

БОЛЬШАКОВ Володимир Борисович

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД І КОМПЛЕКС ЗАСОБІВ  
ВИМІРЮВАНЬ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІДИННИХ  
СЕРЕДОВИЩ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРІНГУ  
(теорія, розробка, впровадження)

- 05.11.13 Прилади і методи контролю та захисту навколишнього середовища, речовин, матеріалів та виробів.
- 05.11.15 Метрологія та метрологічне забезпечення.

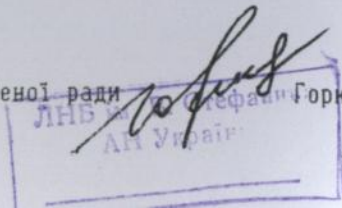
Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук



Дисертація в рукописі 00759903 (X)

Роботу виконано у ДНВО "Метрологія" Державного комітету  
України по стандартизації, метрології та сертифікаціїНауковий консультант - доктор технічних наук, професор,  
дійсний член Нью-йоркської ака-  
демії наук  
СЕБКО Вадим ПантелійовичОфіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України,  
заслужений діяч науки України  
ПОВХ Іван Лукич;доктор технічних наук, професор  
БАБАК Віталій Павлович;доктор технічних наук, професор  
РАІСОВ Юрій АбрамовичПровідна організація: Державне конструкторське бюро  
"Южное" ім. М.К.Янгеля,  
м.ДніпропетровськЗахист відбудеться 13 червня 1996 р.  
на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д 02.09.11  
у Харківському державному політехнічному університеті  
(310002, Україна, Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21.)До дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці  
Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий 4 травня 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Горкунов Б.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Технічний прогрес породив нові проблеми та нову відповідальність людства перед майбутніми поколіннями за становище природного середовища та забезпечення необхідних умов життя на Землі. Останнім десятиріччям прийшла реальна свідомість гостроти суперечності між обмеженими можливостями біосфери засвоювати без помітної шкоди відходи життєдіяльності людини та зростанням суспільних потреб. Зміни екологічних систем, що історично сформувалися, набувають характер, при якому все більш ймовірнішими стають небезпечні для людини та часто необоротні порушення природних зв'язків. У ситуації, що склалася, уявляється надзвичайно актуальним передусім мати гарно організований контроль становища природного середовища та його неперервних змінювань, тобто систему екологічного моніторингу – спеціальну інформаційно-вимірну систему спостереження, контролю, аналізу, прогнозу та управління становищем природного середовища у стратегії оптимізації взаємодій суспільства з природою.

Одним з найбільш небезпечних та інтенсивних факторів антропогенного діяння на природне середовище слід тепер визнати марнотратне використання та забруднення вод суши, морів і ґрунту. Всупереч економному, дбайливому відношенню до води, людина у своїй господарській діяльності настільки зловживала її використанням, що зараз вже стала очевидною необхідність докладати значних зусиль для негайного зменшення дисбалансу, що виникнув. У протилежному разі вода буде основним лімітуючим фактором для людини як біологічного виду.

Усе це ставить перед вченими складні задачі пізнання природних процесів у цілому, та їх гідрофізичних аспектів, зокрема, які вимагають для свого розв'язання застосування самих досконалих та сучасних досягнень науки і техніки та, передусім, – створення високоефективного метрологічного забезпечення (МЗ) гідродинамічних вимірювань (ГДВ) у самому широкому його розумінні, що відповідає вимогам сьогодення: від створення засобів вимірювань (ЗВ) до розробки керівних нормативних документів (КНД), які регламентують метрологічний нагляд за ними у процесі експлуатації. На цей день такого МЗ ГДВ немає.

Особливе значення при створенні МЗ ГДВ набувають удос-

коналювання та розробка виміршвальних перетворшвачів (ВП), як первинних засобів збору інформації, тому що вони власне й визначають можливості, рівень та метрологічні характеристики (МХ) ЗВ, інформаційно-виміршвальних систем (ІВС), систем керування та контролю. Останнім часом широкий розвиток набирають багатифункціональні ВП, і передусім - електромагнітні (МГД), як ті, що в найбільшій мірі відповідають вимогам натурних виміршвань: у них відсутні рухомі частини, і в цьому зв'язку вони безвідмовні та надійні, малоінерційні та мають високу чутливість, їх схемотехнічні рішення забезпечують роботу без утручання оператора та переустроювання на всьому діапазоні мінливості гідродинамічного поля швидкостей (ГДПШ), інформація о виміршваних параметрах подається в електричній формі, зручній для перешкодостійкого передавання по кабельним лініям, автоматизованої обробки реєстрації. МГД ВП знайшли широке застосування в витратометрії, морській та речній гідрометрії, суднопластві. Велике практичне значення вони набувають й при розв'язанні задач екологічного моніторингу та охорони навколишнього середовища.

Над проблемами створення МГД ВП і ДПШ інтенсивно працюють фахівці в багатьох закордонних університетах, лабораторіях, фірмах. Починаючи з 60-х років до них активно приєдналися вчені колишнього СРСР і, передусім, Ризька школа на чолі з І.М.Кирко, Таллінська - з Х.К.Енго, Московська - з І.Д.Вельтом, Донецька - з І.А.Повхом, Севастопольська - з Н.І.Пантелеєвим, Харківська - з Л.М.Керсунським. Результати виконаних робіт, з одного боку, стали основою для створення електромагнітних витратомірів (ЕМВ) для трубопроводів малих та середніх діаметрів та ЗВ турбулентних пульсацій швидкості рідинних потоків, з другого - ініціювали подальші дослідження. Теперішнього часу роботи в цій галузі, які охоплюють саме широке коло народногосподарських задач, але об'єднані спільним метрологічним підходом, сформувалися в самостійний напрям та продовжують інтенсивно розвиватися.

Основними необхідними та у визначеній мірі достатніми параметрами ГДПШ у рамках екологічного моніторингу і охорони навколишнього середовища є вектор середньої швидкості  $V$  течії водяного потоку або окремих його ділянок, як правило, поблизу дна, берегів та різних конструкцій гідротехнічних

споруд, вертикальні градієнти  $\nabla_z V$  швидкості течії, масоперенос або витрата  $Q$ , число Річардсона  $Ri$  та частота Вайсяля-Брента  $N$ . За значеннями перших параметрів міркують про стік річок, його динаміку коливання часу та території; про швидкість розповсюдження забруднень; про об'єми скидань промислових виробництв, стічних вод міських колекторів і т.і.; про процеси розподілу та нагромадження змулених компонентів стічних вод у донних відкладеннях річок, озер, ставків-відстійників, морів; про динамічні процеси у водоочисних спорудах, їх ефективність. Вони є основними вихідними даними для систем водообліку та водорозподілу. Число  $Ri$ , яке є відношенням потенціальної енергії до турбулентної, характеризує процес перемішування, вертикальну дифузію тепла, планктону, кисню і т.і. в стратифікованих течіях. Частота  $N$  також є мірою вертикальної гідростатичної стійкості стратифікованих потоків - показником, який характеризує динамічний стан водних середовищ.

Створення багатфункціональних МГД ВП, виділення відомостей о значеннях вимірюваних характеристик з інформації, яка міститься в їх сигналі, визначення оптимальних параметрів, технічних можливостей та МХ ЗВ, є загалом ділом далеко нетривіальним. До теперішнього часу не було розроблено високонадійних МГД ЗВ ГДГШ з МХ, які відповідають вимогам цього дня, не запропоновані способи, методи та апаратура вимірювання з нормованими похибками та високою роздільною здатністю в реальному масштабі часу  $Ri$  і  $N$ , були відсутні наукові основи їх створення та нормативна база, яка регламентує атестацію, перевірку та метрологічний нагляд за ними у процесі експлуатації - все це стримує роботи, які проводяться в рамках екологічного моніторингу та охорони наколишнього середовища, робить їх малоефективними. У зв'язку з цим, дослідження, розробка та упровадження в гідрометричну практику ЗВ, ІВС, засобів регулювання і контролю на базі багатфункціональних МГД ВП становить надзвичайно актуальну наукову проблему, яка має важливе народногосподарське значення.

Робота виконувалася на основі планових НДР, які здійснювалися в ДНВО "Метрологія" за Постановами Президії СРСР №64 від 10.03.78р., №227 від 01.09.78р., №255 від 02.08.80р., №305 від 18.08.82р., №473 від 31.12.83р. та Постановою АН

СРСР N 0024 від 19.02.79р. для забезпечення робіт Інституту космічних досліджень (ІКД) АН СРСР, м.Москва, за постановами ЦК КПРС та СМ СРСР N 433-157 від 10.06.69р. та N 136-46 від 27.01.86р. в рамках 4 тем з 1978р. по 1990р.; а також - для Держстандарту СРСР, м.Москва, з 1989р. по 1991р.; - для Держстандарту України, м.Київ, по 3 темам з 1992р. по 1995р.; - для УкрНДІГАЗу, м.Харків, по 2 темам з 1970р. по 1976 р.; - для НВО ХАРТРОН, м.Харків, у 1990р.; - для СОЮЗМОРІНЖГЕОЛОГІІ, м.Рига, з 1986р. по 1989р.

