

*Д.В. СТАДНИК, О.Б. ГАЛАТ, канд. фіз.-мат. наук*

## **АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ПОЛЬОВОГО МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДИ**

### **Вступ**

У сучасному світі зростає потреба у безперервному та високоточному моніторингу якості водних ресурсів, адже чистота води є ключовим чинником для збереження здоров'я людини, екосистем та соціально-економічного розвитку. Традиційні методи аналізу якості води, такі як хімічні аналізи чи вимірювання за допомоги стандартних турбідиметрів, хоч і забезпечують високу точність, проте часто є витратними, вимогливими до умов експерименту та не дозволяють проводити моніторинг у режимі реального часу.

За останні десятиліття доцільність застосування волоконно-оптичних сенсорів у цьому була доведена численними дослідженнями [1–5]. Завдяки таким властивостям, як висока чутливість, компактність, стійкість до електромагнітних завад та можливість організації мультиплексованих або розподілених систем вимірювань, волоконно-оптичні сенсори відкривають нові перспективи у галузі екологічного моніторингу [2]. Зокрема варто відмітити успішне застосування цих сенсорів для моніторингу якості води та повітря, що є важливим кроком до впровадження ефективних систем раннього сповіщення у випадках погіршення якості води [3].

Існуючі стандартні турбідиметри, що працюють за ISO-7027, забезпечують точність вимірювань приблизно 0,1 NTU, проте вимагають відбору проб і тривалої підготовки. Волоконно-оптичний комплекс дозволяє здійснювати онлайн-контроль якості води з чутливістю до 0,01 NTU безпосередньо в середовищі експерименту.

Сучасний стан досліджень характеризується впровадженням інноваційних підходів до побудови сенсорних систем. Наприклад, використання технологій на основі волоконно-оптичних сенсорів для визначення турбідності дозволяє не лише оперативно визначити рівень заміщених частинок у воді, а й здійснювати моніторинг у важкодоступних місцях завдяки високій гнучкості волоконної технології [3]. Застосування сенсорів на основі явища спектральної інтерференції, зокрема сенсору з використанням волоконних ґраток Брэгга (FBG), надає можливість точного вимірювання параметрів, які залежать від змін тиску та температури, що особливо важливо в природніх умовах.

У представленій роботі розглянуто принцип дії оптичного сенсора, виконано моделювання оптичних характеристик сенсора на основі D-подібного волокна за допомоги аналітичних співвідношень.

Обґрунтовано вибір конструкції датчика, отримано залежності вихідних характеристик чутливого елемента від параметрів зовнішнього середовища, визначено діапазони вимірювань з максимальною чутливістю.

Таким чином, робота спрямована на розширення можливостей сучасних технологій моніторингу якості води шляхом інтеграції інноваційних волоконно-оптичних сенсорів у систему безперервного контролю, що може стати важливим елементом у сфері екологічного моніторингу та управління водними ресурсами.

### **Принцип роботи волоконно-оптичних сенсорів та вибір конфігурації сенсора**

У волоконно-оптичних сенсорах контролю турбідності вимірювання базується на явищі повного внутрішнього відбиття (ПВВ) і взаємодії еванесцентного поля випромінювання, що поширюється оптоволоконном, з речовиною поза межами волокна. Якщо досліджувана рідина (вода) містить зайві частинки, еванесцентне поле взаємодіє з ними: частинки поглинають та розсіюють хвилю. Внаслідок цього частина енергії світла, що розповсюджується у волокні,

не повертається до сердечника у процесі відбиття від поверхні волокна, а поглинається або розсіюється у воді, що зменшує інтенсивність вихідного сигналу.

