

УДК 681.121

Коробко І.В., к.т.н., доц.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВОЇ ФОРМИ ТІЛ ОБТІКАННЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ВИТРАТИ РІДИНИ

Korobko I.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (i.korobko@kpi.ua)

OPTIMIZATION OF SPATIAL FORM OF STREAMLINE BODIES OF SENSING ELEMENTS IN HYDRODYNAMIC LIQUID FLOW MEASURING TRANSDUCERS

Розглянуті питання вибору просторової геометричної форми тіл обтікання чутливих елементів вимірювальних перетворювачів витрати рідини гідродинамічного класу на основі запропонованого узагальненого критерію оцінювання, який базується на ефективній взаємодії потоку вимірюваного середовища із чутливим елементом перетворювача, що забезпечує високі чутливість системи та точність вимірювання за мінімального впливу на кінематичні характеристики потоку. Визначені проектні параметри форми тіл обтікання чутливих елементів гідродинамічних перетворювачів, їх геометричні форми та просторова орієнтація відносно набігаючого потоку. Досліджені головні класи тіл обтікання що застосовуються у витративимірах і окреслені раціональні їх геометричні форми та просторова орієнтація відносно вектору швидкостей течії, які створюють реальні передумови синтезу гідродинамічних вимірювальних перетворювачів витрати з досконалими метрологічними характеристиками.

Ключові слова: вимірювання витрати, рідина, вимірювальні перетворювачі витрати, оптимізація.

Вступ. Постановка проблеми

Сталий розвиток економіки України у вирішальній мірі буде залежати від забезпечення її енергоносіями. Як відомо на сьогодні, третина валового внутрішнього продукту поглинається розрахунками за імпорт енергоносіїв. І в цьому контексті задачею економіки постає їх ощадне використання. Енергозбереження обертається на один з головних пріоритетів енергетичної політики України, оскільки ощадливе споживання енергетичних ресурсів, за рахунок їх обачливого використання, уявляється єдиним життєздатним шляхом вирішення стратегічно важливої для країни задачі – цілковитого забезпечення енергоносіями.

З розвитком промисловості, енергетики, нафтогазових комплексів тощо, зростають, відповідно, обсяги споживання паливно-енергетичних ресурсів. У всьому світі набувають широкого вжитку енергозберігаючі технології та відповідні засоби їх обліку. Аналіз причин порушення пропорцій між економічним ростом та енергоспоживанням переконує, що рушійною силою енергозбереження в Україні може бути лише глобальний перехід на ресурсозберігаючі технології.

Для народження дієвої системи енергозбереження слід, перш за все, розробити ефективну систему виміру і контролю витрати. Особливість моменту вималюється у необхідності у виміру витрати енергоносіїв з відмінною динамікою їх протікання – від сталих ламінарних потоків до нестационарних стохастичних тривалістю у долі секунди. Все це обумовлює жорсткі рамки метрологічних характеристик приладів і систем, універсальність і надійність роботи, максимальну інваріантність до впливу негативних чинників кінематичної і силової структури.

За відсутності засобів витративиміру стає неможливим забезпечення управління, а в подальшому і оптимізації технологічних режимів в енергетиці, металургії, нафтовій, газовій, целюлозно-паперовій, харчовій та в інших галузях промисловості. Постає також неможливою і автоматизація виробничих ліній і, відповідно, забезпечення максимальної їх ефективності.

Лічильники кількості вкрай необхідні для обліку маси або об'єму нафти, газу, пари, води та інших речовин різного агрегатного стану, які транспортуються по технологічним мережам і споживаються окремими об'єктами. Значення лічильників зростає у зв'язку із комерціалізацією обліку енергоносіїв. Отже, на сьогодні надто важливою постає проблема розробки нових і вдосконалення існуючих методів та способів вимірювання витрати і кількості рідинних енергетичних носіїв.

