

Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М.

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ІНСПЕКЦІЇ МОРСЬКИХ НАФТОГАЗОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Метою роботи є аналіз сучасного стану та перспектив використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів. Поставлена мета під час інспекцій в шельфовій галузі досягається шляхом використання гібридних роботизованих комплексів, до складу яких входять автономні підводні апарати, дистанційно керовані підводні апарати, безпілотні літальні апарати та автономні надводні апарати, що діють за єдиним планом для мінімізації ризику для людини при виданні точної і достовірної інформації про стан обладнання в будь-яких складних умовах. Ключовими ланками в системі моніторингу стану і безпеки об'єктів шельфової промисловості є дистанційно керовані підводні апарати та автономні підводні апарати. БПЛА, які, маючи доступ до важкодоступних ділянок на плавучих спорудах, сучасні технології візуалізації та відмінну маневреність, надають детальні знімки з високою роздільною здатністю для моніторингу стану споруд, розташованих вище ватерлінії, дозволяють оперативно виявляти корозію або механічні пошкодження конструкцій та оперативно пропонувати термінові заходи щодо їх усунення. Підвищення безпеки під час регулярних інспекцій безпілотними апаратами у різних зонах платформи для виявлення потенційних ризиків, які можуть поставити під загрозу персонал, активи та навколишнє середовище, досягається шляхом відсторонення інспекторів від роботи на великій висоті або глибині та/або в небезпечних умовах. Найсуттєвішими результатами є виділення кількох інспекційних зон залежно від наявності обладнання та порядку проведення інспекцій на стаціонарних та плавучих морських спорудах. Значущість отриманих результатів полягає у розробці пропозицій щодо використання безпілотних літальних, надводних апаратів і підводних апаратів для інспекцій морських споруд, що вважається ефективною альтернативою використанню водолазів під водою і робітників, що проводять роботи на великих висотах, забезпечуючи розширені можливості контролю, технічного обслуговування і ремонту у важкодоступних місцях та більш швидке отримання великих обсягів даних. Таким чином, основним напрямком подальшої роботи є дослідження можливості інтеграції передових сенсорних технологій з наявними безпілотними системами для досягнення більш ефективних інспекцій та використання штучного інтелекту і машинного навчання для аналізу отриманих у результаті цих інспекцій даних для поліпшення автоматизованого виявлення дефектів і аномалій та зниження можливих ризиків.

Ключові слова: гібридний роботизований комплекс, автономний підводний апарат, дистанційно керований підводний апарат, безпілотний літальний апарат, автономний надводний апарат, навігація, судно, посадка на міліну, особа, що приймає рішення, набір корпусу судна, пошкодження, розлив нафти, методи підтримки маневрування, судно, система підтримки прийняття рішень

Вступ. Стрімкий прогрес у нафтогазовій галузі, особливо на шельфі, супроводжується прийняттям безпрецедентних заходів безпеки для мінімізації ризику техногенних аварій з обладнанням та аварій з персоналом через небезпеку для навколишнього середовища та людини. Тому постійна прихильність до безпеки вимагає розробки та впровадження адекватних методів інспектування морських установок [1]. Але висока трудомісткість, досить висока

вартість й обмежений доступ до важкодоступних точок суттєво знижують ефективність традиційних методів – візуального і неруйнівного контролю (НК) [2]. Подолання цих проблем вимагає втручання людини, що призводить до неминучих помилок оператора і зниження надійності управління. Суворі морські умови та постійні втомні навантаження, що впливають на морські установки, призводять до деградації та пошкодження конструкцій, що ставить під загрозу їх цілісність та безпеку. Однак традиційні методи і засоби боротьби не завжди дозволяють точно виявити місце й оцінити ступінь пошкодження [3].

Ризик-орієнтований контроль (РОК) передбачає комплексний підхід до розрахунку ризиків, пов'язаних з експлуатацією морських об'єктів і розробку планів інспектування на основі виявлених ризиків. Однак на даний момент відсутнє систематичне планування РОК для морських установок, особливо для морських вітрових турбін [4].

Традиційні методи моніторингу стану і безпеки морських споруд зазвичай не передбачають безперервного збору даних і зворотного зв'язку про їх стан в режимі реального часу. Ці методи, як правило, «заточені» під отримання оперативного знімка поточного стану конструкції, але не забезпечують раннього виявлення потенційних проблем, які можуть викликати несподівані збої і збільшення витрат на обслуговування [5].

Перевірка та обслуговування великої кількості морських споруд, що працюють у складних морських умовах, потребує значних ресурсів. Тому підвищення рентабельності існуючих методів інспектування та розробка ефективних методів планування діяльності з інспектування та обслуговування морських споруд при збереженні високого рівня точності та заданої якості контролю у водному та повітряному середовищі є актуальним завданням.

Аналіз літератури та постановка проблеми. Для подолання вищевказаних проблем під час інспекцій в шельфовій галузі були розроблені ефективні та економічно вигідні технологічні рішення, що дозволяють мінімізувати ризик для людини. До них належить використання гібридних роботизованих комплексів (ГРК), які є автономними підводними апаратами (АПА), дистанційно керованими підводними апаратами (ДКПА), безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та автономними надводними апаратами (АНА), що діють за єдиним планом в інтересах вирішення основної місії. Ці прилади здатні надати точну і достовірну інформацію про стан обладнання в будь-яких складних умовах [6].

Ключовими ланками в системі моніторингу стану і безпеки об'єктів шельфової промисловості є ДКПА і АПА [7, 8].