Якщо навколишнє середовище є поглинаючим, то інтенсивність еванесцентної хвилі зменшується, приводячи до зменшення потужності, що поширюється у волокні [4]. За відповідних умов мікрочастинки в товщі води локально розсіюють поляризовані еванесцентні хвилі біля поверхні волокна, що сильно змінює оптичний відгук сенсора (звужуючи або зменшуючи резонансні піки в спектрі пропускання) [5]. Отже, при підвищенні турбідності (збільшенні концентрації зважених частинок) падає інтенсивність передачі волоконного сигналу через посилене розсіювання або поглинання еванесцентним полем.

Кількість відбиттів світла всередині волокна збільшує ефект послаблення: чим довший шлях у зони контакту з водою, тим більше взаємодій і втрат. В експериментальних моделях показано, що вихідна потужність спадає із збільшенням довжини взаємодії та концентрації частинок:

$$P(l) = P_0 \exp(-\gamma Cl), \quad (1)$$

де  $l$  – довжина зони без покриття;  $C$  – концентрація зважених частинок,  $\gamma$  – коефіцієнт еванесцентного поглинання [7].

Таким чином, сенсор фактично виконує роль АТР спектроскопа: будь-яке додаткове поглинання чи розсіювання у зовнішньому середовищі призводить до падіння інтенсивності в сердечнику.

Еванесцентне поле проникає зазвичай досить близько від поверхні волокна (глибина проникнення  $\delta$  не перевищує кілька сотень нанометрів) і тому «опитує» лише тонкий шар рідини. Частилки із фракції глибше цього шару не впливають безпосередньо на поле, що робить сенсор локальним і нечутливим до дальшого тла. При цьому дисперговані частинки (глини, мікроорганізми, мул) у зоні еванесцентного поля взаємодіють з ним: вони викликають локальне розсіювання (чи поглинання) світла.

Саме збільшення концентрації частинок безпосередньо у цьому шарі призводить до пропорційного зменшення інтенсивності еванесцентної хвилі.

Локальне розсіювання невеликими частинками на поверхні волокна різко змінює спектральні резонанси датчика [5]. В цілому взаємодія еванесцентного поля з зваженими частинками призводить до редукції сигналу пропорційно концентрації цих частинок.

Для вимірювання турбідності застосовують різні конструктивні рішення, що підвищують ефективність взаємодії світла з рідиною [6]. Розглянемо основні із них:

Оголене волокно – традиційний варіант, при якому знімають захисне покриття і частину оболонки волокна. Це відкриває сердечник для прямого взаємодії з середовищем. Як показано в дослідженнях [6], вигнутий або увігнутий сегмент з видаленою оболонкою фактично поводить як відрита ділянка волокна, що використовується в еванесцентних сенсорах.

D-подібне волокно – бічне шліфування волокна до утворення плоскої поверхні (форма літери D) дозволяє наблизити сердечник до зовнішнього середовища. Така конфігурація забезпечує більшу площу контакту світла з навколишньою водою, збільшуючи чутливість сенсора.

Конусне (втягнуте) волокно – звуження діаметра волокна в зоні вимірювання до субміліметрових розмірів значно збільшує роль еванесцентного поля. Зменшення діаметра волокна приводить до того, що відповідно збільшується зона еванесцентного поля. Це явище підвищує чутливість до зміни зовнішнього показника заломлення.

Багатократні вигини та петлеві ділянки – U-подібні, спіральні або концентричні петлі волокна збільшують кількість відбиттів на одиницю довжини, тобто множать проходження еванесцентного поля через середовище. Це еквівалентно збільшенню довжини взаємодії без суттєвого подовження волокна.

Після ретельного аналізу варіантів сенсору для моделювання було вибрано D-подібне волокно.

В якості джерел світла в сенсорах турбідності зазвичай використовують стабільні лазерні діоди або світлодіоди з обраною довжиною хвилі. На виході застосовують фотоприймачі (фотодіоди або фотометри), які вимірюють потужність переданого світла.

