МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

КОРОБКО ІВАН ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 681.121

НАУКОВІ ПРИНЦИПИ ТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПЛИННИХ ПОТОКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕРЕЖ

05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі приладобудування Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор,
БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут",
професор кафедри приладобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПІСТУН Євген Павлович,
Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри автоматизації теплових та хімічних процесів, м. Львів

доктор технічних наук, професор,
КВАСНІКОВ Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, м. Київ

доктор технічних наук, професор,
КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович,
Одеська Державна академія технічного регулювання та якості, завідувач кафедри акредитації, якості та споживчої політики, м. Одеса

Захист відбудеться "___" _____ 2014 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.07 в НТУУ "КПІ" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37, корпус 1, ауд. 317-1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий "___" _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доцент **Ю.В. Киричук**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сталий розвиток економіки України вирішальним чином залежить від забезпечення промисловості всіх галузей народного господарства енергоносіями. Перед суспільством стоїть надзвичайно важливе завдання жорсткої економії плинних енергоносіїв, яка не може бути життєздатною без точного та надійного їх обліку. Галузева практика потребує суттєвого підвищення точності реєстрації витрати та кількості рідин. Перш за все, це стосується стратегічно важливих їх видів, зокрема, нафтопродуктів, енергоносіїв спеціального призначення, питної води тощо. Надпроблемою в цьому контексті постає побудова такої системи проектування вимірювальних перетворювачів, яка б створила умови комплексного розв'язання проблеми народження досконалих сучасних вимірювальних засобів з високими метрологічними показниками. В свою чергу, це передбачає побудову досконаліших розрахункових схем, які б описували взаємодію плинних потоків рідини з елементами вимірювальних перетворювачів, здійснення щораз точніших розрахунків з огляду на непросту динаміку обопільної дії вимірюваних потоків і перетворювача, особливостей структури проектуємих елементів конструкції. Оскільки, перетворювачі взаємодіють з рідинним середовищем, для тестування їх метрологічних характеристик необхідно побудувати наукові основи системи вимірювання витрати, яка б не залежала від профіля потоків, з одного боку, і враховувала б параметри рідини у трубопроводах і вимірювальних камерах перетворювачів різних класів – з іншого. Надзвичайно важливим постає питання дослідження неоднорідностей потоку, викликаних локальними гідравлічними опорами різної просторової конфігурації (коліна, конфузори, дифузори, раптові розширення та звуження мережі, тіла обтікання і таке інше, які породжують градієнти швидкості потоку і викликають вихороутворення), впливу забруднення та недоцільності обраного місця монтажу приладів на вимірювальній ділянці, вивчення характеру і ступеня зворотного впливу на контролюємий потік елементної бази приладу через специфіку його конструкції, аналіз оберненої реакції приладу на параметри потоку і чисельна її оцінка.

Для забезпечення необхідної точності виміру витрати, а також кількості рідини, необхідно побудувати дієву теоретичну базу та універсальне стендове забезпечення для відтворення експлуатаційних умов плину паливно-енергетичних ресурсів та води в технологічних мережах з подальшою атестацією засобів виміру.

Таким чином, проблема точних вимірювань витрати і реєстрації кількості рідини в технологічних мережах постає стратегічно важливою і **актуальною** для України, як гарант її сталого розвитку в очікуваному майбутті.

Обґрунтуванням необхідності та доцільності проведених досліджень може слугувати той факт, що на теперішній час відсутній комплексний підхід до вивчення і аналітичного опису динаміки поліагрегатних структур засобів виміру різного класу і фізичних принципів в умовах нестаціонарного руху потоків в технологічних мережах і їх стохастичного розвитку у часі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Теоретичні та експериментальні дослідження, результати яких покладено в основу дисертаційної роботи, проводилися на кафедрі приладобудування НТУУ„КПІ" при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт „Розробка теоретичних та

експериментальних основ проектування вимірювачів витрат рідин із різними режимами потоку”(1993–1994 р.р., *РК 0193U032008*), „Розробка та дослідження вимірювальних перетворювачів витрат рідини з різними режимами потоку (1995–1997 р.р., *РК 0195U003145*), „Розробка наукових основ проектування і дослідження засобів вимірювання витрат енергоносіїв” (1996–1999 р.р., *РК 0198U001703*), „Розробка високочутливого лічильника витрат рідин” (2000–2002 р.р., *РК 0100U002387*), ”Розробка систем оптимального проектування засобів вимірювання витрат енергоносіїв”(2003–2005 р.р., *РК 0103U000213*), „Розробка високочутливого лічильника рідин з розвантаженими опорами чутливого елемента” (2007–2009 р.р., *РК 0107U002330*), “Розробка вимірювальних перетворювачів витрат природного газу з використанням комп’ютерних технологій параметричного моделювання" (2009–2010 р.р., *РК 0109U002631*). Дисертаційні дослідження пов’язані також з виконанням госпдоговірних тем: „Сучасні технології щодо створення малих ГЕС” (2008 р., *РК 0108U009270*), „Аналіз приладів і систем вимірювання витрати та кількості паливно-енергетичних ресурсів та води” (2013–2014 рр., *РК 0113U000901*).

Автором здійснювалось наукове керівництво зазначених робіт, особисто розроблено концепцію, задачі та методики комплексних досліджень, здійснено планування експериментів, їх практичну реалізацію та узагальнення результатів, самостійно та у співавторстві розроблені нові математичні моделі перетворювачів витрати, обґрунтовані їх робочі режими, розроблені конструктивні схеми.

Мета і задачі досліджень. *Метою наукових досліджень* є вирішення важливої науково-технічної проблеми – побудова наукових принципів творення засобів вимірювання витрати дозвукових плинних потоків паливно-енергетичних ресурсів.

Для досягнення мети досліджень *вирішені наступні задачі:*

– узагальнені наявні досягнення та здобутки витратовимірної галузі і сформульовані магістральні напрямки розвитку вимірювальних перетворювачів на підґрунті побудованої системи наукових поглядів нестаціонарної взаємодії рідиннофазних потоків з чутливими елементами на різноманітних фізичних принципах;

– встановлені локальні особливості динаміки взаємодії технологічних потоків з перетворювачами в умовах нестаціонарної турбулентності потоку за наявного градієнту швидкості кінематичного поля;

– розкриті особливості пружно-напруженого стану поверхні чутливого елементу перетворювача і його вплив на похибки вимірювань;

– побудовані математичні моделі вивчаємих процесів, що слугують основою для створення програмного забезпечення наукових досліджень;

– окреслені шляхи вирішення задач оптимізації процесу виміру витрати рідини технологічних потоків;

– здійснені стендові напівнатурні дослідження перетворювачів для тестування приладів в умовах, максимально наближених до експлуатаційних;

– розроблена методологія оцінки певності і надійності витратовимірювальної техніки вітчизняних виробників і означені шляхи її вжитку в Україні.

Об’єктом дослідження слугує процес виміру витрати, а також кількості, паливно-енергетичних ресурсів.

Предметом досліджень обрані тахометричні, акустичні та гідродинамічні засоби, які набули широкого вжитку у виробників і споживачів багатьох галузей промисловості.

Методи досліджень, що покладені в основу роботи, базуються на використанні математичного моделювання фізичних процесів, основних законах гідродинаміки, методах сучасних інформаційних технологій. Математичне моделювання роботи перетворювачів та побудова їх розрахункових схем ґрунтуються на теорії похибок, теорії імовірностей, теорії невизначеності у вимірюваннях, та на методах структурного аналізу похибок. При побудові системи проектування застосовувався комплексний підхід творення вимірювальних приладів із використанням методів оптимізації складних технічних систем. Стендові дослідження впливу гідродинаміки вимірюваного середовища на метрологічні характеристики перетворювачів будувались на принципах планування та постановки експерименту, математичній статистиці, методах чисельної обробки результатів досліджень.

Методологічну основу дисертаційної роботи складає комплексний підхід до аналізу та вдосконалення методичних, інструментальних і метрологічних аспектів вимірювання витрати рідини на базі методів оцінювання та перевірки гіпотез, стохастичних процесів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– *отримали подальший розвиток* принципи побудови розрахункових моделей пружної взаємодії набігаючого потоку з механічними системами перетворювачів і створена науково обґрунтована система поглядів на природу виникнення похибок виміру витрати рідини;

– *доведена необґрунтованість* існуючої практики окреслення зони контролю тільки прямолінійними ділянками технологічних мереж;

– *вперше запропонований системний* підхід до підвищення точності вимірювань витрати та кількості рідини шляхом ідентифікації нормування математичних моделей перетворювачів по критерію локальних гідродинамічних характеристик технологічних потоків. Виявлені складові похибок, які мають бути частково чи повністю виключені за рахунок структурно-параметричної оптимізації перетворювача в цілому, та його окремих вимірювальних ділянок, зокрема, за визначеними критеріями оптимізації;

– *здійснені* теоретичні і стендові дослідження впливу гідродинамічних параметрів плинного середовища і елементної бази перетворювачів на метрологічні характеристики та окреслені шляхи мінімізації похибок вимірювань;

– *встановлена* ступінь залежності метрологічних характеристик від фізико-хімічних параметрів вимірюваного середовища, шляхом імітаційного моделювання запропоновано опосередкований метод їх визначення в експлуатаційних умовах;

– *вперше побудовані* узагальнені математичні моделі динамічної взаємодії потоків рідини з елементами конструкції перетворювача, що дозволяє тестувати його показники для широкого спектру локальних особливостей кінематичних полів;

– *запропоновані нові критерії* оптимальності характеристик перетворювачів з позиції мінімізації похибок вимірювання та впливу на параметри рідиннофазних потоків;

– *вдосконалено методологію* визначення і аналізу гідродинамічних характеристик потоку вимірюваного середовища на підґрунті методів статистичного, регресійного і дисперсійного аналізів та методу найменших квадратів;

– *вперше* виявлені закономірності взаємодії рідини з елементами конструкції приладу;

– *вирішена проблема* практичної реалізації аналітичних результатів для побудови перетворювачів витрати з досконалими метрологічними характеристиками;

– *створені і запропоновані до вжитку наукові аспекти* подальшого вдосконалення перетворювачів витрати за рахунок компенсації похибок, обумовлених неоднорідностями потоку;

– *вперше досягнута* висока ступінь збіжності теорії і стендових випробувань в широкому діапазоні кінематичних параметрів потоку;

– *робота слугує* науковим підґрунтям принципово нового підходу до проектування досконалих засобів вимірювальних систем нового покоління.

Практичне значення одержаних результатів полягає у галузевому впровадженню:

– на ***ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ”*** принципово нових методик дослідження та оцінки гідродинамічних характеристик потоків рідини із застосуванням сучасних наукових підходів до розробки еталонів, методики оцінки впливу варіативності характеристик вимірюваного середовища, викликаних конструктивними особливостями еталонного обладнання, на метрологічні характеристики перетворювачів витрати рідини, що забезпечило створення сучасного метрологічного обладнання з межами нормування відносної похибки від ±0,1 до ±0,2 відсотків ;

– на ***ТОВ* ФІРМА *“СЕМПАЛ КО ЛТД”*** математичних моделей перетворювачів витрати на основі взаємодії потоків рідини з елементами їх конструкції, що можуть бути використані при проектуванні сучасних засобів вимірювання, принципово нові методики проектування лічильників ультразвукового типу з використанням інформаційних пакетів системи *CAD/CAE*; результати проведених розрахунків метрологічних характеристик ультразвукових лічильників рідини за різних схем розміщення електроакустичних перетворювачів та швидкостей вимірюваного середовища; рекомендації щодо визначення місця встановлення приладів на вимірювальній ділянці при створенні системи вимірювання витрати рідини ;

– на ***ТОВ „НВП ТЕХПРИЛАД”*** методик визначення місця розміщення вимірювальних перетворювачів витрати та кількості рідинних енергетичних носіїв на трубопроводі, при проектуванні та створенні систем теплопостачання адміністративних, житлових та промислових будівель; методики оцінки впливу місцевих опорів, що є складовими вузлів обліку енергоносіїв, на ефективність роботи елементів систем теплопостачання та системи в цілому; методики проведення комплексних досліджень елементів системи теплопостачання, завдяки чому суттєво підвищилася точність визначення витрати і кількості паливно-енергетичних ресурсів та води, що, в свою чергу, дозволило значно зменшити втрати енергетичних носіїв і уникнути розбіжності між дійсними і зареєстрованими значеннями;

– на ***ТОВ „ІМПОРТПРИЛАД”*** методик та програмного забезпечення дослідження метрологічних характеристик перетворювачів витрати та кількості рідини за умови впливу на гідродинамічні параметри потоків місцевих опорів різної

конфігурації; результати моделювання роботи вимірюваних перетворювачів витрати та кількості рідини за різних режимів її протікання та умов експлуатації; методику та результати оцінювання неоднорідності потоків, що виникають при його проходженні крізь місцеві гідравлічні опори, що дало можливість експериментально виявити похибки нових та існуючих засобів вимірювання витрати і кількості, а також визначити доцільні місця монтажу приладів з метою досконалості проведених вимірювань;

– на ***ТОВ „ІН-ПРЕМ”*** методик досліджень метрологічних показників лічильників та витратомірів рідинних енергоносіїв і входять до складу систем вимірювання теплової енергії, що дозволило підвищити ефективність вибору засобів обліку при проектуванні вимірювальних ділянок і систем управління споживанням енергоносіїв та вдосконалення їх конструкцій і, як наслідок, заощадити енергетичні ресурси та зменшити затрати при експлуатації цих приладів; розробленої методики дослідження просторового розподілу плинного потоку рідини в трубопроводі і його вплив на характеристики приладів вимірювання; методики визначення оптимального місця розміщення таких приладів на технологічній мережі, що забезпечило побудову досконалого комплексу вимірювання витрати та кількості рідинних енергетичних носіїв при створенні системи збору, передачі та обробки інформації з лічильників та витратомірів рідини, що входять до його складу;

– в ***компанії “SENSUS SLOVENSKO a.s.” (Словаччина)*** методики оцінювання ступеня неоднорідності потоків рідини при протіканні по закритих трубопроводах, що створює можливість достовірної оцінки характеристики потоків для різних типових місцевих опорів; результатів моделювання процесів вимірювання кількості та витрати рідин швидкісними засобами вимірювання; результатів оцінювання впливу неоднорідностей потоків рідини, які викликані локальними гідравлічними опорами, на метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів витрати; систему оптимального проектування швидкісних вимірювальних перетворювачів витрати рідини, що забезпечило досконалість метрологічних характеристик сучасних приладів обліку енергетичних носіїв та визначення просторової геометрії метрологічного обладнання витрати рідини.

Вперше обґрунтовано свідчення щодо стратегічного впливу обставин локального позиціонування витратовимірів в технологічних мережах на точність реєстрації плинних потоків.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати застосовуються в навчальному процесі ***кафедри „Приладобудування”*** НТУУ„КПІ” при підготовці фахівців за спеціальностями *„Прилади та системи точної механіки”* та *„Інформаційні технології в приладобудуванні”,* а також інженерно-технічними працівниками, які вирішують питання вимірювання витрати та кількості рідини.

В дисертації запропоновані **13** нових технічних рішень вимірювальних перетворювачів витрати, які патентозахищені в Україні.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати, що містяться в дисертації, отримані здобувачем особисто. З наукових публікацій, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані ті результати, які є надбанням самостійних досліджень здобувача. Внесок здобувача у праці, опубліковані в співавторстві, наведено у списку опублікованих робіт за темою дисертації.