Мета та задача досліджень полягали в розв'язанні проблеми створення наукових основ, розробки та упровадження електромагнітного методу і комплексу засобів вимірювань динамічних параметрів рідинних середовищ у гідрофізику, екологічний моніторинг та охорону навколишнього середовища на основі багатофункціональних МГД ВП з одностороннім магнітним індуктором. Досягнення поставленої мети зв'язано з необхідністю розв'язання кола ключових задач, які наведені на рис.1.

Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. Створено наукові основи будування багатофункціонального МГД ВП з одностороннім індуктором, що дозволяє зондувати рідинні потоки без їх збурення, адаптованого до різних умов застосування.

2. Розв'язано наукову проблему розробки, досліджень та МЗ комплексу гідрометричної апаратури з високими МХ на основі розробленого багатофункціонального МГД ВП.

3. Розроблено теоретичні основи створення МГД ЗВ вектора швидкості (ЕВВШ) у безпосередній близькості від конструкцій гідротехнічних споруд та у відкритих потоках.

4. Розроблено принципи будування компактних, що мають невисоку металомісткість, простих при монтажі та експлуатації накладних ЕМВ ЕМВВ-Н на базі МГД ВП з одностороннім індуктором.

5. Запропоновано методи та ЗВ вектора швидкості рідкої фази (РФ) розшарованих газорідинних потоків у газо- та трубопроводах, на основі накладних МГД ВП.

6. Розвинуто спосіб вимірювань з нормованими похибками та високою просторовою роздільною здатністю вертикального градієнта гідрофізичних характеристик рідинних потоків за допомогою скануваних ЗВ, коли прирісти в градієнті визнача-

ються за вертикальний компонент швидкості сканування, що вимірює ЕВВШ, та часом.

7. Розроблено концепцію будування багатоканальних ІВС "Ri-метр", які призначені для комплексного вивчення Світового океану – проведення гідрофізичних та екологічних робіт у його найбільш діяльному поверхнево-му стратифікованому шарі.

8. Розроблено методологію МЗ ЗВ ГДПШ у трубопроводах, лотках, річках, каналах, різних водоймищах, морях, гідротехнічних спорудах і т.і., яка забезпечує єдність вимірювань.

Оригінальність основних рішень, що одержані та реалізовані в дисертації, захищена в авторськими свідоцтвами СРСР та патентом Російської Федерації.

Практична цінність та реалізація. Висновки, пропозиції та алгоритми, які одержані в роботі, цілком використані при розробці методів розрахунку, проектування та експлуатації багатфункціонального МГД ВП з одностороннім індуктором для ЗВ ГДПШ.

Найбільш істотними прикладними результатами роботи є: розроблені та експериментально підтверджені алгоритми будування багатфункціональних МГД ВП; запропонований спосіб вимірювань вертикального градієнта гідрофізичних характеристик за допомогою скануючих ЗВ, варіації місцеположення яких визначаються за вертикальною швидкістю сканування та часом; рекомендації по забезпеченню коректності вимірювань характеристик середовища "in situ" за допомогою нестационарних ЗВ; алгоритми розрахунку  $K_L$  та  $N$ ; створення ІВС "Ri-метр" та широкого класу електромагнітних вимірювачів: вектора швидкості (ЕВВШ) течій у безпосередній близькості від конструкцій гідротехнічних споруд, у відкритих потоках; витрати (ЕМВВ-Н) рідини в колекторах та трубопроводах великих діаметрів; осьової (ЕВПШ-1) та тангенціальної (ЕВПШ-2) швидкості РФ розшарованих газорідних потоків у газо- та трубопроводах; методи та засоби атестації та експериментальних досліджень створених ЗВ та ІВС; КНД 50-052-95 "Державна система забезпечення єдності вимірювань. Вимірювачі швидкості рідинних потоків. Методи та засоби повірки", що регламентує метрологічний нагляд за ЗВ ГДПШ, які використовуються в Україні.

Основні результати досліджень та розробок упроваджені в

## Основні задачі, які складають проблему

### До рівнянням магнітної гідродинаміки:

- 1) розробити математичну модель МГД ЗВ ГДПШ;
- 2) сформулювати узагальнену задачу синтезу МГД ВП з одностороннім індуктором;
- 3) дослідити ступінь впливу анізотропії середовища (переважно неоднорідності його електричної провідності) на МХ МГД ЗВ.

### До метрологічному забезпеченню:

- 1) розробити ПМА, способи та засоби метрологічної атестації створених ЗВ та ІВС;
- 2) розробити та узаконити в установленому порядку керівний нормативний документ, який регламентує метрологічний нагляд за ЗВ під час їх експлуатації в Україні.

### На основі вирішення задач синтезу

- визначити діаграму спрямованості, протяжність та конфігурацію області просторового осереднення МГД ВП з одностороннім індуктором;
- розробити алгоритми будівництва багатofункціональних МГД ВП двох компонентів вектора швидкості рідинних потоків, адаптованих до різних умов застосування (структури потоку, форми об'єктивів та т.і) в рамках задач екологічного моніторингу та охорони навколишнього середовища.

СТВОРИТИ НА БАЗІ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО МГД ВП ВИМІРЮВАЧІ

1

2

3

4

5



Рис. 1

практику таких гідрофізичних та екологічних робіт:

ЕВШП-1 та ЕВШП-2 установлені на Шебелинському газовому родовищі та в УкрНДІГАЗі для вимірювання швидкості руху РФ розшарованих газорідних потоків у системах підготовки природного газу, що добувається, до далекого транспорту;

ЕВВШ, ЗВ вертикального градієнта швидкості течії та ІВС "Ri-метр" знайшли широке застосування як комплексний засіб МЗ вимірювань характеристик внутрішніх хвиль; їх взаємодії з поверхневим хвилюванням, течіями, різними турбулентними утвореннями; вертикального тепломасопереносу, стійкості руху і т.і. в аерокосмічних експериментах, які проводилися з 1986р. по 1992р. ІКД АН СРСР у Тихому океані, включаючи Маріанську западину ( місцевості гір Макарова, Кита-Кохо, Хан-Кок та банки Рамало), а також у західній частині Атлантичного океану (шельфова зона США) в міжнародному аерокосмічному експерименті "Pre cherry".

Упровадження розроблених у дисертації методів, ЗВ та ІВС у гідрометричну практику підтверджено 7 актами.

За своїми експлуатаційними та МХ ІВС "Ri-метр" перевищує кращі світові аналоги, а інші розроблені ЗВ знаходяться на їх рівні.

#### На захист вносяться:

1. Теорія багатофункціональних МГД ВП з одностороннім індуктором двох компонентів вектора швидкості рідинних потоків, адаптованих до різних умов застосування в рамках екологічного моніторингу та охорони навколишнього середовища.

2. Застосування розробленої теорії для створення методів визначення протяжності та конфігурації області просторового осереднення і діаграми спрямованості МГД ВП; способу і методології вимірювань вертикального градієнта за допомогою скануючих МГД ВП; способів поліпшення їх МХ та поширення технічних можливостей.

3. Розроблений комплекс ЗВ ГДПШ - прилади ЕВВШ, ЕВШП-1, ЕВШП-2 та ІВС "Ri-метр".