Приймач зазвичай оснащено оптичними фільтрами з вузькою смугою пропускання, щоб відсіяти фонове освітлення та залишити лише ту довжину хвилі, що використовується для вимірювання. Напруга або струм фотодетектора перетворюються в цифровий сигнал, який далі обробляють. Зазвичай використовується калібрування системи на еталонних зразках води із відомою турбідністю: вивчається залежність фотосигналу від концентрації зважених частинок, після чого реальні покази перетворюють у значення турбідності (в NTU або інших одиницях).

### Моделювання волоконно-оптичного сенсора на основі D-подібного волокна

На рис. 1 наведено конструкцію досліджуваного волоконно-оптичного сенсора, геометричні та оптичні параметри якого використано як вихідні дані для чисельного моделювання. Сенсор виконано на основі одномодового кварцового волокна з діаметром серцевини 9 мкм і оболонки 125 мкм. Центральна ділянка довжиною 20 мм зазнала D-подібного шліфування, внаслідок чого товщина залишеної оболонки становить 3 мкм. У цю ділянку поміщають досліджуване середовище, яке безпосередньо контактує з еванесцентним полем випромінювання.

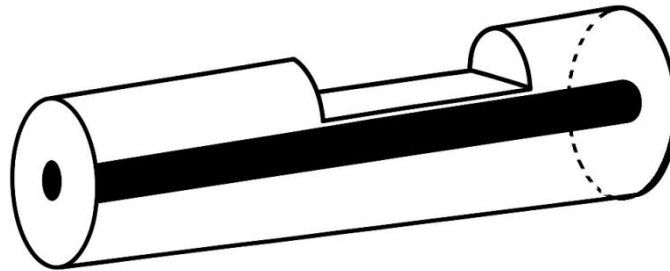


Рис. 1. Схема волоконно-оптичного сенсора та його основні параметри, використані при моделюванні

У якості джерела випромінювання використовуємо лазерний діод з довжиною хвилі 980 нм і вихідною потужністю 5 мВт. Промінь поширюється під кутом, що забезпечує умови повного внутрішнього відбиття, а еванесцентна складова хвилі взаємодіє з середовищем із показником заломлення  $n_2$ . Зміна  $n_2$  призводить до варіацій коефіцієнтів відбиття на межі серцевина–оболонка та оболонка–зовнішнє середовище, що безпосередньо впливає на вихідну оптичну потужність.

Таке виконання сенсора обране через його високу чутливість до змін показника заломлення рідини, що дозволяє проводити моніторинг концентрації розчинених речовин. Для кількісного аналізу використовували комбінацію аналітичних розрахунків (формули Френеля, критичний кут, глибина проникнення). Математичне моделювання виконувалось у середовищі Mathcad.

Для розрахунків як варійований параметр обрано солоність води, оскільки вона безпосередньо впливає на показник заломлення зовнішнього середовища, що визначає умови повного внутрішнього відбиття. Крім того, солоність є одним із базових показників якості води, який легко калібрувати за допомогою еталонних розчинів, що робить її зручною для експериментальної перевірки та практично значущою для екологічного моніторингу.

Солоність води ( $C$ ) безпосередньо впливає на показник заломлення за емпіричною формулою [6]:

$$n_2 = n_0 + kc \cdot C, \quad (2)$$

де  $n_0 = 1,333$  – показник преломлення чистої води;  $k_c = 0,0019$  – емпіричний коефіцієнт, отриманий з експериментальних даних;  $C$  – солоність води. Значення  $C$  варіювалося від 5 до 100 г/л.

Збільшення солоності підвищує показник заломлення води. Наприклад, для морської води ( $C = 35$  г/л)  $n_2 \approx 1.339$ , що на 0.45 % вище, ніж у прісної води. Ця зміна критично впливає на умови повного внутрішнього відбиття.

