

УДК 681.121

І.А.Гришанова

Національний технічний університет України «КПІ»

БЕЗКОНТАКТНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ

В даній статті аналізуються результати теоретичних і практичних досліджень безконтактного ультразвукового методу вимірювання витрат на базі накладних витратомірів. Метою всіх проведених досліджень було відповісти на запитання, чи можна використовувати безконтактний ультразвуковий метод вимірювань в комерційному обліку енергоносіїв.

Ключові слова: *витратоміри, вимірюване середовище.*

Вступ.

Серед сучасних методів вимірювання витрат ультразвуковий завжди відрізнявся доволі високою точністю і гарно зарекомендував себе в різних умовах експлуатації. Його різновидом є ультразвуковий метод вимірювань з накладними датчиками, який полягає у можливості безконтактного визначення витрати протікаючого по трубопроводу середовища, внаслідок чого вважається досить унікальним. Дійсно, ознаки цієї унікальності полягають в тому, що

- немає необхідності вмонтовувати витратомірну ділянку в трубу;
- відсутня втрата тиску на витратомірній ділянці;
- датчики витрати не треба занурювати у вимірюване середовище, отже, виключено їхнє забруднення та випадання на них осаду;
- можна використовувати там, де небажано контактувати з вимірюваним середовищем.

На жаль окрім суттєвих переваг безконтактному ультразвуковому методу вимірювання притаманні і суттєві недоліки, які досить часто роблять неможливим його застосування для високоточних вимірювань, яких, наприклад, потребує комерційний облік енергоносіїв.

Дослідженнями безконтактного методу займаються здебільшого у Великобританії та США [1-5], де він знайшов широке розповсюдження. Зокрема вчені Британської національної інженерної лабораторії NEL приймали участь у різних проектах, метою яких було експериментальне випробовування витратомірів, що працюють на безконтактному ультразвуковому методі. Завдяки потужній експериментальній базі вченим з NEL вдалося оцінити ефективність безконтактного ультразвукового методу з точки зору стабільності і точності отримуваних показань за різних умов роботи накладних ультразвукових витратомірів.

Однак і досі залишається невирішеним питання, чому так багато нарікань на гіршу (у порівнянні зі звичайними витратомірами) точність отримуваних показань, на їхню нестабільність, на необхідність неодноразового налагодження приладу, тощо. Багато накладних витратомірів дають так звану «унікальну» можливість «адаптації» своїх характеристик під конкретний об'єкт прямо на місці експлуатації. Зрозуміло, що в такому випадку жодних розмов про метрологію взагалі бути не може.

Постановка задачі.

Для того, щоб відповісти на запитання, чи здатні взагалі накладні витратоміри мати високі метрологічні показники, слід розв'язати такі задачі:

- провести аналіз загальної теорії, покладеної в основу безконтактного ультразвукового методу вимірювань;
- оцінити, які саме параметри впливають на точність витратомірів, що працюють на безконтактному ультразвуковому методі вимірювань;
- з урахуванням впливаючих факторів обчислити загальну похибку витратомірів, що працюють на безконтактному ультразвуковому методі вимірювань;
- проаналізувати дослідні дані різноманітних експериментів з витратомірами, що працюють на безконтактному ультразвуковому методі вимірювань;
- зробити висновки відносно можливості застосування безконтактного ультразвукового методу для високоточних вимірювань витрати або кількості речовини.

Загальна теорія.

Спочатку розглянемо, до чого призводять окремо взяті відхилення деяких важливих для вимірювання витрати параметрів.

Для великої кількості ультразвукових витратомірів, які пропускають акустичні сигнали в діаметральній площині і є часо-імпульсними, об'ємна витрата визначається за формулою [6]

$$Q = \pi d k t g \alpha c^2 \Delta t / 8, \quad (1)$$

де d – діаметр труби, в якій вимірюється витрата;

$k = V_s / V_d$ – поправковий коефіцієнт, що представляє собою відношення середньої швидкості по перерізу труби V_s до середньої швидкості по діаметру труби V_D ;

α – кут введення ультразвукових коливань в потік;

c – швидкість ультразвуку у вимірюваному середовищі;

Δt – різниця часів проходження акустичних сигналів вздовж потоку і проти нього.