Апробація результатів роботи. Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 55-ти Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях, серед них: 8-ма науково-технічна конференція „Реологія гідравлічно – складних середовищ і гідропривод в машинобудуванні”, м. Київ, 1991р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Усовершенствование средств измерения расхода жидкости, газа, пара”, м. Санкт-Петербург, 1992р; Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка та технологія машинобудування і зварювального виробництва”, м. Київ, 1998р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Вимірювання – 98”, м. Київ, 1998р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Гідромеханіка в інженерній практиці”, м. Суми, 1999р.; Всеукраїнська науково-практична конференція „Екологія, Людина, Суспільство”, м. Київ. 1999р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Гідромеханіка в інженерній практиці”, м. Київ, 2000р.; I, II, IV, XIII, XIV Міжнародні конференції „Прогресивна техніка і технології”, м. Київ, м. Севастополь, 2001, 2002, 2003, 2011, 2012р.р.; XIII Міжнародна науково-технічна конференція „Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления” ”Датчик-2001”, г. Москва, 2001р.; I-XII Міжнародні науково-технічні конференції „Приладобудування: стан і перспективи”., м. Київ, 2002-2013р.р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів”, м. Донецьк, 2002р.; III Всеукраїнська науково-технічна конференція “Витратометрія - 2003”, м. Івано-Франківськ, 2003р; IX Міжнародна конференція „Гидромеханика в инженерной практике”, м. Київ, 2004р.; Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологическое обеспечение измерительных систем”, Пенза, 2004р.; 19-та Міжнародна науково-практична конференція „Коммерческий учет энергоносителей ”, м. Санкт-Петербург, 2004р.; Proceedings of HT/FED’04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference July 11-15, 2004, Charlotte, North Carolina, USA; Міжнародні науково-практичні конференції “Проблеми обліку теплоти та води в Україні”, м. Київ, 2004, 2006, 2008, 2010р.р.; IV Міжнародна наукова конференція „Проблемы промышленной теплотехники”, м. Київ, 2005 р.; VIII Міжнародна наукова конференція „Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005), м. Вінниця, 2005р.; Міжнародна науково-технічна конференція „Прикладні задачі математики і механіки”, м. Севастополь, 2006р.; Міжнародні науково-технічні конференції „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”, м. Івано-Франківськ, 2008, 2011р.р.; Всеукраїнські науково-технічні конференції „Вимірювання витрати та кількості газу”, м. Івано-Франківськ, 2009, 2011р.р; VI науково-практична конференція „Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні”, м. Київ, 2010р.; Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні екологічно безпечні та енергозберігаючі технології в природокористуванні”, м. Київ, 2011р.; Міжнародна науково-технічна конференція ”Університетська наука, 2011”, м. Маріуполь, 2011р.; III Науково-практична конференція “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”, м. Івано-Франківськ, 2011р.; Міжнародна науково-практична конференція “Метрологія і вимірювальна техніка” (МИТ-2011), м. Харків, 2011р.; Всеукраїнська конференція “Прикладна геометрія,

дизайн та інноваційна діяльність”, м. Київ, 2012р.; Міжнародна конференція “Актуальні питання обліку природного газу”, м. Харків, 2012р.; VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка. Метрологія - 2012”, м. Харків, 2012р; Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій ”, м. Тернопіль, 2013р.; XIV Міжнародна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, м. Севастополь, 2013р.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладені у 116 наукових працях, 67 з яких наведені в авторефераті, а саме – 1 монографія, 41 стаття у провідних фахових виданнях (з них 3 – в іноземних, 9 – у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз), 13 патентів України (з них 4 - деклараційні патенти на винахід, 6 - патентів на корисну модель та 3 - деклараційні патенти на корисну модель), в 61 публікаціях матеріалів міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій та інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків по роботі в цілому та додатків. Загальний об’єм дисертації становить 874 сторінок, 509 рисунків, 125 таблиць, з яких основна частина викладена на 413 сторінках (288 рисунків, 34 таблиці), з них 100 сторінок повністю зайняті таблицями та ілюстраціями, список використаних джерел із 312 найменувань на 33 сторінках, 50 додатків на 461 сторінці (окремою книгою).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, показано зв'язок дисертації з науковими програмами та планами, визначено об’єкт та предмет досліджень, наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в одержані результатах, наведено відомості про їх апробацію та впровадження.

В першому розділі наведені результати аналізу сучасного стану вимірювання витрати і кількості рідини, основних вимог до засобів та методів вимірювання витрати рідинофазних потоків при їх безпосередній взаємодії з чутливими елементами.

Проведена оцінка умов вимірювання витрати рідини, які характеризуються рядом факторів: вимірюване середовище знаходиться в стані руху, характер якого впливає на точність приладів, характеристики середовища та приладів знаходяться у складному і багатогранному зв’язку, плинно-рідинні потоки відрізняються за фізико-хімічними властивостями та умовами експлуатації.

Окреслені та проаналізовані основні вимоги до сучасних витратовимірювачів рідини: високі точність та надійність вимірювань, великий діапазон та лінійність шкали, мінімальний вплив на точність приладів властивостей середовища, тиску, температури та умов експлуатації, високі динамічні характеристики, працездатність приладу за різних умов експлуатації та забезпеченість метрологічною базою.

На підставі проведеного аналізу встановлено, що:

– при створенні вимірювальних перетворювачів має місце різноманітність методів вимірювання, принципів побудови, технічних реалізацій і широкий діапазон метрологічних характеристик приладів. Однак, оцінка метрологічних характеристик та вимоги до приладів вказують на недостатній рівень вивчення фізичних процесів, що проходять в них. Це слугує необхідністю подальших досліджень теоретичних основ функціонування перетворювачів витрати;

– потребують вдосконалення існуючі засоби вимірювання витрати та розроблення нових принципів побудови перетворювачів для підвищення їх точності і розширення умов функціонування;

– потребують покращення основні характеристики приладів: точність, повторюваність результатів та розширення діапазону вимірювань в зону малих витрат, незалежність результатів від характеристик вимірюваного середовища та впливів зовнішніх чинників. Встановлені складові похибок, які можуть бути усунені, або зменшені, за рахунок визначення взаємодії плинного середовища з елементами перетворювачів та їх оцінка з наступним врахуванням при творенні таких приладів;

– необхідність підвищення метрологічних характеристик перетворювачів окреслює доцільність наукового обґрунтування і принципів побудови витратомірів технологічних мереж.

Досліджені математичні моделі потоків рідини, яка протікає по трубопроводах, за різних режимів течії. При визначенні ступеня впливу місцевих опорів на гідродинамічні характеристики потоків, для опису профілю осесиметричної турбулентної течії, обрані теоретичні моделі, які базуються на законі *Грего*

$$\frac{v}{\bar{v}} = 1{,}1523 + 0{,}09211\ln\left(1 - \frac{r}{R}\right) + 0{,}1858\Phi\left(\frac{r}{R}\right), \qquad (1)$$

де v - швидкість в будь-якій точці перерізу циліндричної труби радіусом R на відстані r від її осі; $\bar{v}$ -осереднена по перерізу швидкість потоку;

$$\Phi\left(\frac{r}{R}\right) = -0{,}5530347\left(\frac{r}{R}\right)^4 + 1{,}6066064\left(\frac{r}{R}\right)^3 - 1{,}8782031\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0{,}6044168\left(\frac{r}{R}\right) + 0{,}0026893.$$

Уточнена математична модель потоків рідини в трубопроводі за швидкозмінних у часі режимів протікання, що надало можливість здійснювати аналіз взаємодії таких течій з чутливими елементами (ЧЕ) приладів

$$u(y,z,t) = \frac{G(t)}{4\mu}(R^2 - y^2 - z^2) - \frac{2G(t)R^2}{\mu}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_0\left(\frac{\lambda_n}{R}\sqrt{y^2+z^2}\right)}{\lambda_n^3 J_1(\lambda_n)}e^{-\lambda_n^2\frac{\nu t}{R^2}}, \qquad (2)$$

де $u(y,z,t)$ - швидкість потоку рідини у точці перерізу із координатами y,z; $G(t)$- градієнт тиску, що викликає рух вимірюваного середовища; μ- коефіцієнт динамічної в’язкості рідини; ν- коефіцієнт кінематичної в’язкості рідини; J_0 -

функція *Бесселя* першого роду нульового порядку; λ_n - один із додатніх коренів рівняння $J_0(\lambda)=0$; $J_1(\lambda_n)$ - функція *Бесселя* першого порядку першого роду.

Вивчення моделей турбулентних потоків, які використовуються в *CFD-технологіях* при моделюванні плину рідини, довели, що для досліджень взаємодії вимірюваного середовища із ЧЕ гідродинамічних та ультразвукових перетворювачів можна використовувати гібридну модель *Ментера SST*. Для розрахунків складних закручених потоків, що мають місце при дослідженні тахометричних перетворювачів витрати, в широкому діапазоні чисел *Рейнольдса*, і ультразвукових та гідродинамічних приладів, за високих значень чисел *Рейнольдса*, доцільно застосовувати модель *Рейнольдсових* напружень *RSM*.

На підставі викладеного, сформульовані мета і конкретні задачі дослідження, обґрунтована актуальність розв'язання проблеми точних вимірювань витрати, включаючи всі її аспекти – від розроблення і метрологічних досліджень перетворювачів до побудови системи контролю в натурних умовах їх експлуатації, обґрунтована доцільність подальшого розвитку теорії вимірювання витрати рідини.

У другому розділі викладені результати досліджень особливостей потоків рідини у вимірювальній магістралі. Акцентована увага на характері гідродинамічних процесів, які проходять в технологічних мережах у процесі визначення її витрати, за наявності місцевих гідравлічних опорів. За результатами досліджень профілів швидкостей по протяжності технологічної мережі після гідравлічних опорів різної просторової форми (конфузор, дифузор, раптові розширення та звуження, коліно з поворотом на кут $\pi/2$ *рад*, два коліна з поворотом на кут $\pi/2$ *рад* кожний і розміщених в одній (або різних) площинах, побудовані ізотахи швидкості (рис.1, рис.2) та їх тривимірні зображення і потім за розробленими методиками, оцінені ступені асиметрії, які застосовуються при подальших дослідженнях роботи перетворювачів, за зміни натурних умов використання.

Вдосконалено існуючі та побудовані нові методики визначення і аналізу гідродинамічних характеристик течії рідини при оцінюванні ступеня неоднорідності потоку, що базуються на величині незбігу просторових фігур (геометричний критерій), втраті енергії потоку (енергетичний критерій), факторів профілю, асиметрії, турбулентності та максимального кута закручування (комплексний критерій). За результатами такого оцінювання розроблені рекомендації з вдосконалення перетворювачів витрати та місця їх монтажу і просторової орієнтації на технологічній мережі, з метою досягнення високої точності вимірювання при мінімальній дії на потік.

Моделюванням у середовищі *ANSYS FLUENT* в кожному поперечному перерізі вимірювальної ділянки вузла обліку (рис.3,а) отримуємо значення проекцій векторів швидкості по чотирьом діаметральним хордам:(*0-0*), (*π/4- π/4*), (*π/2- π/2*), (*3π/4 - 3π/4*) (рис.3,б), які є визначальними вихідними даними для проведення оцінювання величини асиметричності потоку по протяжності технологічної магістралі.

Геометричний критерій визначення асиметричності базується на оцінюванні ступеня імовірності незбігу кривих розподілу швидкостей в поперечних перерізах, де проводяться дослідження. При симетричному полі розподілу швидкостей значення їх

складових по діаметральними хордам близькі між собою (рис.4). В протилежному випадку, вказані швидкості будуть різнитися між собою (рис.5).

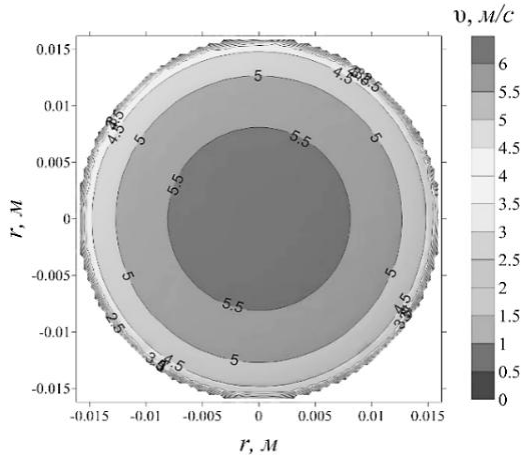


Рис.1. Ізотахи швидкості у вхідному перерізі досліджуваної мережі

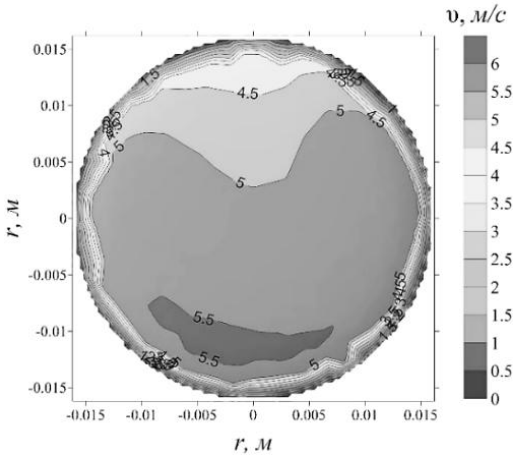
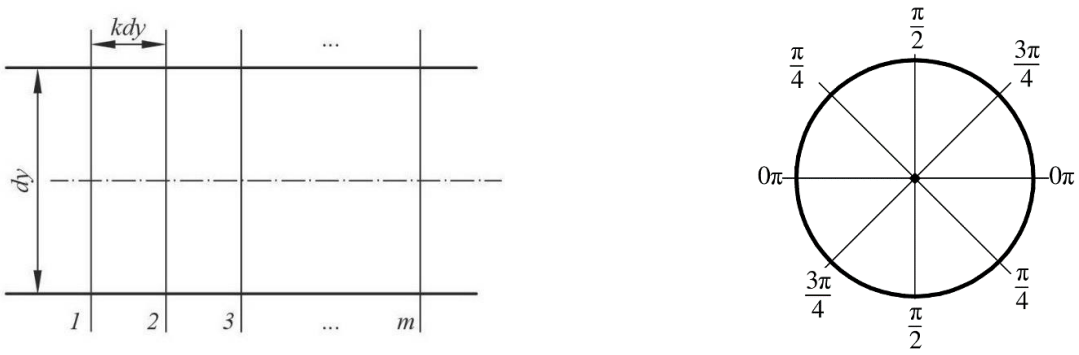


Рис.2. Ізотахи швидкості в перерізі на відстані $21\,d_y$ від вхідного перерізу



а) б)

Рис.3. Сканування векторів швидкості: а) по вимірювальному тракту; б) в поперечному перерізі

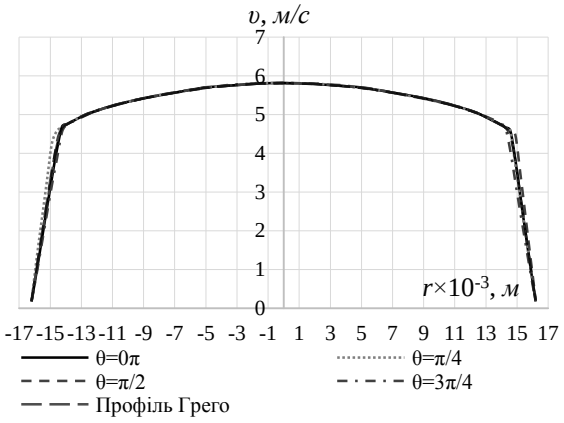


Рис.4. Епюри розподілу швидкостей однорідного потоку

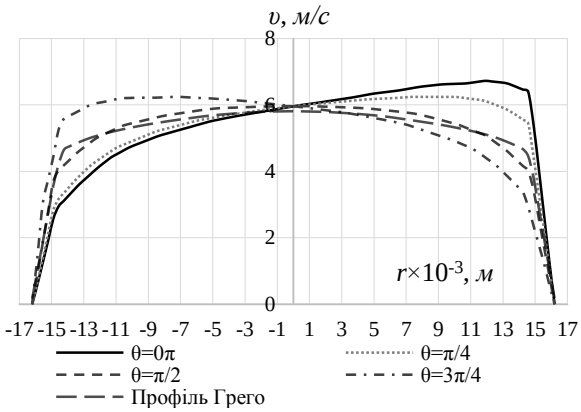


Рис.5. Епюри розподілу швидкостей неоднорідного потоку

Для оцінки ступеня неоднорідності потоку обчислювалися відносні значення швидкостей в поперечних перерізах по кожній із *m* діаметральних хорд на вході перед гідравлічними опором, з повністю розвинутим турбулентним однорідним потоком

(1), як правило, на вході перед місцевим опором (*профіль Грего*), та в поперечному перерізі, що досліджується, за виразами:

$$\upsilon_{km}^{вд}(n) = \upsilon_{km}(n)\upsilon^{-1}{}_{\max km}, \tag{3}$$

$$\upsilon_{0m}^{вд}(n) = \upsilon_{0m}(n)\upsilon^{-1}{}_{\max 0m}, \tag{4}$$

де $\upsilon_{km}(n)$ - швидкість в *n*-ій точці по *m*-ій діаметральній хорді *k*-го перерізу; $\upsilon_{\max km}$- максимальне значення швидкості $\upsilon_{km}(n)$; $\upsilon_{0m}(n)$ - швидкість в *n*-ій точці по *m*-ій діаметральній хорді *0-го* перерізу; $\upsilon_{\max 0m}$-. максимальне значення швидкості $\upsilon_{0m}(n)$.

Ступінь неоднорідності поля розподілу швидкості визначався за показником загальної відмінності розподілу відносних швидкостей між перерізами *0* та *k* по діаметральній хорді m на базі критерію незбігу двох експериментальних кривих, що порівнюються:

$$\sigma_{km} = D_{2km}(a\sigma_{0\,km}^2)^{-1}, \text{ при } k_1 = a;\ k_2 = n - 2a, \tag{5}$$

де D_{2km} - дисперсія відхилення значень розподілу відносних швидкостей між перерізами *0* та *k* по діаметральній хорді m; *a* – число груп значень проекцій векторів швидкостей $\upsilon_{km}^{*}(n)$ в *k*-му поперечному перерізі по діаметральній хорді m (в нашому випадку *a* = *n*); $\sigma_{0\,km}^2$ - випадкова варіація експериментальних результатів в перерізах *0* та *k* по діаметральній хорді m; k_1 – число ступенів свободи (число вільно варійованих значень); k_2 - число ступенів свободи (кількість значень варіювання, що можуть приймати довільні значення, не змінюючи загального рівня, біля якого ці значення варіюються).