ДКПА – це прив'язний транспортний засіб, яким дистанційно керує оператор для виконання рутинних завдань з інспекції на підводних нафтогазових установках та здійснення легких втручань [9, 10]. Конструктивні особливості ДКПА дозволяють реалізувати їх переваги. По-перше, інформація в режимі реального часу дозволяє миттєво реагувати на перешкоди або зміни параметрів місії. По-друге, візуалізація з високою роздільною здатністю дозволяє операторам візуально оглядати та оцінювати стан морських споруд. Однак удари хвиль на кабель і вплив підводних течій обмежують керованість блоку дистанційного керування і викликають дрейф пристрою.

АПА, які не з'єднані кабелями з надводними суднами і працюють незалежно від них, оснащені сучасною контрольно-вимірювальною апаратурою для збору та аналізу даних і характеризуються великою дальністю дії, маневреністю, гнучкістю розгортання, високою швидкістю занурення і неможливістю заплутування в підводних спорудах. Наявність мультимодальних гідролокаційних датчиків в складі обладнання АПА дозволяє проводити точне картографування морського дна і моніторинг підводних кабелів і трубопроводів [11]. Нові потужні батареї збільшили автономність АПА до декількох і дозволили їм працювати в більш складних гідрометеорологічних умовах.

Останнім часом АНА та БПЛА все частіше використовуються для обстеження споруд, розташованих над морською водою. Навіть у суворих морських умовах АНА можуть самостійно орієнтуватися в морській інфраструктурі, збираючи дані про поверхню океану та підповерхневе середовище за допомогою вбудованих датчиків, включаючи багатопроменеві

ехолоти та гідролокатори бічного сканування [12]. Зниження ролі людського фактору і зниження ризиків при пілотуванні АНА сприяють оптимізації графіків технічного обслуговування (ТО) і точній оцінці потенційних загроз.

БПЛА, маючи доступ до важкодоступних ділянок на плавучих спорудах, надають детальні знімки з високою роздільною здатністю для моніторингу стану споруд, розташованих вище ватерлінії [13]. Таким чином, технології візуалізації та маневреність БПЛА дозволяють оперативно виявляти корозію або механічні пошкодження конструкцій та оперативно пропонувати термінові заходи щодо їх усунення. Крім того, БПЛА значно підвищують безпеку під час перевірок за рахунок відсторонення інспекторів від роботи на великій висоті та/або в небезпечних умовах.

Однак сучасні дослідження повністю не закривають питання ефективного використання різноманітних автономних апаратів для проведення інспекцій морських промислових установок.

Метою роботи є аналіз сучасного стану та перспектив використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів.

Основна частина. Всі апарати ГРК оснащені сучасними датчиками та системами візуалізації для отримання зображень з високою роздільною здатністю, відеоматеріалів та інших даних для оцінки стану підводного обладнання. Підводні лазерні сканери і фотограмметрія ближньої дії дозволяють сканувати всю сцену і виконувати комплексну реконструкцію її 3D-структури шляхом обробки 3D-хмари точок [14]. Технології аналізу великих обсягів даних, зібраних під час підводних інспекцій, дозволяють виявляти закономірності або аномалії, які вказують на потенційні проблеми або проблемні зони.

Ключовим фактором для впровадження нових технологій в оцінці стану морських споруд є здешевлення складних і дорогих інспекційних операцій [15]. Саме тому дослідники вважають, що спільне використання АНА, АПА, ДКПА і БПЛА сприяє зниженню витрат при збереженні високої якості та точності інспекцій над та під водою.

Беручи до уваги ймовірність, наслідки і витрати на експлуатацію або обслуговування морських споруд, для інспекції також широко використовуються РОК-системи. Вони використовують методи структурної надійності та баєсові методи надійності для встановлення критеріїв розрахунку втоми та оновлення планів контролю під час експлуатації. РОК-система встановлює пріоритети контролю в залежності від рівня ризику, пов'язаного з кожним підводним об'єктом. Ретельна перевірка ризиків показує, які об'єкти потребують частих перевірок, а де немає необхідності в систематичних періодичних перевірках.

Другим важливішим підходом до підвищення ефективності підводних інспекцій є використання алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання [16].

У роботі [17] розглядається виявлення наростів в морських спорудах і їх класифікації на основі глибокого навчання й інформації від датчиків для отримання 3D представлення товщини і складу наростів та оцінки впливу підвищених гідродинамічних навантажень на структурну цілісність об'єктів.

У роботі [18] розглядаються проблеми відсутності навчальних даних з використання АПА та ШІ при перевірці, ТО та виявленні пошкоджень у підводних нафто- і газопроводах, що порушують їх структурну цілісність.

По суті, поєднання технологій ДКПА, АНА, АПА та БПЛА, об'єднаних у рамках ГРК, впровадження стратегій інспекції на основі РОК, ШІ та машинного навчання забезпечує цілісний підхід до зниження витрат на інспекцію великих споруд та глибоководні операції. Ретельне планування забезпечує оптимальні графіки перевірок при збереженні бажаного рівня ризику при найменших витратах. Моніторинг загального стану конструкцій, таким чином, забезпечує тривалий термін служби та безпеку при одночасному зниженні експлуатаційних витрат.

Ведення господарської діяльності морськими видобувними компаніями (МВК) в небезпечних умовах зумовлює необхідність розробки безпечних та ефективних методів моніторингу своєї інфраструктури. Однак проведення перевірок обладнання людиною за

традиційною технологією пов'язане з високими експлуатаційними ризиками через великі висоти або глибоководні операції. Закономірним виходом з цієї ситуації є поява безпілотних апаратів, об'єднаних в ГРК.

Нафтові вишки, платформи, морські вітрові турбіни та інші морські видобувні установки (МВУ) повинні відповідати жорстким вимогам безпеки та проходити регулярні перевірки цілісності та функціональності обладнання, виявлення потенційних небезпек та дотримання стандартів безпеки.

Управління структурною цілісністю (УСЦ) спрямоване на забезпечення довгострокової надійності та довговічності фізичних структур та охоплює людські ресурси, системи, процедури та активи [6].