Критичний кут ПВВ ( $\theta_{\text{крит}}$ ) залежить від співвідношення показників заломлення серцевини волокна ( $n_1 = 1.492$ ) та середовища ( $n_2$ ) [8]:

$$\theta_{\text{крит}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (3)$$

Графік залежності  $\theta_{\text{крит}}$  від  $C$  показує майже лінійне зростання: при  $C = 5$  г/л  $\theta_{\text{крит}} \approx 68^\circ$ , а при  $C = 100$  г/л  $\theta_{\text{крит}} \approx 90^\circ$ . Це свідчить про те, що зі зростанням концентрації солей більша частина променів залишається всередині серцевини, що потенційно підвищує чутливість датчика.

Зі зростанням показника заломлення зовнішньої середовища  $n_2$  критичний кут також зростає – від близько  $63^\circ$  при низькій солоності до приблизно  $84^\circ$  при  $C \approx 80$ , наближаючись до  $90^\circ$  (рис. 2), що свідчить про зниження ефективності повного внутрішнього відбиття та посилення втрат енергії при вищому вмісті солей.

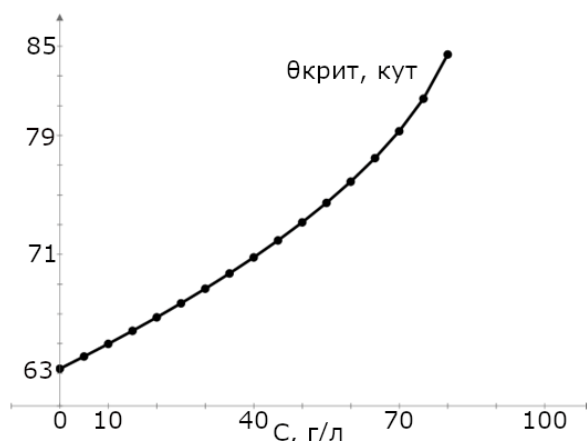


Рис. 2. Залежність показника солоності зовнішнього середовища та критичного кута повного внутрішнього відбиття  $\theta_{\text{крит}}$

Для аналізу відбиття світла на границі «волокно–рідина» обчислено коефіцієнти відбивання для двох варіантів поляризації світлового променя за формулами Френеля [8]:

$$R_{\text{per}} = \left( \frac{n_2 \cdot \cos\theta - \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cdot \sin^2\theta}}{n_2 \cdot \cos\theta + \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cdot \sin^2\theta}} \right)^2, \quad (4)$$

$$R_{\text{par}} = \left( \frac{n_1 \cdot \cos\theta - \frac{n_2^2}{n_1} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cdot \sin^2\theta}}{n_2 \cdot \cos\theta + \frac{n_2^2}{n_1} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \cdot \sin^2\theta}} \right)^2,$$

де  $\theta = 70^\circ$  – обрано близьким до середнього кута розповсюдження променів у серцевині.

На графіках залежностей  $R_{\perp}$  та  $R_{\parallel}$  від  $C$  (рис. 3) спостерігається їхнє монотонне зменшення до моменту досягнення умови порушення повного внутрішнього відбиття. Діапазон зміни вказаних коефіцієнтів дає можливість стверджувати, що сенсор з використанням поляризованого випромінювання забезпечить достатньо високу точність вимірювань. До того ж

використання двох типів поляризації розширює функціональні властивості вимірювальної системи.

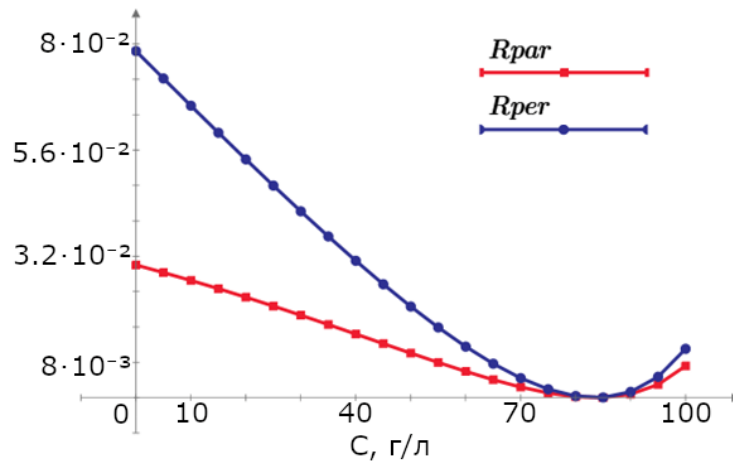


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів відбиття Френеля для перпендикулярної та паралельної поляризації від показника солоності зовнішнього середовища