Дисперсія відхилення значень розподілу відносних швидкостей між перерізами *0* та *k* по діаметральній хорді m визначається за виразом:

$$D_{2km} = \sum_{i=1}^{n^/} M_{im}(\bar{\upsilon}_{0m}^{вд}(i) - \bar{\upsilon}_{km}^{вд}(i))^2, \tag{6}$$

де $M_{im} = n_{0mi}n_{kmi}(n_{0mi} + n_{kmi})^{-1}$; n_{0mi}– частота, появи $\upsilon_{0m}^{вд}(i)$ за значень *R(i)*; n_{kmi} – частота появи однакових величин швидкості $\upsilon_{km}^{вд}(i)$ за значень $R(i)$; $R(n)$–координата визначення *n-i* проекції швидкості в поперечному перерізі по хорді; $-R \le R(n) \le R$; $n^/$ - кількість середин інтервалів визначення швидкості по діаметральній хорді (для нашого випадку $n^/$=50).

Випадкова варіація експериментальних результатів в поперечних перерізах *0* та *k* по діаметральній хорді m визначається за виразом:

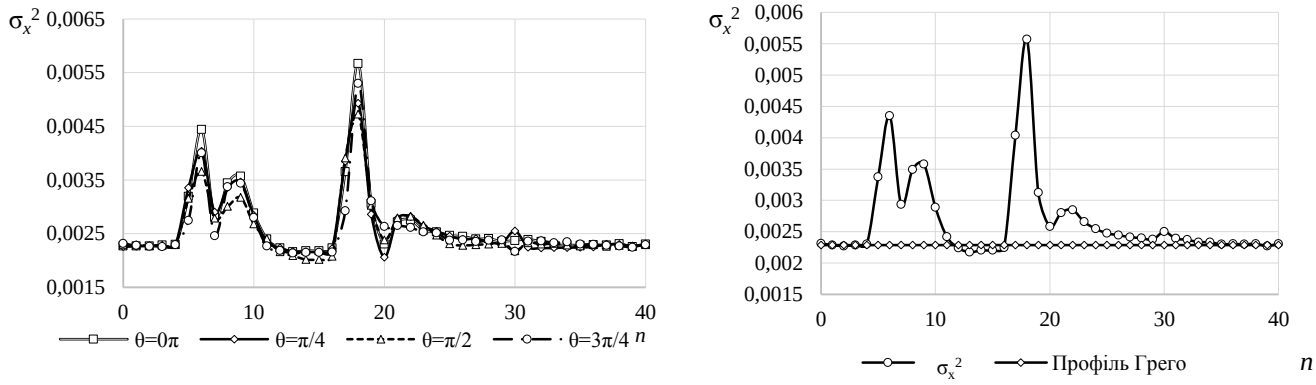
$$\sigma_{0km}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n^/}{}_0((\upsilon_{0m}^{вд}(i))^2 \cdot n_{\upsilon_{0m}^{вд}(i)}) + \sum_{i=1}^{n^/}{}_k((\upsilon_{km}^{вд}(i))^2 \cdot n_{\upsilon_{km}^{вд}(i)}) - \overline{(\sum_{i=1}^{n^/}{}_0(\upsilon_{0m}^{вд}(i) \cdot n_{\upsilon_{0m}^{вд}(i)})^2} - \overline{(\sum_{i=1}^{n^/}{}_k \upsilon_{km}^{вд}(i) \cdot n_{\upsilon_{km}^{вд}(i)})^2}}{n_{0km} - 2a}, \tag{7}$$

де $\overline{(\sum_{i=1}^{n'} {}_k\upsilon_{km}^{вд}(i)\cdot n_{\upsilon_{km}^{вд}(i)})^2} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n'} {}_k\upsilon_{km}^{вд}(i)\cdot n_{\upsilon_{km}^{вд}(i)})^2}{n_{kmi}}$; $\overline{(\sum_{i=1}^{n'} {}_0\upsilon_{0m}^{вд}(i)\cdot n_{\upsilon_{0m}^{вд}(i)})^2} = \dfrac{\sum_{i=1}^{n'} {}_0\upsilon_{0m}^{вд}(i)\cdot n_{\upsilon_{0m}^{вд}(i)})^2}{n_{0mi}}$.

Визначивши числові значення виразів (6) і (7) отримуємо всі необхідні дані для знаходження за виразом (5) критерію загальної відмінності двох кривих просторової неоднорідності потоків рідини в поперечних перерізах. Така оцінка здійснюється в кожному із досліджуваних перерізах технологічної мережі за значенням проекцій векторів швидкості по *m* діаметральних хордах (в нашому випадку *m*=4). Для комплексної оцінки асиметрії потоку в поперечному перерізі за отриманими значеннями *m* критеріальних оцінок визначаємо їх середнє квадратичне відхилення від середнього значення симетричного потоку в *0*-му вхідному на досліджуваній ділянці перерізах виразом

$$\sigma_{\Sigma k} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{m}(\sigma_{ki} - \overline{K_0})^2\right] m^{-1}}, \qquad \text{де} \quad \overline{K}_0 = (\sum_{i=1}^{m}\sigma_{ki})m^{-1}. \tag{8}$$

За розробленою методикою оцінені асиметричності потоків в поперечних перерізах по діаметральних хордах по протяжності вимірювальної ділянки з характерними для вузлів обліку місцевими опорами технологічної мережі (рис. 6).



а) б)

Рис. 6. Оцінка асиметрії потоку по протяжності технологічної мережі з місцевим опором у формі двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ *рад* кожний і розміщених в різних площинах: а)по діаметральним хордам; б)комплексна, за витрати $Q_1 = 4{,}16\cdot 10^{-3} м^3/с$

Енергетичний критерій базується на мірі компактності та інтегральній енергетичній характеристиці течії, яка уявляється сумарним імпульсом потоку

$$J = \int_S \rho v^2 dS, \tag{9}$$

де dS -елементарна площадка площі поперечного перерізу S.

Міра компактності потоку характеризується моментами розсіювання імпульсу

$$\sigma_x^2 = \frac{V^2}{J}\int_y \left(y - y_0\right)^2 v\left(y\right)^2 dy; \quad \sigma_y^2 = \frac{V^2}{J}\int_x \left(y - y_0\right)^2 v(x)^2 dx, \tag{10}$$

де x_0, y_0 – координати центру потоку; $V = v_{\max} v\left(rR^{-1}\right)$; $v_{\max}$ - максимальна швидкість потоку рідини; $x = rR^{-1}$ та $y = rR^{-1}$ (якщо трубопровід циліндричної форми).

Враховуючи, що результати моделювання картини потоку при його проходженні крізь гідравлічні опори є дискретними, при аналізі експериментальних даних доцільніше перейти від інтегральної оцінки до оцінювання за сумою. В такому випадку вирази для визначення сумарного імпульсу (9) та моментів розсіювання (10) набувають виду:

$$J = \sum_{i=1}^{N} v_i^2 \rho \Delta x; \tag{11}$$

$$\sigma_x^2 = \frac{v_{\max}^2}{J}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - x_0\right)^2 v_i^2 \rho \Delta x, \tag{12}$$

де Δx - крок, між i-ми значеннями швидкості в напрямі діаметральної хорди; N – кількість точок.

Інтегральна енергетична оцінка ступеня асиметрії потоку визначається відносно осесиметричного профілю на вході досліджуваної ділянки.

Комплексний критерій оцінки неоднорідності потоку базується на оцінюванні профілю швидкостей за факторами: профілю, асиметрії, турбулентності та максимального кута закручування.

Визначення фактору профіля здійснюється за виразом:

$$K_p = \frac{K_{p.mess}}{K_{p.s}}, \tag{13}$$

де $K_{p.mess}$ – фактор профілю вимірюваного потоку, що визначається за формулою

$$K_{p.mess} = \frac{1}{2 \cdot \bar{v}}\int \left(v_0 - v\right) d\left(\frac{r}{R}\right); \tag{14}$$

$K_{p.s}$ – фактор профілю нормального розподілу швидкостей, що описується виразом

$$K_{p.s} = \frac{1}{2 \cdot \bar{v}}\int \left(v_{s,0} - v_s\right) d\left(\frac{r}{R}\right), \tag{15}$$

де v_s – місцева швидкість; $v_{s,0}$ – швидкість в центрі профіля.

Фактор асиметрії, який інтерпретується як зміщення центру мас окремих профілів відносно площини симетрії, визначається за формулою:

$$K_a = (\int r v^m r^n dr)(D\int v^m r^n dr)^{-1}, \tag{16}$$

де $m = 1$; $n = 0$.

Фактор турбулентності визначається відношенням ступеня турбулентності в області ядра потоку(-0,2 ≤ *r/R* ≤ 0,2) $Tu_{\max}$ та в центрі нормального профіля Tu_s:

$$K_{tu} = Tu_{\max} T^{-1} u_s . \qquad (17)$$

Використовуючи розроблені методики, за результатами проведеного чисельного моделювання, здійснена апробація запропонованих методів оцінювання неоднорідності впливу на гідродинамічні характеристики потоку рідини місцевих опорів різної просторової форми (рис.7).

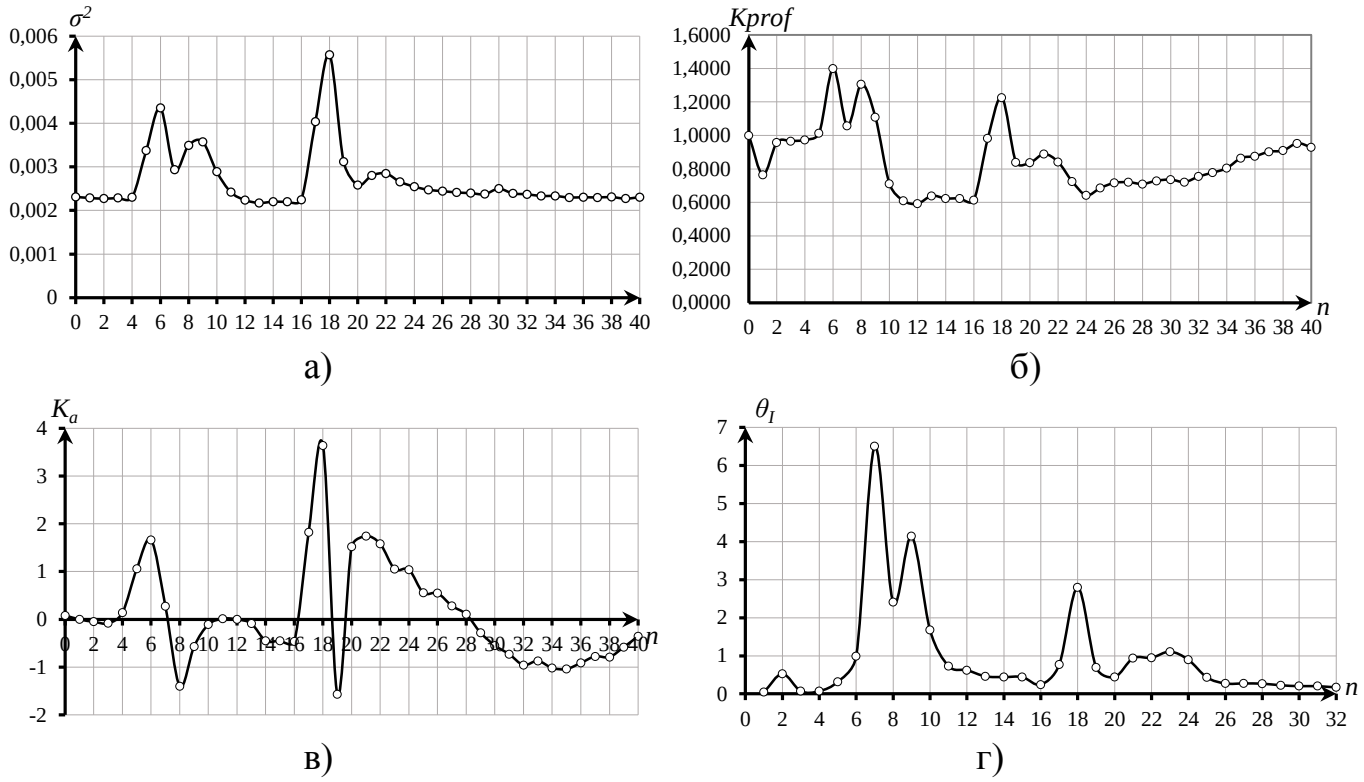


Рис.7. Оцінювання неоднорідності потоку по протяжності технологічної мережі з гідравлічним опорам у вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ *рад* кожний і розміщених в різних площинах: а) розподіл моментів розсіювання імпульсу σ^2; б) фактор профілю; в)фактор асиметрії; г) критерій загальної відмінності двох експериментальних кривих

Обробка даних чисельного відтворення гідродинамічних показників плину рідинного середовища по технологічній мережі та ступеня післядії на нього гідравлічних опорів різної просторої форми вказує на адекватну оцінку неоднорідності потоку для конкретного місцевого опору, яка отримується при використанні запропонованих критеріїв оцінювання.

Запропоновані методики визначення асиметричності розподілу швидкостей в поперечних перерізах дозволяють визначити, також, місця монтажу перетворювачів та означити їх доцільне розташування в технологічних мережах з урахуванням стратегічного впливу кінематичних і силових чинників локального позиціонування.

В третьому розділі на підґрунті виявлених особливостей взаємодії потоків вимірюваного середовища з чутливими елементами перетворювачів витрати рідини розроблені та експериментально підтверджені математичні моделі тахометричних, гідродинамічних та ультразвукових приладів з врахуванням характеру розподілу швидкості потоку по протяжності технологічної мережі.

Математична модель тахометричних перетворювачів описується диференціальним рівнянням обертального руху ЧЕ, яке зв'язує вихідну величину з витратою:

$$2\pi J\frac{dn}{dt}=M_P-\sum M_O\,, \tag{19}$$

де n– частота обертання ЧЕ; J– момент інерції ЧЕ; M_P – рушійний момент від потоку вимірюваного середовища; $\sum M_O$ – сума моментів опору обертанню ЧЕ.

Для крильчастого перетворювача моментами опору обертанню ЧЕ є моменти опору тертя рідини об дискову і циліндричну частини втулки та тертя рідини об його лопаті в радіальному зазорі. Моментом сил тертя рідини об поверхню лопатей можна знехтувати (при тангенціальному підведенні рідини до ЧЕ він буде відсутнім, оскільки проекція сил в'язкого тертя по поверхні лопатей на напрямок руху турбінки близька до нуля). До циліндричної поверхні турбінки, що обертається в рідині, відносяться поверхня втулки, в прорізях якої закріплені лопаті, і, в першому наближенні, поверхня лопатей у радіальному зазорі.

Після визначення всіх складових елементів виразу (19) математична модель крильчастих вимірювальних перетворювачів набуде виду

$$\left[I_{\text{т}}+\left(K_{p1}K_{p2}\frac{\pi}{4}\rho H^2 r_p\left(r_{\text{вт}}+\frac{r_p}{2}\right)^2+\frac{K_{p1}K_{p2}\pi\rho H^2 r_p^{\,3}}{48}\right)k\right]\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{r_{\text{еф}}}{\alpha_{\text{кін}}-\alpha_0}K_{p3}-$$

$$-0{,}5aC_{m\text{д}}\omega^2\rho r_{\text{кр}}^5-\pi\rho r_{\text{вт}}^4\omega^2 C'_{m\text{ц}}H_{\text{вт}}-\pi\rho r_{\text{кр}}^4\omega^2 C_{m\text{ц}}H\frac{h_{\text{т}}k}{2\pi r_{\text{кр}}}-\frac{f^*}{\alpha_{\text{кін}}-\alpha_0}K_{p3}, \tag{20}$$

де $K_{p1}=\dfrac{\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}}$; $K_{p2}=1-0{,}425\dfrac{\gamma}{1+\gamma^2}$; $r_p=r_{\text{кр}}-r_{\text{вт}}$;

$$K_{p3}=\frac{\rho}{\left(1-\tau\dfrac{S}{F_0^*}\right)^2}\left[\int_{\alpha_0}^{\alpha_{\text{кін}}}\int_0^H\int_0^{r'}C_{\text{х}}(\alpha)U(r)\left[U(r)-\omega\cdot\left(r_{\text{вт}}+r'-r\right)\right]\sin\alpha\,\mathrm{d}r\,\mathrm{d}h\,\mathrm{d}\alpha+\right.$$

$$\left.+\int_{\alpha_0}^{\alpha_{\text{кін}}}\int_0^H\int_0^{l_{\text{лоп}}-r'}C_{\text{х}}(\alpha)U(r)\left[U(r)-\omega\cdot\left(r_{\text{вт}}+r'+r\right)\right]\sin\alpha\,\mathrm{d}r\,\mathrm{d}h\,\mathrm{d}\alpha\right];$$

$$\alpha=\alpha_2+\frac{\pi\left[\left(L-r_{\text{к}}\right)\mathrm{tg}\alpha_2-\dfrac{d_{\text{у}}}{2\cos\alpha_2}\right]}{r_{\text{к}}}+\frac{2\pi}{k},$$

I_T – момент інерції ЧЕ; $r_{кр}$ – максимальний радіус ЧЕ; $r_{вт}$ – радіус втулки ЧЕ; H – висота лопаті; $\gamma = \left(r_{кр} - r_{вт}\right)H^{-1}$ – подовження плоских прямокутних пластинок (лопатей); $U(r) = \varepsilon\left[U_{ср}\left(1+m\right)\left(1+2m\right)0,5m^{-2}\right]\left(1 - r(r')^{-1}\right)^{m^{-1}}$, ε – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу епюри швидкості потоку в каналі обтікання лопатей; r' – напівширина каналу обтікання лопаті, $r'=(r_к-r_{вт})/2$; $U_{ср}$ – середня швидкість потоку; m – показник ступеня, що залежить від числа *Рейнольдса*; $r_{еф}$ – ефективний радіус лопаті; C_x – коефіцієнт лобового опору; τ – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив форми лопаті і стиснення поперечного перерізу каналу обтікання лопаті; F_0– прохідна площа камери; α – кут перетину лопаті з віссю набігаючого потоку визначається залежністю; α_2 – кут між віссю вхідного патрубка і віссю технологічної мережі; $r_к$ – радіус корпусу, де обертається ЧЕ; L – відстань від входу рідини у патрубок до вісі обертання ЧЕ; k – кількість лопатей ЧЕ; a– коефіцієнт, що враховує відмінність форми ЧЕ від форми диску; $C_{тд}$ – коефіцієнт моменту дискового опору; $C'_{тц}$ – коефіцієнт циліндричного опору; $H_{вт}$ – висота циліндричної втулки ЧЕ; α_0 – кут перетину лопаті з віссю потоку на початку їх взаємодії; $\alpha_{кін}$ – кут перетину лопаті з віссю потоку наприкінці їх взаємодії; $l_{лоп}$ – довжина лопаті; f^*- коефіцієнт тертя в опорах обертання ЧЕ.