Так, зовнішній діаметр труби, від якого переходять до внутрішнього d , здебільшого визначається за результатами замірів зовнішнього кола труби L . Причому, як свідчать дослідження Британської національної інженерної лабораторії NEL [1] (рис. 1), похибка вимірювання витрати зменшується із збільшенням діаметра труби і зростає із збільшенням товщини стінки труби. Тільки для труб з діаметром більше 200 мм похибка вимірювання витрати вже не залежить від товщини стінки, а на менших діаметрах цей вплив більш суттєвий, як і величина похибки вимірювання.

Відхилення від округлості в перерізі трубопроводу іноді помилково не враховуються і передбачається, що труба має ідеальний округлий поперечний переріз, хоча в реальності досить часто він має еліпсоїдну форму. В цьому випадку, якщо проводити заміри діаметрів за допомогою так званої мірної штанги, що проходить через центр труби під визначеним кутом, то похибка буде суттєво залежати від коректності вибору даного кута (рис. 2). Як видно з рис. 2, при куті в 0° , діаметр труби буде дещо більшим, ніж при куті в 90° .

В результаті, похибка за даними тієї ж Британської національної інженерної лабораторії NEL [1] (рис. 3) буде відповідно змінюватися в межах $\pm 5\%$. Причому, залежати вона буде не стільки від виниклої еліпсності, скільки від суттєвого викривлення характеру розподілу швидкостей порівняно з трубою округлого перерізу. Останній фактор відобразиться на зміні поправкового коефіцієнта k , що використовується при знаходженні витрати і враховує відмінність розподілу швидкостей по перерізу від розподілу швидкостей по довжині каналу зондування потоку.

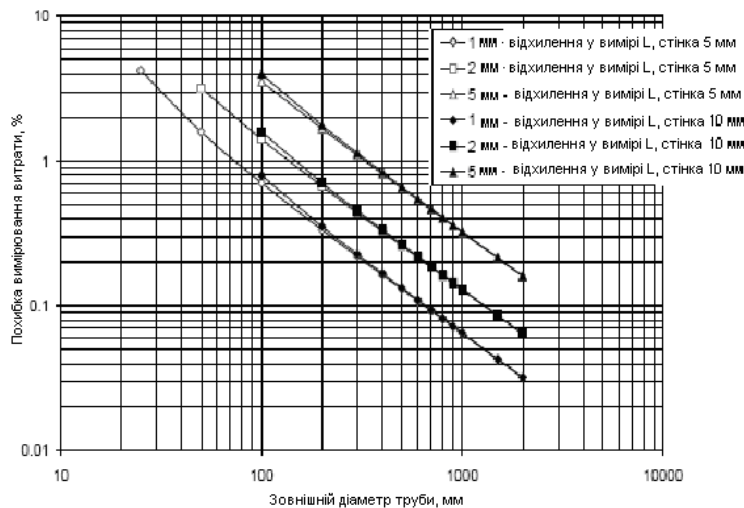


Рис. 1. Залежність похибки вимірювання витрати від неточності вимірювання довжини зовнішнього кола трубопроводу L

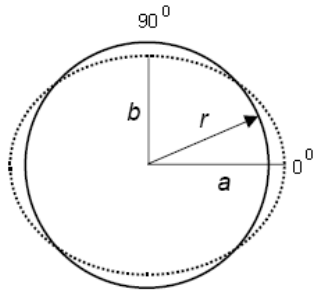


Рис. 2. Еліптичне викривлення форми поперечного перерізу труби

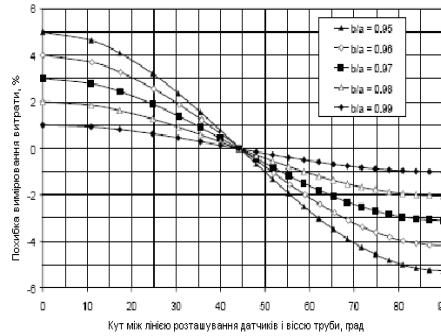


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання витрати від кута введення акустичних коливань в потік за різної величини еліпсності b/a

Суттєвий вплив на точність вимірювання витрати має також і кут, що утворюється між лінією установки ультразвукових датчиків і віссю труби, тобто кут α в формулі (1). При цьому в реальних умовах на можливе відхилення даного кута від номінального значення впливає не тільки точність позиціонування накладних датчиків на трубі, але і шорсткість поверхні стінок труби, а також зміна властивостей матеріалу прокладки між трубопроводом і ультразвуковим датчиком. Все це в кінці кінців безумовно відобразиться на точності вимірювання витрати.

