

DOI 10.36074/logos-04.04.2025.040

## ЗАСТОСУВАННЯ НОВІТНИХ ТИПІВ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА У НАВІГАЦІЙНИХ ПІДВОДНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТАХ

Сандлер Альберт Кирилович<sup>1</sup>, Омельченко Тарас Юрійович<sup>2</sup>

1. кандидат технічних наук, доцент

Національний університет "Одеська морська академія", УКРАЇНА

ORCID ID: 0000-0002-0709-0542

2. кандидат технічних наук, доцент

Національний університет "Одеська морська академія", УКРАЇНА

ORCID ID: 0000-0003-1130-2883

Трансєвропейська ріка Дунай відрізняється складними й варіативними гідрологічними умовами. Коливання рівня води на окремих ділянках ріки обумовлено кількістю опадів, що випали, величиною сніжного покриву, характером погоди в період танення снігу, режиму вітрів і ін. Одночасно істотний вплив на коливання рівня води виявляють такі фактори, як поздовжній ухил водної поверхні, форма русла, інтенсивність руслових деформацій, наявність шлюзів, льодові явища та інше. Незважаючи на складний гідрологічний режим, на Дунаї чітко прослідковуються періоди весняного повіддя й осінньої межени. Результати ряду досліджень підтверджують, що в останні роки відзначає тенденцію зменшення водності Дунаю. Аналіз статистичних даних основних гідрологічних характеристик та витрат і рівнів води, виконаний болгарським агентством по дослідженню й експлуатації ріки Дунай, показав зменшення витрат води на 236 м<sup>3</sup>/с і рівнів води на 68 см за 70-літній період спостережень.

На Дунаї бувають такі явища, як кілька маловодних років підряд або небувало високі паводки. Найбільш імовірна причина явищ, що відбуваються, може бути пояснена розбалансуванням кліматичної системи, що супроводжується цілим рядом явищ.

Небезпечні гідрологічні зміни, що відбуваються, роблять Дунай однією із самих складних у навігаційному відношенні рік, судноплавство на ній залежить від глибин, яке на природних ділянках обумовлене гідрологічними

## SECTION 19.

### TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

особливостями ріки, рельєфу дна. Найбільш проблемною для судноплавства фахівці вважають спільну румунсько-болгарську ділянку, яка є єдиним місцем, на якій не проводиться ніяких гідротехнічних робіт з регулювання русла ріки з метою поліпшення умов судноплавства. Днопоглиблювальні роботи, спрямовані на забезпечення мінімальних глибин суднового ходу, дають лише тимчасовий або короткостроковий результат. Іншим немаловажним фактором є ерозія берегів ріки, яка негативно впливає на стан умов судноплавства.

Як результат на спільному словацько-угорському й на угорському ділянках виникло 42 критичних перекату; на спільній румунсько-болгарській ділянці між 645 – 374 км виникло понад 30 критичні перекати. Складної залишається обстановка із глибинами й у секторі Апатин (Сербія). На цих ділянках зупинене понад 300 навантажених суди, у тому числі небезпечні вантажі, що перевозяться, а також зернові. Судноплавні компанії країн – членів ДК не тільки зазнають прямих втрат від недопоставки вантажів і простою флоту, але й втрачають власну вантажну базу; туристичні фірми зазнають збитків через припинення пасажирських перевезень на "довгих" лініях. З моменту обмеження навігації на Середньому й Нижньому Дунаї судноплавні компанії країн - членів понесли реальні втрати, обчислювальні десятками мільйонів євро. Проблема зупинки судноплавства через мілководдя виникла не зараз: подібна ситуація мала місце в 2003 році, коли на перекатах, що з'явилися, глибини досягали 1,8 ... 1,6 м уже в червні, а нормальна навігація почалася тільки в листопаді [1 - 3].

Крім зупинок судноплавства почастишали випадки посадки окремих суден та караванів на мілину на різних ділянках Дунаю. Гідрографічні служби не завжди встигають попереджувати судноводіїв про зміни гідрологічної ситуації.

Одним з варіантів вирішення проблеми підвищення безпеки судноплавства на Дунаї може бути застосування безпілотних підводних навігаційних апаратів (БПНА).