Після визначення всіх складових елементів виразу (19), математична модель турбінних вимірювальних перетворювачів набуде виду

$$
\begin{aligned}
&2\pi\left(\frac{1}{2}\pi\rho_T r_{BT}^4 s + z\rho_T\left(r_H - r_{BT}\right)hl_Л\left(\frac{r_H + r_{BT}}{2}\right)^2 + \right.\\
&+z\left(\frac{1}{12}\left[\left(\left(r_H - r_{BT}\right)^2 + l_Л^2\right)\sin^2\beta + \left(h^2 + \left(r_H - r_{BT}\right)^2\right)\cos^2\beta\right]\rho_T\left(r_H - r_{BT}\right)hl_Л + \right.\\
&\left.\left.+z\left(\mu_z\rho_П\frac{l_Л h^4}{48} + \left(\frac{r_H + r_{BT}}{2}\right)^2\rho_П\left(r_H - r_{BT}\right)hl_Л\right)\right)\frac{dn}{dt} = \\
&= a\int_{r_{BT}}^{r_m}\left[v_{CP}k\left[1 - \left(\frac{r_m - r}{r_m - r_{BT}}\right)^m\right]k_1 tg\beta - 2\pi nr\right]^2 dr - 15,2394\int_0^{r_{BT}}\left(\rho_П v^{0,5}\right)r^3 n^{1,5}dr - \\
&+a\int_{r_m}^{r_H}\left[v_{CP}k\left[1 - \left(\frac{r - r_m}{r_K - r_m}\right)^m\right]k_1 tg\beta - 2\pi nr\right]^2 dr - \int_0^{2\pi}\int_0^{s}\frac{v_{CP}^2\lambda\rho_П}{8}r_{BT}^2 d\psi dl - \\
&-\frac{4\pi\mu shzr_H r_K{}^2}{\sin\beta_н V_0\left(r_K^2 - r_H^2\right)}Q - C_x\rho_П v_{CP}^2 l_Л\left(r_H - r_{BT}\right)r_{CP}z\cos\beta - \\
&-\frac{4}{\pi}\mu_{TP}F_r\frac{d}{2} + \sqrt{\left(0,1651875\pi\mu_{TP}F_a\sqrt[3]{F_a\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right)R_{оп}}\right)^2 + \left(\frac{4}{\pi}\mu_{TP}F_r\frac{d}{2}\right)^2}, \qquad (21)
\end{aligned}
$$

де $\rho_П$ – густина вимірюваного середовища; r_m – радіус, відповідний максимальному значенню швидкості; $l_Л$ – довжина хорди профілю лопаті; z – кількість лопатей; $v(r)$ – швидкість; $r_{ВТ}$– радіус поверхні втулки; $r_Н$– радіус зовнішньої поверхні лопатей; $a=\rho_П r_m l_Л z/2$; r – поточний радіус, $r_К$– радіус внутрішньої поверхні корпусу; k_1 – коефіцієнт, що враховує розбіжність напрямку вектора швидкості потоку у відносному русі з кутом нахилу лопаті до вісі турбінки; k – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу швидкості; m – показник ступеня, що залежить від числа *Рейнольдса*; $\rho_{ЧЕ}$ – густина матеріалу ЧЕ; s – осьова довжина турбінки; h – товщина лопаті; μ_z – коефіцієнт приєднаної маси прямокутного перерізу; ν – кінематична в'язкість вимірюваної рідини; μ– динамічний коефіцієнт в'язкості вимірюваної рідини; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя; $\beta_Н$ – кут встановлення лопатей на зовнішньому радіусі турбінки, V_0– об'єм міжлопатевого простору турбінки; ($r_К$-$r_Н$) – радіальний зазор; $\mu_{ТР}$ – коефіцієнт тертя ковзання; F_r – радіальне зусилля; d– діаметр опори; F_a– осьове зусилля; E_1, E_2 –модулі пружності матеріалів опор; $R_{оп}$– радіус опори ($R_{оп}=0,5d$).

Математичну модель гідродинамічного перетворювача у загальному випадку можна представити диференціальним рівнянням

$$m_k \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} = F_н(t) - F_c(t) - F_в(t), \tag{22}$$

де m_k –коливна маса; $x(t)$ –переміщення матеріальної точки з масою m_k, яка знаходиться на вільному кінці ЧЕ; $F_н(t)$ –сили гідродинамічного натиску; $F_c(t)$ –сили в'язкого тертя (демпфірування); $F_в(t)$ –відновлюючі сили.

Після визначення складових елементів виразу (22), математична модель перетворювача гідродинамічного типу набуде виду

$$\frac{l^2}{hl_T}\left\{0,25\rho_м\left[2blk_E + d^2\left(\pi - arctg\left(\frac{b}{2l}\right)\right)\right] + \right.$$

$$+k_E\rho\left[\frac{\chi^2 b^2\pi}{4\sqrt{1+\chi^2}}\left(1-0,425\frac{\chi}{1+\chi}\right)+\frac{d^3 arctg\left(\frac{b}{2l}\right)}{3\pi}\right]+$$

$$\left.+\frac{\rho d^3}{3}\left(1-\frac{arctg\frac{b}{2l}}{\pi}\right)\right\}\frac{d^2(\Delta l(t))}{dt^2} = \frac{C_x\rho G(t)R^2}{\mu l\left(1-\tau\frac{S_м}{S_0}\right)^2}\times$$

$$\left\{0,25R^2 + 2R^2\sum_{i=1}^{3}\frac{e^{-\frac{\lambda_i^2}{R^2}\upsilon t}}{\lambda_i^{\frac{5}{2}}\left[a_0+\sum_{n=1}^{6}a_n\left(\frac{3}{\lambda_i}\right)^n\cos\left\{\lambda_i + b_0 + \sum_{m=1}^{6}b_m\left(\frac{3}{\lambda_i}\right)^n\right\}\right]}\times\right.$$

$$\times 0,25\int_{l_1'}^{l_2'}\left[\int_0^{\frac{b(y)}{2}}\left(y^2+z^2\right)\sum_{i=1}^{3}\left\{a_{10}+\sum_{n=1}^{6}\left(\frac{3R}{\lambda_i\sqrt{y^2+z^2}}\right)^n\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\cos\left\{\frac{\lambda_i}{R}\sqrt{y^2+z^2}+b_{10}+\sum_{n_i=1}^{6}b_{n_i}\left(\frac{3R}{\lambda_i\sqrt{y^2+z^2}}\right)^{n_i}\right\}\right\}dz\right]dy\times$$

$$\times\left\{l-\frac{\int_{l_1'}^{l_2'}\left[\int_0^{\frac{b(y)}{2}}\left(y^2+z^2\right)\sum_{i=1}^{3}\left\{a_{10}+\sum_{n=1}^{6}\left(\frac{3R}{\lambda_i\sqrt{y^2+z^2}}\right)^n\cos\left\{\frac{\lambda_i}{R}\sqrt{y^2+z^2}+b_{10}+\sum_{n_i=1}^{6}b_{n_i}\left(\frac{3R}{\lambda_i\sqrt{y^2+z^2}}\right)^{n_i}\right\}\right\}dz\right]ydy}{\int_{l_1'}^{l_2'}\left[\int_0^{\frac{b(y)}{2}}\left(y^2+z^2\right)\sum_{i=1}^{3}\left\{a_{10}+\sum_{n=1}^{6}\left(\frac{3R}{\lambda_i\sqrt{y^2+z^2}}\right)^n\cos\left\{\frac{\lambda_i}{R}\sqrt{y^2+z^2}+b_{10}+\sum_{n_i=1}^{6}b_{n_i}\left(\frac{3R}{\lambda_i\sqrt{y^2+z^2}}\right)^{n_i}\right\}\right\}dz\right]dy}\right\}-$$

$$-\frac{bh^2E}{6ll_T}\Delta l(t)+\frac{C_x\rho l^3}{2l_Th^2}\left[\frac{d\left(\Delta l(t)\right)}{dt}\right]^2\int_{l_1'}^{l_2'}b(y)dy, \qquad (23)$$

де C_x – коефіцієнт обтікання тіла; τ – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив форми тіла обтікання і зменшення площі поперечного перерізу потоку; $b(y)$ – ширина ЧЕ по координаті y; l'–довжина частини ЧЕ, що знаходиться у потоці рідини; l – довжина консолі ЧЕ; $y_0(t)$–координата прикладення рівнодіючої сили $F_\partial(t)$; c – жорсткість пружного ЧЕ; b – ширина ЧЕ по лінії закріплення; h – товщина ЧЕ; $\rho_м$ – густина матеріалу ЧЕ; E – модуль пружності матеріалу ЧЕ; f_{OE} – частота власних коливань, яка визначається експериментально.

В основу ультразвукового методу вимірювання витрати рідини покладено принцип визначення різниці часу $\Delta\tau$ проходження акустичних променів “за” і “проти” потоку. Виходячи з цього, узагальнену математичну модель для часово-імпульсних схем можна представити виразом

$$\Delta\tau=\tau_{-v}-\tau_{+v}, \qquad (24)$$

де τ_{-v}– час проходження УЗ променя проти потоку; τ_{+v}– час проходження УЗ променя за потоком.

Визначивши складові виразу (24), узагальнена математична модель УЗ ВПВР описується виразом:

$$\Delta\tau=16k_{уз}Q\left\{\left[\pi Rc^2-(4k_{уз}QR^{-1}\sin\beta)^2\right]\cos\beta\right\}^{-1}, \qquad (25)$$

де c– швидкість УЗ променя у рідині; υ_l– швидкість потоку по УЗ променю; $k_{уз}$- гідродинамічний коефіцієнт, який враховує відношення усереднених в поперечному перерізі та по УЗ промені швидкостей потоку; β– кут нахилу вісі УЗ передавача-приймача відносно площини поперечного перерізу вимірювальної камери.

В четвертому розділі визначені головні принципи оптимальності, сформульовано критерії оптимізації тахометричних, ультразвукових та гідродинамічних перетворювачів витрати, визначено цільові функції, обрано проектні параметри, обґрунтовано їх початкові та граничні значення. Проаналізовано існуючі методи багатовимірної оптимізації і розроблено алгоритм оптимізації параметрів перетворювачів витрати, за визначеними критеріями, та програмне забезпечення, що його реалізує.

При визначенні раціональної системи реєстрації для безпосередніх умов застосування, необхідно враховувати конфігурацію технологічної мережі в зоні вимірювання, параметри потоку, методи вимірювання, зовнішні та внутрішні чинники впливу на прилад, вимоги до його метрологічних параметрів.

Вимірювальні перетворювачі витрати рідини відрізняються особливостями взаємодії вимірюваного середовища із ЧЕ, формою вимірювальної камери, по якій протікає рідина, геометричними параметрами елементів приладу, способами перетворення вимірюваної інформації у вихідний сигнал.

Для оцінювання систем вимірювання витрати та кількості рідини сформульовані узагальнюючі критерії ефективності засобів, які входять до складу таких систем: а) ефективність взаємодії потоку вимірюваного середовища із ЧЕ перетворювача, що забезпечує високу чутливість системи; б) ефективність взаємодії ЧЕ з потоком, що забезпечує високу точність вимірювання; в) узагальнений критерій, який сформульований на базі перших двох критеріїв і окреслює високу чутливість і точність перетворювача при мінімізації впливу на вимірюване середовище.

Для комплексної оцінки впливу приладу на вимірюване середовище, при забезпечені високих чутливості та точності вимірювання, застосовувався узагальнений критерій оцінки ефективності перетворювача

$$K_{\text{ефу}} = \frac{A(1-\delta)}{\Delta p^{-2}},$$

де A - величина корисного вихідного сигналу перетворювача; Δp - втрата тиску потоку на перетворювачі; δ - похибка вимірювань.

Таким чином, задача оптимізації реальної конструкції перетворювача будь-якого класу зводиться до забезпечення мінімальних відносної похибки вимірювання та ступеня впливу на вимірюване середовище.

При дослідженнях виявлені параметри конструкції приладу, що суттєво впливають на метрологічні характеристики, і які доцільно прийняти в якості проектних:

- *для крильчастих перетворювачів*: зовнішній радіус крильчатки, кількість лопатей, відносний радіус втулки, радіальний та торцевий зазори в корпусі, де обертається крильчатка, висота лопаті, довжина вхідного патрубка, кут відхилення вісі патрубка від горизонтального напряму технологічної мережі;
- *для турбінних приладів*: товщина профілю лопатей, радіальний зазор, втулкове відношення, кількість та кут встановлення лопатей, осьова довжина турбінки;

- *для гідродинамічних ВПВР*: товщина та ширина ЧЕ у місці защемлення, довжина (відстані від центру тіла обтікання до лінії защемлення), форма та діаметр тіла обтікання, модуль пружності матеріалу ЧЕ;

- *для ультразвукових перетворювачів*: топологія та кількість вимірювальних хорд та просторова орієнтація засобу вимірювання відносно вісі потоку.

Граничні значення проектних параметрів означені з наступних міркувань:

- *для крильчастих приладів*: зовнішній радіус крильчатки фактично визначається діапазоном вимірюваної витрати і може бути прийнятим залежно від умовного діаметру (калібру) приладу в межах $2\cdot10^{-2}\le r_{кр}\le 3,2\cdot10^{-2}$ *м*; кількість лопатей, на підставі проведеного аналізу для оптимізаційних досліджень, приймається рівною 3 $\le k\le$ 11; величина радіального зазору вибирається за умови відсутності попадання лопатей в зону впливу примежового шару рідини $0,02r_к<\delta'\le 0,1r_к$; величина торцевого зазору обирається з міркувань, подібних до вибору величини радіального зазору і приймається, наприклад. для приладів з $d_y=15\cdot10^{-3}$ *м* в діапазоні $3,5\cdot10^{-3}\le\delta\le5\cdot10^{-3}$ *м*; відносний радіус втулки крильчатки $r_{вт}$ фактично дає співвідношення між радіусом втулки та зовнішнім радіусом крильчатки $r_{кр}$ і приймається $0,1r_{кр}\le r_{вт}\le 0,6r_{кр}$; висота лопаті визначається діаметром вхідного патрубка d_y, $0,7d_y\le H\le 1,1d_y$; кут відхилення осі патрубка від горизонтальної вісі перетворювача α_2 обирається за умови максимального збільшення рухаючого моменту та розвантаження опори крильчатки і приймається $12^0\le\alpha_2\le 30^0$. Довжина вхідного патрубка з конструктивних міркувань приймається $47\cdot10^{-3}\le L\le 6\cdot10^{-2}$ *м*;

- *для турбінних витратомірів*: товщина профілю лопатей повинна бути мінімальною, наскільки це можливо з технологічних та конструктивних міркувань; її значення визначається з розрахунку лопаті на міцність; величина радіального зазору (r_K-r_H) визначається граничними значеннями співвідношення r_H/r_K: $(r_K-r_H)=(0,0192\div0,0392)r_K$; значення втулкового відношення (r_{BT}/r_H), з одного боку, обмежується ускладненнями конструкції, з іншого – негативним впливом вторинних течій, обумовлених нерівномірністю поля відцентрових сил, непостійністю кутів атаки за висотою лопаті і т. ін., тому $(r_{BT}/r_H)=0,5\div0,8$; кількість лопатей z визначається з умови досягнення рівномірності за поперечним перерізом розвороту потоку та убезпечення відривів пограничного шару: z_{min}=4, z_{max}=30; кут встановлення лопатей β змінюється в межах від $\pi/6$ до $\pi/3$ *рад,* щоб обертове зусилля на лопатях турбінки створював весь потік рідини; мінімальне значення осьової довжини турбінки повинно бути таким, щоб потік в повній мірі заповнював міжлопатевий канал $s_{\min}=\dfrac{t-h_t}{tg\beta}=\left(\dfrac{2\pi r_{CP}}{z}-\dfrac{h}{\sin\beta}\right)(tg\beta)^{-1}$, максимальне значення цього параметру визначається, виходячи з припущення, що довжина лопаті не повинна бути більшою за величину повного витка гвинтової лінії $s_{\max}=2\pi r_{CP}\sqrt{1+tg^2\beta}\sin\beta$;

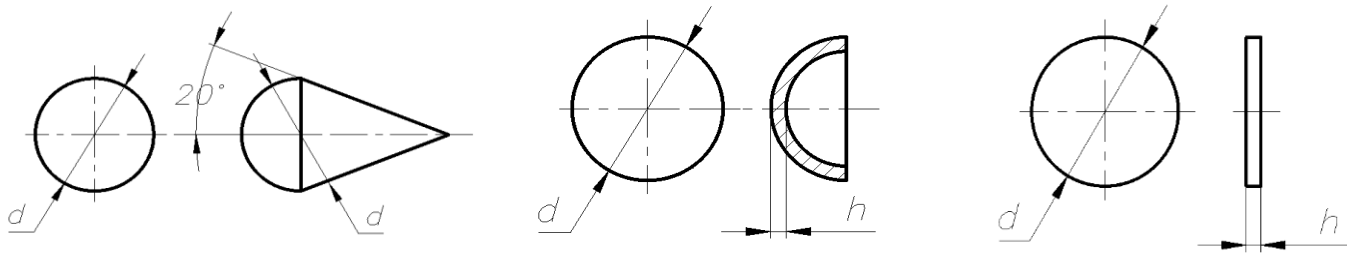
- *для гідродинамічних приладів*: діаметр тіла обтікання d, ширина b і довжина l ЧЕ визначаються з виразу $\left[arctg\left(\frac{b}{2l}\right)\left(D^2-d^2\right)+\pi d^2\right](\pi D^2)^{-1}\le 0,35$; ширина ЧЕ в основному регламентується габаритними розмірами тензорезисторних перетворювачів, які застосовуються для перетворення деформації ЧЕ в електричний сигнал і повинна бути не менше $b\ge 2b_T+3b_П$ (де b_T - ширина ТП; $b_П$ - ширина просвіту між тензорезисторами); довжина ЧЕ, виходячи з вимог забезпечення високої чутливості повинна задовольняти умову $l=(0,5\div 1,5)D$; максимальна деформація ЧЕ визначається значеннями припустимих деформацій тензорезисторів і для зменшення похибки перетворень деформації необхідно виконання наступної умови $\varepsilon_{\max}>0,8\varepsilon_д$.