Ще одним негативним моментом при використанні накладних ультразвукових датчиків є часткове віддзеркалювання акустичних коливань від поверхні розділу твердого і рідинного середовищ і розповсюдження їх в стінці труби. При цьому поперечні звукові хвилі можуть досягнути п'єзоелемента-приймача раніше, ніж хвилі, які розповсюджуються через рідину.

Щоб врахувати якомога більше впливаючих на точність вимірювання витрати факторів з допомогою накладних датчиків, скористаємось формулою середньоквадратичної похибки вимірювання витрати [6]:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_d^2 + \frac{4\sigma_\alpha^2}{\sin^2 2\alpha} + 4\sigma_c^2 + \sigma_k^2 + \sigma_{\Delta t}^2 + \sigma_p^2}, \quad (2)$$

де $\sigma_d, \sigma_\alpha, \sigma_c, \sigma_k, \sigma_{\Delta t}, \sigma_p$ - середньоквадратичні похибки внаслідок варіацій діаметра витратомірної ділянки d , кута випромінювання акустичних коливань в потік α , швидкості ультразвуку c , поправкового коефіцієнта k , вимірювання інтервалу часу Δt , реверберації ультразвукових хвиль в перетворювачі p .

Якщо варіація швидкості ультразвуку при зміні температури в межах $\pm 5^\circ\text{C}$ і тиску середовища в межах $0 \div 10 \text{ кгс/см}^2$ дає максимальне значення середньоквадратичної похибки $\sigma_c = 0,9\%$, то з урахуванням максимальних відносних похибок: вимірювання діаметра $\delta_d = 1\%$, урахування гідродинамічного поправочного коефіцієнта $\delta_k = 5,4\%$, вимірювання кута випромінювання коливань $\delta_\alpha = 1\%$, - середньоквадратична похибка вимірювання витрати в цілому σ_Q буде дорівнювати $3,5\%$. При цьому не враховувалися середньоквадратичні похибки, викликані варіаціями: вимірювання різниці Δt часів проходження акустичного сигналу і реверберації p ультразвукових хвиль. Розрахунки проводились з урахуванням того, що при довірчому інтервалі 2σ гранична похибка вимірювання витрати $S_Q = 2\sigma_Q$ [6].

Даний приклад гарно ілюструє випадок, коли навіть незначні відхилення основних компонентів формули визначення витрати дають суттєву похибку вимірювання.

Тепер перейдемо від теоретичних аспектів до практичних. Спробуємо проаналізувати експериментальні дослідження накладних витратомірів, отримані нашими колегами з європейських і американських інженерних лабораторій [1-5], оскільки саме їм вдалося досягнути значних успіхів в розвиненні цього методу вимірювань. Разом з тим, не дивлячись на ці успіхи, є і

суттєві недоліки, які на сьогоднішній день слід мати на увазі особливо, якщо намагатися застосовувати безконтактний ультразвуковий метод вимірювання в комерційному обліку енергоресурсів.

Спочатку зупинимося на тих вимогах, яких обов'язково дотримуються при встановленні накладних датчиків витрати:

1. Необхідно впевнитися, що датчики під конкретні умови експлуатації підібрані вірно, тобто з необхідними розмірами і робочою частотою.
2. Кріплення датчиків до труби має виконуватися дуже ретельно, з урахуванням точного позиціонування.
3. Довжина прямої ділянки, що йде перед витратомірною, має бути не менше 20 Ду (діаметрів умовного проходу).
4. Бажано уникати установки накладних датчиків на ділянках, де є подвійні і потрійні коліна, або встановлювати датчики якомога далі від цих місцевих опорів з урахуванням інформації з п.3.
5. Необхідно мати точні відомості про вимірюване середовище, а також розміри, матеріали і стан труби, по якій воно протікає.

З урахуванням всіх вищенаведених достатньо жорстких рекомендацій, а також використовуючи високоточне монтажне обладнання, були проведені експериментальні дослідження, мета яких полягала у з'ясуванні різних факторів, що можуть вплинути на метрологічні характеристики накладних ультразвукових витратомірів.

