

УДК 628.4: 504

## АКУСТИЧНІ МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШОК У РЕЧОВИНІ

В.Д. Погребенник, Е.А. Джумеля

*Національний університет „Львівська політехніка”  
вул. Ген. Чупринки, 130, Львів, 79057, Україна*

Актуальність дослідження обумовлено необхідністю постійного підвищення вірогідності контролю забруднення водних середовищ та розроблення нових вимірювальних засобів та вдосконалення методів контролю параметрів забруднення з метою забезпечення вимог, які все зростають, до якості поверхневих вод. Екологічний контроль стану водних середовищ може здійснюватися на основі визначення інтегральних параметрів, які характеризують вміст органічних та неорганічних домішок. Зміну концентрацій розчинених у воді забруднювальних речовин та завислих частинок можливо досліджувати одночасно декількома методами, як оптичними, так і акустичними, що дасть можливість підвищити чутливість і швидкість визначення концентрацій, розширити динамічний діапазон, вимірювати вміст неорганічних та органічних речовин. Метою роботи є підвищення чутливості вимірювання загальної концентрації домішок у воді.

Методологічну базу дослідження становлять принципи комплексності, достовірності та наукової об'єктивності. Для виявлення стану розробленості теми долучено загальнонаукові методи – порівняння, узагальнення, аналіз, які дали можливість виокремити найсуттєвіше у питаннях створення комп'ютерних систем вимірювання загальної концентрації домішок у речовині, а також забезпечили цілісність розгляду питань.

У проведеному дослідженні виокремлено та проаналізовано методи побудови комп'ютерних систем вимірювання загальної концентрації домішок у речовині, наголошено на їх відмінності від відомих акустичних систем. Наголошено на його визначальному впливі на формування науково-технологічних засад. Запропоновано новий метод визначення загальної концентрації домішок у речовині. Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що запропоновано методи побудови систем загальної концентрації домішок у речовині, які мають підвищену чутливість. Новизну методу визначення загальної концентрації домішок у речовині підтверджено патентом України на винахід.

Системи визначення загальної концентрації домішок у речовині мають непересічне науково-практичне значення для оперативного екологічного моніторингу і контролю забруднення поверхневих вод. Фактичний матеріал, висновки статті можна використати в навчальних курсах з інформаційно-вимірювальних технологій та екологічного контролю.

**Ключові слова:** моніторинг поверхневих вод, концентрація домішок у воді, ультразвуковий сигнал, акустичний перетворювач.

**Вступ.** Екологічний моніторинг і контроль забруднення поверхневих вод займають важливе місце в загальній системі охорони природи і є важливими компонентами вирішення проблеми сталого розвитку суспільства. Проте на даний час теоретичні та практичні аспекти автоматизованого контролю стану водних екосистем розвинуті недостатньо. Водні середовища природних водних об'єктів є складними системами, що містять розчинені неорганічні та органічні речовини, завислі частинки різного походження, водні організми тощо. Підчас забруднення водних об'єктів у них відбувається внесення речовини або енергії, що призводить до зміни функціонування водних екосистем, потоків енергії і речовин, продуктивності та чисельності біологічних популяцій тощо. Забруднення водних середовищ та комплексний антропогенний вплив на водні об'єкти призводить до зміни концентрацій розчинених речовин, що можуть перевищити гранично допустимі значення; зміни концентрацій завислих частинок та співвідношень між об'ємними концентраціями частинок певних типів; зміни чисельності популяцій водних організмів у водних екосистемах. Це призводить до зміни властивостей водного об'єкта та виникнення небезпеки для живих ресурсів екосистеми та здоров'я людини.

Актуальність теми дослідження обумовлено необхідністю постійного підвищення вірогідності контролю забруднення водних середовищ та розроблення нових вимірювальних засобів та вдосконалення методів контролю параметрів забруднення з метою забезпечення вимог, які все зростають, до якості поверхневих вод. Екологічний контроль стану водних середовищ може здійснюватися на основі визначення інтегральних параметрів, які характеризують вміст органічних та неорганічних домішок. Зміну концентрацій розчинених у воді забруднювальних речовин та завислих частинок можливо досліджувати одночасно декількома методами, як оптичними, так і акустичними, що дасть можливість підвищити чутливість і швидкість визначення концентрацій, розширити динамічний діапазон, вимірювати вміст неорганічних та органічних речовин.