Постановка задачі

Одними з вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ), що використовуються для обліку рідин за різних режимів їх протікання, є гідродинамічні (ГД) ВПВ, принцип дії яких ґрунтується на залежності

переміщення або коливання чутливого елемента (ЧЕ), що розміщено у потоці, від величини його гідродинамічного натиску.

Для творення ефективних ГД ВПВ з довершеними метрологічними характеристиками необхідно провести їх синтез шляхом визначення раціональних значень конструктивних параметрів перетворювача за мінімізації втрати енергетичної складової потоку вимірюваного середовища. Доцільно дослідити вплив форми та просторової орієнтації тіл обтікання чутливих елементів на точність визначення витрати і ступені гідродинамічного впливу на плинний потік рідини.

Вплив просторової форми тіла обтікання чутливого елемента на метрологічні характеристики перетворювача витрати гідродинамічного типу

Вихідним сигналом ГД ВПВ є величина деформації чи відхилення ЧЕ, які викликані дією сил гідродинамічного натиску потоку вимірюваного середовища на ЧЕ, що являє собою пружний елемент з тілом обтікання і розміщено у потоці рідини. Тиск сил гідродинамічного натиску, що діють на ЧЕ у вигляді тіла обтікання (ТО) є функцією місцевої швидкості вимірюваного потоку рідини (швидкість у „живому” перерізі $(S_0 - S_m)$), тобто швидкості у перерізі вимірювального каналу S_0 за виключенням міделевої площі ТО S_m ; форми і розмірів ТО та густини вимірюваного середовища.

Виходячи з цього, задача оптимізації зводиться до заходження раціональних параметрів вимірюваної камери, ТО та ЧЕ в цілому. Враховуючи те, що серед одних з основних вимог до ВПВ є мінімальна втрата гідродинамічного натиску потоку вимірюваного середовища, при проходженні його крізь сам прилад, за критерій оптимізації доцільно прийняти критерій комплексної оцінки впливу приладу на вимірюване середовище при високій чутливості системи вимірювання та ефективності взаємодії ЧЕ з потоком рідини, що забезпечує високу точність вимірювання [1].

$$K_{efy} = \frac{A_{ec}(1-\delta)}{\Delta p^2}, \quad (1)$$

де A_{ec} - величина корисного вихідного сигналу ВПВ; Δp - втрата тиску потоку вимірюваного середовища на перетворювачі; δ - похибка вимірювання ВПВ.

Гідродинамічні ВПВ ефективно використовувати для вимірювання витрати та кількості рідини, що протікає з високими динамічними характеристиками, як в часі так і за величиною. Виходячи з цього, доцільно при оцінці такого типу ВПВ застосовувати величину динамічної похибки, яка описується виразом [2]

$$\delta_{дин}^i = \frac{\sin \beta}{A \cdot (D_1^2 + C_1^2)} \left\{ e^{-D_1 \tau_i} (-D_1 \sin c \tau_i - C \cos c \tau_i) + C \right\} + \frac{\cos \beta}{A \cdot (D_1^2 + C^2)} \left\{ e^{-D_1 \tau_i} (-D_1 \cos c \tau_i - C \sin c \tau_i) + D_1 \right\}, \quad (2)$$

де $A = \sqrt{1-\xi^2}$; $\beta = \arctg \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$; $C_1 = \omega \sqrt{1-\xi^2}$; $D_1 = \xi \cdot \omega$; ξ - коефіцієнт демпфірування ЧЕ; ω - частота вільних коливань ЧЕ.