Згідно методам багатовимірної оптимізації, застосовано стратегію прямого пошуку. Це не вимагає знаної цільової функції у явному вигляді, але дозволяє врахувати, як обмеження, що накладаються на окремі проектні параметри, так і складні обмеження, що накладаються на область пошуку.

Оптимізація перетворювачів витрати за обраними показниками дала наступні результати:

- *для крильчастих перетворювачів*: нелінійність зменшилася з 3,7% до 0,6%; при оптимізації за середньо-інтегральною похибкою результат зменшився з $\Delta_н$=4,55% до $\Delta_н$=0,45%; при оптимізації за відносною похибкою отримано результат, при якому її максимальне значення на всьому діапазоні вимірювання не перевищує 0,96%, тоді як до оптимізації максимальна похибка в діапазоні вимірювання досягала 5,32 %;
- *турбінні прилади* отримано з відносною похибкою 0,25%, тоді як до оптимізації відносна похибка становила 2,0%; при оптимізації за найменшою середньо-інтегральною відносною похибкою отримано її значення 0,24 %, тоді як до оптимізації ця похибка становила 1,0 %;
- *для гідродинамічних перетворювачів*: досліджено вплив форми тіла обтікання ЧЕ (рис.8) на значення узагальненого критерію оцінки ефективності за різної його геометричної та просторової орієнтації; виявлено, що однією з оптимальних за формою є ЧЕ з тілом обтікання у вигляді конусу, з орієнтацією вершиною назустріч потоку, та диску.
- *для ультразвукових приладів*: розроблено методологію та алгоритми оптимізації шляхом визначення раціональних топологій вимірюваних площин (хорд), сформовано набір дослідних топологій, які досліджені при дії на вимірюване середовище гідравлічних опорів різної просторової орієнтації, що мають місце при побудові вимірювального вузла; похибку, викликану неоднорідністю потоку, найкраще компенсує схема з топологією хорд із симетричним їх розташуванням, проведених через центр поперечного перерізу; при подальшому збільшенні кількості хорд до 5 похибка зменшується від ±0,4% до ±0,1%. (рис.9) та схема із симетричним розміщенням хорд, проведених на відстані $0,5R$ від центру поперечного перерізу (рис.10, рис.11); схема з паралельним розташуванням хорд, дає задовільну компенсацію при кількості хорд до 3 (при цьому, подальше збільшення кількості хорд не забезпечує покращення результатів); похибку, викликану відхиленням потоку від зразкового турбулентного, найкраще компенсує топологія хорд із симетричним їх

розміщенням, проведених на відстані $0,5R$ від центру поперечного перерізу, при цьому кількість хорд, починаючи з 2 не впливає на величину компенсації похибки.



а) б) в)

Рис.8. Тіла обтікання: а)конус; б) порожниста напівсфера; в) диск

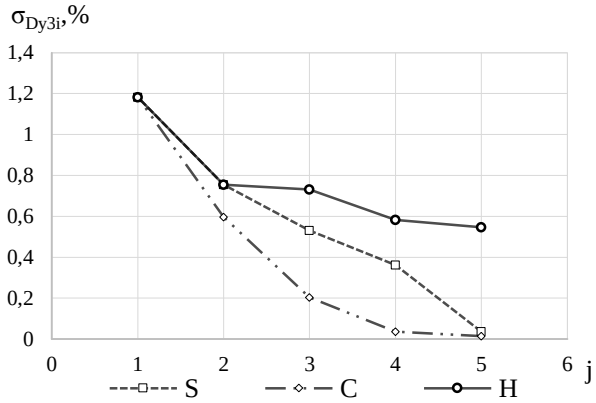


Рис.9. Значення $\sigma_{D_{уз}i} = f(j)$

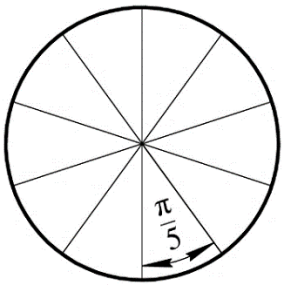


Рис.10 Схема 4С

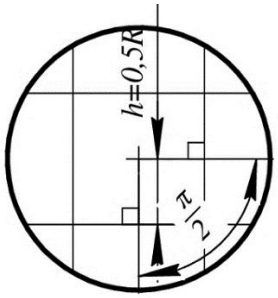


Рис. 11. Схема 4S

П'ятий розділ присвячений моделюванню та аналізу перетворювачів витрати на підґрунті перевіреною практикою теорії із застосуванням сучасних програмних комплексів.

Проведені теоретичні дослідження метрологічних характеристик тахометричних, гідродинамічних та ультразвукових приладів, за результатами яких одержано аналітичні апроксимації залежності градуювальних характеристик, похибок вимірювання та втрати (зниження) тиску.

З метою автоматизації досліджень, розроблене програмне забезпечення комп'ютерного моделювання роботи перетворювачів побудоване на єдиному об'єктно-орієнтованому принципі програмування. Таке програмне забезпечення дозволяє розв'язувати задачі перевірки гіпотез стосовно дії тих чи інших фізичних факторів на ефективність процесу вимірювання витрати і кількості, визначати метрологічні характеристики та дію різних фізичних чинників на них, здійснювати розв'язання цілого класу задач, які мають однакові, або подібні аналітичні структури; уточнювати математичні моделі, визначати сприятливі технологічні режими функціонування, оптимізувати параметри конструкції перетворювачів, візуалізувати процеси на екрані ПЕОМ.

Дослідження впливу геометричних параметрів вимірювальної камери тахометричних приладів на їх метрологічні характеристики встановили, що збільшення кількості лопатей призводить до зростання частоти обертання ЧЕ,

перепаду тиску на приладі, похибки вимірювання; зменшення товщини профіля лопаті спричиняє росту похибки вимірювання, перепаду тиску на перетворювачі та частоти обертання турбінки, зменшення втулкового відношення знижує перепад тиску, частоту обертання ЧЕ; збільшення осьової довжини турбінки породжує зростання частоти обертання ЧЕ; зміна радіального зазору між лопатями ЧЕ та внутрішньою поверхнею корпусу в напрямку збільшення призводить до погіршення метрологічних характеристик перетворювача. Суттєвий вплив на точність перетворювачів має кут встановлення лопатей β. Змінюючи величину цього параметру в межах $\pi / 4 - \pi / 3$ *рад* можна отримати прилад з похибкою $\pm 30\%$. Зміна β лише на 1° збільшує похибку до 4%.

За результатами проведених теоретичних досліджень впливу вимірюваного потоку на метрологічні характеристики тахометричних приладів доведено, що густина рідини не чинить визначального впливу на градуювальну характеристику та похибку перетворювача, збільшення густини вимірюваної рідини призводить до підвищення втрати тиску на приладі; зростання в'язкості рідини призводить до зниження частоти обертання ЧЕ, похибки вимірювання та втрати тиску.

Математичне моделювання роботи ультразвукових перетворювачів дозволяє досліджувати вплив неоднорідності потоку, температури, тиску, швидкості середовища та параметрів елементів конструкції (умовний діаметр, кут нахилу вимірювальної хорди до вісі потоку та їх кількість і топологію, механічні параметри вимірювальної камери) на метрологічні характеристики приладів.

Розроблене для дослідження гідродинамічних перетворювачів ПЗ *GDFlow Meter* дозволяє отримати градуювальні характеристики в залежності від товщини ЧЕ, діаметру тіла обтікання, зміни модуля пружності ЧЕ та визначати динамічні характеристик приладу за вхідного сигналу у формі одиничного та дискретно неперервних іпульсів з різною скважністю та частотою.

Проведені дослідження роботи вимірювальних перетворювачів витрати на базі вдосконалених та розроблених математичних моделей підтвердили слушність наукових засад, покладених в основу вимірювання витрати та кількості рідини.

Шостий розділ присвячений комп'ютерному вивченню перетворювачів витрати з метою виявлення ступеня чутливості до асиметричності потоків, які модулюються місцевими гідравлічними опорами різної просторової конфігурації.

На підґрунті сучасних інформаційних *CFD-технологіїй,* проведені дослідження впливу гідродинамічних показників потоків рідини на метрологічні характеристики акустичних приладів і приладів з обтічними тілами, які представлені ультразвуковими та гідродинамічними перетворювачами витрати.

Застосування *CFD-моделювання* дозволяє оптимізувати наступні аспекти при розробці, монтажу і обслуговуванні витратомірів: визначення причин неполадок, що виникають при вимірюванні, оцінка величини похибок та ефективності мір по усуненню неполадок, екстраполяція лабораторних експериментів на практичне застосування, оцінка альтернативних конфігурацій перетворювачів та ступеня впливу на ефективність їх роботи параметрів вимірювальної камери, місцевих гідравлічних опорів технологічної мережі і межових умов, що особливо актуально для області малих витрат, де вартість вимірювань виходить на одне з перших місць. Також слід зазначити, що в ряді випадків, для отримання чіткої картини взаємодії вимірюваного

середовища з ЧЕ витратоміра відтворити натурні умови експерименту не уявляється можливим. Тоді, на допомогу і приходить комп'ютерне моделювання, завдяки якому можна проаналізувати метрологічні характеристики певної конструкції витратоміра.

Оцінка впливу неоднорідності рідиннофазних потоків на точність ультразвукових перетворювачів витрати здійснювалися на прикладі однохордового ультразвукового приладу з класичним розміщенням хорди в діаметральній площині під кутом $\pi / 6$ *рад* до осі потоку та умовним діаметром $32 \cdot 10^{-3}$ *м*, з використанням спрощеної геометричної моделі. Для вказаної моделі проведено моделювання взаємодії потоку рідини з елементами конструкції приладу і визначені залежності похибки вимірювання від кута її просторової орієнтації та відстані від місцевого опору. Враховуючи незмінну геометрію значення поперечного перерізу вимірювального каналу, оцінка точності перетворювача проводиться шляхом знаходження похибок визначення гідродинамічного коефіцієнта відносно його значення для модельного осесиметричного профіля *Грего* (1). Параметричний розподіл швидкостей такого профіля було визначено для номінальної витрати $4{,}1666 \cdot 10^{-3} м^3/с$, що відповідає нормальній швидкості протікання вимірюваного середовища $W_{\max} = 5{,}053693$ *м/с* .

Чисельне моделювання впливу неоднорідностей потоку на точність класичного однохордового ультразвукового перетворювача проводилося для вимірювальної ділянки з гідравлічними опорами: конфузор, дифузор, раптові розширення та звуження; коліно з поворотом на кут $\pi / 2$ *рад,* два коліна з поворотом на кут $\pi / 2$ *рад* кожний в одній та різних площинах, які є невід'ємною частиною будь-якої реальної системи. Параметри модельної геометрії місцевих опорів були обрані аналогічно дослідженим в розділі 2. Для кожного з цих опорів були визначені перерізи з характерними гідродинамічними картинами потоків, числові значення яких подавалися на вхід приладів (рис.12, рис.13).

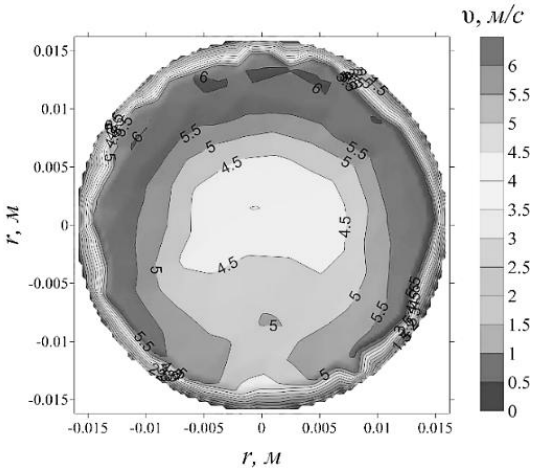


Рис.12. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані $9d_y$ від входу

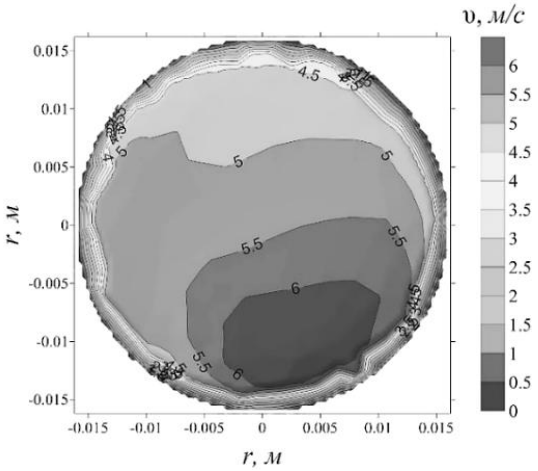


Рис.13. Ізотахи швидкостей для перерізу на відстані $19d_y$ від входу

Оцінювання якісних і кількісних особливостей процесу такого впливу проведено чисельним моделюванням для кожного з вказаних, за чотирьох випадків розміщення площини вимірювальної хорди, відносно вертикальної вісі перетворювача, при відліку кута повороту за годинниковою стрілкою з дискретністю $\pi / 4$*рад*.

Графічні залежності похибок вимірювання ультразвукового приладу за різних кутів орієнтації вимірювальної хорди (рис.14) чітко відображають місце знаходження гідравлічних опорів. На перерізах близьких до 1-го місцевого гідравлічного опору найменшу похибку отримуємо при орієнтації вимірювальної хорди на кути $\theta=0$, $\theta=\pi/4$ *рад*. При інших орієнтаціях перетворювача в просторі похибки вимірювання на початкових перерізах близькі за характером та величиною і досягають максимуму в районі 6-7 перетинах ((1-2)d_y після 1-го гідравлічного опору) і сягають 9%. Однакова за характером картина спостерігається в безпосередній близькості до 2-го гідравлічного опору (19-20 перерізи). В цьому разі значення похибок досягає 9% і 4% для хорд, що направлені під кутом $\theta=3\pi/4$ *рад* і $\theta=\pi/2$ *рад* відповідно.