#### **Акустичні методи визначення загальної концентрації домішок у воді**

Відомий метод визначення акустичних параметрів матеріалів, який забезпечує ультразвуковий контроль матеріалів вимірюванням часу поширення та поглинання ультразвукових коливань у них [1]. Пристрій для ультразвукового контролю матеріалів описано в [2], основними структурними елементами якого є послідовно з'єднані генератор, акустичний випромінювач, акустичний приймач, підсилювач та детектор. Однак розглянуті метод та пристрій не враховують вплив температури на швидкість поширення ультразвуку в контрольованій речовині, що обмежує їх точність та умови використання.

У [3] описано метод ультразвукового контролю хімічного складу навколишнього середовища та пристрій для його реалізації, який полягає в тому, що визначають хімічний склад середовища вимірюванням часу поширення ультразвуку від ультразвукового випромінювача через середовище з контрольованим хімічним складом до ультразвукового приймача. Далі порівнюють час поширення ультразвуку в контрольованому та еталонному середовищах, тому

виключається вплив температури на точність контролю. Однак цей метод має недостатню чутливість для вирішення багатьох прикладних задач, особливо низьких концентрацій речовин. Також в ньому визначають концентрацію речовин тільки для одного значення концентрації еталонного середовища.

У [4] введено новий інтегральний параметр – загальну концентрацію  $C_{\Sigma}$ :  $C_{\Sigma} = C_S + C_{OR}$  домішок, де  $C_S$  – концентрація неорганічних речовин у воді,  $C_{OR}$  – концентрація органічних речовин у воді. Показано, що вона дає змогу оперативно виявляти рівень забруднення водного середовища. Встановлено зв'язок інтегрального параметра  $C_{\Sigma}$  з параметрами акустичних коливань під час зондування водного середовища з урахуванням впливу температури, тиску і швидкості звуку [5]. За малих (до 10%) концентрацій домішок швидкість звуку можна подати сумою компонентів. Отже, швидкість звуку у воді залежить від швидкості звуку у дистильованій воді  $c_0$  з урахуванням температури  $c_T$ , солей  $c_S$ , тиску  $c_P$ , взаємного впливу температури, солей та тиску  $c_{TSP}$ , вмісту органічних домішок  $c_{OR}$ , впливу повітряних бульбашок  $c_b$  та зависей  $c_z$ , швидкості течії  $c_v$  та нелінійних ефектів  $c_g$ . Найбільше впливає на сумарну швидкість звуку температура.

Для зниження рівня похибок використаємо принцип інваріантності, сформульований академіком Б.М. Петровим [6], який полягає у багатоканальності інваріантних засобів вимірювань.

Інший шлях – створення еталонного каналу, який визначатиме суму кількох компонентів

$$c_{1e} = c_{0e} + c_{Te}, \quad (1)$$

або 
$$c_{2e} = c_{0e} + c_{Te} + c_{Se} \quad (2)$$

або 
$$c_{3e} = c_{0e} + c_{Te} + c_{Se} + c_{ORe}. \quad (3)$$

За виразом (1) в еталонному каналі використовують дистильовану воду; за формулою (2) – воду із заданою концентрацією неорганічних домішок; а за формулою (3) – із заданою концентрацією неорганічних та органічних домішок.

У першому випадку, використовуючи диференційний метод, визначаємо швидкість звуку за виразом

$$c - c_{1e} = c_S + c_P + c_{TSP} + c_{OR} + c_b + c_z + c_v + c_g. \quad (4)$$

У другому випадку

$$c - c_{2e} = Dc_S + c_P + c_{TSP} + c_{OR} + c_b + c_z + c_v + c_g. \quad (5)$$

У третьому

$$c - c_{3e} = Dc_S + c_P + c_{TSP} + Dc_{OR} + c_b + c_z + c_v + c_g. \quad (6)$$

Дещо менший вклад у сумарну швидкість звуку дає швидкість течії, максимальне значення якої становить до 3 м/с. Тому потрібно її враховувати. Тиск впливає на швидкість звуку тільки на великих глибинах; за досліджень забруднення у верхньому (діяльному) шарі води, складник  $c_P$  можна знехтувати. Компоненти  $c_b$  і  $c_z$  за літературними даними не перевищують 0,1 м/с. Ще менші значення складників  $c_{TSP}$  та  $c_g$ .