У цей час серйозні фундаментальні розробки перспективної інноваційної техніки й технології безпілотних підводних навігаційних апаратів (БПНА) ведуться у найрозвинених країнах світу. Завдяки цьому БПНА в цей час одержали досить широке поширення й застосування, а ця технологія активно використовуються в сфері гідрології, картографії й геоінформатики. Якщо специфіка застосування нових технологій у виробництві традиційних топографо-геодезичних робіт на суші визначена, то стосовно до подібних робіт у водному середовищі тут залишається ще багато невирішених питань. Однак, необхідно враховувати, що встаткування, приладова база й інструменти

БПНА за досить тривалий період часу перетерпіли не просто більші, а дійсно суттєві зміни. Пройдений шлях від використання цілої команди геодезистів із громіздкими ехолотами й лазерними сканерами, що кріпляться на човни, що й здійснювали зйомку, до компактних БПНА з комплектом надійного встаткування, які можуть переміщатися й управлятися в ряді випадків усього лише однією людиною. Основні напрямки досліджень, у розв'язку яких доцільне застосування БПНА в гідрологічному картографуванні й моделюванні – це гідрографія й гідрометрія, попередження й ліквідація наслідків небезпечних гідрологічних явищ, широке коло водно-екологічних проблем. Причому перелік розв'язуваних з використанням водних безпілотників завдань прямо залежить від устаткування, яким вони оснащуються.

При розгляді комплектації БПНА "Apache 6 USV Norbit IWBMS", який позиціонується як безпілотний дрон для виконання спеціалізованих робіт на внутрішніх водоймах і морським мілководді виявлено, що перелік його оснащення може бути різноманітним: багатопроменевий ехолот, однопроменевий ехолот, гідролокатор бічного огляду, профілограф швидкості плинину, лазерний сканер, донний профілограф і інше встаткування.

Багатопроменевий ехолот використовується для проведення майданної зйомки дна. При цьому він поширює акустичні імпульси (промені) віялом, у такий спосіб захоплюючи за один прохід широку смугу дна (рис. 1).

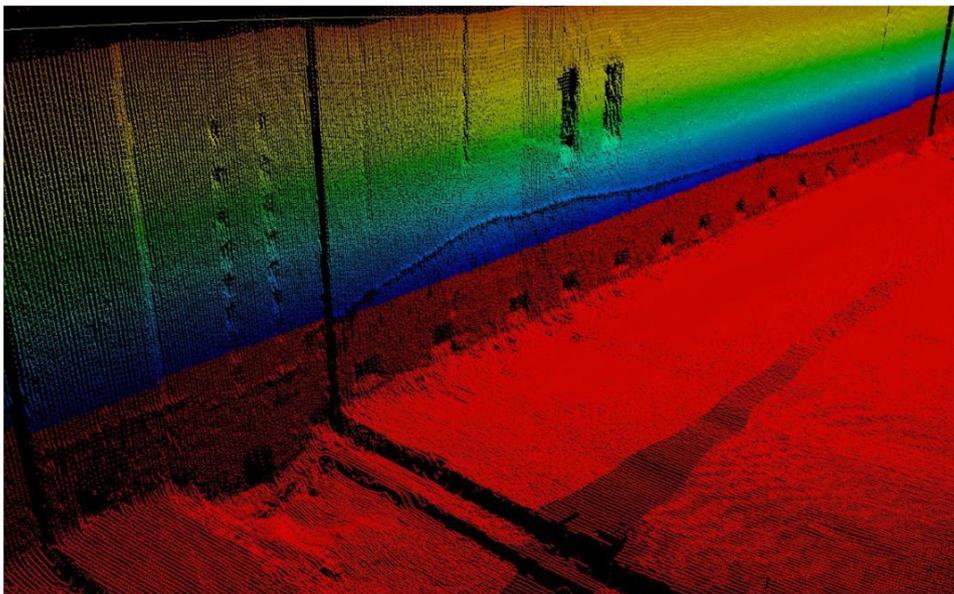


Рис. 1. Приклад цифрової моделі рельєфу ділянки дна водойми, отриманої за результатами майданної зйомки багатопроменевим ехолотом

## SECTION 19.

### TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

Основною функцією однопроменевого ехолота є визначення глибин. Вимірюючи час проходження акустичних сигналів установленої частоти до дна й назад, він дозволяє обчислити дискретні значення глибин у різних локаціях. Крім проміру глибин, ехолоти використовуються для побудови профілів і визначення зразкової структури дна, пошуку об'єктів на дні й у товщі води.