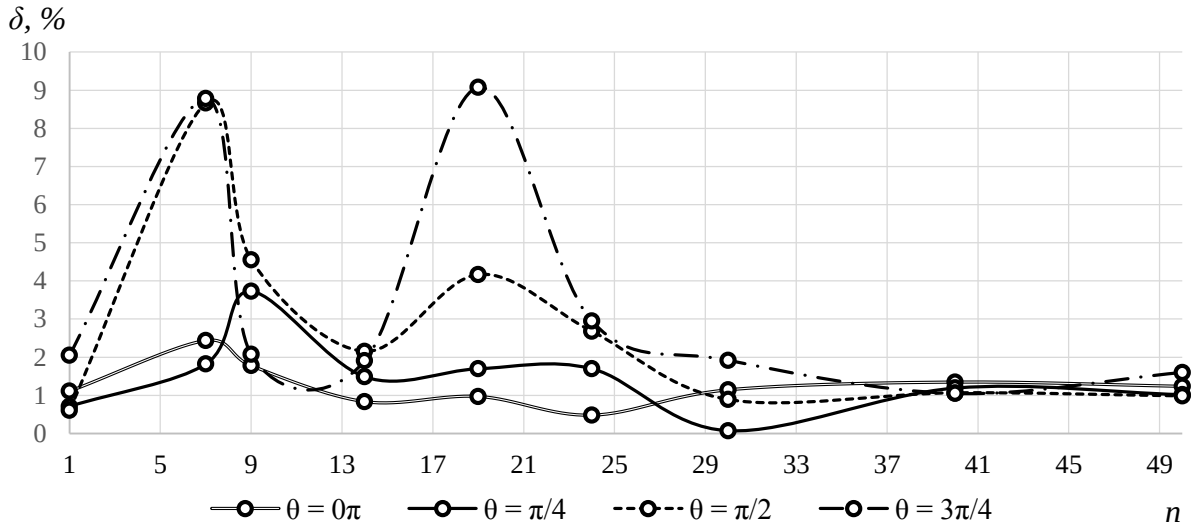


Рис.14. Похибки УЗ ВПВР в залежності від місця встановлення відносно місцевого опору у вигляді просторових колін та орієнтації перетворювача в просторі

Аналогічно здійснена оцінка впливу на точність перетворювачів кінематичної неоднорідності потоку індукованих місцевими опорами просторової конфігурації у вигляді конфузора, дифузора, раптових розширення та звуження, колін з поворотом на кут $\pi/2$ *рад*, двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ *рад* в одній площині, за різної кутової орієнтації відносно вісі потоку.

Моделювання роботи перетворювача витрати гідродинамічного типу проведено з використанням програмного комплексу, який є універсальною програмною системою кінцево-елементного аналізу для розв’язання просторових задач механіки деформованого твердого тіла та 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. Для повного відтворення всіх процесів в приладі проведено міждисциплінарний аналіз, що включає в собі пакети *CFX* та *Structural Static*.

Оцінювання взаємодії плинного неоднорідного потоку і ЧЕ різної просторової конфігурації та її вплив на паспортні характеристики приладу проводилися з перетворювачами, ЧЕ яких мають обтічні поверхні різної гаусової кривини: нульової (циліндр), додатньої (конус) та від’ємної (порожниста напівсфера). Для вказаних

моделей проведено чисельні моделювання з визначенням похибок вимірювання в залежності від кута їх просторової орієнтації на технологічні мережі та відстані від місцевого гідравлічного опору.

Значення виміряної витрати пропорційне гідродинамічній силі, що діє на пружний елемент, викликаючи його деформацію. Враховуючи незмінність значення поперечного перерізу, оцінку точності перетворювача можна проводити шляхом знаходження ступеня невідповідності деформації ЧЕ, викликаної дією на нього модельного осесиметричного профілю *Грего* і швидкісного напору в досліджуваному перерізі. При цьому, на вхідному перерізі модельної геометрії гідравлічного опору було відтворено епюру швидкостей, яка відповідає розподілу, що утворюється при проходженні потоком відповідного опору на певній відстані від початкового перерізу.

Дослідження впливу неоднорідностей течії на роботу перетворювача проводилися за оцінюванням величини похибок і впливу на середовище, що характеризується втратою тиску на приладі та значень, запропонованого в роботі, коефіцієнту ефективності, який узагальнено відображає точність вимірювання і дію на потік (два коліна з поворотом на кут $\pi / 2 рад$ в різних площинах) (рис.15, рис.16).

Досить чітко окреслюються місця найбільш раціонального розміщення перетворювача на технологічній магістралі відносно гідравлічного опору. Після 27-го перетину спостерігається різке зростання показника ефективності, рядом із зменшенням величини похибки вимірювання.

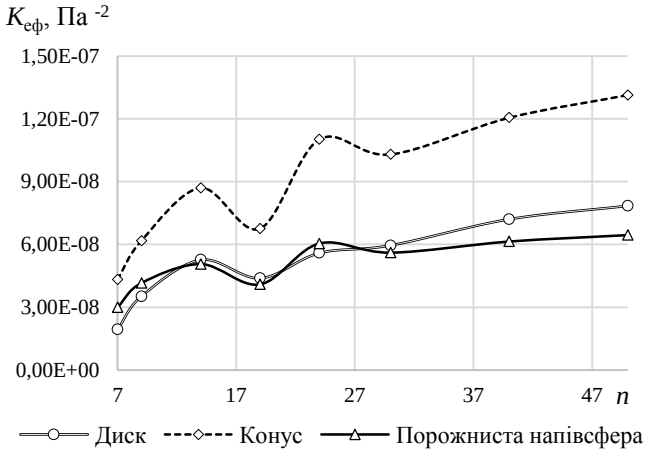


Рис.15. Коефіцієнт ефективності при куті орієнтації приладу $\theta = 0 рад$

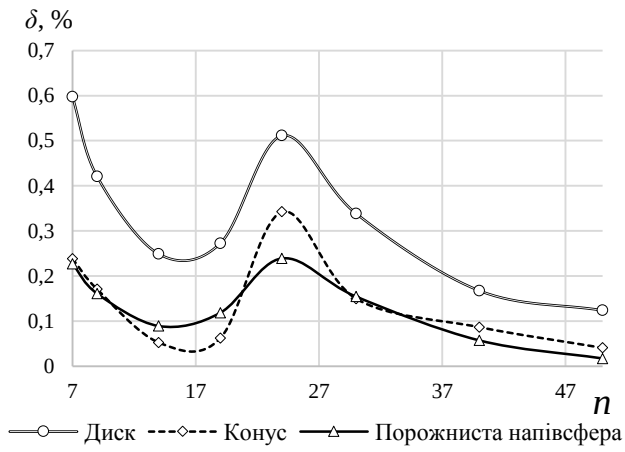


Рис.16. Похибка при куті орієнтації приладу $\theta = 0 рад$

Зміна просторової орієнтації приладу відносно вертикальної вісі дає можливість досягти в поперечних перерізах на протяжності технологічної магістралі високої точності вимірювання за мінімального впливу на потік. Найменшу похибку мають прилади при орієнтації відносно вертикальної вісі на кут $\theta = 3\pi / 2 рад$. За такої просторової орієнтації перетворювача похибки вимірювання для конструкцій з обтічними тілами у вигляді конуса і чаші після 25-го перетину не перевищують 0,1%, при цьому, перший спосіб вимірювання найменше впливає на гідродинамічні характеристики потоку.

Аналіз отриманих результатів доводить значну, за комплексними показником ефективності, перевагу конструкції з обтічним тілом просторової конфігурації у

вигляді конуса, направленого вершиною назустріч потоку, перед іншими конструкціями. Такі перетворювачі найменшим чином впливають на вимірюване середовище при близьких значеннях похибки вимірювання.

Отримані результати дають чітке уявлення для вибору місць локального розміщення приладів на технологічній мережі за умов максимальної точності і мінімальної дії на вимірюване середовище. Це дозволяє ефективно застосовувати перетворювачі без огляду на вимоги обов'язкового забезпечення прямих ділянок до і після приладів, а, навпаки, в тих місцях на технологічній мережі, де слід враховувати конкретні натурні умови процесу вимірювання.

У сьомому розділі сформульовано основні задачі та проблеми експериментальних досліджень крильчастих, турбінних, гідродинамічних та ультразвукових перетворювачів витрати рідини, визначена ступінь впливу асиметрії потоку на метрологічні характеристики, проведено стендові дослідження приладів з метою з'ясування відповідності результатів математичного моделювання експериментальним даним та аналізу реальних похибок перетворювачів.

Тестування отриманих в даній дисертаційній роботі результатів проводилося на метрологічному обладнанні, атестованому на ***ДП "Укрметртестстандарт"***: калібрувальній установці *METROST-112-100/160,* еталонній витратомірній установці *ALEX 132-40/ 16 U,* тепловодній проливній установці *PREMATESTPT 100,* та метрологічній установці *ГИР-2,5*.

Однією з головних задач стендової атестації випробувань було визначення впливу гідродинамічних показників вимірюваного середовища на метрологічні характеристики тестуємих приладів. Стендові визначення розподілу швидкостей в поперечних перерізах вимірювальних каналів та дослідження їх впливу на паспортні характеристики турбінних та ультразвукових перетворювачів проводилися в лабораторії гідромеханічних вимірювань ***ДП "Укрметртестстандарт"***, а гідродинамічних та крильчастих приладів – в лабораторії Національного технічного університету України "КПІ". Для цього, на прямолінійній ділянці вимірювальної магістралі були відтворені місцеві гідравлічні опори, за конструктивними розмірами, формою і просторовою орієнтацією аналогічні дослідженим в розділі 2.

Місцева швидкість в точках перерізу для відтворення просторового профілю потоку визначалася за допомогою спеціально розробленого пристрою на основі трубки *Піто*, з координатною прив'язкою по поперечному перерізі трубопроводу, і диференціального манометра.

Епюри розподілу місцевих швидкостей потоку визначалась в діапазоні об'ємної витрати $0,58-4,78\cdot10^{-3}\,м^3/с$, тобто при швидкості потоку води від 0,72 до 5,94 *м/с* за чисел *Рейнольдса* від $0,35\cdot10^5$ до $2,94\cdot10^5$, що характерно для розвинутої турбулентної течії. Сканування потоку, вздовж двох взаємно перпендикулярних діаметральних хорд поперечного перерізу трубопроводу, здійснювалося дискретним переміщенням трубки *Піто* з кроком $2\cdot10^{-3}\,м$. Для кожного положення трубки *Піто* визначалася різниця повного і статичного тисків потоку води у трубопроводі.

Результати стендових досліджень розподілу швидкостей в поперечних перерізах на протяжності вимірювальної магістралі з локальними гідравлічними опорами

порівнювалися з даними чисельного моделювання за ідентичних умов при витратах $Q_1 = 4{,}16 \cdot 10^{-3} м^3 / с$; $Q_2 = 41{,}6 \cdot 10^{-3} м^3 / с$; $Q_3 = 83{,}2 \cdot 10^{-3} м^3 / с$.

Стендові дослідження проводилися над дослідними та промисловими зразками вимірювальних перетворювачів: крильчастими з $d_y = 15 \cdot 10^{-3} м$, турбінними з $d_y = 50 \cdot 10^{-3} м$, гідродинамічними з $d_y = 15 \cdot 10^{-3} м$ та ультразвуковими з $d_y = 32 \cdot 10^{-3} м$.

Оцінка адекватності математичних моделей здійснювалася за умови відтворення на вході засобів вимірювання однорідного розвинутого турбулентного потоку. Оцінка відповідності розроблених математичних моделей діючим зразкам за статистичними критеріями *Фішера і Стьюдента* переконливо підтвердила адекватність розроблених математичних моделей реаліям практичного застосування в межах 5 %.

Дослідження ультразвукового перетворювача витрати за схемою під кутом до вісі вимірювальної камери і відповідно до плинного середовища проведені при дії неоднорідності потоку викликаних гідравлічними опорами різної просторової форми (рис.17, рис.18).

Найбільший вплив на точність вимірювань ультразвукових приладів здійснюють неоднорідності потоків модульованих місцевими гідравлічними опорами зі складною просторовою конфігурацією: два коліна з поворотом на кути $\pi / 2 рад$ кожний і розміщених в одній (до 2,5%) та різних площинах (до 5% в критичних перерізах).

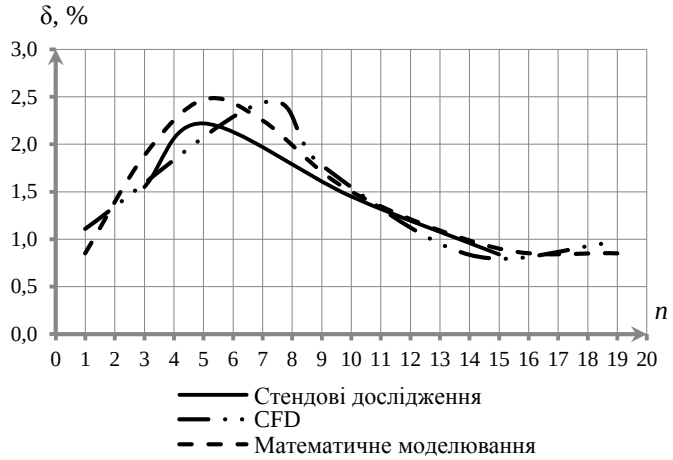


Рис.17. Похибка ультразвукового перетворювача після місцевого опору – просторове коліно

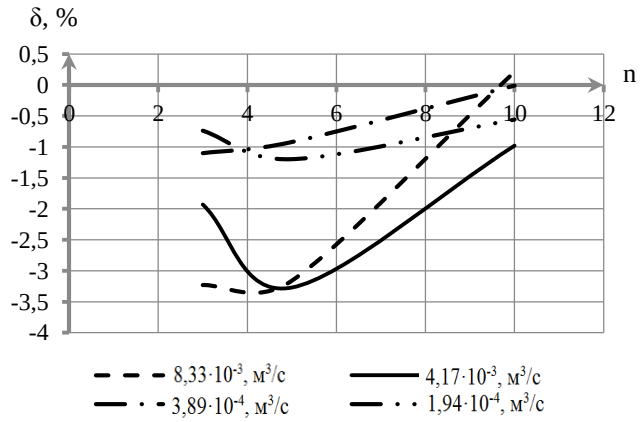


Рис.18. Похибка ультразвукового перетворювача після місцевого опору складної просторової форми

Найменшу похибку породжують несиметричності потоку, що виникають після проходження місцевих гідравлічних опорів – конфузорів, дифузорів та раптових розширень і звужень, які не вносять чітко окреслених неоднорідностей, а деформують течії в осьовому напрямку. В той же час, достатньо однозначно визначаються місця можливого локального розміщення приладів по протяжності технологічної мережі де забезпечується висока точність виміру витрати. Це окреслює надзвичайно важливу можливість застосування ультразвукових перетворювачів витрати в найбільш

оптимальних, з точки зору точності вимірювання, місцях технологічної мережі не зважаючи на вимоги означені в паспорті приладу, які обумовлюють необхідні довжини прямих ділянок до і після приладу.

Стендові дослідження гідродинамічних перетворювачів витрати проводилися з засобами вимірювання, які мають тіла обтікання різної гаусової кривини: з циліндричним диском, конусом, направленим вершиною назустріч потоку та порожнистою напівсферою.

Результати проведених досліджень гідродинамічних перетворювачів за різного їх локального розміщення після місцевих гідравлічних опорів (рис.19, рис.20) вказують на те, що криві похибок по протяжності вимірюваного каналу мають однаковий характер і однозначно характеризують залежність точності вимірювань від гідродинамічної картини потоку. Це надає змогу приймати вірне рішення стосовно локального просторового розміщення приладу на технологічній мережі, з метою забезпечення високої точності вимірювання витрати рідини. За результатами проведених метрологічних досліджень випливає, що перетворювачі з обтічними тілами у формі конусу, менш чутливі до асиметрії потоку, ніж схема, з ЧЕ, який має обтічні тіла просторової конфігурації у формі плоского диску та порожнистої напівсфери, яка направлена ввігнутою частиною на зустріч вимірюваному середовищу.

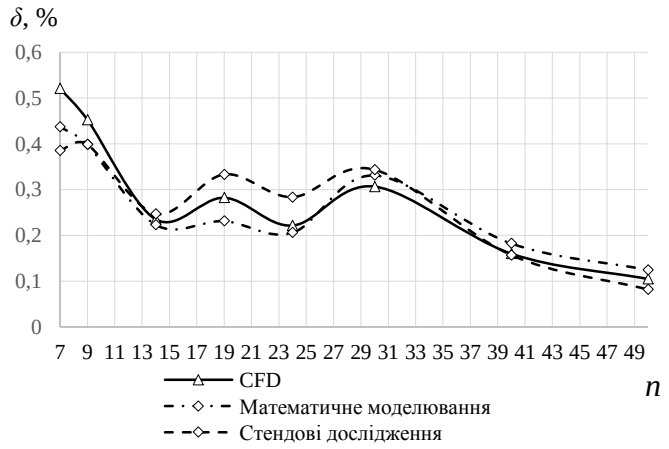


Рис.19. Похибки приладу після місцевого опору – два коліна з поворотом на кути $\pi / 2 рад$ кожний і розміщених в різних площинах

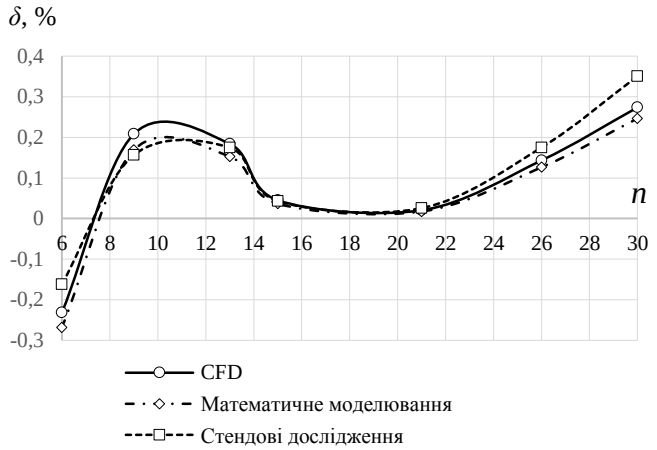


Рис.20. Похибки приладу після місцевого опору – два коліна з поворотом на кути $\pi / 2 рад$ кожний і розміщених в різних площинах

Отримані результати тестування шляхом математичного та чисельного моделювань поряд з стендовими випробуваннями свідчать про високий рівень відповідності теоретичних та експериментальних досліджень, визначають місця доцільного локального розміщення приладів в технологічній мережі. Ця теза окреслює надзвичайно важливе для практики усвідомлення доцільності застосування перетворювачів в єдино слушних, з точки зору точності вимірювання, локальних місцях технологічної мережі, без огляду на вимоги в паспорті на прилад, які вимагають необхідні протяжності прямих ділянок трубопроводів до і після приладу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу і складну наукову проблему – побудова наукових принципів творення засобів вимірювання витрати дозвукових плинних потоків паливно-енергетичних ресурсів. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дають підґрунтя зробити наступні головні висновки:

1. Узагальнені наявні надбання наукової думки галузі досліджень і окреслені шляхи подальшого вдосконалення засобів вимірювання витрати.