Контроль за морськими виробничими підрозділами (МВП) повинен відповідати певним вимогам, що означає усунення або значне зменшення впливу більшості перешкод та обставин, з якими стикаються ці структури. Технічне обслуговування обладнання в УСЦ є найважливішим фактором у забезпеченні безпеки та надійності МВП. Це досягається шляхом проведення регулярних інспекцій у різних зонах платформи для виявлення потенційних ризиків або збитків, які можуть поставити під загрозу персонал, активи та навколишнє середовище. Ці перевірки повинні відповідати нормативним вимогам, запобігаючи виникненню дорогих інцидентів і збоїв.

Залежно від наявності обладнання та порядку проведення інспекцій на стаціонарних та плавучих морських спорудах виділяють кілька інспекційних зон (Z_i) (рис. 1):

Z_1 – надбудова (від нижньої палуби до верхньої щогли), тобто верхня частина морської платформи, що містить житлові приміщення, вертолітні майданчики і технологічне обладнання (модулі), інспекції в яких забезпечують безпеку і функціональність обладнання і конструкцій, розташованих на верхній конструкції [19]. Доступ до зони Z_1 відносно легкий для персоналу та обладнання, за винятком деяких специфічних споруд, за допомогою сходів або ліфтів.

Зона Z_2 розташована від ватерлінії (вище ватерлінії) до нижньої палуби і має у своєму складі ділянки, що піддаються впливу хвиль, вітру і періодичних бризок морської води, які найбільш схильні до корозії і деградації через суворі умови навколишнього середовища [20]. Однак ця територія складна для моніторингу і вимагає спеціалізованого обладнання та техніки для огляду (скелелазіння).

Підводна зона Z_3 розташована нижче ватерлінії на глибині до 50 м, охоплює корпус плавучої/нерухомої платформи [21], а також обладнання та з'єднання стояків, де перевірки забезпечують цілісність корпусу та належне функціонування стояків. Контроль на цій ділянці ускладнюється проблемами доступу до інспекції через необхідність занурення. Обмежені можливості та маневреність звичайних ДКПА та АПА не дозволяють їм діяти на такій глибині.

Підводна динамічна зона Z_4 (від глибини 50 м до точки приземлення та якірної системи труб на морському дні) має у складі стояки, що транспортують вуглеводні з підводних свердловин у верхній технологічний комплекс. Перевірки в зоні Z_4 для виявлення потенційних дефектів або пошкоджень стояків, які можуть призвести до витоків або несправностей, ускладнюються екстремальною глибиною, вертикальним положенням і рухом труб, а також суворими умовами.

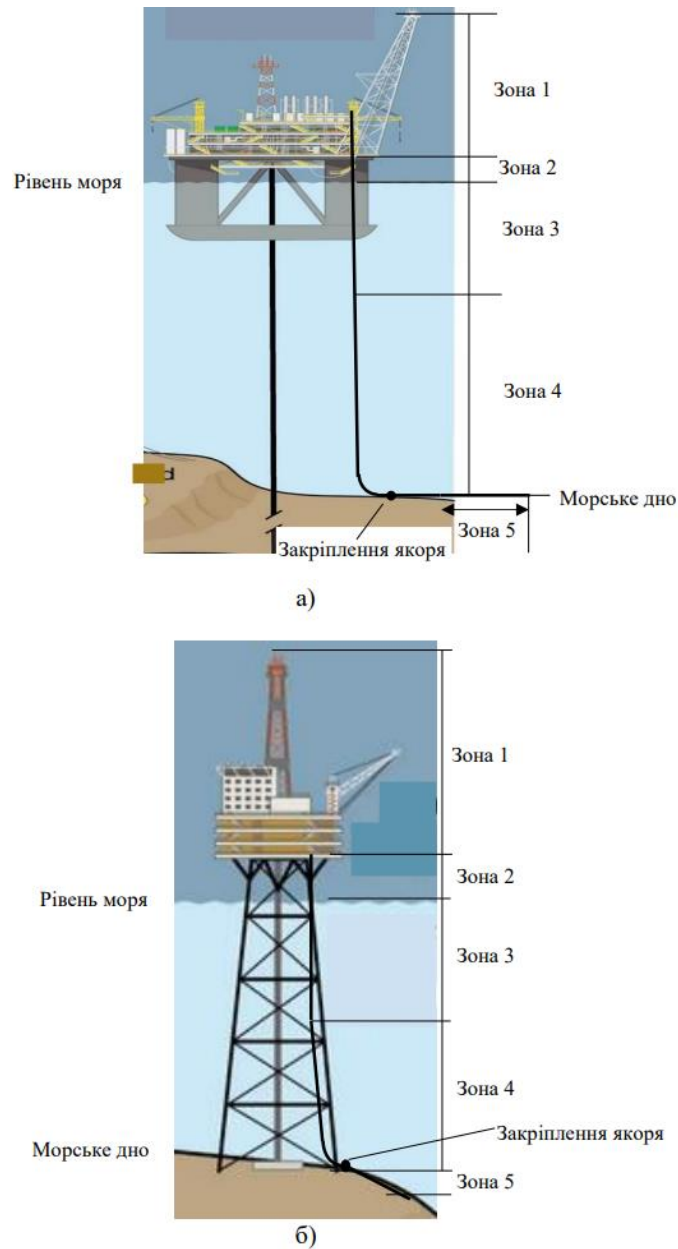


Рисунок 1 – Інспекційні зони морських споруд:
 а) плавуча платформа; б) стаціонарна платформа

Підводна зона Z_5 охоплює всі активи, розташовані на морському дні, – трубопроводи, споруди та обладнання. Перевірки в зоні Z_5 дозволяють виявити будь-які пошкодження, корозію або проблеми з цілісністю, які можуть вплинути на безпеку та надійність обладнання. З одного боку, огляд цієї ділянки відносно легкий завдяки горизонтальному розташуванню труб і закріпленню їх на морському дні. Але, з іншого боку, перевірки утруднені через періодичне занурення техніки в осадові породи або покриття морською рослинністю.