Гідролокатор бічного огляду дозволяє одержувати високоякісне акустичне зображення дна на основі інтенсивності відбитого сигналу й застосовується для одержання відмінних рис форм підводного рельєфу. Його використання разом з ехолотом дозволяє одержати інформацію про особливості рельєфу окремих ділянок дна водойм.

Профілограф швидкості течії, побудований на принципі використання доплеровського зрушення акустичних сигналів, відбитих від часток водного потоку, дає можливість виміряти швидкість водного потоку на різних глибинах.

Лазерний сканер, вимірюючи відстані й напрямку, дозволяє обчислювати координати крапок над поверхнею води. Сканування проводиться широкою смугою й з високою частотою зйомки, тому за одну секунду зйомки можливе одержання даних про сотні тисяч таких локацій. Спільне використання лазерного сканера й багатопроменевого ехолота забезпечує практично повне покриття зйомкою як надводний, так і підводного простору.

Донний профілограф за принципом роботи являє собою ехолот, але завдяки низьким частотам випромінювання й більшій потужності забезпечується проникнення акустичного сигналу глибоко в донний ґрунт. Це дає можливість одержати картину вертикальної структури донних відкладань, необхідну при плануванні й здійсненні навігації, обчислення обсягів відкладань, а також провести пошук об'єктів, заглиблених у шарі ґрунту [4 - 6].

Як видно з функціонала описаного БПНА сучасна концепція застосування подібних апаратів вимагає впровадження новітніх, більш ефективних, зручних у застосуванні, автоматизованих засобів та пристроїв контролю гідрологічної ситуації. Тенденції розвитку сучасних засобів гідрологічного моніторингу показують, що саме використання надійних, верифікованих, нечутливих до збурень апаратів, які органічно сполучаються з судновими мікропроцесорними вимірювальними системами і мережами, забезпечують високу експлуатаційну ефективність та безпеку судноплавства.

Існуючі гідрологічного моніторингу функціонують в умовах дестабілізуючих експлуатаційних факторів. Саме ці збурення не дозволяють забезпечити ефективний та вірогідний контроль підводної навігаційної обстановки.

Аналіз відомих рішень доводить, що для сучасних БПНА затребувані нові конструкційні елементи, а саме – нечутливі до більшості експлуатаційних

дестабілізуючих факторів пристрої волоконної оптики. Саме волоконно-оптичні лінії зв'язку відповідають у БПНА за якість, достовірність та швидкість отримання всього обсягу інформації, що надходить від апарата до оператора і на підставі якої приймаються навігаційні рішення [7].

Волоконні світловоди, створювані на основі кварцового скла, стали невід'ємною частиною БПНА. Кварцові світловоди становлять основу сучасних ліній зв'язку, використовуються для створення волоконно-оптичних датчиків і волоконних лазерів, що знайшли численні застосування від обробки матеріалів до біомедицини. Разом з тим, кварцове скло як матеріал серцевини світловода накладає фундаментальні обмеження на такі параметри світловодів як мінімально можливі оптичні втрати, робітник спектральний діапазон, оптична міцність і ін.

Створення світловодів з порожньою серцевиною, так званих револьверних світловодів (РС) відкрило нові можливості для обходу зазначених обмежень. РС – це новий тип волоконних світловодів з порожньою серцевиною. Поперечні переріз порожнього РС, реалізованого до сьогодні, представлений на рис. 2.