Отже, обґрунтовано можливість визначення загальної концентрації домішок за різницею швидкостей у досліджуваному та еталонному каналах у водному середовищі.

Розглянемо випадок, коли водне середовище містить тільки неорганічні домішки, тобто розчини солей. Одним з таких середовищ є морська вода. Як вже вказувалося раніше, зараз концентрацію солей у воді обчислюють за формулою Дель-Гроссо, що передбачає вимірювання тиску, температури і швидкості звуку. За цим методом необхідно визначити три термодинамічні параметри води.

Нижче подамо акустичний метод вимірювання домішок у водному середовищі. Швидкість звуку є функція не тільки концентрація солей у воді, але й, чого треба позбутися, температури та глибини. Тому досліджуване та еталонне середовища одночасно опромінювали акустичними хвилями і вимірювали часи поширення сигналів між перетворювачами, розташованими в кожному з них [7]. Відстань між акустичними перетворювачами в обох середовищах однакова і рівна  $L$ .

Швидкість звуку в еталонному  $c_e$  та досліджуваному  $c_d$  середовищах визначають емпіричні вирази

$$c_e = c_0 + b_1 t_e - b_2 t_e^2 + b_3 S_e + b_4 H_e, \quad (7)$$

$$c_d = c_0 + b_1 t_d - b_2 t_d^2 + b_3 S_d + b_4 H_d, \quad (8)$$

де  $c_0$  – швидкість звуку за  $T = 0^\circ\text{C}$ ;  $c_0 = 1410$  м/с;  $H$  – глибина встановлення первинних акустичних перетворювачів, м;  $b_1 = 4,21$ ;  $b_2 = 0,037$ ;  $b_3 = 1,14$ ;  $b_4 = 0,0175$ .

Нехай температура і глибина встановлення первинних акустичних перетворювачів у середовищах однакові, тобто  $t_e = t_d$  і  $H_e = H_d$ . Тоді різниця швидкостей звуку буде пропорційна різниці концентрації солей  $S$  цих рідин:

$$c_d - c_e = b_3(S_d - S_e). \quad (9)$$

Виразимо швидкості  $c_e$  та  $c_d$  через часи поширення звуку  $t_e$  і  $t_d$ :

$$c_e = L/t_e \text{ і } c_d = L/t_d$$

де  $L$  – віддаль між поверхнями відбивань.

Тоді

$$b_3(S_d - S_e) = L(t_e - t_d)/(t_e \times t_d). \quad (10)$$

Якщо еталонною рідиною є дистильована вода (тобто  $S_e = 0$ ), то концентрацію солей визначимо зі співвідношення

$$S_d = L t_x / c(t_e t_d), \quad (11)$$

де  $t_x = t_e - t_d$ .

Отже, щоб визначити концентрацію домішок у воді, потрібно виміряти довжину бази  $L$ , часи поширення акустичних сигналів в еталонному  $t_e$  та дослі-

джуваному  $t_d$  середовищах та їх різницю  $t_x$ . Перевагами пропонованого методу є можливість знайти концентрацію солей у воді в реальному часі, незалежно від температури та тиску води.

Акустичним методом визначають концентрації нерухомих рідин. Тому його можна також рекомендувати для різних технологічних процесів.

Метою роботи є підвищення чутливості вимірювання загальної концентрації домішок у воді.

### **Підвищення чутливості вимірювання загальної концентрації домішок у воді**

Запропонований метод [8] полягає у випромінюванні та прийманні багаторазово відбитого імпульсного ультразвукового сигналу в контрольованій та еталонній речовинах, вимірюванні після однакової кількості  $n$  відбивань часів поширення ультразвукових сигналів та їх різниці в кожній речовині, а концентрацію домішок  $C$  у речовині визначають за формулою:

$$C = KL (t_{xn}) / (t_{en} t_{kn}), \quad (12)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності;

$L$  – віддаль між поверхнями ультразвукового відбивача та ультразвукового випромінювача-приймача;

$t_{en}$ ,  $t_{kn}$  і  $t_{xn}$ , відповідно, часи поширення звуку та їх різниця в еталонному та контрольованому середовищах після  $n$  відбивань.