Втрату тиску Δp на ВПВ можна описати виразом [3]

$$\Delta p = \frac{\xi_d \cdot \rho \cdot u_M^2}{2}, \quad (3)$$

де u_M - швидкість потоку в міделевому перерізі; ξ_d - коефіцієнт місцевого опору при обтіканні тіла і визначається за виразом [4]:

$$\xi = k \frac{C_x \cdot \frac{S_M}{S_0} \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^m}{\left(1 - \tau_{ЧЕ} \cdot \frac{S_M}{S_0}\right)^3}, \quad (4)$$

де C_x - коефіцієнт лобового опору ЧЕ; S_M - площа міделя ЧЕ; S_0 - площа живого перерізу потоку до встановлення ЧЕ; D - діаметр вимірювальної камери; y - відстань між віссю тіла і віссю потоку; $\tau_{ЧЕ}$ - коефіцієнт, впливу просторової форми ЧЕ та зміни поперечного перерізу вимірювальної камери; m - показник ступеня, k - коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкості течії за живим перерізом.

Коефіцієнт k визначається режимом руху вимірюваного середовища [4]: для ламінарного потоку:

$$k = 2, \quad (5)$$

для турбулентного потоку:

$$k = \frac{(2m+1)(m+1)}{2m^2}. \quad (6)$$

Коефіцієнт впливу просторової форми ЧЕ та зміни поперечного перерізу вимірювальної камери $\tau_{ЧЕ}$ визначається співвідношенням площ міделя ЧЕ, що обтікається, та технологічного трубопроводу, де його встановлено

$$\tau_{ЧЕ} = f\left(\frac{S_M}{S_0}\right).$$

Враховуючи вирази (6) та (4) залежність (3) набуде виду

$$\Delta p = \frac{C_x \cdot S_M \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^{\frac{3}{m}} \cdot (2m+1) \cdot (m+1) \cdot \rho \cdot u_M^2}{4 \left(1 - \tau_{ЧЕ} \cdot \frac{S_M}{S_0}\right)^3 m^2 \cdot S_0}. \quad (7)$$

Беручи до уваги залежності (7) та (2), вираз для критерія оптимізації (1) набуде виду

$$K_{еф\psi} = \frac{A_{вс} 16 \cdot (1 - (B_1 + B_2)) \left(1 - \tau_{ЧЕ} \cdot \frac{S_M}{S_0}\right)^6 m^4 \cdot S_0^2}{C_x^2 \cdot S_M^2 \left(1 - \frac{2y}{D}\right)^{\frac{6}{m}} \cdot (2m^2 + 3m + 1)^2 \rho^2 \cdot u_M^4}, \quad (8)$$

де $B_1 = \frac{\sin \beta}{A \cdot (D_1^2 + C_1^2)} \left\{ e^{-D_1 \tau_i} (-D_1 \sin c \tau_i - C \cos c \tau_i) + C \right\},$

$$B_2 = \frac{\cos \beta}{2 \cdot \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ D & +C \\ 1 & \end{pmatrix}} \left\{ e^{\begin{pmatrix} -D \tau \\ 1 i \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} -D \cos c \tau & -C \cos c \tau \\ 1 & i & i \end{pmatrix} + D \right\}.$$

З аналізу функції (8), випливає, що задача знаходження її максимуму зводиться до визначення оптимальних значень коефіцієнта демпфірування ξ , частоти вільних коливань ЧЕ ω , коефіцієнт лобового опору ЧЕ C_x , відношення площ міделя ЧЕ S_M і живого перерізу потоку до встановлення ЧЕ S_0 за конкретних умов витрати рідини. В той же час, коефіцієнт лобового опору ЧЕ C_x та відношення площ міделя ЧЕ S_M і живого перерізу потоку перед ЧЕ S_0 залежать від геометричної форми і розмірів ТО та ЧЕ в цілому.

Для тестування вибрані найбільш технологічні ТО: диск, конус з напрямом потоку на вершину, конус з напрямом потоку на основу, комбінація сфери і конуса з напрямом потоку на конус, комбінація сфери і конуса з напрямом потоку на сферу, сфера та чаша (табл.1).