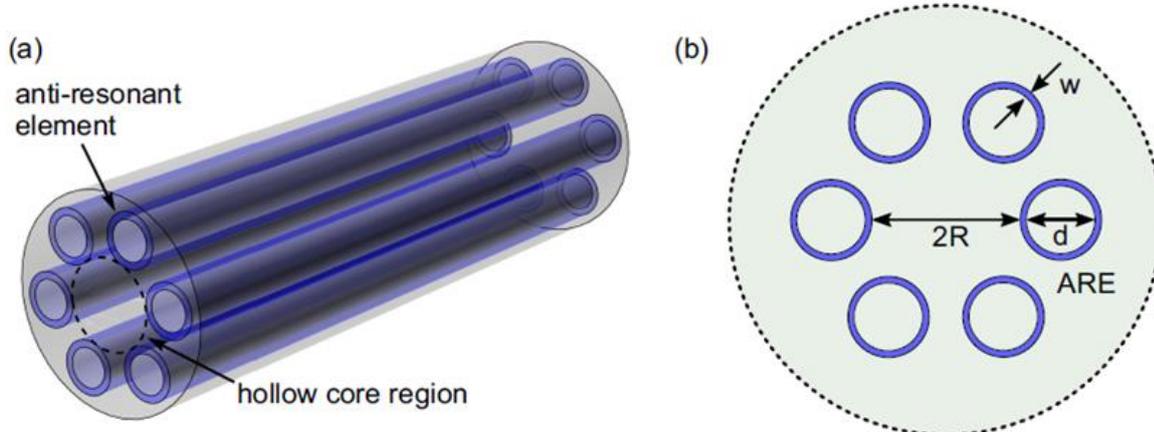


Рис. 2. Револьверне оптичне волокно: *а* – геометрія револьверного антирезонансного порожнистого волокна, де волокно складається з шести антирезонансних елементів кільцевого типу (блакитна область), розташованих навколо центральної області ядра (позначена чорною пунктирною лінією); *б* – поперечний переріз цієї структури з усіма відповідними геометричними параметрами. Кільця виготовлені з діелектричного матеріалу, тоді як середовище з нижчим показником заломлення знаходиться в іншому місці

## SECTION 19.

### TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

Винятково сильна локалізація випромінювання в порожній серцевині стала можливою з появою РС із негативною кривизною поверхні серцевина-оболонка, у яких частка оптичної потужності в оболонці світловода становить менш  $10^{-5}$ . Мінімальні оптичні втрати, отримані за останній рік у кварцових РС, становлять 0,22 і 0,28 дБ/км на довжинах хвиль 1625 і 1550 нм, відповідно, що дуже близько до межі в сучасних телекомунікаційних світловодах ( $\sim 0,15$  дБ/км,  $\lambda = 1550$  нм). Однак, завдяки полою серцевині, у РС суттєво подавлені такі фундаментальні механізми оптичних втрат як релеевське розсіювання, електронне й фононне поглинання, які є обмежуючими факторами у світловодах із твердотільною серцевиною. Таким чином, РС припускають подальше зниження оптичних втрат і розглядаються як перспективні для наступного покоління волоконно-оптичних ліній зв'язку

У порожніх РС уперше було введено поняття світловодів з негативною кривизною границі серцевина-оболонка. Саме ця властивість (негативна кривизна) приводить до значного зниження оптичних втрат. РС суттєво відрізняються від інших світловодів з негативною кривизною оболонки тим, що, по-перше, елементи оболонки мають циліндричну симетрію (точніше, форма поперечного переріза елементів близька до кругової або еліптичної) і, по-друге, їх можна розміщати навколо серцевини без зіткнення один з одним, що поліпшує характеристики та хвилеводні властивості. Властивості РС обумовлені головним чином відбиттям випромінювання від структур на границі серцевина-оболонка, що не володіють трансляційною симетрією. Оптичні властивості РС визначаються матеріалом, з якого виготовлений світловод, геометричними параметрами поперечного переріза світловода, а також стабільністю цих параметрів по довжині світловода.

У порівнянні з іншими світловодами, що мають порожнини, РС відрізняються насамперед простотою конструкції. Будучи виготовлені із кварцового скла, вони здатні транспортувати випромінювання з довжинами хвиль від вакуумного ультрафіолету до середнього ІЧ-діапазону. Експериментально показано, що оптичні втрати в РС не перевищують рівня порядку 1 дБ/м у діапазоні від 200 нм до 4,4 мкм. У близькому ІЧ діапазоні порожні фотонно-кристалічні світловоди (ФКС) демонструють більш низькі втрати (порядку 1 дБ/км на 1,5 мкм проти 30 дБ/км у РС. Але у ФКС із порожньою серцевиною випромінювання взаємодіє з декількома періодами фотонного кристала, що, з одного боку, дозволяє одержати низькі оптичні втрати, а з іншого, приводить до підвищення оптичних втрат у спектральних областях, де матеріал світловода має високі втрати. РС, особливо із простими капілярами в оболонці, характеризуються значно меншим перекриттям розподілу випромінювання з матеріалом світловода, що дозволяє РС працювати й в