Експериментальні дослідження [1].

Експериментальні стенди були заповнені водою і працювали на старт-стопному принципі із застосуванням статичного зважування. Похибка стендів складала 0,1%. Діапазон тестових швидкостей води знаходився в межах 50:1.

Дані по тестових швидкостях, відповідних витратах і кількості повторних випробувань на кожній витраті наведені в таблиці. Для проведення експериментальних досліджень були взяті прилади з накладними датчиками від трьох виробників (вибір здійснювався з 9 найбільш відомих фірм на ринку витратомірної техніки у Великобританії). Зразки відрізнялися кількістю каналів і методами обробки сигналів вимірювальної інформації, а також шириною ультразвукового променя, що зондує потік.

Таблиця

Експериментальні дослідження накладних витратомірів

Швидкість м/с	% від макси- мальної можливої швидкості	Витрата в трубі діаметром 100 мм, л/с	Витрата в трубі Діаметром 200 мм, л/с	Витрата в трубі діаметром 600 мм, л/с	Кількість повторни х дослідів
0,10	2	0,8	3,1	28,3	5
0,25	5	2,0	7,9	70,7	5
0,50	10	3,9	15,7	141,4	5
2,00	40	15,7	62,8	565,5	5
3,50	70	27,5	110,0	989,6	5
5,00	100	39,3	157,1	1413,7	5

Експерименти проводилися з метою оцінки впливу наступних факторів:

- відтворюваності результатів за повторних накладань датчиків на трубу;
- зміщення датчиків від нульового (початкового) положення на точність показань;
- місцевих опорів на точність показань;
- діаметра труби на характер градууювальної характеристики витратоміра;
- матеріалу труби на проходження ультразвукового сигналу.

В процесі дослідження **відтворюваності результатів вимірювань**, датчики знімали з труби, а потім знову встановлювали, причому їх не зміщували відносно заданої позиції, а перевстановлювали на те саме місце. Вплив зняття/накладання датчиків на точність приладу

відображено на рис.4. Данні фіксувалися в певних точках всього діапазону швидкостей потоку і порівнювалися зі зразковою градууювальною характеристикою, отриманою для труби діаметром 600 мм (пунктирна лінія). Суцільна лінія отримана шляхом апроксимації результатів вимірювань (символ ×) у всьому діапазоні швидкостей.

Як видно з рисунка, відхилення в показах на одній і тій самій швидкості доходять до 1%, а це досить багато для високоточних вимірювань витрат, де боротьба ведеться за десяті долі відсотка.

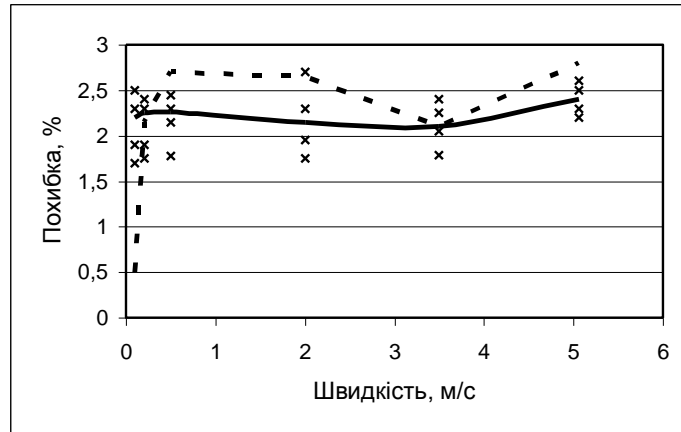


Рис.4. Оцінка відтворюваності результатів вимірювань витратоміра з накладними датчиками

Додаткові тести були проведені на швидкості 2 м/с, коли **датчики були зміщені** на ± 50 мм (з кроком 5, 10, 25 і 50 мм) на трубі з неіржавки сталі діаметром 200 мм (рис.5).