4. МЗ розроблених ЗВ та ІВС, КНД 50-052-95.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: III Всесоюзній нараді по електромагнітним витратомірам, м.Таллін, 1967р.; IV, VI, VII, VIII та IX Таллінських нарадах по електромагнітним вит-

ратомірам та електротехніці рідких провідників, м.Таллін, 1969р., 1973р. (дві доповіді), 1976р., 1979р., 1982р; Українській республіканській н.-т. конф. присвяченій 50-річчю метрологічної служби УРСР, м.Харків, 1972р.; VIII та X Ризьких нарадах по магнітній гідродинаміці, м.Рига, 1975р. та 1981р.; I Всесоюзній конф. "Метрология в гидродинамических измерениях", м.Москва, 1977р.; I та IV Всесоюзних н.-т.конф. "Развитие системы метрологического обеспечения измерений расхода и количества веществ", м.Казань, 1979р. та 1991 р.; V Всесоюзній школі "Автоматизация научных исследований морей и океанов", м.Севастополь, 1980р.; III та IV Республіканських конф. по прикладній гідродинаміці "Проблеми гидромеханики в освоении Мирового океана", м.Київ, 1984р. (дві доповіді), 1987р.; IV Всесоюзній нараді "Автоматизация процессов управления, средств исследования и освоения Мирового океана", м.Одеса, 1987р.; I та II Всесоюзних конф. "Проблеми стратифицированных течений", м.Ўрмала, 1988р., м.Канев, 1991р.; III та IV Всесоюзних школах-семінарах "Методы гидрофизических исследований", м.Калінінград, 1989р.; I Всесоюзній школі "Технические средства и методы исследования Мирового океана", м.Геленджик, 1991р.; I Українській н.-т. конф. "Метрологія в електроніці", м.Харків, 1994р. (дві доповіді); н.-т. конф. з міжнародною участю "Проблеми автоматизированного электропривода. Теория и практика", м.Харків, 1995р.; Українській н.-т. конф. "Метрологія та вимірювальна техніка", м.Харків, 1995р. (три доповіді).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 58 праць, з них 6 а.с. СРСР та патент Російської Федерації.

Особистий внесок автора в отримання наукових результатів, викладених у роботі, полягає в розробці концепції МЗ вимірювань ГДПШ в задачах екологічного моніторингу та охорони навколишнього середовища, методологій вимірювань вертикальних градієнтів гідрофізичних характеристик, числа  $Re$  і частоти  $N$  за допомогою скануючих ЗВ та швидкості РФ розшированих газорідних потоків у трубо- та газопроводах, КНД 50-052-95; будівництві на основі струмової інтерпретації законів магнітної гідродинаміки теорії МГД ЗВ ГДПШ, фізичної та математичної моделей механізму формування сигналу їх ВП; введенні узагальненої вагової функції, як інструмента дослід-

жень протяжності і конфігурації області просторового осереднення та діаграми спрямованості МГД ВП; постановці та розв'язанні задачі синтезу багатофункціональних МГД ВП з одностороннім індуктором; визначенні на основі розв'язанні задачі синтезу шляхів поліпшення МХ, розширення технічних можливостей багатофункціональних МГД ВП та алгоритмів розрахунку їх оптимальних параметрів залежно від конкретної гідрометричної задачі; створенні на основі розробленого ВП приладів ЕМВШ, ЕМВВ-Н, ЕВШП-1, ЕВШП-2, ІВС "Ri-метр"; проведенні за допомогою розробленої апаратури гідрофізичних досліджень у різних регіонах Тихого та Атлантичного океанів.

Усі основні положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. З робіт, що опубліковані в співавторстві, використані тільки ті результати, в які автор вніс основний вклад.

Методологія та метод досліджень предмета дисертації складалися з теоретичного аналізу, постановки та розв'язання задачі синтезу багатофункціональних МГД ВП з метою одержання алгоритмів для визначення їх оптимальних МХ та конструктивних параметрів при створенні апаратури для МЗ гідрометричних задач та експериментальному підтвердженні спроможності отриманих результатів, рекомендацій, положень, алгоритмів.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, шести глав, висновку, списку літератури (448 найменувань) та восьми додатків. Вона містить 262 сторінки основного тексту та 51 сторінку з рисунками та таблицями. Додатки містять 109 сторінок.

#### КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі розглянуто роль та місце гідрофізичних вимірювань у системі екологічного моніторингу та охорони навколишнього середовища; обґрунтована актуальність проблеми створення багатофункціональних МГД ВП для ЗВ ГДПШ. Проаналізовано причини, які стримують розвиток електромагнітного методу, розробку та упровадження в гідрометричну практику багатофункціональних адаптованих до різних умов застосування МГД ВП. Обґрунтовано новизну та практичну цінність роботи. Наведено структуру дисертації.

У першій главі розглянуто характерні особливості ЗВ ГДПШ. Визначено основні вимоги до ВП, як первинних елементів

автоматизованих ЗВ, ІВС, систем контролю. Проведено аналіз існуючих методів та ЗВ вектора швидкості, її градієнта, числа  $Ri$ , частоти  $N$ , витрати рідинних середовищ та швидкості РФ розшарованих газорідинних потоків в трубо- та газопроводах. Показано переваги та недоліки існуючих методів, ЗВ та пристроїв. Обгрунтовано доцільність створення сучасних ЗВ ГДПШ в натурних умовах на базі багатфункціональних МГД ВП з одностороннім магнітним індуктором, який розміщується за межами потоку. Сформульовано напрями теоретичних та експериментальних досліджень у створі наукового та утилітарного аспектів МЗ гідрометричних задач.

Другу главу присвячено розгляду питань теорії роботи електромагнітних ВП та, зокрема, МГД ВП з одностороннім індуктором. Проаналізовано магнітогідродинамічні ефекти, які спостерігаються в провідних рідинах, що переміщуються в магнітному полі МГД ВП. Виявлено, що домінуючим ефектом у рідинах - середовищах з іонною провідністю  $\sigma$ , є виникнення в них індукційованого електричного поля  $E$  та зв'язаних з його градієнтами електричних струмів  $j$ . Звернено увагу на те, що суть електромагнітного методу вимірювань, на відміну від традиційних уявлень, які полягають в тому, що сигнал  $\mathcal{U}$  МГД ВП визначається індукційованою ЕРС, полягає в вимірюванні спаду напруги на електродах ВП, яке цілком визначається густиною індукційованих у вимірюваному потоці електричних струмів

$$\mathcal{U} = \varphi_{E_1} - \varphi_{E_2} = \int_{E_1}^{E_2} E_L dl = \int_{E_1}^{E_2} \left\{ \frac{j_L}{\sigma} - [vB]_L \right\} dl = \int_{E_1}^{E_2} \frac{j_L}{\sigma} dl. \quad (1)$$

Це обумовлено тим, що спад напруги - різниця потенціалів  $\varphi$ , яка знімається з електродів ВП, визначається роботою, яка здійснюється силами поля по переміщенню зарядів від одного електрода  $E_1$  до другого  $E_2$ , та тим, що швидкість течії на них внаслідок в'язкості рідини дорівнює нулю ( $V_L = 0$ ).

У відповідності з цим, запропонована струмова модель механізму формування сигналу МГД ВП, на основі якої досліджено вплив неоднорідності вимірюваного середовища на МХ МГД ЗВ. Одержано алгоритми, які визначають ступінь показів таких ЗВ від  $\sigma$  при різних їх виконаннях. Указано шляхи зведення цієї залежності до припустимого мінімуму за рахунок збільшення вхідного опору ЗВ та зменшення області просторового

осереднення їх ВП. Показано, що у випадку перевищення вхідного опору ЗВ опору середовища у міжелектродному проміжку у  $5 \cdot 10^2$  разів, похибка вимірювань вже не буде перевищувати 0,2%; при "стягуванні" області просторового осереднення до міжелектродного проміжку вона буде ще зменшуватися.

На основі струмової інтерпретації механізму роботи МГД ВП розроблена математична модель МГД ЗВ ГДПШ. Сформульована задача синтезу ЗВ, що розробляється, яка базується на рівняннях електромагнітного поля у електродинамічному наближенні та законі Ома

$$\begin{aligned} E &= -\nabla\varphi, \quad \Delta\varphi = \operatorname{div}[VB], \\ B &= -\nabla\varphi_m, \quad \Delta\varphi_m = 0; \\ j &= \sigma\{E + [VB]\}; \end{aligned} \quad (2)$$

та полягає у визначенні сигналу  $U = U(\Gamma, K, Re, V, Q, Ri, N)$  ВП, як функціоналу від його геометричних  $\Gamma$  та конструктивних  $K$  параметрів, розподілу індуктованих струмів у вимірюваному потоці рідини у рамках кола гідрометричних задач  $Re, V, Q, Ri, N$ , що розглядається. Тут  $B = (B_\rho, B_z, B_\theta)$  – вектор магнітної індукції у полі розсіяння ВП,  $\varphi_m$  – магнітний потенціал.

