

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-44>

УДК 621.317

ЗДОРЕНКО Валерій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6508-4290>

alzd123@meta.ua

ШОЛУДЬКО Кирило

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: kirillsholydko@gmail.com

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНІ ВОДИ

У цій роботі здійснено огляд сучасних методів контролю забруднення поверхні водного середовища, що є актуальною проблемою для екологічного моніторингу. Проаналізовано запатентовані способи, засновані на застосуванні акустичних, радіолокаційних та оптичних принципів. Розглянуто особливості та обмеження кожного з методів, зокрема їх точність, швидкодію, залежність від зовнішніх умов та можливість автоматизації. На основі порівняльного аналізу визначено, що найбільш ефективним і перспективним є метод, що базується на використанні ультразвукових хвиль, який забезпечує безконтактне вимірювання з високою чутливістю. Запропоновано напрямки подальших досліджень, що включають адаптацію методу до реальних умов та розробку мобільної вимірювальної системи. Результати роботи можуть стати основою для створення інноваційних інформаційно-вимірювальних систем контролю забруднення водних поверхонь.

Ключові слова: забруднення поверхні води, екологічний моніторинг, ультразвукові вимірювання, інформаційно-вимірювальна система, водне середовище, методи контролю, безконтактне вимірювання.

ZDORENKO Valeriy, SHOLUDKO Kyrylo

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR CONTROLLING SURFACE WATER POLLUTION

Surface water pollution is one of the key environmental challenges of our time, with both local and global consequences. Microplastics, chemical reagents, and other anthropogenic contaminants not only deteriorate water quality but also disrupt ecosystem functioning, posing a threat to biodiversity and human health. The same applies to films of oily substances. Therefore, ensuring reliable, timely, and accurate monitoring of surface water conditions is of utmost importance.

Modern methods for controlling surface water pollution have a number of limitations, particularly in terms of sensitivity, spatial and temporal resolution, process automation, and accessibility for widespread implementation. Existing laboratory techniques often require significant time for sample analysis, while remote methods do not always provide the required accuracy under complex natural conditions.

Thus, a pressing scientific and practical task arises: to analyze current methods for controlling surface water pollution in order to identify their advantages, limitations, and potential for improvement. This will make it possible to define further research directions in the field of information and measurement technologies for environmental monitoring. Solving this problem will contribute to enhancing the effectiveness of water resource management, reducing ecological risks, and supporting sustainable development.

This work presents a review of modern methods for controlling pollution on the surface of water bodies, which is a pressing issue in the field of environmental monitoring. The study analyzes patented approaches based on acoustic, radar and optical principles. The characteristics and limitations of each method are examined, including accuracy, response speed, dependence on environmental conditions, and potential for automation. Based on a comparative analysis, the most effective and promising approach is identified as the method using ultrasonic waves, which enables non-contact measurement with high sensitivity. The article outlines future research directions, including the adaptation of the method to real-world conditions and the development of a mobile measurement system. The results of this work can serve as a foundation for the creation of innovative information and measurement systems for controlling pollution on water surfaces.

Key words: water surface pollution, environmental monitoring, ultrasonic measurements, information and measurement system, aquatic environment, control methods, non-contact measurement.

Стаття надійшла до редакції / Received 15.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Забруднення поверхні води є однією з ключових екологічних проблем сучасності, що має як локальні, так і глобальні наслідки. Мікропластик, хімічні реагенти та інші техногенні домішки не лише погіршують якість водних ресурсів, але й порушують функціонування екосистем, створюють загрозу біорізноманіттю та здоров'ю людини. Те ж саме стосується і плівок маслянистих речовин зокрема. У зв'язку з цим надзвичайно важливим є забезпечення надійного, оперативного та точного моніторингу стану поверхневих вод.

Сучасні методи контролю забруднення поверхні води мають низку обмежень, зокрема в контексті чутливості, просторової та часової роздільної здатності, автоматизації процесів і доступності для масового

впровадження. Існуючі лабораторні методи часто потребують значного часу для обробки зразків, а дистанційні методи не завжди забезпечують необхідну точність у складних природних умовах.