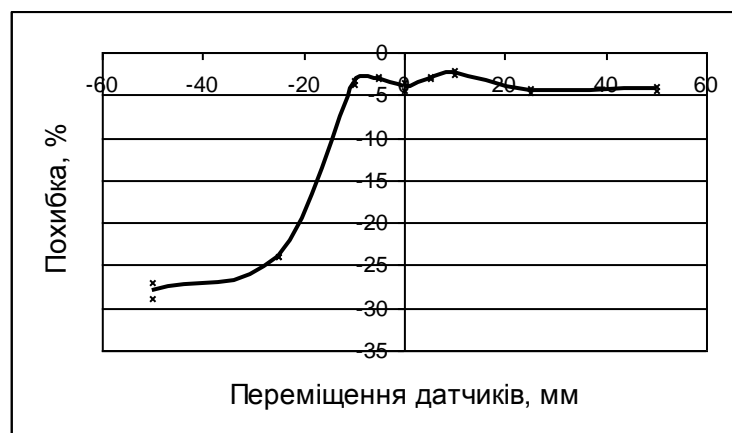


Рис.5. Експерименти по зміщенню накладних датчиків витратоміра

Результати цього тесту свідчать про те, наскільки важливо дотримуватися інструкції відносно точного позиціонування датчиків на трубопроводі. Навіть незначні зміщення датчиків в межах декількох міліметрів можуть легко призвести до погіршення точності на 1-2 %, тоді як більші – суттєво впливають на показання приладу, збільшуючи похибку вимірювань до 30 %. Повторюваність результатів в даному експерименті також не можна назвати достатньо високою, оскільки відхилення показань між початковим і повторним градуюваннями в різних точках, зміщених відносно початкового положення, доходять в деяких випадках до декількох відсотків.

Оцінка впливу на точність вимірювань місцевих опорів проводилася на трубі з неіржавки сталі діаметром 200 мм з прикріпленими до неї заздалегідь ультразвуковими датчиками. Це робилось для підтримання чистоти експерименту, щоб не переплутати реально отримувані ефекти від впливу місцевих опорів із випадковими ефектами від «перенакладання» датчиків.

З місцевих опорів найбільшу зацікавленість викликали подвійні і потрійні коліна, розташовані перед тестовими витратомірами. Струмовипрямляч розташовувався на відстані не менше 10 Ду (діаметрів умовного проходу) до зазначених місцевих опорів і після них

встановлювалася пряма ділянка в 30 діаметрів, наприкінці якої і розташовувався прилад, що тестувався.

Випробування показали, що викривлений профіль швидкостей, викликаний потрійним коліном, створює досить суттєвий вплив на виконання накладних датчиків, навіть якщо потрійне коліно віддалено від витратоміра на відстань до 40 Ду. Цей ефект обумовлений складною взаємодією викривленого профілю течії і ультразвукових променів.

В ході інших досліджень накладних ультразвукових витратомірів [1] було помічено, що збільшення кількості діаметральних шляхів проходження ультразвукового сигналу не зменшує впливу місцевих опорів на точність приладу. Витратоміри, що використовують акустичне зондування потоку за двома хордами, які проходять через половини радіусів труби по обидва боки від вісі, значно менше піддаються впливу місцевих опорів.

При дослідженні впливу подвійного коліна на точність накладних витратомірів було відмічено, що в деяких випадках на відстані 20 Ду від цих опорів результати були значно кращими, ніж на відстані 30 Ду. Однак в кількісному співвідношенні поки не вдалося остаточно визначити вплив згаданих місцевих опорів на похибку накладних ультразвукових засобів вимірювання витрат.

Наступний експеримент мав на меті виявити, *наскільки діаметр труби впливає на характер градувальної характеристики* накладних витратомірів.

Для цього випробування кожен з трьох витратомірів (рис.6,7,8) тестувався в зразкових умовах на трубі діаметром 200 мм (пунктирна лінія) і в звичайних умовах на трубі діаметром 100 мм (суцільна лінія).

Кількість повторних дослідів (символ ×) в звичайних умовах дорівнювала 5 на кожній з певних точок діапазону, а потім за середніми значеннями була побудована результативна крива (суцільна лінія).