Запропоновано апарат узагальненої вагової функції  $W$ , яка описує вклад різних елементарних об'ємів  $\Omega$  рідини, що рухається, у сигнал ВП

$$U_{LE \in E_2} = \iiint_{\Omega} (V \cdot W) d\Omega, \quad (3)$$

як інструмент дослідження області просторового осереднення та діаграми спрямованості МГД ВП з істотно неоднорідним магнітним полем. На основі аналізу узагальненої вагової функції МГД ВП з одностороннім індуктором, який встановлено під обтічним довільним рідинним потоком елементом конструкції якої-небудь гідротехнічної споруди,

$$\begin{aligned} W(\alpha, \rho, q, \theta) &= \frac{1}{2\pi R} \{ B_\theta(\alpha, \rho, q) [\psi_1(\rho, q, \theta) - \psi_2(\rho, q, \theta)] q \sin \theta + \\ &+ B_z(\alpha, \rho, q) [(\rho - p \sin \theta) \psi_1(\rho, q, \theta) + (\rho + p \sin \theta) \psi_2(\rho, q, \theta)] \}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $R$  – радіус центрального полуса магнітопроводу;  $\alpha, \rho = d/2R, p = g/R, q = z/R$  – безрозмірні параметри, які характеризують величину паза в магнітопроводі під катушку збудження магнітного поля, відстань  $d = |E_1 E_2|$  між електро-

дами та циліндричними координатами, відповідно;

$$\Psi_1(p, q, \theta) = [p^2 + q^2 + \ell(\ell - 2p \sin \theta)]^{-1,5}; \quad \Psi_2(p, q, \theta) = [p^2 + q^2 + \ell(\ell + 2p \sin \theta)]^{-1,5};$$

показано, що їх основний сигнал формується в безпосередній близькості від конструкції гідротехнічної споруди у квазіколінійному об'ємі рідини висота та радіальний розмір якого порядку  $3R$ . Вклад решти потоку в сигнал не перевищує 1%. Область просторового осереднення має істотну асиметрію - домінуюча частина сигналу формується в площині розміщення електродів ВП. Одержано точні та інженерні (наближені з нормованою похибкою) алгоритми, які зв'язують протяжність та конфігурацію області просторового осереднення та розподілу магнітного поля ВП з параметрами його індуктора та місцеположенням електродів. Отримані алгоритми є основоположними при розробці ЗВ ГДПШ.

Третю главу присвячено розробці та дослідженню багатofункціональних МГД ВП з одностороннім індуктором стосовно до забезпечення вимірювань швидкості течій у довільно спрямованих рідинних потоках як у безпосередній близькості від дна та обтічних конструкцій гідротехнічних споруд (відстійники, опори, греблі і т.і.), так і у відкритих акваторіях. Розв'язано задачу синтезу таких ЗВ. Отримано функцію перетворення, яка відображає зв'язок конструктивних та геометричних параметрів ВП з МХ ЗВ у різних умовах експлуатації

$$U_{E1E2} = KVbd, \quad (5)$$

$$K(\alpha, \ell, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \chi) = [2,0 + 2,3 \ell g \frac{\Delta_1}{\Delta_2}] \ell^{-1} \sum_{n,m=1}^{\infty} A_{nm} B_{nm} C_{nm} \sin(0,05n\pi \ell),$$

де  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$  - безрозмірні (віднесені до  $R$ ) глибина потоку; товщина прилежового шару над ВП, яка визначається ступенем шорсткості конструкції та режимом течії; товщина осада; товщина конструкції, під якою розміщується ВП;  $\chi = \sigma_{ос} / \sigma$  - відносна провідність осада;

$$A_{nm} = \frac{n e^{-(\Delta_3 + \Delta_4) \beta_{nm}}}{\sqrt{2} \pi (n^2 + m^2)^{1,5}} \left\{ (1 + \alpha^2)^{0,5} \gamma_1 [(1 + \alpha^2)^{0,5} \beta_{nm}] - \gamma_1(\beta_{nm}) - \alpha \gamma_1(\alpha \beta_{nm}) \right\};$$

$$B_{nm} = 1,4 e^{-\Delta_1 \beta_{nm}} \cdot \left\{ \left( 3 + \ell n \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right) e^{-2\Delta_1 \beta_{nm}} - (1 - 2\Delta_2 \beta_{nm}) \right\} \frac{e^{-2\beta_{nm} \xi}}{\xi} d\xi - \\ - \left( 1 + \frac{2 \operatorname{sh}(\Delta_2 \beta_{nm})}{\beta_{nm}} e^{\Delta_2 \beta_{nm}} \right) e^{-2\Delta_2 \beta_{nm}} \};$$

$$C_{nm} = \left\{ (1+\kappa) \operatorname{Sh}[(\Delta_1 + \Delta_2)\beta_{nm}] + (1-\kappa) \operatorname{Sh}[(\Delta_1 - \Delta_2)\beta_{nm}] \right\}^{-1}; \beta_{nm} = 0,05\pi(n^2 + m^2)^{0,5}$$

Досліджено вплив глибини вимірюваного потоку та появи осадка на електродах ВП на ортогональність, чутливість та похибку вимірювань. Розроблено алгоритми розрахунків багатofункціональних МГД ВП та шляхи оптимізації їх МХ. Визначено умови, при яких вони мають ортогональність, т.т. забезпечують синхронне, незалежне вимірювання двох компонентів вектора швидкості довільно спрямованих потоків рідини, навіть при варіаціях їх глибини та наявності осадків. Показано, що для зниження залежності показів ЗВ від глибини вимірюваного потоку та осадка на електродах ВП його характерний лінійний розмір  $R$  не повинен перевищувати 0,02 глибини потоку, оптимальна міжелектродна база -  $d \sim 4R$ . При цьому похибка вимірювань, яка зв'язана зі зміною глибини потоку в межах від плюс 20% до мінус 20% від його середньої величини, не буде перевищувати (1-2)%; поява осадка на електродах ВП товщиною до 1,0мм буде приводити до додаткової невиключеної систематичної похибки (НСП), яка не перевищує 1,0%, при товщині осадка від 1,0 до 5,0 мм - ця похибка може досягати 8,0%, при подальшому збільшенні товщини осадка вона різко наростає і ЗВ у цьому випадку рекомендується використовувати тільки як індикатор руху середовища. Чутливість  $S = U/V$  ЗВ з оптимізованими параметрами його ВП при  $V \sim 4 \cdot 10^{-2}$  Тл та  $R \sim 3$  см порядку 0,5 мВ/м/с, т.т. близька до чутливості серійних ЕМВ, що дозволяє використовувати їх електронні схеми для вимірювання вихідного сигналу ЗВ, що розробляється.

Згідно з результатами теоретичних досліджень розроблений та виготовлений прилад ЕВВШ. Проведені його експериментальні дослідження за розробленою ПМА на дослідовому басейні Інституту гідромеханіки НАН України, м.Київ. Показано, що ЕВВШ має ортогональність; відхилення його діаграми спрямованості від ідеальної в самому широкому діапазоні кута набігання потоку  $\theta$  (дослідження виконувалися при 14 значеннях  $\theta$  в інтервалі від мінус  $5^\circ$  до  $185^\circ$  при  $V = 4$  см/с, 30 см/с та 60 см/с) не перевищує 5,0%; має лінійну градувальну характеристику і реверсивність (визначалися методом найменших квадратів по 10 значенням швидкості в діапазоні від мінус 90 см/с до 90 см/с, в кожній серії експерименту було прове-

дено по 10-19 вимірювань); його відносне середнє квадратичне відхилення (СКВ) результату вимірювань не перевищує 3,7% при НСП  $\leq 0,3\%$ , порогова чутливість - на рівні 1 см/с; результати експериментальних досліджень повністю підтвердили коректність постановки та розв'язання задачі синтезу МГД ЗВ ГДПШ рідинних потоків та справедливність отриманих алгоритмів, рекомендацій, висновків.

Викладені питання упровадження ЕВВШ в практику океанологічних робіт як ЗВ швидкості та вертикального градієнта швидкості течій у поверхневому стратифікованому шарі Тихого океану, які проводилися з 1982 р. по 1989 р. ІКД АН СРСР у рамках аерокосмічних експериментів "Схід". За його допомогою був виконаний цикл робіт по дослідженню в реальному масштабі часу тонкої структури гідрофізичних полів поблизу сезонного термокліна.

Подано розроблений КНД 50-052-95, який запроваджує методи та засоби визначення МХ ЗВ швидкості рідини в лотках, річках, каналах, різних водоймищах і т.і. в процесі їх експлуатації, та є обов'язковим для усіх підприємств, установ і організацій, що діють в Україні.

Четверту главу присвячено розв'язанню проблеми МЗ вимірювань числа Річардсона та частоти Вьяйсяля-Брента

$$Ri = N^2 / \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2, \quad N^2 = \left( -\frac{g}{g} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

параметрів, які характеризують тепломасообмін, динамічні процеси, стійкість руху і т.і. у стратифікованих потоках. Тут  $g$  - прискорення вільного падання,  $\rho$  - густина середовища,  $z$  - вертикальна координата.