Розташування деяких конструктивних елементів в різних зонах (табл. 1) вимагає застосування різних методів обстеження в кожній зоні для ефективної оцінки різних компонентів цих складних систем.

Таблиця 1 – Технічні характеристики елементів контролю у різних зонах МВП

Зона	Основні елементи контролю
1	Надбудова платформи та накладні модулі
2, 3	Стояк балконний, двотаврова труба, ребро жорсткості
3, 4	Жорсткі і гнучкі стояки
3, 4, 5	Лінії управління і шлангопроводи
3, 4	Підводні споруди
2, 3, 4, 5	Швартовна система
5	Гирла свердловин
5	Лінії перевероту

Традиційний метод, що використовується в інспекційних операціях, заснований на візуальному огляді, дозволяє ефективно виявляти різні пошкодження (потертості, розриви, витoki, деформації) на зовнішньому покритті підводної системи, виявляти несправності запобіжних клапанів, розташованих у верхній частині, і виявляти помилки в позиціонуванні плавучих платформ.

Візуальний огляд зазвичай проводиться двома методами – загальним візуальним оглядом (ЗВО), який проводиться за допомогою камер, встановлених на ДКПА або АПА для візуального виявлення пошкоджень і витоків, і ретельним візуальним оглядом (РВО), який використовується для перевірки зварних швів, рівнів корозії та тріщин. ЗВО і РВО, які ефективні при виявленні проблем на поверхні обладнання, не дають оцінки загального стану підводних споруд.

Традиційні підходи до обстеження морських об'єктів у різних зонах працювали: інспектори – для надбудови (зона 1); альпіністи – для зони бризок/розпилення (зона 2); водолази – для підводної зони біля ватерлінії (зона 3); дистанційно керовані апарати – для динамічної підводної зони (зона 4) і підводної зони (зона 5) [22]. Для зменшення загроз життю людей та підвищення ефективності перевірок у різних зонах останнім часом використовуються: БПЛА та АНА (зони 1 та 2), міні-ДКПА (зона 3), АПА (зони 4 та 5). Ці пристрої характеризуються хорошою мобільністю, можливістю віддаленого моніторингу і кращим доступом до важкодоступних місць.

Безпілотні літальні апарати

БПЛА, оснащені камерами та датчиками з високою роздільною здатністю і з відносно легким доступом до надбудови та зони розбризкування/розпилення, надають детальні візуальні зображення для аналізу та виявлення потенційних проблем або дефектів, значно зменшуючи потребу операторів у безпосередньому фізичному огляді обладнання.

Міні-ДКПА в порівнянні з водолазами-людьми можуть спритно пересуватися в підводній зоні біля ватерлінії.

Автономні підводні апарати якісно збирають дані про стан підводної споруди без необхідності роботи з ними людини.

Для інспекції морських споруд можуть використовуватися БПЛА, ДКПА, АПА й АНА. Досягнення у сенсорних технологіях, ШІ та автономності за останні два десятиліття сприяли масштабним дослідженням усіх чотирьох типів автономних та дистанційно керованих апаратів.

Безпілотні літальні апарати, які стали важливим інструментом збору даних та візуальної оцінки обстановки, поділяються на апарати з нерухожим крилом та мультиротори (рис. 2).



а) б)
Рисунок 2 – Різні типи безпілотних літальних апаратів:
а) літакового типу з нерухомим крилом; б) багатороторний

Мультироторні БПЛА, завдяки своїй здатності зависати та маневрувати в обмеженому просторі та оснащеності камерами з високою роздільною здатністю, широко використовуються у військовій справі, сільському господарстві, картографії, інспекції у промисловому секторі тощо. Вони стають все більш популярними для інспекції морських споруд.

Забезпечуючи покращену видимість та дистанційний моніторинг, не вдаючись до прямого фізичного огляду, БПЛА надають операторам детальні візуальні зображення та дані для аналізу та виявлення потенційних проблем або дефектів щодо об'єктів у зонах 1 та 2:

1. Ділянки з корозією, тріщинами або іншими пошкодженнями повинні бути виявлені на будь-якій частині *корпусу* морської конструкції БПЛА.

2. На *балконах-стояках*, як критичних точках на морській платформі, БПЛА контролюють практично будь-які важкодоступні місця.

3. На *верхній частині* морської споруди БПЛА здійснюють огляд на предмет цілісності конструкції, витоків, пошкоджень, спричинених погодними умовами тощо.

4. БПЛА оглядають *факельні труби* на наявність корозії, тріщин або засмічень без зупинки технологічних операцій.

5. Спеціалізовані БПЛА перевіряють внутрішні частини великих *внутрішніх резервуарів* на суднах та морських спорудах для виявлення корозії та витоків.

6. У *важкодоступних місцях* (підпалуби, крани тощо), небезпечних для людей, БПЛА виявляють ділянки з корозією, тріщинами або іншими пошкодженнями.

Таким чином, універсальність БПЛА дозволяє використовувати їх практично у всіх верхніх зонах морської інфраструктури.

У роботі [23] розглядаються типи БПЛА та правила їх експлуатації для контролю важкодоступних місць, виявлення корозії, тріщин та витоків у найкоротші терміни на плавучих платформах та кораблях ВМС, використання 360-градусного відео, 3D-моделювання для вимірювань та аналізу ситуації на основі отриманих зображень.