Зміни  $R_{per}$  та  $R_{par}$  визначають ефективність кожного відбиття променя на межі "серцевина-середовище", що при багатократному повторенні (до 6 разів на 2 мм волокна) призводить до кумулятивних втрат потужності. Цей ефект кількісно описується моделлю [8]:

$$P = P_0 \cdot \left( \frac{R_{per} + R_{par}}{2} \right)^k, \quad (5)$$

де  $P_0$  – початкова потужність світла;  $k = \frac{L}{d \cdot \tan \theta} \approx 6$  – кількість відбиттів (для  $L = 2$  мм,  $d = 980$  мкм,  $\theta = 70^\circ$ ).

Графік залежності вихідної потужності  $P$  від солоності  $C$  демонструє, що інтенсивність світла на виході волоконно-оптичного сенсора зменшується зі зростанням солоності середовища (рис. 4).

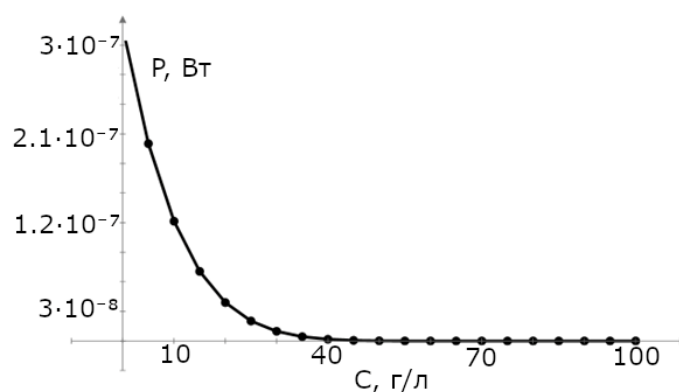


Рис. 4. Залежність відносної потужності світла  $P$  у волокні від солоності води  $C$

Зі зростанням концентрації солей у воді від  $C = 0$  до  $C = 100$  г/л відносна потужність вихідного сигналу  $P$  зменшується з приблизно  $3.3 \times 10^{-7}$  до  $3 \times 10^{-10}$  Ват – тобто на три порядки величини. Найбільш інтенсивне (майже 99,9%) зниження відбувається в межах  $C = 0 - 40$  г/л, коли потужність падає з  $3,3 \times 10^{-7}$  Ват до близько  $2 \times 10^{-8}$  Ват.

Поява такого стрімкого гасіння обумовлена поступовим порушенням умов повного внутрішнього відбиття: при  $C > 36,3$  г/л фіксований кут падіння  $\theta = 70^\circ$  стає меншим за кри-

тичний, і кожне відбиття супроводжується частковим заломленням у зовнішнє середовище. Зростаючі втрати енергії призводять до стрімкого зменшення рівня сигналу (порядку  $10^{-10} \dots 10^{-9}$  Вт) вже за  $C > 60$  г/л, що вимагає застосування надчутливих фотодетекторів. Завдяки ж формі функції залежності  $P(C)$  у цьому діапазоні сенсор чітко реагує навіть на незначні коливання солоності ( $\Delta C \approx 1 - 5$  г/л), роблячи його ідеальним для моніторингу прісної та слабосолоної води в річках, озерах і прибережних зонах.