Виявлено, що принципово досяжна на сьогоднішній день точність вимірювань  $Ri$  та  $N$  за допомогою скануючих ЗВ, вертикальна координата яких визначається за тиском - одного з кращих до цієї роботи методів вимірювань цих параметрів, може досягати  $\sigma_{Ri} \sim 250\%$  і  $\sigma_N \sim 60\%$ ; такі низькі точності вимірювань  $Ri$  та  $N$  обумовлені як малими градієнтами середовища в реальних умовах, так і невисокими МХ існуючих до цього часу способів та засобів їх вимірювання. Показано, що поставленій задачі в найбільшій мірі відповідає метод скануючих ЗВ, коли вертикальні градієнти вимірюваних параметрів

визначаються за часом та вертикальною швидкістю сканування. Можливість реалізації такого методу визначено розробленим у попередній главі приладом ЕВВШ. Розроблено методологію та алгоритми визначення осереднених за часом  $\tau$  та які викликають найбільший практичний інтерес при натурних дослідженнях значень числа Річардсона та частоти Вьясяля-Брента

$$\bar{Ri} = \bar{N}^2 / \left( \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{1}{V_L} \frac{\partial V}{\partial t} dt \right)^2, \quad \bar{N}^2 = \frac{dg}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{1}{V_L} \frac{\partial T}{\partial t} dt, \quad (7)$$

в яких як вихідний гідрофізичний параметр поряд з  $V$  використовується температура середовища  $T$  та їх, згідно з свідомою справедливою у застосуваннях, що розгортаються, гіпотезою Тейлора, вертикальні градієнти в формі  $\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{V_L} \frac{\partial V}{\partial t}$  та  $\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{V_L} \frac{\partial T}{\partial t}$ , а також вертикальний компонент швидкості сканування  $V_L$  ЗВ; швидкість течії  $V$  вимірюється одним з каналів ЕВВШ, швидкість сканування  $V_L$  - другим.

Вибрана методика (?) вилучає невизначеність в алгоритмах, що реалізуються, яка обумовлена тим, що число  $Ri$  має у своєму знаменнику квадрат випадкової величини - градієнт швидкості течії, який у реальних турбулентних потоках з великим ступенем ймовірності може дорівнювати нулю, і цим, забезпечує високу стабільність обчислення осереднених значень  $\bar{Ri}$  та  $\bar{N}$ .

Особливу увагу в главі приділено метрологічним аспектам методу, який розробляється: обґрунтуванню та аналізу точності методики вимірювань та алгоритмів розрахунку  $Ri$  та  $N$ , схемотехнічним питанням їх реалізації, визначенню форми та конструктивного виконання скануючого "in situ" занурюючого пристрою (ЗП) з ЗВ, і, як наслідок, точності вимірювань, що забезпечується, та розділювальної здатності методу. Показано, що НСП заміни класичних визначень  $Ri$  та  $N$  (б) запропонованими (?) не перевищують 5%; метод, що розробляється, забезпечує істотне перевищення точності та розширення просторової розділювальної здатності вимірювань  $Ri$  та  $N$ . Це досягається за рахунок того, що вертикальні компоненти градієнтів  $V$  та  $T$  обчислюються за результатами вимірювань їх часових приставів  $\Delta z = V_L \Delta t$ , а часові інтервали  $\Delta t$ , які визначаються сталою часу ЕВВШ, достатньо незначні -  $\Delta t \sim 0,2$  с. Розширення просторової розділювальної здатності обумовлено тим, що при

переході від просторової метрики до часової інтервал розділення  $\Delta z$ , який є аналогом використовуваного часового інтервалу  $\Delta t$ , за яким обчислюються прирости  $V$  та  $T$  (?), при характерній швидкості сканування ЗВ за рахунок хитавиці науково-дослідного судна (НДС)  $V_{\perp} \sim 0,5$  м/с, дорівнює  $0,1$  м, т.т. на порядок менше ніж у традиційних способах.

Згідно з результатами виконаних досліджень розроблена та виготовлена багатоканальна ІВС "Ri-метр", яка забезпечує синхронне вимірювання в реальному масштабі часу температури середовища, вертикального та горизонтального в напрямку течії, компонентів вектора швидкості, азимута течії, числа  $Ri$  та частоти  $N$  у найбільш діяльному поверхневому стратифікованому шарі океану глибиною до  $300$  м.

Виконані експериментальні дослідження ІВС "Ri-метр" за розробленою ПМА. Каналам вимірювання швидкості сканування  $V_{\perp}$ , швидкості течії  $V$ , його напрямку  $\theta$  і температури  $T$  середовища, які оснащені атестованими приладом ЕВВШ, вимірвачем кутів просторової орієнтації ЗП (розробка СКТБ ПЕ НВО "Потенціал", м. Харків) та вимірвачем температури ИРТ-5 (розробка СКТБ "Турбулентність" при Донецькому Держуніверситеті, м. Донецьк) приписані МХ цих ЗВ. Показано, що канали вимірювання  $Ri$  та  $N$  мають лінійні градувальні характеристики; зведені інструментальні СКВ результатів вимірювань  $Ri$  та  $N$  при можливих у натурних умовах варіаціях термогідродинамічних параметрів ( $1,5 \leq \nabla_z V \cdot 10^2$  (м/с/м)  $\leq 5$  та  $0 \leq \nabla_z T$  (°С/м)  $\leq 5$ ) не перевищують  $0,5\%$ , т.т.  $\sigma_{Ri} = \sigma_N = 0,5\%$  при НСП  $< 1,0\%$ ; зведені основні СКВ результатів вимірювань, які зв'язані з максимально можливими змінюваннями швидкості та частоти сканування ЗВ при виконанні робіт з дрейфуючого НДС в умовах відкритого океану ( $0,3 \leq V_{\perp}$  (м/с)  $\leq 1$  та  $0,6 \leq \omega$  (с<sup>-1</sup>)  $\leq 1,0$ ) не перевищують по  $\bar{N}^2$  -  $6,0\%$ , по  $\bar{Ri}$  -  $9,0\%$  при довірчій ймовірності  $P = 0,95$ ; розділювальна здатність ІВС практично на порядок перевищує можливості традиційних методів та досягає  $0,1$  м. Доказано коректність розробленої методології, прийнятих алгоритмів та методів розрахунку  $Ri$  та  $N$ , а також високі МХ розробленої ІВС "Ri-метр".

Наведені дані широкого упровадження ІВС "Ri-метр" у практику гідрологічних робіт як комплексного засобу МЗ вимірювань характеристик тонкої структури гідрофізичних полів у

поверхневому діяльному шарі в різних регіонах Тихого та Атлантичного океанів при дослідженні внутрішніх хвиль, вертикального тепломасопереносу, стійкості руху і т.і. у багаторічному циклі аерокосмічних експериментів ІКД АН СРСР.

П'яту главу присвячено створенню та дослідженням економічних, компактних, простих під час монтажу та експлуатації накладних електромагнітних витратомірів ЕМВВ-Н для колекторів та трубопроводів великих діаметрів на основі розроблених багатфункціональних МГД ВП. Суть ЕМВВ-Н полягає в тому, що їх індуктор може розміщатися зовні трубопроводу та зондувати рідину магнітним полем, яке локалізовано в пристінній області трубопроводу; сигнал ЕМВВ-Н знімається за допомогою електродів, які розміщуються урівень з внутрішньою поверхнею трубопроводу; на основі вимірювання цього сигналу визначається середня швидкість  $V_0$  потоку та витрата  $Q$  середовища в трубопроводі ( $Q = V_0 S$ , де  $S$  - площа перерізу трубопроводу).

Одержані алгоритми роботи ЕМВВ-Н. Відмічено, що оскільки основна частина сигналу ЕМВВ-Н формується в безпосередній близькості від поверхні трубопроводу, т.т. в прилеглому шарі рідини, їх покази можуть істотно залежати від його структури та товщини і, в цьому зв'язку, від фізико-хімічних властивостей вимірюваного середовища та параметрів трубопроводу. Показано, що обмеженість протяжності полюсів магнітної системи ЕМВВ-Н приводе до появи кінцевих зрівнявальних струмів, які спроможні, затікаючи в робочу область ВП, приводити до посередній залежності показів витратоміра від розподілу швидкостей у потоці. Звернуто увагу на те, що ЕМВ схильні до впливу зовнішніх перешкод і тому потрібно забезпечення необхідного перевищення сигналу над перешкодами. Збільшення сигналу не може бути досягнуто тільки за рахунок збільшення потужності, яка споживається магнітною системою ВП ЕМВ, так як ім властиві квадратурні перешкоди та виникнення фазової нестійкості, які приводять до істотного зниження точності вимірювань. У цьому зв'язку дуже бажано при фіксованій потужності живлення магнітної системи забезпечити максимальний сигнал ВП ЕМВВ-Н. Одним з шляхів досягнення цього є правильний вибір параметрів магнітного індуктора.