області високих втрат матеріалу оболонки. Тому на РС із кварцового скла були реалізовані перші ефективні рамановські лазери, що працюють у середньому ІЧ-діапазоні (на довжині хвилі 4,4 мкм). До гідностей РС ставиться їхня здатність транспортувати короткі потужні лазерні імпульси без викривлень, що може знайти й знаходить застосування при доставці випромінювання від лазера до локації споживання. Цьому сприяють їхня висока променева міцність і низька нелінійність. Подальше просування в середній ІЧ-діапазон можливий за рахунок переходу на халькогенідні РС. Перші експерименти в цій області показали можливість транспортування випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера на довжині хвилі 10,6 мкм [8, 9].

Унікальні можливості РС дають змогу суттєво збільшити кількість вимірювальних приладів на борту БПНА. Такі БПНА можуть широко застосовуватися при плануванні й здійсненні екологічного моніторингу, у картографуванні й моделюванні його результатів і визначення на цій основі джерел, розмірів і області поширення забруднень, відбору проб води з метою визначення й наступного картографування й моделювання основних фізико-хімічних параметрів водних мас [10 - 12].

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Проблемы придунайского региона и пути их решения, взгляд специалистов с Украинского Дунайского Пароходства. URL: [www.danube-river.info/archives/4444](http://www.danube-river.info/archives/4444).
- [2] Омельченко, Т. Ю. (2011). Проблемы логистики и пути их решения в Украине. Вісник економіки транспорту і промисловості, (35), 269 - 274.
- [3] Sotnychenko, L., Haichenia, O., Omelchenko, T., & Kuzmenko, K. (2024). Assessment of Consistency in the Functioning of Seaports of Ukraine. Economics Ecology Socium, 8(1), 78-88.
- [4] Сандлер, А., & Омельченко, Т. (2024). ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БЕСПІЛОТНИХ СУДЕН. Collection of scientific papers «Λ'ΟΓΟΣ», (April 26, 2024; Bologna, Italy), 240-244.
- [5] Сандлер, А., & Омельченко, Т. (2024). ВДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ПРИСТРОЇВ НАЛАШТУВАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ. Collection of scientific papers «Λ'ΟΓΟΣ», (March 29, 2024; Cambridge, UK), 227-232.
- [6] Смуров, А. Е., & Тесленок, С. А. (2021). Применение технологий и оборудования беспилотных водных аппаратов в картографировании и моделировании. Огарёв-Online, (5 (158)), 9.
- [7] Сандлер, А. К. (2021). Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій (Doctoral dissertation, – К., 2021. –159 с).
- [8] Буфетов, И. А., Косолапов, А. Ф., Прямыков, А. Д., Гладышев, А. В., Колядин, А. Н., Крылов, А. А., ... & Бирюков, А. С. (2019). Полые револьверные световоды (свойства, технология, применения). Фотоника, 13(5), 426-443.
- [9] Zeisberger, M., Hartung, A., & Schmidt, M. A. (2018). Understanding dispersion of revolver-type anti-resonant hollow core fibers. Fibers, 6(4), 68.



**SECTION 19.**

TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

- [10] Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., & Bogach, V. (2023). IMPROVING THE MATHEMATICAL MODEL OF A FIBER-OPTIC INCLINOMETER FOR VIBRATION DIAGNOSTICS OF ELEMENTS IN THE PROPULSION SYSTEM WITH SLIDING BEARINGS. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 125(5).
- [11] Сандлер, А. К., Карпілов, О. Ю., & Удолатій, В. Б. (2024). ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ FIBER OPTIC DEVICE FOR SYSTEM OF AUTOMATED ECOLOGICAL MONITORING.
- [12] Сандлер, А. К., & Опрышко, М. О. (2020). Волоконно-оптичний датчик контролю стану технічних рідин і газів. СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА, 63.