Падіння потужності, демонстроване на рис. 4, безпосередньо пов'язане зі зміною просторової структури еванесцентного поля. Крім втрат енергії, зростання показника заломлення  $n_2$  суттєво впливає на глибину проникнення поля у середовище  $\delta$ , що визначає товщину шару води, який "опитує" сенсор. Цей параметр розраховується за формулою [8]:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \sqrt{\sin^2 \theta - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}, \quad (6)$$

де  $\lambda = 980$  нм – довжина хвилі ІЧ-лазера;  $\theta = 70^\circ$  – кут падіння;  $n_1 = 1.492$  – показник заломлення серцевини волокна.

Графік, наведений на рис. 5, візуалізує розрахункові значення  $\delta$ , отримані за допомоги цієї моделі.

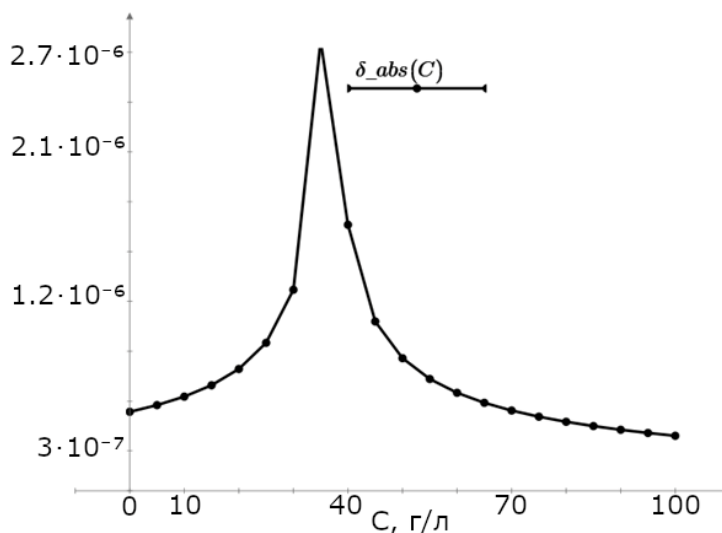


Рис. 5. Залежність глибини проникнення еванесцентного поля  $\delta$  від солоності води  $C$

Залежність глибини проникнення еванесцентного поля  $\delta$  від концентрації солі  $C$  виявляє немонотонну поведінку: при зростанні  $C$  до  $\approx 30$  г/л  $\delta$  поступово збільшується, досягаючи різкого максимуму (розрив функції) поблизу  $C \approx 35$  г/л, що відповідає наближенню показника заломлення зовнішнього середовища до критичного значення  $n_2 \approx n_1 \cdot \sin \theta$  і практичній втраті умов повного внутрішнього відбиття, після чого за подальшого підвищення солоності ( $>35$  г/л)  $\delta$  знижується до  $\sim 4 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-7}$  м. Цей ефект підкреслює високу чутливість сенсора в діапазоні 30–40 г/л і відкриває можливість змінювати діапазон високої чутливості сенсора шляхом зміни кута падіння променю на чутливу поверхню.

Таким чином, проведене моделювання підтверджує здатність до виявлення змін турбідності та високу чутливість волоконно-оптичного сенсора. Також наведено практичні варіанти фізичних та оптичних параметрів для розглянутої конфігурації.

### Порівняльний аналіз, обмеження та перспективи застосування волоконно-оптичних сенсорів у моніторингу якості води

Волоконно-оптичні сенсори мають кілька принципових переваг порівняно з традиційними лабораторними методами контролю якості води. По-перше, вони дозволяють здійснювати безперервний моніторинг у режимі реального часу, що усуває потребу у частому відборі

проб і дає змогу оперативно фіксувати швидкоплинні зміни якості середовища. По-друге, компактність та гнучкість оптичних волокон роблять можливим розгортання розподілених мереж вимірювальних ділянок уздовж одного волокна, що є важливою характеристикою для масштабних та віддалених систем моніторингу. Додатковою перевагою є відносна нечутливість таких сенсорів до електромагнітних завад, що підвищує стабільність показів у промисловому оточенні.