Визначені на основі розв'язання задачі синтезу ЕМВВ-Н електромагнітне поле, яке індукційоване в його робочій облас-

ті, та функція перетворення  $K$  (5) витратоміра, як функціонал від параметрів МГД ВП: ширини центрального полюса  $\gamma$  магнітопроводу, розміру  $\alpha = k\gamma$  паза під котушку збудження, довжини  $L = a\gamma$  індуктора, товщини  $\Delta$  стінок трубопроводу та розташування  $\beta = \varepsilon\gamma$  електродів при усіх числах Рейнольдса. Показано, що найбільш значні зміни величини  $K$  відбуваються при зміні характеру течії в каналі ВП ЕМВВ-Н - при переході від ламінарного режиму течії до турбулентного, і для вимірювання в трубопроводах порівняно малих діаметрів, де може бути як перший, так і другий режими течії рідини, такі ЗВ, очевидно, не можуть застосовуватися; для вимірювання у трубопроводах великих діаметрів ( $D_{\text{д}} \geq 400$  мм), коли весь робочий діапазон перевищує числа  $Re$  порядку  $10^5$ , застосування ЕМВВ-Н при відповідному виборі параметрів ВП стає можливим. Здійснено оптимізацію метрологічних та конструктивних характеристик ЕМВВ-Н на основі аналізу одержаних алгоритмів, як функціоналів від параметрів  $a, \gamma, \varepsilon, \Delta, k$  та  $Re$ . Показано, що похибка вимірювань буде оптимальною - не буде перевищувати 1,0%, якщо ВП ЕМВВ-Н виконати з параметрами  $\gamma = 3 \cdot 10^{-2}$ ,  $k = 2$ ,  $\varepsilon = 3,7$ ,  $a \approx 10$ . Чутливість такого ЗВ при вимірюваннях в трубопроводах великих діаметрів буде порядку 1,5 мВ/м/с.

У відповідності до результатів досліджень розроблено накладний витратомір ЕМВВ-Н, який дозволив розв'язати надзвичайно актуальну на сьогодні проблему вимірювань витрати скиданих вод, у колекторах та трубопроводах великих діаметрів. МХ ЕМВВ-Н знаходяться на рівні показників кращих ЕМВ для трубопроводів малих та середніх діаметрів, які серійно випускаються, приміром, ІР-51 і ІР-51М. Знайдені розв'язання дозволяють використовувати як вимірювальний пристрій вихідного сигналу ВП ЕМВВ-Н уніфіковані електронні блоки цих ЗВ.

Шосту главу присвячено розробці та дослідженню ЗВ вектора швидкості РФ розшарованих газорідинних потоків, яка переміщається у вигляді тонких рідинних плівок по внутрішній поверхні газо- та трубопроводів, на базі розроблених МГД ВП з одностороннім індуктором.

Одержані основоположні співвідношення, які визначають роботу МГД ВП в умовах реальних розшарованих газорідинних потоків. Створено алгоритми розрахунків МГД ВП з односторон-

нім індуктором стосовно до вимірювань осьового та тангенціального компонентів вектора швидкості рідинних плівок. Визначено оптимальні конструктивні параметри ВП та МХ ЗВ в кожному з зазначених застосувань. Показано, що у випадку вимірювань осьового компонента оптимальними параметрами ВП є  $\gamma = 6 \cdot 10^{-2}$ ,  $k = 2$ ,  $\varepsilon = 3,8$ , у випадку тангенціального -  $\gamma = 0,667$ ,  $k = 0,5$ ,  $\varepsilon = 0,8$  при цьому похибки, які зв'язані зі зміною товщини плівок у інтервалі від 1 мм до 7 мм, а саме такі їх зміни можуть мати місце в реальних розшарованих газорідинних потоках у газо- та трубопроводах, у самому широкому діапазоні варіацій епур швидкостей порядку 1,0%, чутливість - на рівні 0,2 мВ/м/с та 1,0 мВ/м/с у першого та другого ЗВ, відповідно.

Одержані результати теоретичних досліджень лягли в основу розробки приладів ЕВШП-1 та ЕВШП-2 - ЗВ, які забезпечують вимірювання відповідно осьової та тангенціальної складових вектора швидкості РФ розшарованих газорідинних потоків, яка переміщається по внутрішній поверхні газо- та трубопроводів. Розроблено ПМА та засоби для експериментальних досліджень ЕВШП-1 та ЕВШП-2. Показано, що існуючі методи створення та контролю рідинних плівок з фіксованими товщиною та осьовою і тангенціальною швидкостями в каналі ВП ЕВШП трудомісткі та не забезпечують необхідну точність завдання та відтворення характеристик потоку. Запропоновано ефективніший спосіб створення рідинних плівок з наперед заданими легко відтворюваними параметрами в каналі ВП за допомогою прокачування рідини в щілинному зазорі між непровідними обтічними циліндричними обертовими валами різних діаметрів, які розміщуються в каналі, та його поверхню. Товщина плівки визначається різницею радіусів каналу ВП та вала, що розміщується в ньому, осьова швидкість - витратою рідини та площею щілини, тангенціальна - швидкістю обертання вала. Помічено, що умови, які накладаються на індукційне в рідині, що рухається, електромагнітне поле, у данному випадку ідентичні умовам у реальних розшарованих газорідинних потоках, тому що газове ядро та вали, що розміщуються в каналі ВП ЕВШП - діелектрики. Запропонований спосіб реалізовано у відповідній установці.

Визначено та оцінено методичні похибки досліджень виходячи з фізичної природи їх можливих джерел: імітації коаксі-

альної рідинної плівки рухом рідини в кільцевій щілині, можливої асиметрії щілинного зазора, вимірювань середньої швидкості рідини та вала, нестійкості потоку в щілині, яка обумовлена перехідним режимом руху рідини в елементах установок, від ламінарного до турбулентного. Одержані співвідношення, які зв'язують похибки експерименту з результатами вимірювань і контролю геометричних та кінематичних параметрів пристроїв, які імітують плівку, та запропоновані способи зведення цих похибок і, у першу чергу, НСП до припустимого мінімуму - 2,0%.

Проведено експериментальні дослідження МХ ЕВШП-1 та ЕВШП-2. Для забезпечення репрезентативності одержаних результатів дослідження здійснені при п'яти товщинах плівок (1; 2; 3; 4; 7 мм) у кожному з 10 значень показів ЗВ - 10; 20; ...; 100% його шкали. В кожній серії експерименту було проведено по 17 вимірювань. Показано, що ЕВШП-1 та ЕВШП-2 мають лінійні градувальні характеристики і їх відносні похибки вимірювань відповідно осьового та тангенціального компонентів вектора швидкості рідинних плівок при варіаціях товщини останніх у всьому діапазоні їх можливої зміни не перевищують (1-3)%, що цілком відповідає реальним задачам вимірювання РФ розшарованих газорідинних потоків. Результати експериментальних досліджень доказали коректність одержаних алгоритмів, розрахункових формул та рекомендацій по створенню ЗВ осьової та тангенціальної складових вектора швидкості рідинних плівок у технологічних газо- та трубопроводах без унесення гідродинамічних збурень в газорідинний потік.

Наведено результати упровадження ЕВШП-1 та ЕВШП-2 на Шебелинському газовому родовищі та в УкрНДІГАЗі для вимірювання швидкості руху РФ розшарованих газорідинних потоків в газопроводах. З їх допомогою виконано цілий цикл досліджень і, зокрема, була одержана залежність величини тангенціальної швидкості двофазного потоку від його газоскладу та параметрів закручувального пристрою, що дозволило виробити ряд практичних рекомендацій по підвищенню ефективності, удосконалюванню наявних сепараторів та розробленню нових високо-ефективних установок підготовки природного газу, що добувається, до далекого транспорту.

Основні результати і висновки. Виконана дисертаційна робота присвячена створенню наукових основ, розробці і упровадженню електромагнітного методу та комплексу засобів вимірювань динамічних параметрів рідинних середовищ в екологічному моніторингу та охороні навколишнього середовища, що дозволяє говорити при розв'язанні важливої народногосподарської задачі. Упровадження апаратури, її характеристики, експлуатаційні якості та надійне функціонування в натурних умовах підтвердили справедливість одержаних результатів.

В роботі одержані такі основні результати.

1. Розроблено математичну модель та сформульовано багатопараметричну задачу синтезу електромагнітних засобів вимірювання гідродинамічного поля швидкостей на основі розв'язання якої одержані співвідношення для універсальних функцій перетворення, алгоритми розрахункових та вимірвальних процедур, формули для визначення оптимальних параметрів та метрологічних характеристик ЗВ.