Традиційним методом розв'язання поставлених задач постає емпіричний метод з проведенням великої кількості експериментального вивчення дослідних зразків. Виготовлення таких зразків і проведення випробувань пов'язано з великими матеріальними і регламентними затратами. В той же час, сьогодні особливою популярністю серед науковців користуються методи чисельного моделювання гідродинамічних процесів на технологічній базі обчислювальної гідродинаміки *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, завдяки яким можна ставити експерименти, не витрачаючи на них багато часу і коштів. Крім того, в багатьох випадках такий спосіб отримання інформації є чи не єдиною можливістю для виявлення ефектів складної взаємодії потоку вимірюваного середовища з ЧЕ елементами ВПВ.

Моделювання роботи витратоміра було проведено з використання програмного комплексу *ANSYS*, яких базується на системі кінцево-елементного аналізу для розв'язання лінійних, нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла та механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), завдань механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки зв'язаних полів. Система працює на основі геометричного ядра *Parasolid* [5].

Для повного відтворення всіх процесів у витратомірі було проведено міждисциплінарний аналіз, що включає в себе пакет *CFX* та пакет *Structural Static*.

ANSYS CFX – професійний аналітичний програмний комплекс, призначений для вирішення широкого спектру завдань обчислювальної газо- і гідродинаміки. Область застосування CFX – моделювання багатозфазних потоків, хімічної кінетики, горіння, радіаційного теплообміну, рідинно-структурної взаємодії.

Таблиця 1

Тіла обтікання та їх просторова орієнтація

№ класу ТО	Опис	Геометричне зображення та просторова орієнтація (напрямок потоку ←)
1.	Диск	
2.	Конус з напрямом потоку на вершину	
3.	Конус з напрямом потоку на основу	
4.	Комбінація сфери і конуса з напрямом потоку на конус	
5.	Комбінація сфери і конуса з напрямом потоку на сферу	
6.	Сфера	
7.	Чаша	

StaticStructural – повний міцнісний пакет (за винятком функцій розрахунку гідрогазодинаміки, тепла, електромагнетизму), включає функції міцнісного аналізу, розрахунки лінійної міцності, нелінійності (деформації, пружності, пластичності, текучості, розрахунок елементів на розтяг-стиск та ін.).

Тестування впливу ТО різних геометричних форм, розмірів та орієнтації на метрологічні характеристики перетворювача проводилися за витрати $Q = 1,4 \cdot 10^{-3} \frac{M^3}{c}$, діаметру вимірювального каналу $D = 15 \cdot 10^{-3} m$; параметрів ЧЕ: довжина $l = 35 \cdot 10^{-3} m$, товщині $h = 3 \cdot 10^{-4} m$, ширина в зоні закріплення $b = 1 \cdot 10^{-2} m$, модуль пружності матеріалу $E = 9,5 \cdot 10^{10} Pa$. В результаті досліджень за різних ступенів заповнення поперечного перерізу $d_{cz} = \frac{S_m}{S_o}$ визначені перепади тиску на ТО Δp , максимальна деформація ЧЕ ε , напруження в зоні розміщення перетворювачів деформації та критерії ефективності K_{efy} (табл.2)