Перевагами БПЛА є відмінна маневреність, економічність, гнучкість, безпека та забезпечення частого оновлення інформації. Функціонал БПЛА значно розширено за рахунок оснащення їх активними (лідар та радар) та пасивними (камери візуального спектру та тепловізори) датчиками [24]. Фотограмметрія активно використовується для аналізу зображень і вимірювань в управлінні обладнанням, яке полягає в отриманні серії зображень, що перекриваються під різними кутами, їх з'єднанні за допомогою комп'ютерних алгоритмів і створенні детальних 3D-моделей.

Величезною проблемою на суднах є огляд зовнішньої (важкодоступної) частини корпусів, внутрішньої частини цистерн, баластних і вантажних цистерн, систем покриттів, дахів кранів, факелів, інших замкнутих просторів і важкодоступних зон. БПЛА часто є незамінними при огляді пошкоджень після інцидентів (рис. 3а). Однак при обстеженні замкнутих просторів

морського обладнання БПЛА стикаються з серйозними проблемами, такими як несистемні збурення електромагнітного поля, обмеження або навіть втрата сигналів GPS, наявність різних перешкод, турбулентність повітря [25]. Для подолання цих проблем використовуються лазерні 2D і 3D-сканери, камери глибини і RGB-D, бездротові методи визначення місця розташування.

Таким чином, використання БПЛА в процесі моніторингу морського обладнання, по-перше, значно знижує ризик для людини; по-друге, сприяє генерації великих обсягів даних за більш короткий період; по-третє, часто обходиться набагато дешевше, ніж перевірки людиною.

Останнім часом для цілей інспекції на плавучих платформах виробництва, зберігання та відправлення вуглеводнів активізувалися БПЛА з напівавтономною навігацією, роботизовані системи, що використовують, наприклад, магнітний гусеничний хід, а також методи комп'ютерного зору на основі ШІ для автоматизованого виявлення тріщин та гіперспектрального аналізу зображень (рис. 3б).

У Західній Європі велике значення надається реалізації проекту REDHUS («Remote Drone-based Ship Hull Survey») – «Дистанційне обстеження корпусу судна за допомогою дрона», метою якого є оптимізація процедури автоматизованого дистанційного огляду корпусів суден або танків та аналізу відеоданих, отриманих за допомогою БПЛА. Якщо в майбутньому цей метод буде прийнятий за стандартну практику, судновласники отримають більшу безпеку та економічну вигоду.



а)



б)

Рисунок 3 – Приклади роботизованих та автономних систем, розроблених для морських інспекцій:

а) безпілотний літальний апарат; б) гусеничний робот (Джерело – за матеріалами [25])

Прикладом інспекції в резервуарах FPSO та баластних цистернах для морських компаній та верфей є БПЛА ELIOS 3 (рис. 4).



Рисунок 4 – Універсальний БПЛА Elios 3 для проведення дистанційних планових перевірок в умовах обмеженого простору (Джерело – За матеріалами [25])

Таким чином, доступність, простота експлуатації, добре управління камерою і робота в обмеженому просторі дозволили ефективно проводити обстеження суден і морських споруд.

Дистанційно керовані підводні апарати

Спочатку ДКПА в основному використовувалися у військовій сфері, особливо при вилученні торпед і мін. Згодом можливості ДКПА були значно розширені. Як і водолази, ДКПА базуються на допоміжних суднах і зазвичай з'єднані з ними пуповиною, яка служить каналом для критично важливих даних зв'язку та управління.

Підводні апарати використовуються двома способами: «збоку» і «через місячний басейн». Перший підхід, який передбачає використання А-подібної рами для опускання ДКПА в воду, є більш економічним. Другий спосіб дозволяє безпосередньо занурювати ДКПА у воду, забезпечуючи контрольований вхід та кращу стійкість, що знижує ймовірність пошкодження машини під час розгортання та зменшує залежність від погодних умов.

Зазвичай ДКПА поділяються на такі класи (рисунок 5):

Потужність енерго-установки	0 кВт	15 кВт	55 кВт	75 кВт	110 кВт
Клас	Спостерігачі		Легкий робочий клас	Робочий клас	Важкий робочий клас
Глибина занурення	0 м	300 м	1 000 м	3 000 м	5 000 м
Завдання:	- спостереження; - інспекція; - резервні засоби		- спостереження; - інспекція; - легкі підводні будівельні роботи	- спостереження; - інспекція; - спеціальні підводні будівельні роботи	- глибоководні дослідження; - підводне будівництво; - обслуговування нафтових вишок

Рисунок 5 – Класифікація дистанційно-керованих підв
(Джерело – розроблено авторами)

– *апарати-спостерігачі*, в тому числі пристрої від мікро-ДКПА до засобів масою близько 100 кг з мінімальним корисним навантаженням або взагалі без корисного навантаження, завдяки енергосистемам, що генерують менше 15 кВт, зазвичай використовуються як резервні пристрої для водолазів або інших ДКПА або для проведення інспекцій на відносному мілководді (глибина до 300 м) [6];

– *легкий робочий клас* – це ДКПА вагою від 100 кг до 1000 кг, які можуть бути розгорнуті на глибині до 1 000 м, мають помірну вантажопідйомність разом та взаємодіють з енергосистемами, здатними генерувати до 55 кВт;

– *апарати робочого класу*, що використовують електростанції потужністю понад 75 кВт і мають досить високу вантажопідйомність, виконують різні підводні завдання, в тому числі спеціальні будівельні, на глибинах до 3 000 м;

– *великовантажні апарати* – це вузькоспеціалізовані апарати, які виконують завдання у складних глибоководних умовах (на глибинах до 5 000 м) і потребують потужних силових систем (понад 110 кВт). Вони мають надвисоку вантажопідйомність і призначені для глибоководних досліджень, підводного будівництва та обслуговування нафтових платформ.