Одночасно з перевагами виникають і системні обмеження, обумовлені як фізичними властивостями оптичного поля, так і реальними умовами експлуатації. По-перше, робота сенсора значною мірою залежить від оптичних умов на межі «волокно–середовище»: зміни показника заломлення середовища можуть істотно змінювати характер відбиття та проникнення еванесцентного поля. Це означає, що при певних умовах сенсор може втрачати частину ефективності або переходити в режим, коли сигнал сильно затухає. По-друге, мала глибина проникнення еванесцентного поля робить сенсор дуже локальним – він відображає властивості лише приповерхневого шару води, що одночасно є перевагою для виявлення місцевих аномалій і обмеженням, якщо потрібна інформація про об’ємні зміни.

Практичні проблеми польової експлуатації також заслуговують окремої уваги. Зовнішнє освітлення, механічні вібрації, температурні флуктуації та накопичення біологічних або мінеральних відкладень на чутливій ділянці призводять до зміни базового рівня сигналу або до поступового зниження чутливості. Тому для забезпечення довготривалої та коректної роботи необхідні інженерні заходи: екранування оптичного тракту від паразитного світла, механічне фіксування або захист волокна від потоку, інтеграція температурної компенсації та заходи щодо запобігання або видалення нальоту.

Розрахунки показали, що зміни в оптичних властивостях середовища призводять до суттєвих змін у відгуку сенсора. Навіть помірні зміни властивостей зовнішнього середовища можуть викликати значне послаблення вихідного сигналу. При цьому розрахунки також виявили «області підвищеної вразливості»: існує певний інтервал умов, у якому сенсор реагує особливо гостро (тобто невеликі зміни середовища дають великі зміни сигналу), але одночасно це створює ризик швидкого зниження вихідного рівня сигналу за умови переходу через граничні умови. Іншими словами, модель підтвердила, що сенсор дуже добре «відчуває» малі зміни у типових (прісних/слабосолоних) умовах, але при певних зовнішніх параметрах його робоча точка може наблизитися до стану, коли сигнал стає дуже малим і вимірювання ускладнюються.

Що стосується впровадження та масштабування, поєднання волоконно-оптичних сенсорів із сучасними телекомунікаційними та IoT-платформами створює очевидні переваги. Автономні модулі з передачею даних у реальному часі, суміщені з хмарною аналітикою й алгоритмами машинного навчання, здатні підвищити точність діагностики, виявляти аномалії і адаптивно налаштовувати параметри сенсорів під змінні умови. Алгоритмічні підходи дозволяють також коригувати нелінійні відгуки сенсорів і зменшувати вплив перешкод, що робить систему більш надійною в польових умовах.

Отже, волоконно-оптичні сенсори є перспективною технологією для польового моніторингу якості води: вони поєднують високу чутливість і можливість розподіленого вимірювання, але вимагають продуманих інженерних рішень і алгоритмічної обробки для компенсації реальних факторів, які впливають на роботу в польових умовах. Проектування системи з урахуванням цих обмежень робить такі сенсори ефективним інструментом для інтеграції у сучасні мережі екологічного моніторингу.

## Висновки

Проведені теоретичні розрахунки та чисельне моделювання підтвердили, що D-профільне волоконно-оптичне рішення є придатним інструментом для високочутливого локального моніторингу турбідності. Модель показала: сенсор «опитує» лише приповерхневий шар рідини за рахунок еванесцентного поля, що дає високу селективність до зважених

частинок і істотно зменшує вплив об'ємного тла. Одночасно виявлено наявність вузького інтервалу оптичних умов, у якому чутливість зростає особливо помітно; вихід за ці межі приводить до різкого падіння сигналу – цей факт визначає робочий діапазон і диктує вимоги до приймальної частини.