Сутність запропонованого методу вимірювання концентрації домішок у речовині полягає в наступному.

На рис. 1 показано часові діаграми надходження ультразвукового сигналу, де: а) – зондувальний сигнал; б) – прийнятий сигнал у контрольованій речовині; в) – прийнятий сигнал у еталонній речовині.

На протилежних сторонах контрольованої та еталонної речовини встановлено ультразвукові випромінювачі-приймачі та ультразвукові відбивачі. Ультразвукові імпульсні сигнали заданої амплітуди і частоти випромінюють у напрямку до відбивачів одночасно в кожній з речовин (рис. 1а). Ці сигнали поширюють в контрольованій та еталонній речовинах, багаторазово відбивають від відбивачів та ультразвукових випромінювачів-приймачів, відповідно, через часи  $t_{k1}$ ,  $t_{k2}$ , ...  $t_{kn}$  (рис. 1б) і  $t_{e1}$ ,  $t_{e2}$ , ...  $t_{en}$  (рис. 1в). Вимірюють часи поширення  $t_{kn}$ ,  $t_{en}$  ультразвукових сигналів та їх різницю  $t_{xn}$  в еталонному та контрольованому середовищі після однакової кількості  $n$  відбивань і за формулою (12) обчислюють концентрацію  $C$  домішок у речовині.

Наведемо приклад реалізації способу вимірювання концентрації домішок у водному середовищі.

Швидкість звуку в еталонній  $c_e$  та контрольованій  $c_k$  речовинах визначають вирази:

$$c_e = c_0 + c_{re} \quad (13)$$

$$c_k = c_0 + c_{rk} \quad (14)$$

де  $c_0$  – швидкість звуку у дистильованій воді,  
 $c_{ek}$ ,  $c_{rk}$  – швидкість ультразвуку у домішках.