2. Сформульовані принципи побудови витратомірів нового покоління для технологічних мереж на основі створеної системи наукових поглядів і сучасних інформаційних технологій, одержані результати напівнатурних досліджень дозволяють обрати ефективні шляхи вирішення задач оптимізації роботи витратомірів і лічильників в експлуатаційних умовах.

3. Теоретично обґрунтована і підтверджена практикою впровадження в галузеві виробництва невідповідність існуючої тези обмеження зони контролю технологічних ліній тільки прямолінійними ділянками мережі.

4. Вперше здійснено принципово новий підхід до питань аналізу і синтезу вимірювальних перетворювачів витрати рідиннофазних потоків. Створено методику виявлення і опису локальних особливостей пружно-напруженого стану твердотільних елементів перетворювачів, а також кінематичних полів набігаючого потоку. Можна вважати практично означеними наукові засади проектування перетворювачів нового покоління з досконалими метрологічними характеристиками.

5. Здійснено поглиблений аналіз теоретично-експериментального підґрунтя методів вимірювання, окреслені шляхи подальшого розвитку існуючих засобів, критично переглянута їх технічна спроможність на конкретних вимірювальних засобах відповідно до визначених вимог. Проаналізовані принципові схеми перетворювачів і усвідомлені визначальні критерії оцінки їх ефективного використання з урахуванням особливостей фізичних процесів, на яких вони побудовані.

6. Побудовані математичні моделі динамічної взаємодії рідиннофазних потоків з чутливими елементами вимірювальних перетворювачів, які дозволяють окреслити умови для тестування їх показників в широкому спектрі локальних особливостей кінематичних полів, які, зазвичай, залишаються поза увагою, а саме за наявності градієнту швидкості потоку на вимірювальній ділянці, індивідуальних особливостей обопільної дії рідини з чутливими елементами, тривимірної пружної взаємодії елементів конструкції та потоку у вимірювальній камері.

7. Створено методологію визначення гідродинамічних характеристик потоку за наявної його неоднорідності та здійснена перевірка слушності обраної аналітичної апроксимації цього впливу. Уточнені існуючі та розроблені нові критерії визначення асиметрії набігаючого потоку за розбіжністю розподілу швидкості вздовж протяжності потоку (*геометричний критерій*), по розсіянню енергії потоку (*енергетичний критерій*), по факторам профілю, асиметрії, турбулентності та

максимального кута вихороутворення (*комплексний критерій*), які модульовані гідравлічними опорами різної просторової конфігурації.

8. Здійснено оцінку ступеня впливу розвиваючоїся асиметрії профіля потоку на метрологічні характеристики перетворювачів і окреслені передумови досконалості вимірювань компенсаційними методами.

9. Створене і опробоване програмне забезпечення математичного моделювання впливу збурюючих чинників на ефективність процесу виміру, що може слугувати науковою базою подальшого вивчення проблеми і синтезу нових засобів виміру.

10. Стендові тестування дослідних зразків засобів виміру підтвердили слушність вихідного теоретичного базису. Оцінка відповідності математичних моделей діючим зразкам за статистичними критеріями *Фішера* і *Стьюдента* засвідчила адекватність розроблених моделей реаліям практичного застосування у промисловості.

12.Дисертаційна робота слугує науковим підґрунтям для формування принципово нового підходу до вирішення прикладних задач аналізу і синтезу вимірювальної техніки і засобів реєстрації плинних потоків технологічних мереж, теоретичною основою творення систем витратовиміру нового покоління, спонукою критичного переосмислення існуючих технічних рішень в метрологічній галузі, а також обґрунтованою необхідністю перегляду нормативних документів та паспортних вимог.

Створені реальні передумови переходу вимірювальної галузі на більш високий щабель свого призначення.

Робота має наукову і практичну цінність, слугує вагомим внеском у вітчизняну прикладну науку, докорінно збагачує галузь приладів і методів виміру механічних величин.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Писарець, А. В. Турбінні перетворювачі витрати енергоносіїв з гідродинамічним врівноважуванням чутливого елементу [Текст]: моногр. / А. В. Писарець, І. В. Коробко. – К.: Корнійчук, 2013р. – 160с. *Здобувачу належить методика дослідження перетворювачів та визначення осьового переміщення турбінки.*

2. Коробко, І. В. Визначення статичної характеристики турбінного лічильника води [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение. – 1999.–Вып. 35.–С. 141–144. *Здобувачу належить обґрунтування технічних і метрологічних вимог до лічильника.*

3. Коробко, І. В. Визначення характеристичної залежності турбінних лічильників газу [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестн. НТУУ “КПИ”. Сер. Машиностроение. – 1999. – Вып. 34. – С. 100 – 104. *Здобувачу належить розроблення методики окреслення характеристик перетворювачів витрати.*

4. Коробко, І. В. Знаходження коефіцієнту демпфірування вимірювальних перетворювачів витрат із звужуючими пристроями [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестн. НТУУ «КПИ». Сер. Машиностроение. – 1999. – Вып.35.– С.

145 – 148. *Здобувачу належить аналітичне представлення коефіцієнту демпфірування.*

5. Коробко, І. В. Розрахунок статичної характеристики багатоструменевого мокрохідного лічильника рідини[Текст]/ І. В. Коробко, І. А. Гришанова, А. В. Булавінцев // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение.–1999.–Вып. 36, Т.2.– С. 572–577. *Здобувачу належить постановка задачі і розробка методики розрахунків лічильника.*

6. Коробко, І. В. Розробка математичної моделі течії рідини при швидкозмінних (імпульсних) режимах [Текст] / І. В. Коробко // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение. – 1999.– Вып. 34. – С. 28–33.

7. Коробко, І. В. Гідродинамічні дослідження роботи тахометричного лічильника кількості рідини з тангенціальною турбінкою [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова// Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение.–2000.–Вып. 38, Т.1.– С.34–37. *Здобувачу належить розроблення методології проведення стендових досліджень.*

8. Коробко, І. В. Сучасні методи вимірювання витрат енергоносіїв [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение.– 2001. – Вып. 40. – С. 448 – 455. *Здобувачу належить ідеї та технічні рішення нових принципів побудови і конструктивних вдосконалень приладів .*

9. Гришанова, І. А. Основні аспекти створення математичної моделі засобів вимірювання витрат енергоносіїв [Текст] / І. А. Гришанова, І. В. Коробко // Наукові вісті НТУУ“КПІ”.–2001.–№3(12).– С. 121–128. *Здобувачу належить обґрунтування фізичних процесів під час роботи перетворювачів витрати.*

10. Коробко, І. В. Розрахунок моментів опору тертя рідини об поверхню елементів обертання крильчатки [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение. –2002.– Вып. 42, Т. 1.– С. 100–103. *Здобувачу належить постановка задачі, обґрунтування і розроблення методів визначення моментів опору.*

11. Коробко, І. В. Сучасні методи вимірювання кількості газу [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Технологические системы. Сер. научные разработки и результаты исследований. – 2002. – Вып. №2 (13). – С. 118 – 123. *Здобувачу належить визначення особливостей засобів вимірювання витрати.*

12. Коробко, І. В. Дослідження рівняння руху первинного перетворювача швидкісних засобів вимірювання витрат енергоносіїв [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение.– 2002. –Вып.42, Т.2.– С. 42–45. *Здобувачу належить визначення впливу параметрів конструкції на характеристики перетворювача.*

13. Коробко, І. В. Визначення коливальної маси чутливого елементу вимірювального перетворювача витрат гідродинамічного типу [Текст]/ І. В. Коробко// Праці академії / Таврійська державна агротехнічна академія.–2003. – Вип.4, Т.22.– С. 87– 93.

14. Коробко, І. В. Дослідження роботи швидкісних засобів вимірювання витрат рідин з розвантаженим ротором [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2003. – Вип. 25. – С. 89 – 94. *Здобувачу належить розроблення методики дослідження витратомірів.*

15. Коробко, І. В. Математична модель крильчастих лічильників рідини [Текст]/ І. В. Коробко, І. А. Гришанова //Наукові вісті НТУУ“КПІ”. – 2003. – № 4(30). – С. 109–113. *Здобувачу належить визначення чинників, які впливають на роботу приладу.*

16. Коробко, І. В. Стан і перспективи застосування приладів комерційного обліку енергетичних ресурсів [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець, П. К. Кузьменко, Н. В. Воропаєва // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. приладобудування. – 2003. – Вип.26. – С. 53 – 59. *Здобувачу належить визначення вимог до вимірювальних перетворювачів витрати паливно-енергетичних ресурсів.*

17. Коробко, І. В. Інформаційна система передачі даних з енергетичних об’єктів на базі тепло лічильника SA-97 [Текст] / І. В. Коробко, С. Г. Бойко, В. А. Рябушко, В. П. Онищук // Вісн. НТУУ ”КПІ”. Сер. Приладобудування.– 2003. – Вип. 26. – С. 47 – 53. *Здобувачу належить розроблення структури інформаційної системи передачі даних.*

18. Коробко, І. В. Дослідження моменту в’язкого тертя в швидкісних турбінних перетворювачах витрат [Текст]/І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение. – 2003. –Вып. 44.– С.233–235. *Здобувачу належить методика визначення моментів тертя тахометричних приладів.*

19. Коробко, І. В. Визначення порядку ідентифікаційних моделей і динамічних похибок витратомірів рідин швидкозмінних потоків [Текст] / І. В. Коробко // Наукові вісті НТУУ “КПІ” – 2004. – №3(30). – С.79 – 82.

20. Коробко, І. В. Розробка математичної моделі кулькового тахометричного витратоміра [Текст] / І. В. Коробко, Г. М. Дідковська // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2004. – № 5 (37). – С. 74 – 77. *Здобувачу належить визначення аналітичних залежностей взаємодії потоку з перетворювачем.*

21. Писарець, А. В. Визначення врівноважуючої сили турбінного витратоміра із гідродинамічним врівноваженням ротора [Текст] / А. В. Писарець, І. В. Коробко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.– 2004.– № 4.– С. 115–120. *Здобувачу належить розробка принципу врівноважування чутливого елементу витратоміра.*

22. Коробко, І. В. Вплив епюри швидкостей на метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів витрати [Текст] / І. В. Коробко, І. А. Гришанова // Вестн. НТУУ “КПИ”. Сер. Машиностроение.– 2004. – Вып.45.– С.131 – 33. *Здобувачу належить методика оцінювання ступеня впливу гідродинамічних характеристик рідини на результати вимірювання.*

23. Коробко, І. В. Моніторинг розвитку систем диспетчеризації та контролю обліку теплової егнергії в Україні [Текст]/ І. В. Коробко, П. К. Кузьменко // Вісник Житомир. держ. технологіч. ун-ту. – 2005. – №4(35).– С. 90 – 93. *Здобувачу належить визначення основних вимог до систем диспетчиризації і контролю обліку витрати.*

24. Коробко, І. В. Тепловий метод вимірювання витрат [Текст]/ Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2005. – № 5. – С. 101 – 106.

25. Писарець, А. В. Визначення осьового зусилля в турбінному первинному перетворювачі витрат з гідродинамічним врівноваженням ротора [Текст] / А. В. Писарець, І. В. Коробко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2005. – №2(40).– С. 67 – 70. *Здобувачу належить визначення ступеню впливу параметрів конструкції приладу на осьове зусилля.*

26. Коробко, І. В. Особливості проектування електромагнітних витратомірів та лічильників [Текст] / І. В. Коробко, П. К. Кузьменко // Вісник Черкас. держ. технологіч. унів-ту. – 2006. – № 1. – С. 102 – 105. *Здобувачу належить розроблення основних вимог до системи проектування перетворювачів витрати.*

27. Коробко, І. В. Турбинные преобразователи расхода с уравновешенным ротором [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Промышленная теплотехника.– 2006. – №4. – С.84 – 89. *Здобувачу належить розробка методу врівноважування чутливого елементу перетворювача.*

28. Коробко, І. В. Визначення критеріїв оптимізації та проектних параметрів турбінних перетворювачів витрат [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2006. – №2 (37). – С. 99 – 104. *Здобувачу належить постановка та розв'язання задачі оптимізації конструкції перетворювача.*

29. Писарец, А. В. Определение осевого перемещения чувствительного элемента турбинных преобразователей расхода с уравновешенным ротором [Текст] / А. В. Писарец, И. В. Коробко // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. Харківського ун-ту Повітряних сил ім. І. Кожедуба. – Вип.6(96). Метрологія та вимірювальна техніка. – Х., 2011. – С. 150 – 154. *Здобувачу належить розробка принципів визначення переміщення чутливого елементу під дією потоку.*

30. Коробко, І. В. Методи компенсації силової дії на опори чутливих елементів турбінних перетворювачів витрати рідин [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2011 – Вип. 42. – С. 5 – 13. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ). Здобувачу належить обґрунтування фізичних процесів діючих на конструкцію приладу при його роботі.*

31. Коробко, І. В. Визначення запізнення в передачі тиску імпульсними трубками вимірювальних перетворювачів витрати газу, які базуються на методі змінного перепаду тиску // Вісн. НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2012. – Вып. 43. – С. 95 – 100. *(видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ).*

32. Коробко, І. В. Моделювання ультразвукових вимірювальних перетворювачів витрати [Текст] / І. В. Коробко // Вестн. НТУУ "КПИ". Сер. Машиностроение. – 2012.– Вып. 65. – С.90 – 96. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ).*

33. Коробко, І. В. Оцінка ефективності вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів [Текст] / І. В. Коробко // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування. – 2012. – Вип.44. – С.111– 117. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ).*

34. Коробко, І. В. Моделювання вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів [Текст] / І. В. Коробко // Наукові нотатки: міжвузівський зб. Луцького Нац. техн. ун-ту.– Вип.38 (вересень 2012). – Луцьк., 2012. – С.101–103.

35. Коробко, І. В. Визначення рушійного моменту на чутливому елементі перетворювача витрати повітря [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Вестн. НТУУ"КПИ". Сер. Машиностроение. – 2012. – Вып. 66. – С. 178 – 83. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ). Здобувачу належить постановка задачі та обґрунтування фізичних процесів під час роботи перетворювачів витрати*

36. Коробко, І. В. Оцінка асиметрії потоку рідини при вимірюванні її витрати та кількості [Текст] / І .В. Коробко, Я. В. Волинська // Вісник НТУУ“КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2013.– Вип. 45.– С.91 – 98. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ). Здобувачу належить розробка методики оцінювання нерівномірності течій та визначення критеріїв асиметричності.*

37. Коробко, І. В. Оптимізація просторової форми тіл обтікання чутливих елементів гідродинамічних вимірювачів витрати рідини [Текст] / І. В. Коробко // Вестн. НТУУ“КПИ”. Сер. Машиностроение. – 2013. –Вып. 68. – С. 173–180. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ)*.

38. Коробко, І. В. Оптимізація вимірювальних перетворювачів витрати рідини гідродинамічного типу [Текст] / І. В. Коробко // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 91–96. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази РИНЦ)*.