Таким чином, постає науково-практичне завдання: здійснити аналіз сучасних методів контролю забруднення поверхні води з метою виявлення їхніх переваг, недоліків і потенціалу для вдосконалення. Це, у свою чергу, дозволить сформулювати напрямки подальших досліджень у галузі інформаційно-вимірювальних технологій для екологічного моніторингу. Розв'язання цієї проблеми сприятиме підвищенню ефективності контролю водних ресурсів, зменшенню екологічних ризиків і підтримці сталого розвитку.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є аналіз проблематики контролю забруднення поверхні води, огляд існуючих сучасних методів для його забезпечення, визначення найбільш оптимального методу, який задовольнить поточні потреби.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Забезпечення ефективного екологічного моніторингу стану поверхневих вод потребує не лише визначення джерел і типів забруднень, але й наявності надійних методів для їх кількісного та якісного виявлення. Забруднення на поверхні води можуть мати різну природу – органічну, нафтову, хімічну або біологічну – і проявлятися у вигляді плівок, зважених часток або розчинених речовин. Відповідно, вибір методів контролю має враховувати ці особливості, забезпечуючи високу чутливість, специфічність, швидкість та відтворюваність результатів.

Сучасна наука та техніка пропонують широкий спектр методів для визначення рівня забрудненості водних поверхонь. Вони базуються на різних фізичних явищах – від оптичних [1-2] і акустичних [3-4] до радіолокаційних. Кожен із цих методів має свої переваги й обмеження, які залежать від умов застосування, типу забруднювача, технічної складності обладнання, можливості автоматизації процесу та вартості реалізації. Один із технологічно перспективних підходів до виявлення забруднення поверхні води представлений у патенті [5]. Запропонований метод базується на використанні акустичного сигналу, що випромінюється у водне середовище, з подальшою реєстрацією ревербераційного відгуку від поверхні.

Основною ідеєю методу є те, що наявність нафтової плівки на поверхні води змінює характеристики відбитого акустичного сигналу. Зокрема, інтенсивність поверхневої реверберації значно зростає у порівнянні з фоновим (чистим) сигналом, який в свою чергу залежить від кліматичного сезону (рис. 1, 2). Це дозволяє достовірно визначати наявність нафтових забруднень без фізичного контакту з водною поверхнею.

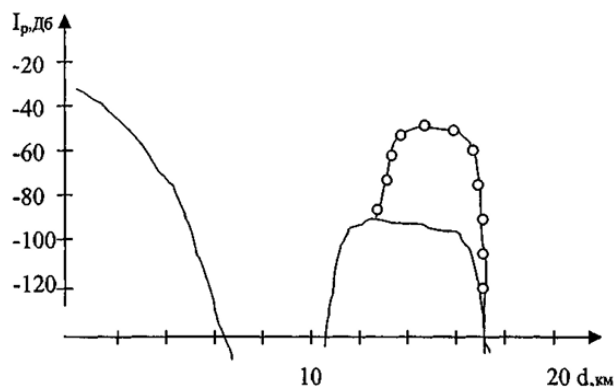


Рис. 1. Діаграма перевищення фонового рівня для літа

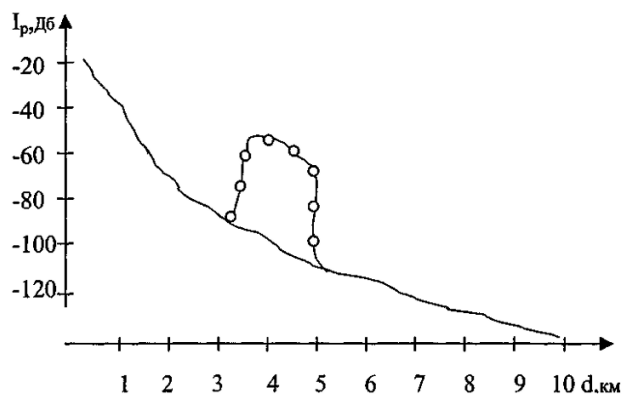


Рис. 2. Діаграма перевищення фонового рівня для зими

Метод має низку переваг:

- забезпечує оперативне виявлення забруднень;
- є безконтактним, що зменшує ризик впливу на досліджуване середовище;
- може бути реалізований у мобільних або автоматизованих системах для екологічного моніторингу.

Проте для точного аналізу сигналу необхідне каліброване акустичне обладнання та налаштування на специфіку конкретного водного об'єкта.

У патенті [6], що ґрунтується на використанні лазерного опромінення для виявлення наявності забруднень на поверхні води. Цей метод належить до оптико-фізичних і дозволяє проводити безконтактний контроль забруднення на значній відстані.

Суть способу полягає в тому, що лазерне випромінювання направляється на поверхню водойми, а реєстрація інтенсивності розсіяного та відбитого світла дозволяє виявити наявність сторонніх речовин (зокрема, нафтопродуктів). При цьому в основі лежить аналіз оптичної неоднорідності забрудненої поверхні у порівнянні з чистою водою. Для підвищення точності обробки сигналу може застосовуватися лазерне сканування з фокусуванням на різні ділянки поверхні.