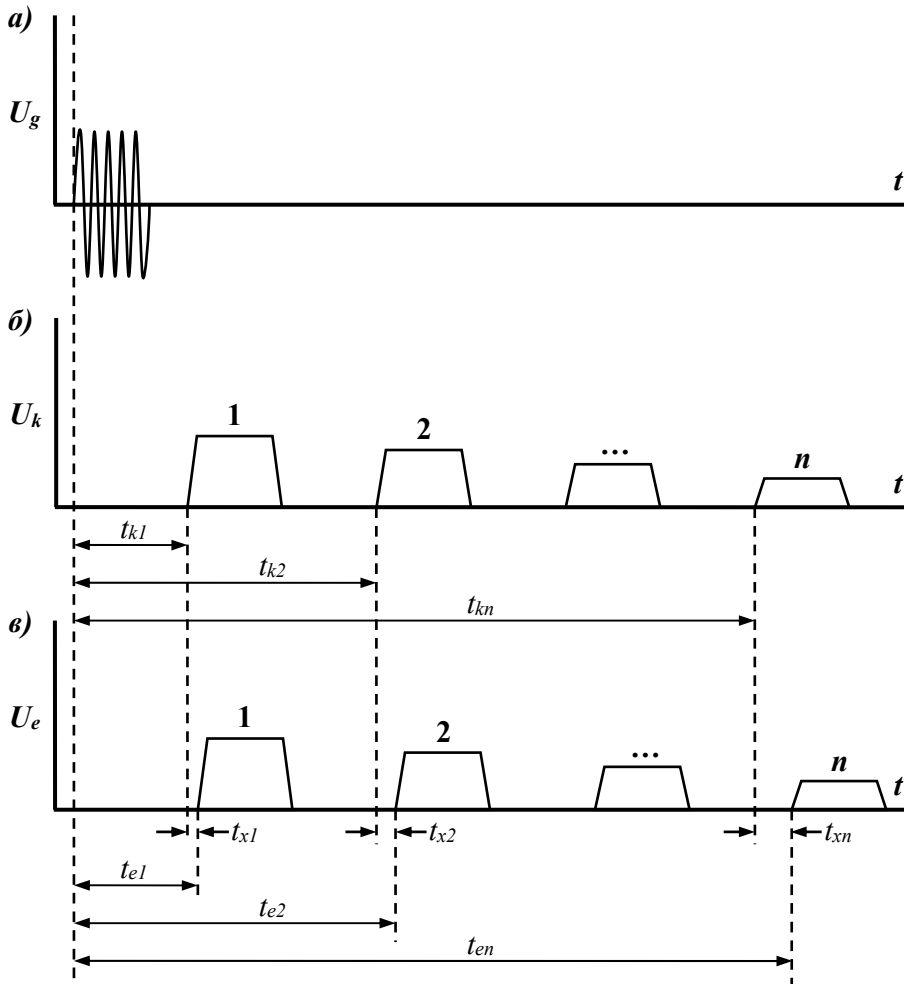


Рис. 1. Часові діаграми роботи пристрою

Тоді різниця швидкостей звуку у контрольованій та еталонній речовинах визначатиметься наявними у них домішками:

$$c_k - c_e = (c_0 + c_{rk}) - (c_0 + c_{re}) = c_{rk} - c_{re} \quad (15)$$

Виразимо швидкості  $c_e$  та  $c_k$  через часи поширення звуку у еталонній та контрольованій речовинах  $t_e$  і  $t_k$ :

$$c_e = \frac{L}{t_e}, \quad c_k = \frac{L}{t_k} \quad (16)$$

де  $L$  – віддаль між поверхнями відбивань.

Тоді, враховуючи (4) і (5) одержимо :

$$c_{\#} - c_e = c_k - c_e = L \cdot \frac{(t_e - t_k)}{t_e \cdot t_k} = L \cdot \frac{t_x}{t_e \cdot t_k}. \quad (17)$$

Якщо еталонною рідиною є дистильована вода, то *при використанні багаторазово відбитого сигналу для визначення концентрації домішок отримаємо вираз (12).*

Пристрій для вимірювання концентрації домішок у речовині реалізовано у вигляді двоканального пристрою, у одному каналі якого знаходиться еталонна речовина, а в іншому – контрольована.

На рис. 2 подано структурну схему пристрою для вимірювання концентрації домішок у речовині, де: 1 – вимірювальний канал з еталонним середовищем; 2 – вимірювальний канал з досліджуваним середовищем; 3, 4 – ультразвукові відбивачі; 5, 6 – ультразвукові випромінювачі-приймачі; 7, 8 – комутатори; 9 – генератор зондування; 10, 11 – підсилювачі, 12, 13 – детектори, 14 – блок вимірювання різниці часів поширення ультразвукових сигналів, 15, 16 – блоки вимірювання часу поширення звуку в контрольованому та еталонному середовищах; 17 – кварцовий генератор; 18, 19, 20 – лічильники імпульсів; 21 – мікроконтролер.

Імпульси з частотою відліків  $f_0$  запускають генератор зондування 9. Електричний імпульс зондування через комутатори 7, 8 надходить на ультразвукові випромінювачі-приймачі 5, 6, які перетворюють його в акустичні імпульси. Ультразвукові імпульсні сигнали заданої амплітуди і частоти випромінюють у напрямку до відбивачів 3 і 4 одночасно в кожному з вимірювальних каналів 1, 2. Ці імпульси поширюються в досліджуваній та еталонній речовинах на базі  $L$ , багаторазово відбиваються від відбивачів 3 і 4, і ультразвукових випромінювачів-приймачів 5 і 6.

Кожного разу при відбиванні від перетворювачів 5, 6 частина енергії звукового імпульсу перетворюється в електричні сигнали, які через комутатори 7 і 8 надходять, відповідно, на послідовно з'єднані підсилювачі 10 і 11 та детектори 12 і 13, вихідні сигнали яких надходять на входи блока вимірювання різниці часів поширення ультразвукових сигналів в обох речовинах 14 та блока 15 часів поширення ультразвуку в еталонній речовині та блока 16 часів поширення ультразвуку в контрольованій речовині.

На виході блоків 14, 15 та 16 формують, відповідно, часові інтервали  $t_{\text{кн}}$ ,  $t_{\text{ен}}$ ,  $t_{\text{хн}}$ , які вимірюють лічильниками імпульсів 18, 19 і 20, на другі входи яких надходять імпульси еталонної частоти  $f_0$  з генератора 17. Ці дані надходять у мікроконтролер 21, який обчислює загальну концентрацію домішок  $C$  у речовині і подає її значення у цифровій формі на персональний комп'ютер.