2. Запропоновано багатофункціональні адаптовані до різних умов застосування у складі ЗВ, ІВС, систем контролю електромагнітних перетворювачі з одностороннім магнітним індуктором, що розміщується за межами потоку, дозволяє зондувати рідинні потоки без порушення їх гідродинамічної структури. Розроблено теоретичні принципи їх будовання.

3. Запропоновано струмові інтерпретація та модель механізму формування сигналу електромагнітних перетворювачів на основі яких за допомогою розробленого апарату узагальненої вагової функції визначені їх діаграма спрямованості та область просторового осереднення, з'ясований механізм впливу фізико-хімічних властивостей вимірюваного середовища на їх покази та одержані універсальні алгоритми, які дозволяють звести ступень цього впливу до припустимого мінімуму.

4. На базі розроблених електромагнітних перетворювачів створені ЗВ вектора швидкості рідинних потоків у безпосередній близькості від різних конструкцій гідротехнічних споруд та у відкритих потоках. Досліджено вплив структури вимірюваних потоків та появи осадка на електродах вимірвального перетворювача на метрологічні характеристики ЗВ. Визначено шляхи зведення цього впливу до припустимого мінімуму, оптимальні параметри, границі застосованості та метрологічні ха-

рактеристики ЗВ. У відповідності до одержаних результатів виготовлено прилад ЕВШ. Проведені його експериментальні дослідження. Показано, що він має ортогональність, лінійну градувальну характеристику, порогову чутливість на рівні 1 см/с, похибку вимірювань, яка не перевищує 3%, що відповідає сучасному світовому рівню натурних гідродинамічних вимірювань, і, як наслідок, - доказана коректність постановки та розв'язання задачі синтезу багатофункціональних електромагнітних перетворювачів, одержаних алгоритмів, рекомендацій, висновків.

5. Запропоновано спосіб та принципи реалізації вимірювань з нормованими похибками та високою просторовою роздільною здатністю вертикального градієнта гідрофізичних характеристик рідинних потоків за допомогою скануючих ЗВ, коли прирісти в градієнті визначаються за вертикальним компонентом швидкості, який вимірюється ЕВШ, та часом. Розглянуто коректність вимірювань характеристик середовища "in situ" за допомогою нестационарних ЗВ. Визначено умови, які мінімізують похибки таких вимірювань. Спосіб та методологія були покладені в основу створених ЗВ вертикального градієнта швидкості течії, які пройшли широку апробацію у ряді аерокосмічних експедицій у Тихому та Атлантичному океанах і показали, що за своїми метрологічними характеристиками більш, чим на порядок, перевищують існуючі методи та апаратуру.

6. Розроблено та виготовлено багатоканальну ІВС "Рі-метр", яка призначена для комплексного вивчення Світового океану - синхронне вимірювання в реальному масштабі часу з нормованими похибками температури, вертикального та горизонтального в напрямку течії компонентів вектора швидкості, азимута течії, числа  $Ri$  та частоти  $N$ . Виконано теоретичні та експериментальні дослідження ІВС "Рі-метр". Визначено оптимальні алгоритми розрахунків  $\bar{Ri}$  та  $\bar{N}$ , їх схемотехнічні вирішення, метрологічні аспекти скануючих ЗВ. Показано, що похибки вимірювань ІВС, при можливих в натурних умовах варіаціях термогідродинамічних параметрів середовища, швидкості і частоти сканування, не перевищують по  $\bar{N}^2$  - 6,0%, по  $\bar{Ri}$  - 9,0%, при роздільвальній здатності, яка практично на порядок перевищує можливості традиційних методів та досягає 0,1 м.

7. Розроблено на базі багатофункціональних електромаг-

нітних перетворювачів принципи будовання компактних, технологічних, простих під час монтажу та експлуатації накладних витратомірів ЕМВВ-Н, які забезпечують вимірювання з нормованими похибками витрати рідинних середовищ у колекторах та трубопроводах великих діаметрів. Визначено оптимальні режими та конструктивні параметри ЗВ. Досліджено їх метрологічні характеристики. Показано, що похибка вимірювань ЕМВВ-Н порядку 1,0%, чутливість - 1,5 мВ/м/с - знаходяться на рівні показників кращих витратомірів для трубопроводів малих та середніх діаметрів, які серійно випускаються.

8. Запропоновані методи та пристрої вимірювань вектора швидкості рідкої фази розшарованих газорідинних потоків, які переміщуються у вигляді плівок по внутрішній поверхні газота трубопроводів, на основі накладних електромагнітних перетворювачів. Розроблено теоретичні основи та алгоритми будовання таких ЗВ в умовах реальних розшарованих газорідинних потоків. Створено прилади ЕВШП-1 та ЕВШП-2, які забезпечують вимірювання відповідно осьової та тангенціальної швидкості рідкої фази розшарованих газорідинних потоків. Розроблено способи, методики та засоби їх експериментальних досліджень і атестації. Виконано експериментальні дослідження ЕВШП-1 та ЕВШП-2, які підтвердили коректність теоретичних висновків, алгоритмів, методик та показали, що вони мають високі метрологічні характеристики - похибки вимірювань не перевищують (1-3)%, чутливість на рівні 1,0 см/с.

9. Основні способи та технічні вирішення виконано на рівні винахідів та захищені 6 авторськими свідоцтвами СРСР та патентом Російської Федерації. За створення методів та засобів експериментальних досліджень та атестації ЕВШП автор роботи нагороджений знаком "Винахідник СРСР".

10. Основні теоретичні та прикладні результати дисертації використано при створенні, упровадженні та експлуатації приладів ЕВШП-1, ЕВШП-2, ЕВВШ, ЗВ вертикального градієнта швидкості течій і ІВС "Ri-метр", які відповідно розміщені на Шебелинському газовому родовищі і в УкрНДІГАЗі (м.Харків) для вимірювань швидкості руху рідкої фази розшарованих газорідинних потоків у системах підготовки природного газу, що добувається, до далекого транспорту та застосовувалися як ЗВ характеристик тонкої структури гідрофізичних полів у поверх-

невному діяльному шарі океану при дослідженні внутрішніх хвиль, вертикального тепломасопереносу, стійкості руху і т.і., дослідженням яких був присвячений багаторічний цикл аерокосмічних експериментів Інституту космічних досліджень АН СРСР у рамках програми "Схід" у різних регіонах Тихого океану та міжнародного експерименту "Pre cherry" - в Атлантичному. Упровадження розроблених у дисертації ЗВ та ІВС у гідрометричну практику підтверджено 7 актами.

11. Розроблено керівний нормативний документ КНД 50-052-95 "Державна система забезпечення єдності вимірювань. Виміршвачі швидкості рідинних потоків. Методи та засоби повірки", який запроваджує методи та засоби визначення метрологічних характеристик ЗВ гідродинамічного поля швидкостей у трубопроводах, лотках, річках, каналах, різних водоймищах і т.і. та регламентує метрологічний нагляд за цими ЗВ під час експлуатації. КНД є обов'язковим для усіх підприємств, установ і організацій, які діють в Україні.

Основні положення дисертації опубліковано в таких працях:

1. КНД 50-052-95 "ДСВ. Виміршвачі швидкості рідинних потоків. Методи та засоби повірки".

2. Корсунский Л.М., Большаков В.Б. Об оптимальной протяженности полюсов магнитной системы электромагнитных расхомеров //Магнитная гидродинамика.-Рига.-1968.-№1.-С.141-146.

3. Большаков В.Б., Корсунский Л.М. О влиянии эпилы скоростей на электрическое поле, индуцированное при течении электропроводящей жидкости в круглом канале в поле рассеяния одностороннего индуктора //Магнитная гидродинамика.-1969.-№1.-С.111-116.

4. Большаков В.Б., Корсунский Л.М., Шейко Т.И. К вопросу об уравнительных токах в неоднородном магнитном поле // "Магнитная гидродинамика".-Рига.-1971.-№1.-С.149-151.

5. Корсунский Л.М., Большаков В.Б., Королев В.Б., Кузьменко В.М. Электромагнитный метод измерения скорости жидкой пленки //Приборы и системы управления.-1972.-№10.-С.15-17.

6. Большаков В.Б., Корсунский Л.М. Область пространственного осреднения электромагнитных преобразователей скорости с полем рассеяния одностороннего индуктора // "Метрология".-1974.-№11.-С.56-62.