39. Коробко, І. В. Дослідження впливу неоднорідності потоку на роботу ультразвукових вимірювальних перетворювачів витрати [Текст] / І. В. Коробко, Я. В. Волинська // Метрологія та прилади. – 2013. – №5. – С.67 – 70. (*видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus). Здобувачу належить розробка і обґрунтування методики тестування дії асиметричності потоку вимірюваного середовища на паспортні характеристики приладу.*

40. Коробко, И. В. Особенности оптимизации формы чувствительных элементов вихревых измерительных преобразователей расхода жидкофазной среды [Текст] / И. В. Коробко, В. А. Коваленко // Вестн. Гомельского Государственного технического университета им. П. О. Сухого.– 2013.- №4(55).– С.36–42. *(іноземне видання). Здобувачу належить постановка задачі, обґрунтування та визначення критеріїв оптимізації.*

41. Коробко, И. В. Оценка влияния гидравлических местных сопротивлений на точность измерения расхода ультразвуковыми преобразователями [Текст] / И. В. Коробко, А. Н. Рак // Трение и смазка в машинах и механизмах.– 2014.– № 1.– С.84 – 89. *(іноземне видання). Здобувачу належить постановка задачі, обґрунтування і розроблення методів визначення впливу несиметричності течії на метрологічні параметри приладу.*

42. Gryshanova, I. CFD modeling of turbine flowmeters. / I. Gryshanova, I. Korobko// Innovationson discrete productions.–2014. – №1. – P. 6 – 8. *(іноземне видання). Здобувачу належить постановка задачі, обґрунтування та практична реалізація застосування інформаційних технологій для дослідження вимірювальних перетворювачів витрати.*

43. Пат. 30463А Україна, МПК (2000) G 01 F1/20. Витратомір [Текст] / І. В. Коробко, І А. Гришанова, С. П. Сергєєв; Заявник і власник патенту НТУУ“КПІ”.– № u98052425; заявл. 12.05.98; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6. – 6с.:іл *Здобувачу належить ідеї та технічні рішення нових принципів побудови приладів.*

44. Пат. 30464А Україна, МПК (2000) G01F1/20. Витратомір [Текст]/ І. В. Коробко, І. А. Гришанова, С. П. Сергєєв; Заявник і власник патенту НТУУ“КПІ”– № u98052426; заявл. 12.05.98; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6. – 5с.:іл. *Здобувачу належить ідеї та технічні рішення конструктивних вдосконалень приладів.*

45. Пат. 3416U Україна, МПК (2004) G 01 F 1/10. Турбінний витратомір [Текст]/ І. В. Коробко, А. В. Писарець, П. К. Кузьменко; Заявник і власник патенту НТУУ

“КПІ”.– № 2004021392; заявл. 26.02.04; опубл. 15.11.2004, Бюл. №11.– 3 с.:іл. *Здобувачу належить ідеї розроблення нових способів функціонування приладів.*

46. Пат. 9257U Україна, МПК (2004) G01 F 1/10. Лічильник рідини [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець, П. К. Кузьменко; Заявник і власник патенту НТУУ“КПІ”. – №20050197; заявл. 03.03.05; опубл. 15.09.2005, Бюл. №9. – 4 с.:іл. *Здобувачу належить ідеї та технічні рішення побудови приладу.*

47. Пат. 32429U Україна, Насадка [Текст] / І. В. Коробко, П. К. Кузьменко, Л. П. Журбенко; Заявник і власник патенту НТУУ“КПІ” – №u200801092; заявл. 30.01.08 опубл. 12.05.2008, Бюл. №9.– 4 с.:іл. *Здобувачу належить ідеї та технічні рішення і конструктивні вдосконалення приладу.*

48. Пат. 34955U Україна, Вимірювальний перетворювач для спірометричних досліджень [Текст]/ І. В. Коробко, П. К. Кузьменко, Л. П. Журбенко, О. В. Юрченко; Заявник і власник патенту НТУУ“КПІ” – №u200804638; заявл. 10.04.08 опубл. 26.08.2008, Бюл. №16.– 4 с.:іл *Здобувачу належить ідеї та розроблення нових способів їх функціонування перетворювача.*

49. Пат.81560U Україна, МПК (2013) G01F1/10. Лічильник гарячої води [Текст]/ І. В. Коробко, В. А. Коваленко; Заявник і власник патенту Коробко І. В., Коваленко В. А. – №u2012 13024; заявл. 15.11.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.- 3 с.:іл. *Здобувачу належить ідеї та розроблення принципу роботи приладу.*

50. Пат.81641U Україна, МПК(2013) G01F1/10. Двотарифний лічильник гарячої води [Текст]/ І. В. Коробко, В. А. Коваленко; Заявник і власник патенту Коробко І. В., Коваленко В. А.– №u201214747– заявл. 24.12.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.- 3 с.:іл. *Здобувачу належить ідея та визначення основних принципів роботи приладу.*

51. Пат.86630U Україна, МПК(2013) G01F1/10. Витратомір з тілом обтікання [Текст]/ І. В. Коробко, В. А. Коваленко, А. М. Рак; Заявник і власник патенту Коробко І. В., Коваленко В. А., Рак А. М.– №u2013 07080; заявл. 05.06.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.- 3 с.:іл. *Ідея патенту належить авторам рівною мірою.*

52. Коробко, И. В. Математическое описание уравновешивающей силы плавающего ротора турбинного расходомера [Текст] / И. В. Коробко, А. В. Писарец// Метрологическое обеспечение измерительных систем: материалы Межд. Науч.-техн. конф., Пенза, 26 – 29 апреля 2004 г. – С.108–112. *Здобувачу належить побудова аналітичного виразу, що описує взаємодію потоку рідини з чутливими елементами*.

53. Korobko, I. V. Research on developing propeller flowmeters with increased accuracy [Текст] / I. V. Korobko, I. A. Gryshanova // Proceedings of HT/FED’04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference July 11-15, 2004, Charlotte, North Carolina, USA. *Здобувачу належить визначення та обґрунтування фізичних процесів які складають основу дії перетворювачів витрати*.

54. Коробко, І. В. Математичні моделі взаємодії рідинного середовища із вимірювальними перетворювачами витрат [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2006: стан і перспективи: тез. доп. V наук.-техн. конф., 25–26 квітня 2006 р. – Київ, 2006.– С. 267.

55. Коробко, І. В. Програмний комплекс проектування приладів і систем вимірювання витрат паливно-енергетичних ресурсів та води на базі перспективних методів вимірювання [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2006: стан і перспективи: тез. доп. V наук.-техн. конф., 25–26 квітня 2006 р. – Київ, 2006.– С. 274–275.

56. Коробко, І. В. Математична модель швидкозмінного у часі потоку рідин [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2007: стан і перспективи: тез. доп. VI наук.-техн. конф., 24–25 квітня 2007р.– Київ, 2007.– С. 294–295.

57. Коробко, І. В. Математичне моделювання вимірювальних перетворювачів витрат рідин [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2007: стан і перспективи: тез. доп. VI наук.-техн. конф., 24–25 квітня 2007р. – Київ, 2007.– С. 290–291.

58. Коробко, І. В. Основи проектування вимірювальних перетворювачів витрат рідин та газів [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2008: стан і перспективи: тез. доп. VII наук. – техн. конф., 22–23 квітня 2008р. – Київ., 2008.– С. 246–257.

59. Коробко, І. В. Застосування методів геометричного моделювання при проектуванні вимірювальних перетворювачів витрат та кількості рідин і газів [Текст]/ І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2009: стан і перспективи: тез. доп. VII наук.-техн. конф., 28–29 квітня 2009 р. – Київ, 2009.– С. 208–209.

60. Коробко, І. В. Основні етапи створення математичних моделей вимірювальних перетворювачів витрат та кількості рідин і газів [Текст] / І. В. Коробко// ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2010: стан і перспективи: тез. доп. VIII наук.-техн. конф., 27–28 квітня 2010 р. – Київ, 2010.– С. 259–260.

61. Коробко, І. В. Застосування обчислювальної гідродинаміки для оцінки ефективності роботи вимірювальних перетворювачів витрати рідин та газів [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2011: стан і перспективи: тез. доп. IX наук. – техн. конф., 19–20 квітня 2011 р. – Київ, 2011.– С. 239–240.

62. Коробко, І. В. Основні задачі і методологія оптимізації вимірювальних перетворювачів витрати та кількості рідин і газів [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Университетская наука 2011: тез. докл. Междунар. науч. – техн. конф., май 2011г., Мариуполь, 2011.– С. 59–60. *Здобувачу належить постановка та розв'язання задач оптимізації конструкції перетворювачів*.

63. Коробко, І. В. Дослідження роботи вимірювальних перетворювачів витрати з тілами обтікання [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2012: стан і перспективи: тез. доп. XI наук.-техн. конф., 24 – 25 квітня 2012р. – Київ, 2012. – С. 254–255.

64. Коробко, І. В. Аналіз впливу профілю потоку на точність ультразвукового витратоміра [Текст] / І. В. Коробко, Я. В. Волинська // Прикладна геометрія, дизайн та інноваційна діяльність: тез доп. конф., 15–16 травня 2012р. . – Київ, 2012.– С. 156–157. *Здобувачу належить ідеологія та принципи використання статистичних методів для оцінювання ступеня впливу асиметрії потоку модульованих місцевими гідравлічними опорами на результати вимірювання*.

65. Коробко, І. В. Моделювання роботи гідродинамічних вимірювальних перетворювачів витрати та кількості паливно-енергетичних ресурсів [Текст] / І. В. Коробко, А. В. Писарець // Прогресивна техніка та технологія: матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф., Севастополь, 11–15 червня 2012 р.– С. 65–66. *Здобувачу належить постановка задачі та визначення напрямів математичне моделювання і тестування фізичних процесів у приладах.*

66. Коробко, І. В. Моделювання руху вимірювального середовища по трубопроводах різної конфігурації [Текст] / І. В. Коробко, А. М. Рак // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2013: стан і перспективи: тез. доп. XII наук.-техн. конф., 23–

24 квітня 2013р.– Київ, 2013– С. 265–266. *Здобувачу належить визначення напрямів математичного моделювання та тестування впливу зовнішніх та внутрішніх чинників на метрологічні характеристики приладів.*

67. Коробко, І. В. Оцінка асиметрії поля розподілу швидкостей в осьовому напряму руху потоку [Текст] / І. В. Коробко // ПРИЛАДОБУДУВАНЯ 2013: стан і перспективи. XII наук. - техн. конф., 23 – 24 квітня 2013р. – Київ, 2013.– С. 267–268.

АНОТАЦІЯ

Коробко І. В. Наукові принципи творення засобів вимірювання витрати плинних потоків технологічних мереж. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – Прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний технічний університет України ”Київський політехнічний інститут”, Міністерство освіти і науки України, Київ. 2014.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми – побудова наукових принципів творення засобів вимірювання витрати дозвукових плинних потоків паливно-енергетичних ресурсів.

У роботі визначені фактори, які мають превалюючий вплив на метрологічні характеристики перетворювачів витрати та кількості рідини, обґрунтовані напрями досліджень процесів вимірювання та шляхи вдосконалення витратовимірювачів. Створено методологію визначення гідродинамічних характеристик течії, уточнені існуючі критерії за наявної її неоднорідності та розроблені нові принципи визначення асиметричності потоку. Окреслений кількісно і якісно розвиток асиметрії потоків рідини внаслідок локальних гідравлічних опорів на вузлі вимірювання.

Розроблені нові та вдосконалені існуючі математичні моделі тахометричних, гідродинамічних та ультразвукових перетворювачів витрати рідини, що описують взаємодію вимірюваного середовища з елементами конструкції таких приладів. Проведені теоретичні та стендові дослідження впливу гідродинамічних характеристик потоків рідини на паспортні показники перетворювачів. Оцінка відповідності розроблених математичних моделей діючим зразкам за статистичними критеріями *Фішера і Стьюдента* підтвердила адекватність розроблених математичних моделей реаліям практичного застосування.

Результати оптимізаційних розрахунків елементів конструкції перетворювачів визначають конкретні умови використання приладів, як за місцем їх локального розміщення, так і просторовою орієнтацією, що має велике значення для практики промислового застосування.

Ключові слова: витрата рідини, вимірювальні перетворювачі, математична модель, оптимізація конструкції.

АННОТАЦИЯ

Коробко И. В. Научные принципы создания средств измерения расхода текучих потоков технологических линий. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.01 - Приборы и методы измерения механических величин. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Министерство образования и науки Украины, Киев. 2014.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы – построение научных принципов создания средств измерения расхода дозвуковых текучих потоков топливно-энергетических ресурсов. В работе определены факторы, оказывающие превалирующее влияние на метрологические характеристики преобразователей расхода и количества жидкости, обоснованы направления исследований и пути усовершенствования измерителей расхода (расходомеров).

Создана методология определения гидродинамических характеристик потока при наличии его неоднородности, вызванной гидравлическими сопротивлениями. Осуществлена проверка правильности выбранной аналитической аппроксимации влияния локальных сопротивлений на картину потока измеряемой среды.

Уточнены существующие и разработаны новые критерии определения асимметрии набегающего потока по расхождению распределения скорости вдоль потока (*геометрический критерий*), по рассеянию энергии потока (энергетический критерий), по факторам профиля, асимметрии, турбулентности и максимальному углу вихреобразования (*комплексный критерий*), модулированные гидравлическими сопротивлениями различных пространственных конфигураций.

Очерчено количественно и качественно развитие асимметрии потоков жидкости вследствие локальных гидравлических сопротивлений на узле измерения (учета). По результатам проведенных исследований определены ограничения на место монтажа счетчиков и выявлено их целесообразное расположение в технологических сетях с учетом стратегического влияния кинематических и силовых факторов локального позиционирования.

Разработаны и всесторонне исследованы расчетные модели крыльчатых, турбинных, ультразвуковых и гидродинамических измерительных преобразователей расхода, состоящие из моделей текучего потока жидкости и прибора, которые содержат основные факторы, влияющие на работу преобразователя, но до сих пор остающиеся без внимания исследователей, а именно: влияние кинематики потока, особенности взаимодействия течения жидкости с чувствительными элементами, действие пограничного слоя, эффекты срыва потока и образования рециркуляционных зон.

Для проведения оптимизационных расчетов параметров тахометрических, ультразвуковых и гидродинамических преобразователей определены целевые функции, очерчивающие значения критерия эффективности приборов, в составе систем измерения расхода и количества жидкости. Сформулированные критерии определяют условия максимальной точности измерения при минимальном влиянии на поток и позволяют оценить работу измерительных преобразователей при разных режимах протекания жидкости в широком диапазоне расходов.

Разработанное программное обеспечение компьютерного моделирования работы преобразователей позволяет решать задачи проверки гипотез относительно действия тех или иных физических факторов на эффективность процесса измерения расхода и количества, определять метрологические характеристики приборов, решать целый класс задач, имеющих одинаковые или подобные алгоритмические описания, уточнять математические модели, определять благоприятные технологические режимы функционирования, оптимизировать параметры преобразователей, визуализировать процессы на экране ЭВМ.

Выявлена степень чувствительности преобразователей к асимметричности потоков, которая модулируется местными гидравлическими сопротивлениями разной пространственной конфигурации. Так для гидродинамических расходомеров с чувствительными элементами разной формы наилучшими при условии минимальной погрешности и влияния на измеряемую среду являются средства измерения с телами обтекания в форме конуса, направленного вершиной навстречу потоку. Для ультразвукового преобразователя однолучевой конфигурации результат измерения хордовой скорости, определяющий расход, зависит от величины искривления осевой симметрии профиля и уменьшается с отдалением контрольного сечения от местного сопротивления. Величина погрешности зависит от пространственной ориентации прибора относительно вертикальной оси на технологической сети. Полученные результаты дают четкую картину мест локального размещения приборов в технологической сети при условии максимальной точности и минимальном воздействии на измеряемую среду. Это позволяет эффективно применять преобразователи, не принимая во внимание требования обязательного обеспечения прямых участков до и после приборов, в местах технологической сети с учетом конкретных натурных условий организации измерения.

Для подтверждения верности исходных теоретических предположений и выводов в режиме полунатурных исследований проведены стендовые испытания крыльчатых, турбинных, гидродинамических и ультразвуковых измерительных преобразователей. Изучено степень влияние асимметричности потоков на точность измерения в разных местах локального монтажа измерительных приборов на технологической сети .

Оценка соответствия разработанных математических моделей действующим образцам по статистическим критериям *Фишера* и *Стьюдента* подтвердила адекватность разработанных математических моделей реалиям практического применения в пределах 5%.

Полученные результаты тестирования путем математического и численного моделирований наряду со стендовыми испытаниями указывают на высокий уровень соответствия теоретических и экспериментальных исследований, определяют места локального размещения приборов в технологической сети. Что, в свою очередь, очерчивает чрезвычайно важное для практики осознание целесообразности применения преобразователей в единственно возможных, с точки зрения точности измерений, локальных местах технологической сети, не принимая во внимание требования в паспорте на прибор, предусматривающие прямые участки определенной длины до и после места установки прибора.

Ключевые слова: расход жидкости, измерительные преобразователи, математическая модель, оптимизация конструкции.

SUMMARY

Korobko I. V. Scientific principles of making fluid flow measurement instrument for process networks. – On rights of the manuscript.

Dissertation on getting of scientific degree of doctor of engineering sciences on specialty 05.11.01 – Devices and methods of measurement of mechanical quantities. – National Technical University of Ukraine "Kiev Politechnic Institute", the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2014.

The dissertation work is devoted to important scientific and technical problems of today - improving the measurement accuracy of liquid flow rate and volume in the technological networks. The paper identified the factors have prevailing impact on the metrological characteristics of liquid flow rate and volume transducers, comprehensive research trends for measurement processes and ways of improving flow rate meters. The methodology for determining the hydrodynamic flow characteristics was created, existing criteria for the heterogeneity of fluid flow amended, new principles for determining the asymmetric flow were developed. The quantitative and qualitative development of asymmetry fluid flows due to local hydraulic resistance at the site of measurement outlined.

The new mathematical models were created and existing mathematical models were improved for tachometric, hydrodynamic and ultrasonic fluid flow transducers, describing the interaction of the measuring fluid with such devices design elements.

Theoretical and experimental investigations were realized to determine influence of fluid flow hydrodynamic parameters on the transducers nominal characteristics. The adequacy of mathematic model and experimental data was appreciated by statistical criteria of *Fisher* and *Student.*

The optimization analysis results of transducers structural elements define specific conditions of devices use like the place of local accommodation and spatial orientation, which is important for practical industrial applications.

Keywords: flow rate, transducers, mathematical models, optimization design.