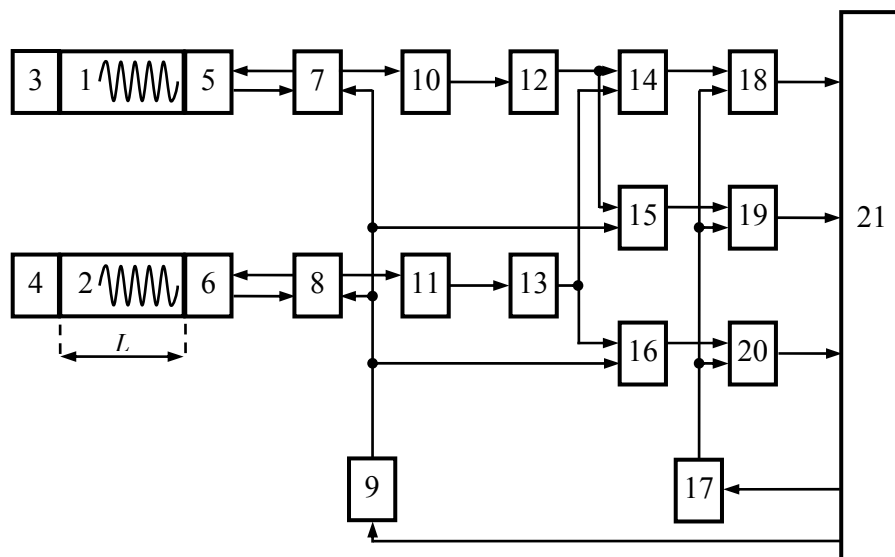


Рис. 2. Структурна схема пристрою для вимірювання концентрації домішок у речовині

Висновки. Запропонований метод вимірювання концентрації домішок у речовині та пристрій для його реалізації забезпечують підвищення чутливості вимірювання та має такі переваги:

- 1) зростання часу поширення ультразвукових сигналів у  $2n$  разів дає змогу за незмінної частоти кварцового генератора у  $2n$  разів підвищити чутливість вимірювання концентрації аналізованої речовини;
- 2) результат вимірювання не залежить від температури речовини;
- 3) дає змогу визначати концентрацію речовин у широкому діапазоні, а в [3] – тільки для одного значення концентрації.

Оскільки час поширення ультразвукових сигналів зростає у  $2n$  разів, то це дає змогу при незмінній частоті кварцового генератора підвищити у  $2n$  разів чутливість способу та пристрою вимірювання концентрації аналізованої речовини, а також визначати у широкому діапазоні концентрацію речовин незалежно від температури.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авторське свідоцтво СРСР № 1682915. Б.Ф. Борисов, А.И. Недбай. Опубл. 07.10.1991, Бюл. 37.
2. Авторське свідоцтво СРСР № 1668936. Р.Ю. Кажис, В.Й. Думбрава, Н.А. Эйдимтас, А.В. Мачикенас. Опубл. 07.08.1991, Бюл. 29.
3. Деклараційний патент на винахід України №33870. П. С. Соченко, О.А. Зеленков, О.М. Зубченко. Опубл. 15.02.2001, Бюл. 1.
4. Погребенник В.Д. Оперативне вимірювання інтегральних параметрів водного середовища та донних відкладів: монографія. – Львів, СПОЛОМ, 2011. – 280 с.
5. Погребенник В.Д., Романюк А.В. Комп'ютерні вимірювально-інформаційні системи для оперативного екологічного моніторингу водного середовища: монографія. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 160 с.



6. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров, В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Наука, 1976. – 242 с.
7. Pohrebennyk V. Improving the accuracy of operative control parameters of water environment / monograph: Water security. – Mukolaiv: PMBSNU – Bristol: UWE, 2016. Editors: prof. Olena Mitryasova, prof. Chad Staddon. – P. 142-154.
8. Патент України на винахід № 116643. Спосіб вимірювання концентрації речовини та пристрій для його реалізації В.Д. Погребенник, В.В. Пташник, Р.С. Крайківський. Опубл. 25.04.2018, Бюл. 8.