Серед переваг методу:

- велика зона покриття і можливість обстеження важкодоступних ділянок водойм;
- висока швидкість оцінки стану поверхні;
- неінвазивність і мінімальний вплив на довкілля.

Проте існують і обмеження:

- метод потребує оптичного доступу до поверхні води (прозоре повітря, відсутність туману, пилу тощо);

- точність залежить від зовнішніх умов освітлення та хвилювання води;
- він орієнтований головним чином на якісне виявлення забруднення, без визначення його концентрації чи хімічного складу.

Патент [7] пропонує метод, який ґрунтується на використанні радіолокаційного опромінення для дистанційного виявлення забруднень, зокрема плівок нафтопродуктів, на поверхні морської води.

Суть методу полягає в реєстрації параметрів відбитого радіосигналу, які змінюються у разі присутності забруднень. Супутник з встановленим на ньому багатопробним, наприклад, двопробним, радіолокатором пролітає над контрольованою акваторією і опромінює морську поверхню в смузі огляду спочатку під азимутним кутом α_1 , а потім - під азимутним кутом α_2 , як показано на рис. 3, де приведена геометрія спостережень. Забруднена ділянка води характеризується зменшенням коефіцієнта відбиття радіохвиль у порівнянні з чистою поверхнею через пригнічення короткохвильового хвилювання. Радіолокаційне зображення таких ділянок на моніторі виглядає як темні плями на тлі більш яскравої поверхні.

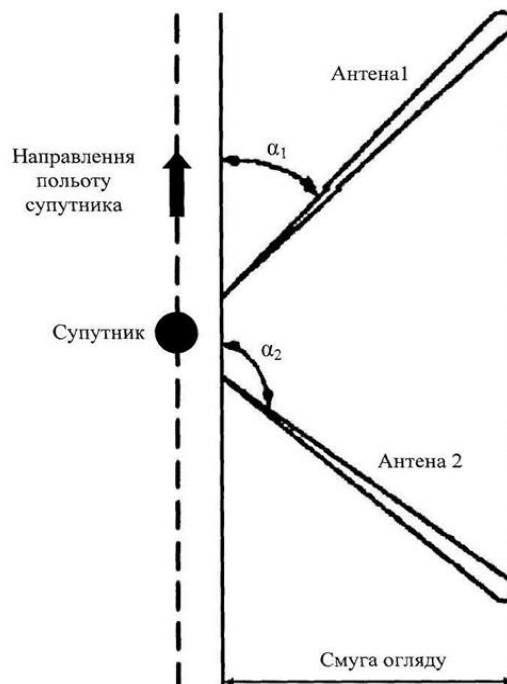


Рис. 3. Геометрія супутникових спостережень

Переваги цього методу:

- великий радіус дії, що дозволяє проводити моніторинг значних площ водної поверхні;
- цілодобове застосування незалежно від освітлення (на відміну від оптичних методів);
- висока швидкість отримання результатів у режимі реального часу.

Серед недоліків слід зазначити:

- чутливість до метеоумов, зокрема сильного вітру чи хвиль, які можуть маскувати забруднення;
- низька роздільна здатність для виявлення тонких або дрібномасштабних забруднень;
- потреба у високовартісному обладнанні, зокрема морських чи супутникових радіолокаційних систем.

Серед усіх проаналізованих методів особливу увагу привертає ультразвуковий метод [8]. Метод базується на принципі аналізу відбиття ультразвукових хвиль від плівки забруднювача, що розташована на поверхні водного середовища [9]. У результаті падіння хвилі на межу «повітря — плівка — вода» відбувається зміна імпедансу, яка залежить від товщини h плівки (рис. 4). Саме цю залежність використано як основу для побудови математичної моделі, що дозволяє розраховувати модуль комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль залежно від товщини шару забруднення (рис. 5).