При інспекції морських споруд, особливо трубопроводів і стояків, в першу чергу оцінюється структурна цілісність цих елементів і виявляються будь-які потенційні пошкодження шляхом візуального огляду для виявлення ознак деградації, корозії або нерівностей поверхні.

Для перевірки цілісності трубопроводів часто використовуються методи неруйнівного контролю (НК) [25], такі як ультразвуковий контроль (УЗК) [26], магнітопорошковий контроль (МПК) [27], витік магнітного потоку (ВМП) [28], вихрострумний контроль [29], контроль трубопроводу спрямованою хвилею (КТСХ) [30] і вимірювання катодного захисту (КЗ) [31].

УЗК використовує високочастотні звукові хвилі для виявлення внутрішньої корозії, тріщин та інших форм структурних пошкоджень у матеріалі трубопроводу.

Суть МПК полягає в намагнічуванні контрольованої ділянки перед введенням частинок заліза, створюючи візуальні індикатори, які накопичуються навколо ділянок з дефектами поверхневого руйнування.

При методі ВМП за допомогою спеціальних датчиків виявляються локальні ділянки корозії або розтріскування шляхом індукування сильного зовнішнього магнітного поля на поверхні труби.

Вихрострумний контроль індукує електричні струми в струмопровідних матеріалах труби, створюючи протилежні поля, які по-різному реагують на нормальні умови та потенційні проблеми на поверхні труби, дозволяючи виявити невеликі ямки, тріщини або корозію.

Однак в нафтогазовій галузі, крім розробки автономних технологій неруйнівного зовнішнього контролю, велика увага приділяється внутрішньому контролю жорстких трубопроводів (ВКТ), особливо внутрішньотрубної діагностики. Ця технологія не може бути ефективно застосована до гнучких трубопроводів.

У підводних операціях першорядне значення має безпека, для чого використовується аналіз надійності за допомогою дерева відмов.

ДКПА можуть оснащуватися магнітними гусеничними візками або роботизованими інспекційними інструментами (рис. 6), які кріпляться до сталевих конструкцій або пластин за допомогою магнітів і переміщуються на колесах. Управління пристроями здійснюється дистанційно з верхньої палуби або з судна за допомогою кабельного з'єднання. Вони дають можливість оглядати горизонтальні і вертикальні поверхні у водному середовищі, запобігати забрудненню, видаляти сміття і іржу, проводити неруйнівний і комплексний контроль і т. д.

ДКПА виявилися дуже цінними інструментами у шельфовій індустрії, головною перевагою яких є їхня здатність проникати до важкодоступних ділянок підводних споруд у суворих умовах, ефективно перевіряти та оцінювати їх, а також виявляти дефекти обладнання за допомогою методів акустичної або оптичної візуалізації.



Рисунок 6 – Встановлення роботизованого інспекційного інструменту з допомогою ДКПА
За матеріалами [32]

Автономні підводні апарати

Автоматизовані підводні апарати можуть перевозити велику кількість обладнання для картографування морського дна, огляду підводного обладнання, кабелів і трубопроводів, в тому числі з метою забезпечення їх структурної цілісності і проведення екологічних досліджень при відносно невеликих експлуатаційних витратах [33]. АПА здатні здійснювати навігацію в невідомих умовах і збирати оптичні дані для обстеження підводних споруд, визначення

морфології і топології морського дна, візуалізації морського дна і широкомасштабної зйомки океанічних об'єктів.

Використання БПЛА, оснащених сучасними датчиками, для інспекції замість людей-водолазів дає можливість виконати ретельний візуальний огляд, виявити дефекти стояків і забезпечити структурну цілісність підводних споруд на нафтових і газових родовищах [34]. Для управління прецизійними ротаційними сканерами під час проведення контролю було розроблено розподілені мережеві комунікаційні системи та використано технологію польових шин для поліпшення управління виконавчими механізмами під час автоматизованого обстеження морських споруд.

АПА здатні автономно картографувати, планувати траєкторії без зіткнень у невідомих умовах і переміщатися в безпосередній близькості від підводних споруд і морського дна, що дає змогу отримувати зображення й оглядати різні структури. АПА функціонує без втручання людини за складним алгоритмом, що містить єдиний підхід до пріоритету завдань, об'єднує різні режими поведінки, такі як проходження траєкторії, проходження рельєфу, обхід перешкод, самонаведення і маневри стикування [34].

Конструктивно АПА складається з циліндричної оболонки, що має забезпечити стійкість при високих гідростатичних тисках. Альтернативою звареним ребрам жорсткості можуть бути ребра жорсткості ковзання, що підвищують стійкість при збереженні внутрішнього простору для обладнання. У роботі [35] досліджено застосування векторних двигунів на основі паралельних маніпуляторів для поліпшення керованості та маневреності АПА. А стаття [36] присвячена розробці бездротових низькочастотних систем віброконтролю для морських платформних споруд.

Значне розширення експлуатаційних можливостей і автономності АПА дало змогу ефективно інспектувати підводні споруди, що раніше виконували виключно пілотовані апарати або ДКПА [37]. Крім того, АПА для підводної інспекції можуть запускатися безпосередньо з берега або з невеликих маневрених суден, що економічніше, ніж використання великих і дорогих допоміжних суден.

Основними проблемами використання АПА під час морських інспекцій є невеликі строки автономної роботи, складність управління в сильних потоках води, проблеми подолання перешкод, мінімальна можливість дистанційного втручання порівняно з прив'язними системами, що збільшує ризик втрати апарата, та обмежені складність і різноманітність розв'язуваних завдань.

