу, тощо. Такі впливи за своєю інтенсивністю можуть значно перевищувати інформативний сигнал, тому виникає потреба його додаткового фільтрування. Оскільки у даному випадку характер залежності між швидкістю потоку (числом Рейнольдса) та частотою вихорової доріжки (числом Струхалія) відомий, доцільним є використання адаптивного смугопропускового фільтра, налаштованого таким чином, щоб виділяти частину сигналу, яка знаходиться у діапазоні $f_{розр} \pm 20\%$. Базова частота $f_{розр}$.

визначалася виходячи з умови стабільності числа Струхалія у робочому діапазоні витратоміра (використання аналогічного підходу у реальних витратомірах дозволяє усунути значну частину завад, якщо їх частота суттєво відрізняється від прогнозованої частоти корисного сигналу).

За результатами моделювання було отримано графічні залежності числа Струхалія від числа Рейнольдса для ТО з перерізом у формі рівнобедреного трикутника та трапеції. Визначені залежності для трикутної та трапецієвидної призми наведено на рисунку 2.

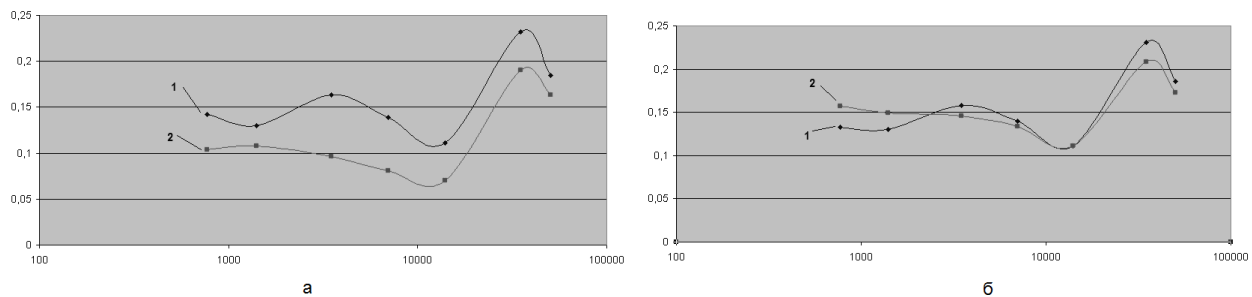


Рис. 2. Графіки залежності $Sh=f(Re)$ для трикутної та трапецієвидної призми з кутом при основі 30° (а) та 60° (б): 1 – трапецієвидна призма; 2 – трикутна призма

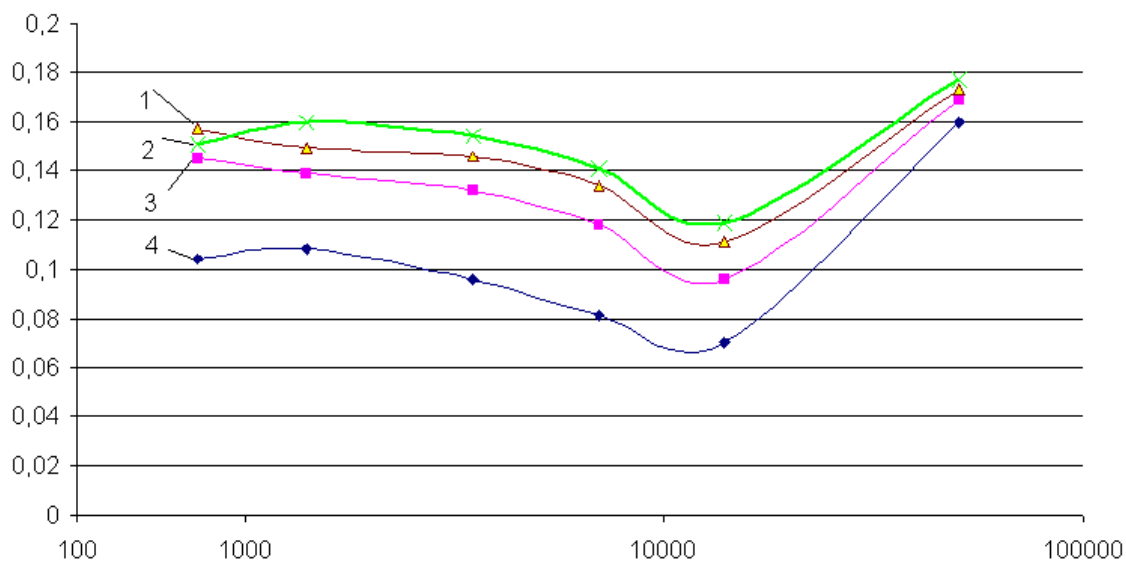


Рис. 3. Графіки залежності $Sh=f(Re)$ для трикутної призми: 1 – кут при вершині 60° ; 2 – кут при вершині 90° ; 3 – кут при вершині 45° ; 4 – кут при вершині 30°

Аналіз отриманих графічних залежностей дає можливість оцінити вплив параметрів тіл схожої форми на параметри потоку за тілом, що дозволяє говорити про можливість встановлення критеріїв оптимальності. Так, зокрема, зі зменшенням кута при вершині тіл, що мають форму трикутної призми, спостерігається стабілізація турбулентного сліду, що підтверджується роботами інших авторів [11]. Наслідком стабілізації вихорової доріжки є, зокрема, і зменшення втрат тиску на ТО. Проте при малих кутах інтенсивність вихроутворення суттєво зменшується за рахунок «прилипання» потоку до бічних граней призми, практично паралельних ліній потоку; для ТО, в основі

яких лежить трапеція спостерігається аналогічна ситуація. При досить малих числах Рейнольдса картина течії наближається до поздовжнього обтікання пластини.

Зі збільшенням кута при вершині як для трикутної, так і для трапецієвидної призми стабільність вихорової доріжки погіршується, втрати тиску зростають, проте за рахунок наявності чітких точок відриву та малої протяжності ТО в напрямку потоку збільшується чіткість фіксації коливальних при малих числах Рейнольдса. Загалом картина течії за ТО з тупим кутом при вершині нагадує обтікання прямокутної пластини, розташованої нормально до потоку.