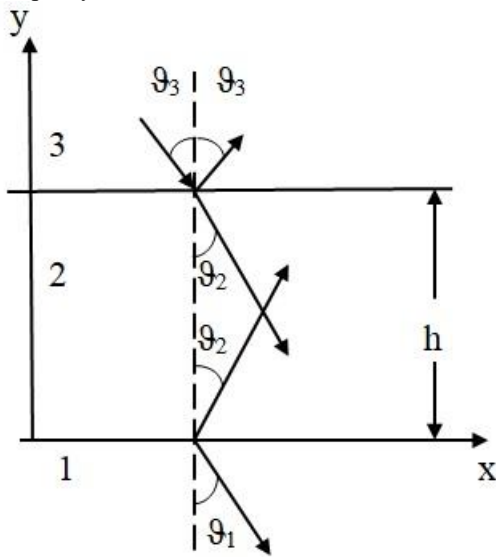


Рис. 4. Відбиття від шару плівки забруднювача та води

- 1 – середовище води;
2 – середовище шару забруднювача
3 – середовище, з якого падає хвиля

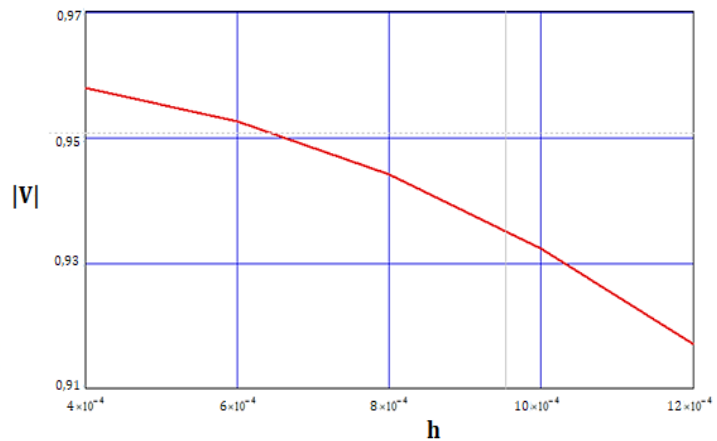


Рис. 5. Залежність модуля $|V|$ комплексного коефіцієнта відбиття хвиль від товщини h плівки на водній поверхні

Метод був реалізований у вигляді комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи (КІВС) із двома каналами — еталонним і вимірювальним. Еталонна комірка заповнена тільки водним розчином, тоді як вимірювальна містить ту саму воду з плівкою забруднювача на поверхні (рис. 6). Порівняння амплітуд відбитих сигналів із обох каналів дозволяє точно визначити товщину плівки з високою чутливістю.

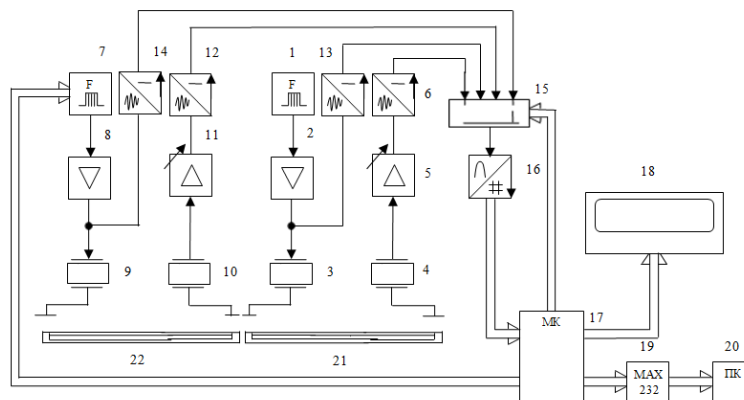


Рис. 6. Структурна схема КІВС вимірювання товщини забруднювача на поверхні водного розчину

Схема, зображена на рис. 6, містить формувач імпульсів 1, підсилювачі 2 і 8, блоки перетворювачів 3 і 4, регульований підсилювач 5, пікові детектори 6, 12, 13 і 14, блок формувача імпульсного сигналу 7, випромінювач 9, приймаючий перетворювач хвиль 10, регульований підсилювач 11, мультиплексор 15, зовнішній аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 16, мікроконтролер (МК) 17, LCD екран 18, мікросхему перетворення логічних рівнів (MAX 232) 19, ПК 20, основну вимірювальну комірку 21 та еталонну комірку 22.

Проведені попередні експериментальні дослідження показали, що орієнтовна похибка не перевищує $\pm 4-5\%$. Отже, ультразвуковий метод вимірювання забруднення на поверхні водного середовища повністю відповідає вимогам до створення майбутньої безконтактної інформаційно-вимірювальної системи контролю забруднення поверхні води.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У ході проведеного дослідження було проаналізовано сучасні методи контролю забруднення поверхні водного середовища.

Порівняльний аналіз виявив, що більшість існуючих методів мають певні обмеження — залежність від погодних умов, необхідність відбору проб, складність та висока вартість обладнання. У цьому контексті найбільш перспективним виявився метод, заснований на використанні ультразвукових хвиль, що дозволяє безконтактно, з високою чутливістю та точністю визначати наявність забруднюючої плівки.