Деякі рішення доступні вже сьогодні. Так, підводні апарати Eelume Underwater Intervention Vehicle компанії Kongsberg на сьогоднішній день є, ймовірно, найпередовішими виробами в даній галузі (рис. 7а). Залежно від моделі апарати можуть використовувати різні методи навігації – GPS-фіксація поверхні, DGPS-USBL метод, підводне позиціонування транспондерів та батиметрична навігація на місцевості. АПА вирізняється інтегрованою інерціальною навігаційною системою з доплерівським реєстратором швидкості, що забезпечує високоточне оновлення місцеположення, підтримання положення АПА під час автономної роботи, точне позиціонування і навігацію в різних підводних умовах.

Здатність АПА рухатися всього в декількох метрах над морським дном дає змогу створювати зображення морського дна і надр із високою роздільною здатністю.

Даний АПА має можливість оперативно локалізувати і виявляти несправності в руховій установці і системі орієнтації з використанням селективних ознак [38], що забезпечує надійні стратегії управління апаратом.

Розроблений у Великій Британії апарат REMUS 6000 (рис. 7б) може бути використаний для підводних пошуків і картографування океанського дна тривалістю до 36 год за крейсерської швидкості 1,8 м/с за допомогою апертурного сонара Kraken SAS. Конструкція апарата може витримувати триваліші і складніші місії і для цього оснащена гідролокаційними системами і стереокамерами високої роздільної здатності. Дані від цих джерел, використовуваних в алгоритмах ШІ, дають змогу здійснювати зміну маршруту підводного апарата. Модульна

архітектура апарату дає змогу адаптивно налаштувати конфігурацію корисного навантаження.

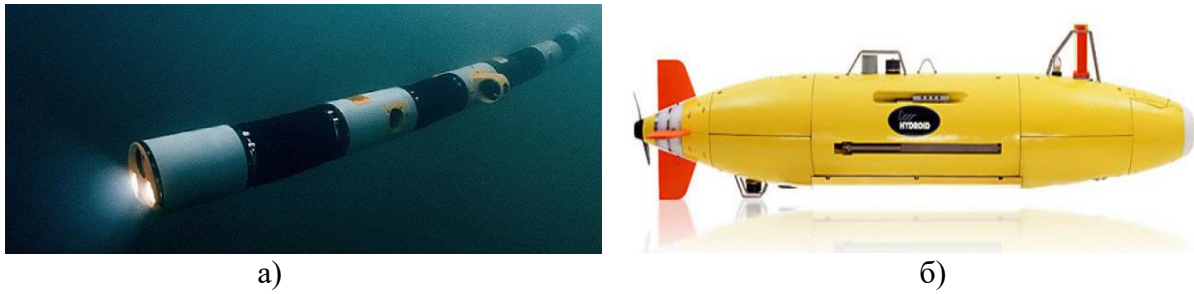


Рисунок 7 – Автономні підводні апарати:
а) Eelume Underwater Intervention Vehicle; б) REMUS 6000

Автономний надводний апарат

Зростаюча потреба в ефективних методах збору даних для вирішення завдань моніторингу та обстеження гаваней, батиметрії та оцінювання глибини, інспекції, ремонту та ТО морської інфраструктури без участі оператора зумовили інтенсивне розроблення АНА [12]. Також АНА стали широко застосовуватися в пошуково-рятувальних операціях, сейсмозвідці, моніторингу стану конструкцій і управлінні морськими спорудами [36]. Останніми роками можливості АНА стали серйозно розширюватися завдяки їхньому комплексуванню з інтелектуальними морськими системами.

Останнім часом зростає доступність комерційних варіантів, розроблених спеціально для підводних досліджень, – дистанційно керованих або повністю автономних апаратів, що відповідають різним вимогам у підводному середовищі.

Наразі більшість апаратів, наприклад Z-Boat 1800 RP, Teledyne Marine, Г'юстон, Техас, США і система морського дна HydroCat-180, зосереджені на отриманні даних з надводної поверхні з акцентом на проведенні детальних досліджень під поверхнею води (рис. 8). У роботі [39] для моніторингу та спостереження за гаванями пропонується використовувати камери. Відомий АНА, що дає змогу отримувати 2D-дані з поверхні за допомогою двовимірного лазерного сканера, який зазвичай використовують для локалізації АНА за відсутності GPS. Для збирання даних одночасно з підводної та надводної областей у дослідженнях [40] запропоновано для вивчення поверхні використовувати 3D-хмари точок, отримані за допомогою технології LiDAR, і багатопробневі ехолоти для збирання інформації про підводне середовище. Також запропоновано автономний апарат для інспекції та технічного обслуговування у багатьох областях SENSE (autonomouS vEssel for multi-domaiN inSpEction and maintEnance), що забезпечує найбільш підходяще корисне навантаження для спостереження за навколишнім середовищем вище і нижче рівня моря [12].

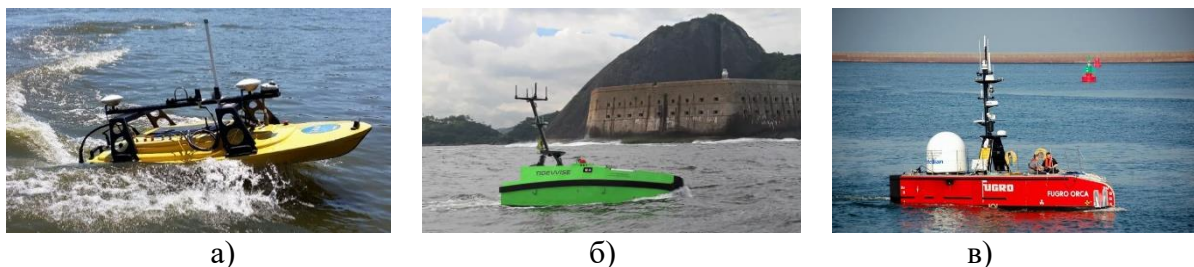


Рисунок 8 – Моделі АНА, використовувані в берегових дослідженнях і забезпеченні безпеки портів і гаваней

а) ASV Z-Boat 1800RP; б) човен ASV W TUPAN 1; в) ASV FUGRO ORCA

Апарат TUPAN, спеціально призначений для моніторингу довкілля та геодезії, оснащений низкою датчиків, включно з LiDAR, багатопроменевими ехолотами або навіть мікро-ДКПА.