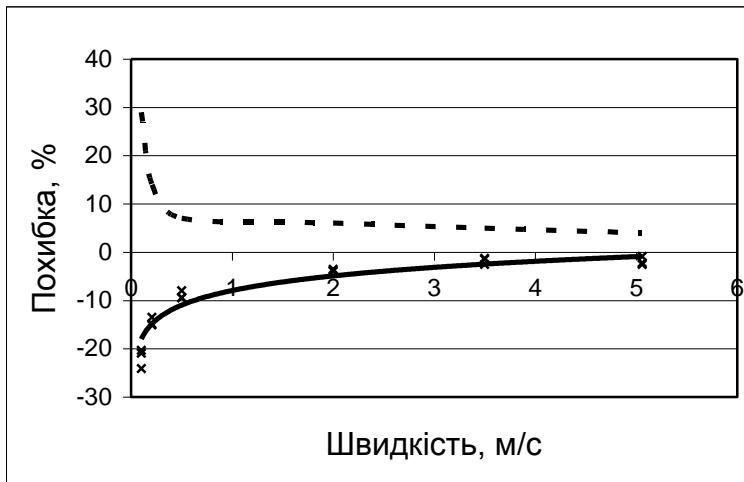


Рис.6. Порівняння поведінки похибок витратоміра 1 в діапазоні швидкостей на трубах діаметрами 100 і 200 мм



Рис.7. Порівняння поведінки похибок витратоміра 2 в діапазоні швидкостей на трубах діаметрами 100 і 200 мм

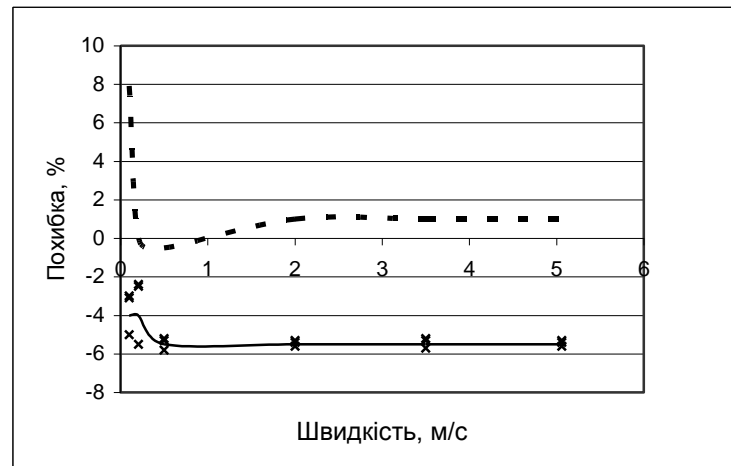


Рис.8. Порівняння поведінки похибок витратоміра 3 в діапазоні швидкостей на трубах діаметрами 100 і 200 мм

Як свідчать отримані графіки (рис. 6,7,8), характер метрологічних характеристик для труб різних діаметрів, але отриманих одним і тим самим витратоміром (кожним з 3 досліджуваних), не завжди був однаковим, не кажучи вже про те, що характеристики зміщалися одна відносно одної. Іншими словами, на етапі градування отримували один результат, а в процесі експлуатації – дещо інший, причому відмінний по точності на декілька відсотків. Дані результати зайвий раз демонструють непередбачуваність поведінки накладних датчиків в реальних умовах експлуатації.

Було також виявлено, що із збільшенням швидкості повторюваність результатів і нелінійність характеристик покращується. Стартовою точкою можна вважати швидкість 1 м/с, починаючи з якої спостерігаються більш або менш стійкі покази. Хоча в ряді випадків цей швидкісний поріг може бути і меншим, але для загальних рекомендацій доцільно керуватися початковим значенням швидкості саме в 1 м/с. Взагалі навіть для швидкостей більше 1 м/с похибки варіюються і складають біля декількох відсотків.

В якості альтернативи порогового значення в деяких джерелах [5] фігурує також число Рейнольдса $Re=6000$. При менших його значеннях спостерігалися похибки до 10-16 % і відмічалась погана повторюваність результатів. При числах $Re>6000$, тобто для турбулентного режиму результати вимірювань накладними витратомірами були очевидно краще, разом з тим зустрічалися випадки, коли один і той самий прилад давав різні похибки (від -7 до +6 %) в залежності від місця розташування на трубі.

Матеріал труб в основному не представляв проблем для досягнення потребованих характеристик передачі сигналу. Тестовані витратоміри були дієздатні на трубах з різного матеріалу, хоча достатньо стабільний сигнал не завжди отримували з першого разу. Жодної модифікації поверхні труб не виконувалося. Нелінійність характеристики могла бути викликана впливом шорсткості на характер профілю швидкостей, а також товщини стінки труби на розповсюдження сигналу.