7. Большаков В.Б., Королев В.Б., Корсунский Л.М. Электромагнитный измеритель тангенциальной скорости жидкостных пленок в трубопроводах //Измерительная техника.-1979.-№ 6.-С.18-21.
8. Большаков В.Б., Дунаевский И.Г., Корсунский Л.М., Повх И.Л. Зависимость чувствительности МГД-измерителей пульсаций скорости от конструктивных параметров // Магнитная гидродинамика.-Рига.-1981.-№ 4.-С.120-126.
9. Большаков В.Б., Дунаевский И.Г., Корнев В.Д. Исследование зависимости чувствительности МГД-измерителя пульсаций скорости от числа Рейнольдса // "Магнитная гидродинамика".-1988.-№4.-С.115-120.
10. Большаков В.Б., Королев В.Б., Косач Н.И., Купко В.С. Метрологическое обеспечение измерений гидрофизических параметров среды //Измерительная техника.-1991.-№4.-С.23-25.
11. Александров А.П., Большаков В.Б., Народницкий Г.Ю. Состояние и перспективы развития метрологического обеспечения средств измерений уровня, расхода и объема жидкости //Український метрологічний журнал. -1995.-вип.1.-С.65-68.
12. Большаков В.Б., Корсунский Л.М. О методике градуировки и поверке электромагнитных измерителей скорости движения жидкой фазы расслоенного газожидкостного потока в газопроводах //Сб.трудов метрологич. институтов СССР "Исследования в области линейных и механических измерений".-Л.-1972.-вып.11.-С.42-50.
13. Большаков В.Б. Измерение вектора скорости в задачах метрологического обеспечения дальномерных измерений в Океане //Сб. н.тр. "Дальнометрия и ее метрологическое обеспечение", НПО ВНИИМ.-Л.-1987.-С.83-90.
14. Большаков В.Б., Королев В.Б., Косач Н.И. Метрологическое обеспечение градиентных измерений гидрофизических параметров среды в дальнометрии //Сб.н.тр. "Вопросы разработки дальномерных систем и их метрологического обеспечения", НПО ВНИИМ.-Л.-С.85-91.
15. Большаков В.Б. Измерение вектора скорости в поверхностном слое Океана //Сб.н.тр. "Методы и средства метрологического обеспечения измерений характеристик ветрового волнения и гидродинамических параметров в поверхностном слое океана".-Харьков.-1991.-С.42-49.

16. Большаков В.Б., Королев В.Б., Косач Н.И. Экспериментальное исследование диаграммы направленности сферических МГД-измерителей скорости //Сб.н.тр. "Методы и средства МО измерений характеристик ветрового волнения и гидродинамических параметров в Океане".-Харьков.-1991.-С.67-74.

17. Большаков В.Б., Косач Н.И. Исследование влияния нестационарности контактных измерителей на их метрологические характеристики //Сб. научн.тр. "Методы и средства метрологического обеспечения измерений характеристик ветрового волнения и гидродинамических параметров в поверхностном слое океана". НПО "Метрология".-Харьков.-1991.-С.75-92.

18. Корсунский Л.М., Большаков В.Б. К вопросу о конечных эффектах электромагнитных расходомеров //Сб. матер. к III Всесоюзн.совещ. по электромагнитным расходомерам.-Таллин.-1967.-С.72-81.

19. Большаков В.Б., Корсунский Л.М. О зависимости чувствительности от геометрических соотношений измерителя расхода с односторонним индуктором //Сб.матер. к IV Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам.-Таллин.-1969.-С. 18-26.

20. Большаков В.Б., Корсунский Л.М., Тимченко П.В. Об учете конечного эффекта при разработке электромагнитных расходомеров повышенной точности // Тр. Харьковского Гос.НИИ Метрологии. Изд-во "Комитета стандартов".-М.-1970.-С.65-71.

21. Большаков В.Б., Гусейнов Ч.С., Шевский А.И., Корсунский Л.М. Об оптимальных параметрах электромагнитного измерителя скорости жидкостной пленки в газопроводах //Тр. УкрНИИГаз "Развитие газовой промышленности Украинской ССР". Изд-во "Недра".-М.-1971.-вып. VI(11).-С.34-46.

22. Большаков В.Б., Гусейнов Ч.С., Королев В.Б., Корсунский Л.М., Шевский А.И. Электромагнитный измеритель скорости жидкой пленки - ЭИСП-1 //Сб.мат. к VI Таллинскому совещанию по электромагн. расходомерам и электротехнике жидких проводников. Электромагнитные расходомеры.-Таллин.-1973.-С. 126-133.

23. Большаков В.Б., Корсунский Л.М., Водкин Е.В., Раппопорт А.Я. Оптимальные параметры электромагнитных измерителей тангенциальной составляющей скорости жидкостных пленок в трубопроводах //Сб.матер. VIII Таллинского совещания по

электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников.-Таллин.-1976.-вып.2.-С.18-28.

24. Большаков В.Б. Электромагнитный измерительный преобразователь вектора скорости жидкости //Матер. I Всесоюзн. конф. "Метрология в гидродинамических измерениях".-М.-1977.-С.68-72.

25. Большаков В.Б., Корсунский Л.М. Электромагнитный измеритель расхода, скорости и толщины жидкой фазы расслоенных газожидкостных потоков //Авт.св. СССР N 558154, БИ N 18.-1977.

26. Большаков В.Б., Королев В.Б., Корсунский Л.М. Электромагнитный измеритель тангенциальной скорости жидкостных пленок //А.С.СССР N 661341, БИ N 17.-1979.

27. Большаков В.Б., Александров В.А., Корсунский Л.М. Устройство для градуировки электромагнитных измерителей тангенциальной скорости жидкой фазы расслоенного газожидкостного потока в трубопроводе //А.С. СССР N 690396, БИ N 37.-1979.

28. Большаков В.Б. Электромагнитный измеритель гидродинамических характеристик потока жидкости //А.с.СССР N 898328, БИ N 2.-1982.

29. Большаков В.Б. Электромагнитный преобразователь параметров потока //А.с.СССР N 1007015, БИ N 11.-1983.

30. Большаков В.Б., Королев В.Б., Косач Н.И., Щупак Н.Е., Щупак И.Е. Электромагнитный измеритель расхода //Пат. РФ N 2030713, рег. в Госреестре 10.03.95.

31. Большаков В.Б., Королев В.Б., Косач Н.И. Влияние неоднородности среды на метрологические характеристики МГД-измерителей гидродинамических параметров //Тез. докл. I Всесоюзн. конф. "Проблемы стратифицированных течений".-Юрмала.-1988.-Т.2.-С.182-185.

32. Большаков В.Б., Королев В.Б., Косач Н.И. Метрологическое обеспечение измерений числа Ричардсона и частоты Вайсяля-Брента в поверхностном стратифицированном слое Океана //Тез. докл. II Всесоюзн. конф. "Проблемы стратифицированных течений".-Канев.-1991.-Т.2.-С.13-14.

33. Большаков В.Б., Косач Н.И., Королев В.Б. Измеритель числа Ричардсона - "Ri - метр" //Сб. тез. докл. Всесоюзн. школы-семина. "Технические средства и методы исследования Мирового Океана".-М.-1991.-Т.2.-С.33.

Bolshakov V.B. Electromagnetic method and measuring instruments complex of dynamic parameters of liquid medium in ecological monitoring.

A dissertation for the competition of a doctor's degree in the field of the technical specialities 05.11.13 - the devices and methods of control and defence of the environment, matters, materials and articles and 05.11.15 - metrology and metrological assurance. The Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1996.

The results presented in 51 scientific papers, 6 a.c. of the USSR and a patent of Russia have to be defended, which contain the scientific bases, the construction principles and the metrological assurance of multifunctional electromagnetic transducers with a onesided inductor, on the basis of which the measuring instruments complex of a hydrodynamic velocities field, of discharge, of Richardson's number and Väisälä-Brendt frequency has been created and inculcated in the problems of ecological monitoring. The informations about the operation of the equipment is presented.

Большаков В.Б. Электромагнитный метод и комплекс средств измерений динамических параметров жидкостных сред в экологическом мониторинге.

диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.11.13 - приоры и методы контроля и защиты окружающей среды, веществ, материалов и изделий и 05.11.15 - метрология и метрологическое обеспечение. Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1996.

Защищается 51 научная работа, 6 а.с. СССР и патент России, которые содержат научные основы, принципы построения и метрологическое обеспечение многофункциональных электромагнитных преобразователей с односторонним индуктором, на основе которых создан и внедрен комплекс средств измерений гидродинамического поля скоростей, расхода, числа Ричардсона и частоты Вяйсяля-Брента в задачах экологического мониторинга. Приводятся сведения об эксплуатации аппаратуры.

Ключові слова:

электромагнітні вимірювальні перетворювачі, засоби вимірювань, швидкість, рідинний потік, вимірювання, контроль.

446788

*Бобарамел*

4В 34.826  
**АВ 34.826**

---

Підписано до друку 29.04.96 р. Зам. N 714  
Формат 60x84 1/16. Тираж 100 прим.

---

Надруковано на ксероксі ДНВО "Метрологія"  
310002, м.Харків, вул. Мироносицька, 42