З технічної точки зору результати впливають на саму конструкцію та експлуатацію пристрою. Проектування має враховувати локальність вимірювання: потрібне калібрування на еталонних розчинах, температурна корекція та відсікання фонових оптичних завад. Надійну роботу гарантує синергія апаратних рішень: вузькосмугові фільтри, опорні канали, температурні датчики, а також алгоритмічна обробка вихідного сигналу, яка компенсує нелінійності відгуку та флуктуації джерел світла.

Польова експлуатація вимагає інженерних рішень для захисту чутливої ділянки: покриття, що запобігають налипанню, організовані сервісні процедури очищення та механічний захист від потоку й вібрацій. Для підвищення надійності доцільно інтегрувати елементи самоочищення або відпрацювати зручні серійні процедури технічного обслуговування. Використання мультиплексування та розподіленого розміщення сенсорів знижує ризик втрати даних через локальні артефакти й підвищує відмовостійкість мережі.

Інтеграція сенсорних вузлів у мережеві архітектури з передачею даних у реальному часі та централізованою аналітикою суттєво підвищує інформативність системи. Поєднання волоконно-оптичних даних із алгоритмами машинного навчання дозволяє коригувати нелінійні відгуки, автоматично виявляти аномалії й адаптивно налаштовувати режими роботи. Така аналітична прошивка спрощує калібрування в польових умовах і дає змогу масштабувати мережу, переміщуючи частину обчислень до хмари або на крайові шлюзи.

#### Список літератури:

1. Стаднік Д. В., Галат О. Б. Моніторинг навколишнього середовища з використанням волоконно-оптичних сенсорів // 29-й Міжнар. молодіж. форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті»: зб. матеріалів форуму. Т. 1. Харків: ХНУРЕ, 2025. С.87–89.
2. D. Lyu, Q. Huang, X. Wu, Y. Nie and M. Yang. Optical fiber sensors for water and air quality monitoring: a review // *Optical Engineering*. 2023. Vol. 63, no. 3. Nov. 2023. doi: 10.1117/1.OE.63.3.031004.
3. C. T. Vu, A. A. Zahrani, L. Duan and T. Wu. A Glass-Fiber-Optic Turbidity Sensor for Real-Time In Situ Water Quality Monitoring // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 16. P. 7271. doi: 10.3390/s23167271.
4. Z. Xiao-hong, L. Lan-hua, X. Wei-qi et al. A reusable evanescent wave immunosensor for highly sensitive detection of bisphenol A in water samples // *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4. P. 4572. doi: 10.1038/srep04572.
5. C. T. Vu, A. A. Zahrani, L. Duan and T. Wu. A Glass-Fiber-Optic Turbidity Sensor for Real-Time In Situ Water Quality Monitoring // *Sensors (Basel)*. 2023. Vol. 23, no. 16. P. 7271. doi: 10.3390/s23167271, PMID: 37631810, PMCID: PMC10459132.
6. A. Sharma J. Gupta and Ishika. Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007–18) // *Optik*. 2019. Vol. 183. doi: 10.1016/j.ijleo.2019.02.104.
7. P. B. Gajbhiye and K. S. Wankhade. Design and Implementation of Smart Water Monitoring System Using IoT and Cloud Computing // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4, no. 4. Available: <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I4605.pdf>.
8. M. Born, E. Wolf, A. B. Bhatia et al. Principles of Optics // *Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

*Надійшла до редколегії 17.01.2026*

*Прийнята до друку після рецензування 23.04.2026*

*Публікація (оприлюднення) 30.04.2026*

#### *Відомості про авторів:*

**Стаднік Данііл Володимирович** – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; e-mail: [daniil.stadnik@nure.ua](mailto:daniil.stadnik@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8343-1246>

**Галат Олександр Борисович** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: [oleksandr.galat@nure.ua](mailto:oleksandr.galat@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8843-7949>