Таблиця 2

Результати досліджень тіл обтікання

№ групи ТО	Опис тіла обтікання	Ступінь заповнення поперечного перерізу ($d_{cz} = \frac{S_m}{S_o}$), %	Перепад тиску, Па	Максимальна деформація ЧЕ, $10^{-3} m$	Напруження в місці розміщення перетворювачі в деформації, МПа	$K_{efy} \cdot 10 \frac{m}{Pa \cdot K_{ef} \cdot h}$
11.	Диск	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-4} m$)	5680	0,274	11,09	0,482
12.		15 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-4} m$)	6877	0,732	26,87	1,064
13.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-4} m$)) $d=7mm, h=0.5mm$	11772	2,066	69,85	1,775
21.	Конус з напрямом потоку на вершину	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$)	4688	0,201	8,31	0,429
22.		15 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$)	5270	0,5	19,08	0,948
23.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$)	7169	1,04	37,38	1,451
31.	Конус з напрямом потоку на основу	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$)	4979	0,177	7,47	0,355
32.		15 ($d = 5 \cdot 10^{-3} m$)	6433	0,682	26,04	1,06
33.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$)	10225	1,75	62,49	1,711
41.	Комбінація сфери і конуса з напрямом потоку на конус	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$)	4437	0,191	8,1	0,43
42.		15 ($d = 5 \cdot 10^{-3} m$)	5306	0,402	15,41	0,758
43.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$)	7221	0,794	27,23	1,1
51.	Комбінація сфери і конуса з напрямом потоку на сферу	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$)	4548	0,234	9,67	0,515
52.		15 ($d = 5 \cdot 10^{-3} m$)	5306	0,402	15,41	0,758
53.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$)	6918	0,814	29,07	1,177
61.	Сфера	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$)	4452	0,219	9,04	0,492
62.		15 ($d = 5 \cdot 10^{-3} m$)	5352	0,465	17,89	0,869
63.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$)	7193	0,892	32,12	1,24
71.	Чаша	5 ($d = 3 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-4} m$)	4921	0,357	15,04	0,725
72.		15 ($d = 4 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-4} m$)	6809	1,003	36,6	1,47
73.		30 ($d = 7 \cdot 10^{-3} m$, $h = 5 \cdot 10^{-4} m$)	11697	2,54	89,47	2,171