Цей метод демонструє високу надійність у лабораторних умовах, придатний до автоматизації та подальшої інтеграції у мобільні або стаціонарні екологічні моніторингові системи.

У перспективі доцільно зосередити подальші дослідження на:

- адаптації методу до польових умов і мінливих характеристик водних об'єктів;
- розробці прототипу безконтактної інформаційно-вимірювальної системи з можливістю віддаленого керування та передавання даних у реальному часі.

Результати даного огляду закладають підґрунтя для вдосконалення технологій екологічного моніторингу водних ресурсів і розробки нових технічних рішень у сфері охорони довкілля.

Література

1. Born, M., & Wolf, E. (1999). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th ed.). Cambridge University Press.
2. Goodman, J. W. (2005). Introduction to Fourier Optics (3rd ed.). Roberts & Company Publishers.
3. Луцик Я., Буняк Л., Стадник Б. Застосування ультразвукових сенсорів. – Львів: СП «БаК», 1998. – 232 с. ISBN 966-7065-07-3
4. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: підруч. для студ. вищ. навч. закл. спец. "Прилади та системи неруйнівного контролю" / В. К. Цапенко, Ю. В. Куц. - К. : [НТУУ "КПІ"], 2010. - 439, [7] с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 417-420. - ISBN 978-966-196-000-7
5. Патент № 47201Ф (Україна). Спосіб виявлення нафтових забруднень на водній поверхні / М.М. Дівізінюк, С.М. Дівізінюк, В.О. Лазаренко, В.П. Черненко. – Надрук. в Бюл., 17.06.2002. – № 7.
6. Патент № 75804 (Україна). Спосіб дистанційного визначення забруднення поверхні відкритих водоймищ / Запєвалов О.С. – Надрук. в Бюл., 15.06.2006. – №6.
7. Патент № 92845 (Україна). Спосіб радіолокаційного визначення забруднення морської поверхні / Запєвалов О.С. – Надрук. в Бюл., 10.06.2009. – №11.
8. Шолудько К.А., Здоренко В.Г. Метод вимірювання забруднення поверхні води. *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні*: матеріали XX Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 04—05 груд. 2024 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. Київ, 2024. С. 283—285.
9. Шолудько К.А., Корень Р.Т., Барилко С.В. Вимірювання відхилення поверхневої щільності і товщини матеріалу полімерної плівки. *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні*: матеріали XIX Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 20—21 груд. 2023 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. Київ, 2023. С. 332—334.

References

1. Born, M., & Wolf, E. (1999). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th ed.). Cambridge University Press.
2. Goodman, J. W. (2005). Introduction to Fourier Optics (3rd ed.). Roberts & Company Publishers.
3. Lutsyk, Ya., Bunyak, L., & Stadnyk, B. (1998). Application of Ultrasonic Sensors. Lviv: SP "BaK". ISBN 966-7065-07-3.
4. Tsapenko, V. K., & Kuts, Yu. V. (2010). Fundamentals of Ultrasonic Non-Destructive Testing: A textbook for university students majoring in "Devices and Systems for Non-Destructive Testing". Kyiv: NTUU "KPI". ISBN 978-966-196-000-7.
5. Divizinyuk, M. M., Divizinyuk, S. M., Lazarenko, V. O., & Chernienka, V. P. (2002). Method for Detecting Oil Pollution on the Water Surface: Patent of Ukraine No. 47201. Published in Bulletin No. 7, June 17, 2002.

6. Zapevalov, O. S. (2006). Method for Remote Detection of Pollution on the Surface of Open Water Bodies: Patent of Ukraine No. 75804. Published in Bulletin No. 6, June 15, 2006.
7. Zapevalov, O. S. (2009). Method for Radar Detection of Pollution on the Sea Surface: Patent of Ukraine No. 92845. Published in Bulletin No. 11, June 10, 2009.
8. Sholudko, K. A., & Zdorenko, V. H. (2024). Method for Measuring Surface Water Pollution. In Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation: Proceedings of the 20th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (Kyiv, December 4–5, 2024). Kyiv: Igor Sikorsky KPI, Faculty of Instrumentation Engineering, pp. 283–285.
9. Sholudko, K. A., Koren, R. T., & Barylko, S. V. (2023). Measurement of Surface Density Deviation and Thickness of Polymer Film Material. In Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrumentation: Proceedings of the 19th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (Kyiv, December 20–21, 2023). Kyiv: Igor Sikorsky KPI, Faculty of Instrumentation Engineering, pp. 332–334.