### REFERENCES

1. Avtorske svidotstvo SRSR № 1682915. B.F. Borysov, A.Y. Nedbai. Opubl. 07.10.1991, Biul. 37. (in Ukrainian)
2. Avtorske svidotstvo SRSR № 1668936. R.Yu. Kazhys, V.Y. Dumbrava, N.A. Eidymtas, A.V. Machykenas. Opubl. 07.08.1991, Biul. 29. (in Ukrainian)
3. Deklaratsiyni patent na vynakhid Ukrainy №33870. P.S. Sochenko, O.A. Zelenkov, O.M. Zubchenko. Opubl. 15.02.2001, Biul. 1. (in Ukrainian)
4. Pohrebennyk V.D. (2001). Operatyvne vymiriuvannya intehralnykh parametriv vodnoho seredovyshcha ta donnykh vidkladiv: monohrafiia. – Lviv, SPOLOM – 280p. (in Ukrainian)
5. Pohrebennyk V.D., Romaniuk A.V. (2013). Kompiuterni vymiriuvani-no-informatsiini systemy dlia operatyvnoho ekolohichnoho monitorynhu vodnoho seredovyshcha: monohrafiia. – Lviv: Vyd-vo Lvivskoi politekhniki, – 160 s. (in Ukrainian)
6. Printsip invariantnosti v izmeritelnoy tehnikе / B.N. Petrov, V.A. Viktorov, B.V. Lunkin, A.S. Sovlukov. (1976). – М.: Nauka– 242 s. (in Russian)
7. Pohrebennyk V. (2016). Improving the accuracy of operative control parameters of water environment / monograph: Water security. – Mukolaiv: PMBSNU – Bristol: UWE. Editors: prof. Olena Mitryasova, prof. Chad Staddon. – P. 142-154. (in English)
8. Patent Ukrainy na vynakhid №116643. Zaiavka a201507536. Sposib vymiriuvannya kontsentratsii rehovyny ta prystrii dlia yoho realizatsii V.D. Pohrebennyk, V.V. Ptashnyk, R.S. Kraikivskiyi. Opubl. 25.04.2018, Biul. 8. (in Ukrainian)

### ACOUSTIC METHODS FOR MEASURING THE IMPURITIES CONCENTRATION IN SUBSTANCE

V. D. Pohrebennyk, E.A. Dzhumelia  
*Lviv Polytechnic National University*  
130, Gen. Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine  
vpohreb@gmail.com

*The relevance of the research is due to the necessity of continuously increasing the probability of controlling the pollution of water environment and new measuring instruments development and improving the methods of controlling the parameters of pollution to supply growing requirements to the surface water quality. Environmental monitoring of the water environment can be based on the determination of integral parameters that characterize the content of organic and inorganic impurities. Changes in the concentrations of water-dissolved pollutants and suspended particles*

*can be studied simultaneously by several methods, both optical and acoustic, which will enable to increase the sensitivity and speed of concentration determination, expand the dynamic range, measure the content of inorganic and organic substances.*

*The principles of complexity, reliability and scientific objectivity have been the methodological basis of the study, grounded on the priority of documented facts. To identify the state of development of the topic, general scientific methods such as comparisons, generalizations, analysis, which made it possible to distinguish the most significant issues in the creation of computer systems for classification of the object's material, have also been included, as well as ensured the integrity of the consideration of issues.*

*In the conducted research, the methods of constructing computer systems for measuring the total concentration of impurities in a substance have been singled out and analyzed, their differences from the known acoustic systems have been highlighted. It emphasizes its decisive influence on the formation of scientific and technological principles. A new method for determining the total concentration of impurities in a substance has been suggested. The scientific novelty of the obtained results is that the methods of constructing systems of the total concentration of impurities in a substance having high sensitivity have been suggested. The novelty of the method for determining the total concentration of impurities in the substance has been confirmed by the patent of Ukraine for the invention.*

*Systems for determining the total concentration of impurities in a substance have a remarkable scientific and practical value for operational environmental monitoring and control of surface water pollution. Actual material, conclusions of the paper can be used in courses on information and measurement technologies and environmental control.*

**Keywords:** *monitoring of surface water, impurities concentration in water, ultrasonic signal, acoustic converter.*

*Стаття надійшла до редакції 5.06.2018*

*Received 5.06.2018*