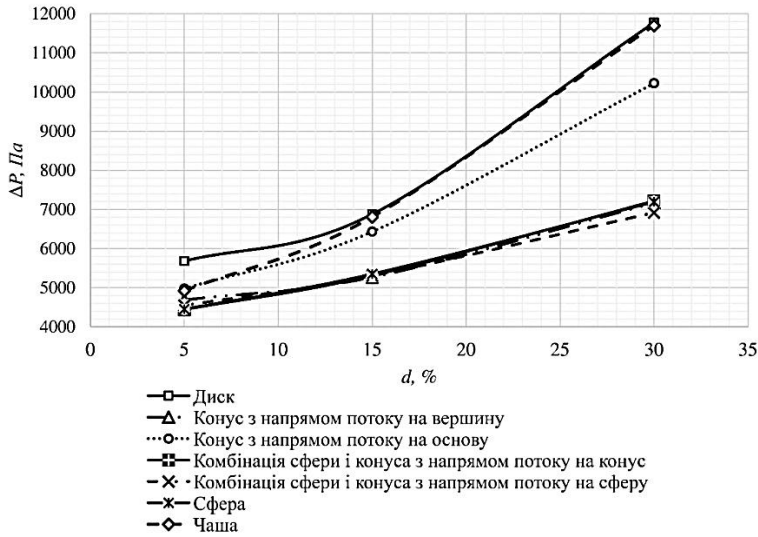


Рис. 1. Перепад тиску за різних тіл обтікання

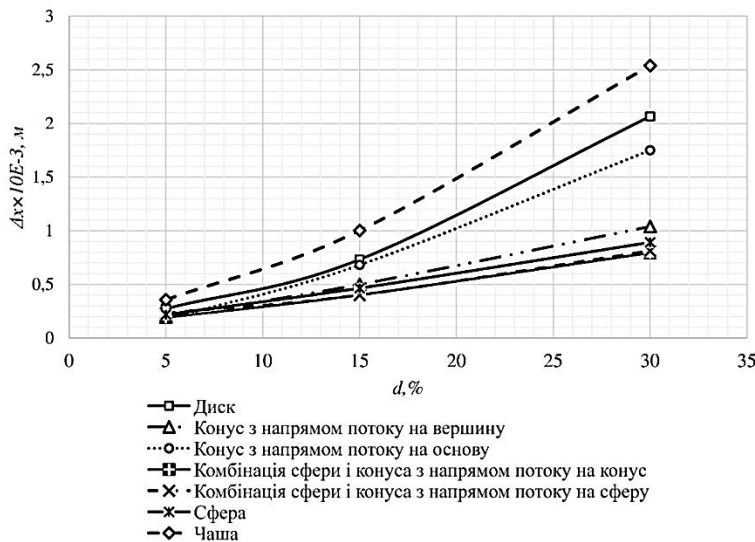


Рис. 2. Максимальна деформація чутливого елемента

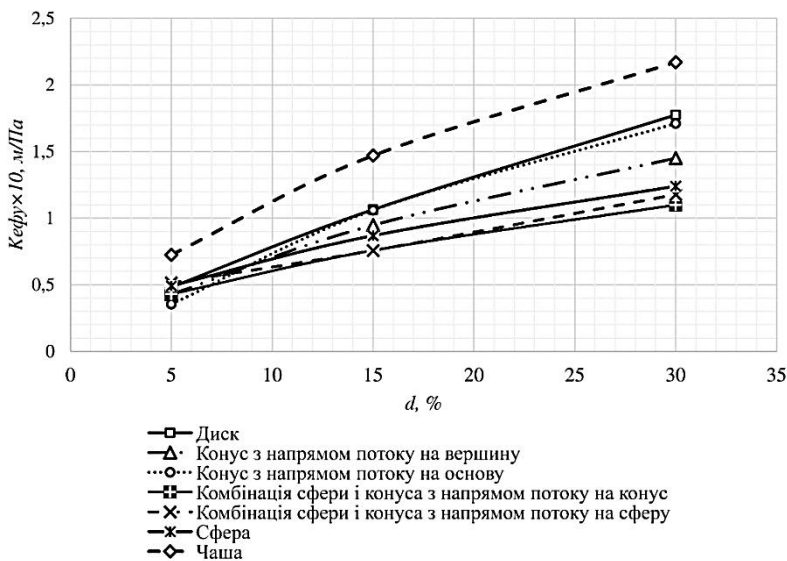


Рис. 3. Узагальнений критерій $K_{эфy}$ в за різних тіл обтікання та їх просторової орієнтації відносно напрямку набігаючого потоку

За результатами чисельного моделювання (табл.2) отримані графічні залежності перепаду тиску $\Delta p = f(d_{c3})$ (рис.1), деформації ЧЕ $\Delta x = f(d_{c3})$ (рис.2) та узагальненого критерія оцінки ефективності перетворювача витрати $K_{эфy}$ (рис.3), за різної орієнтації відносно набігаючого потоку, від ступеню заповнення поперечного перерізу $d_{c3} = \frac{S_M}{S_o}$.

Аналіз графічних залежностей $\Delta x = f(d)$ $\Delta x = f(d)$ (рис.2) показує, що найбільшу чутливість мають пружні елементи з тілами обтікання у формі чаші, диску та конуса з напрямом потоку на вершину. Всі інші групи геометрії тіл обтікання призводять до низької чутливості вимірювального перетворювача. В той же час, перепад тиску, за різних тіл обтікання та їх просторової орієнтації відносно напрямку набігаючого потоку (рис.1), для вказаних тіл обтікання найбільший, який для чаші та диску близький за значеннями та характером (відрізняється тільки при $d_{c3} = 5\%$). Це викликано особливостями локальних гідравлічних опорів, що створюють такі просторові тіла.

Результати дослідження залежності узагальненого критерія $K_{эфy}$ від ступеню заповнення поперечного перерізу d_{c3} за різних тіл обтікання та їх просторової орієнтації відносно напрямку набігаючого потоку (рис.3) переконують, що доцільну форму мають ЧЕ з тілами обтікання у формі чаші та диску. При цьому ЧЕ з чашою має більш досконаліші динамічні характеристики, викликані зменшенням гідравлічного опору переміщенню пружного елемента з боку вимірюваного середовища за ним. Виходячи з цього, для творення вимірювальних перетворювачів витрати рідини зі сталим в часі потоком, доцільно застосовувати чутливі елементи з тілами обтікання у формі чаші з напрямом потоку на вгнуту поверхню або диску, для динамічних в часі течій – чашкоподібні тіла або комбінацію напівсферичної і дискової просторової поверхонь з напрямом потоку на площину диску.