В цілому можна відмітити, що різні за конструктивним виконанням витратоміри дають різні результати і окрім конструктивного виконання грають роль і умови, в яких проводилися випробування. Іноді необхідно проводити більш детальні дослідження, щоб повністю оцінити ефекти, що мають вплив. Різниця в показах витратомірів визначається також різними методами емпіричної корекції показань і введенням в програмне забезпечення коефіцієнтів, підібрати які – доволі непроста задача через брак стабільності в такого роду вимірах. Навіть при достатньо ретельному виборі і застосуванні накладних витратомірів очікувана похибка вимірювань навряд чи буде менше $\pm 5\%$, до речі за швидкостей потоку більше 1 м/с.

Загальні висновки.

1. Для високоефективного використання накладних ультразвукових витратомірів необхідно чітко знати можливі режими течії вимірюваного середовища в трубі, щоб уникнути неточних і нестабільних вимірювань за умови ламінарного чи перехідного режиму течії. У зв'язку з цим напрошується і наступний висновок.

2. Не слід застосовувати накладні датчики на трубах малого діаметра.
3. Значний внесок в похибку накладних витратомірів вносить складність у визначенні точних розмірів труби. При цьому слід враховувати такі фактори, як шорсткість стінок трубопроводу, яка варіюється від місця до місця кріплення датчиків, овальність трубопроводів (згідно ГОСТ 10704 вона може досягати тільки при випуску 2-3% і навіть 4%) тощо. Крім того, не вірно введений матеріал труби також вносить велику долю в сумарну похибку вимірювань.
4. Під час калібрування на стенді для накладних витратомірів в принципі можна досягти відносно стабільних показань в певному діапазоні швидкостей течії (результати варіюються в межах 1-2 %). В реальних же умовах експлуатації для таких витратомірів досить складно визначитися з поправковим коефіцієнтом, щоб привести показання приладу до нуля. Отже в умовах реальної експлуатації у вузлах комерційного обліку енергоносіїв сумарна похибка визначення витрати безконтактним ультразвуковим методом не завжди відповідає вимогам до високоточних вимірювань.

Від автора.

Після всього сказаного дуже сумнівними вважаються твердження багатьох українських і російських розробників накладних витратомірів, що їхні прилади начебто задовольняють точності в 1% у всьому діапазоні вимірювань (іноді заявляються навіть більш фантастичні значення, а саме 0.25 – 0.5%!). Тим більше, що лабораторні експерименти, проведені практично в ідеальних умовах, цього далеко не підтверджують.

Отже, безконтактний ультразвуковий метод вимірювання має право на існування, але поки що не там, де потребують високоточних і стабільних показів, тому подальші наукові дослідження слід спрямувати на розробку системи оптимального проектування безконтактних ультразвукових витратомірів, яка дозволить в залежності від об'єкта установки даних приладів спрогнозувати їхні характеристики, а отже і вийти на оптимальні параметри первинних перетворювачів, за яких можна отримати такі характеристики.

1. Clamp-on Ultrasonic Meters // Flow Measurement Guidance Note No.24. – NEL, Glasgow, 2000.
2. Bernt Svensson, Jerker Delsing Application of ultrasonic clamp-on flow meters for in situ tests of billing meters in district heating systems // Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 9, 1998. – P. 33-41.
3. Further Guidance on the use of Clamp-on Transit Time Ultrasonic Flow Meters // Flow Measurement Guidance Note No.48. – NEL, Glasgow, 2005.
4. Long-term Evaluation of Ultrasonic Flowmeters // Flow Measurement Guidance Note No.25. – NEL, Glasgow, 2000.
5. Project FEUS05 Final report on Clamp-on Transit Time Ultrasonic Flowmeter Performance Evaluation // DTI reference: GBBK/C/03/18 October 2005.
6. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 701 с.
7. Гришанова И.А., Покрас С.И., Покрас А.И. Ультразвуковая расходометрия на примере тепловодосчетчика СВТУ-10М: мнения и факты // Материалы XXI-й международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», Санкт-Петербург, 2005. – С.245-262.