Висновки

Наведені результати тестування тіл обтікання, які конструктивно входять до складу чутливих елементів вимірювальних перетворювачів витрати гідродинамічного класу, які окреслюють геометричну форму вказаних тіл і їх просторове розміщення відносно напрямку градієнту швидкості плинної течії рідиннофазного середовища, що забезпечує творення витратомірів з доскональними метрологічними характеристиками.

Подальші дослідження будуть направлені на оцінку впливу гідродинамічних характеристик рідиннофазного середовища на метрологічні характеристики гідродинамічні вимірювальні перетворювачі витрати рідини при вимірюванні як сталих так і змінних в часі і за амплітудою потоків.

Аннотация. Рассмотрены вопросы выбора пространственной геометрической формы тел обтекания чувствительных элементов измерительных преобразователей расхода жидкости гидродинамического класса на основе предложенного обобщенного критерия оценки, базирующийся на эффективном взаимодействии потока измеряемой среды с чувствительным элементом преобразователя, обеспечивающий высокие чувствительность системы и точность измерения при минимальном влиянии на кинематические характеристики потока. Определены проектные параметры формы тел обтекания чувствительных элементов гидродинамических преобразователей, их геометрические формы и пространственная ориентация относительно набегающего потока. Исследованы главные классы тел обтекания применяемых в расходомерах и очерчены рациональные их геометрические формы та пространственная ориентация относительно вектора скорости течения, которые создают реальные предпосылки синтеза гидродинамических измерительных преобразователей расхода с совершенными метрологическими характеристиками.

Ключевые слова: измерения расхода, жидкость, измерительные преобразователи расхода, оптимизация.

Abstract. Issues of selection of spatial geometric form of streamline bodies of sensing elements in hydrodynamic liquid flow measuring transducers were discussed basing on proposed integrated criterion of estimation. This criterion is grounded on effective interaction of measuring flow with transducer sensing element and gives high sensitivity of the system along with measuring accuracy at minimum impact on kinematic flow characteristics. Design objectives of form of streamline bodies of sensing elements in hydrodynamic liquid flow measuring transducers, their geometric forms and spatial arrangement regarding incoming flow have been determined. Main classes of streamline bodies which are used in flowmeters were investigated. Rational geometric forms of mentioned bodies and their spatial arrangement relatively to flow velocity vector, which create real background of synthesis of hydrodynamic flow measuring transducers with improved performance were analyzed.

Keywords: measurement, flow rate, liquid, measuring transducers, optimization, sensing elements.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Коробко І. В. Оцінка ефективності вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 111 – 117.
2. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. – М.: Машиностроение, 1976. – 312.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.
4. Идельчик И. Е. Справочное пособие по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 543 с.
5. Гришанова І. А., Коробко І. В. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT. – К.: Дія ЛТД, 2012. – 208 с.

References

1. Korobko I. V. BULLETIN of National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute". Series INSTRUMENT MAKING. 2012. Vyp. 44. pp. 111-117.
2. Braslavskij D.A., Petrov V.V. Tochnost' izmeritel'nyh ustrojstv. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 312 p.
3. Al'tshul' A. D. Gidravlicheskie poteri na trenie v truboprovodah. Moscow-Leningrad.: Gosjenergoizdat, 1963. 256 p.
4. Idel'chik I. E. Spravochnoe posobie po gidravlicheskim soprotivlenijam. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 543 p.
5. Grishanova I. A., Korobko I. V. Sistemi CAD/CAE. ANSYS FLUENT. Kyiv:Dija LTD, 2012. 208 p.