Використання АНА для моніторингу, геодезії та інспекції морської інфраструктури підвищує ефективність, безпеку і рентабельність у морській і шельфовій галузях.

Порівняльний аналіз технологій використання апаратів різного класу для морських інспекцій дає змогу зробити такі висновки:

1. Будучи універсальними інструментами для проведення інспекцій, ДКПА здатні працювати на різній глибині, точно виконувати завдання управління, виконувати детальний контроль морських споруд і ремонт обладнання, завдяки дистанційно керованим маніпуляторам. Однак загальна ефективність ДКПА знижується через обмеженість їх автономності прив'язним управлінням. На експлуатаційні витрати ДКПА негативно впливає необхідність використання материнського судна [41]. Однак, оснащення цих засобів камерами і гідролокаційними системами дає змогу оперативно і точно збирати дані під час перевірок. Наразі проводять дослідження з підвищення автономності ДКПА для підводних інспекцій та операцій з ТО шляхом розроблення передових систем навігації, наведення та управління для переходу від ручного до автоматичного управління, використовуючи автономні функції для низки конкретних завдань.

2. Автономні підводні апарати, оснащені передовими навігаційними датчиками, гідролокаційними системами і камерами, застосовуються для глибоководних інспекцій, ефективного збирання даних із мінімальним втручанням людини, проведення екологічних оцінок, всебічної підводної розвідки в різних умовах тощо. Однак, обмежена ємність батареї негативно впливає на час роботи АПА. Крім того, апарат менш універсальний з точки зору можливості втручання з боку оператора порівняно з ДКПА. Проводяться активні дослідження підводних маніпуляторів для підвищення можливостей втручання АПА [42].

3. Автономні надводні апарати, маючи здатність автономної роботи і високу стійкість до хвиль і поточних впливів, спеціально розроблені для моніторингу поверхні та ефективного збору даних під час інспекцій морських споруд. Проте, АНА, маючи обмежену маневреність у поверхневих водах, з гарною якістю виконують візуальні огляди, моніторинг довкілля та батиметричні оцінки, у т. ч. в суворих морських умовах. Обмежені експлуатаційні можливості більшості наявних автономних платформ викликали до життя активні дослідження концепції AxVs. Вона передбачає здатність автономних апаратів працювати одночасно в повітряному, надводному і підводному середовищах, забезпечуючи підвищену мобільність за рахунок переміщення між цими різними середовищами [43].

4. БПЛА, завдяки різним камерам, GPS і LiDAR для навігації та збору даних, традиційно використовуються для повітряного спостереження, фото- і відеозйомки під час морських інспекцій, у т. ч. в обмеженому просторі. Однак працездатність БПЛА сильно залежить від погодних умов, а його вантажопідйомність обмежена. Широкому впровадженню нової технології БПЛА для підвищення гнучкості, роздільної здатності та ефективності збору даних перешкоджають висока вартість сенсорних систем, обмеження за вагою корисного навантаження, які не дають змоги встановлювати певні датчики або декілька датчиків, обмеження за часом автономної роботи та тривалості польоту, несприятливі погодні умови, такі як вітер, вологість, коливання температури довкілля, проблеми з пилом та дощем, а також проблеми масштабованості й вимоги до дотримання правил прямої видимості [44].

У таблиці 2 подано огляд перевірок морських видобувних установок, що дає змогу отримати цілісне уявлення про різні зони контролю, конкретні елементи, які перевіряють у цих зонах, пов'язані з ними ризики та проблеми, а також рекомендовані методи або технології апаратів, які застосовують для кожної процедури інспекції.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз властивостей автономних апаратів різних класів

Зона	Специфічний елемент	Ризики та виклики	Методи перевірки
1	Структура платформи	Корозія, пошкодження конструкції, пошкодження внаслідок пожежі або вибуху, несправність обладнання	Візуальні огляди, інспекції БПЛА, неруйнівні випробування (ультразвук або рентгенографія) для виявлення внутрішніх дефектів сталевих конструкцій
2, 3	Система трубопроводів	Протікання, корозія, ерозія, засмічення	Візуальні огляди, випробування тиском, неруйнівні випробування
3, 4	Стояки	Корозія, ерозія, втомні пошкодження внаслідок руху платформи та морських течій, пошкодження ударами плаваючих предметів	Візуальні огляди за допомогою ДКПА, ультразвукові огляди для вимірювання товщини стінок труб, внутрішній контроль
3, 4	Гнучкий стояк	Пошкодження від втоми, знос і стирання, корозія, пошкодження броньового дроту, вплив морського середовища, термічний цикл	Візуальний огляд, внутрішній візуальний огляд, ультразвуковий контроль, випробування на акустичну емісію, виявлення затоплених елементів, внутрішній огляд, рентгенографічний контроль
3, 4, 5	Контрольні лінії та пуповини	Протікання, засмічення, пошкодження через рух платформи	Візуальні огляди за допомогою ДКПА, гідравлічні та електричні випробування для перевірки функціональності
4	Швартовна система	Знос ланцюгів і тросів, корозія, пошкодження якорів	Візуальні огляди за допомогою ДУА, вимірювання напруги в швартовних тросах
4, 5	Підводна будова	Корозія, структурна втома, пошкодження, спричинені морським життям або рухом води, осадження	ДКПА або АПА, оснащені камерами та датчиками, використовуються для візуалізації та огляду конструкції
5	Гирло свердловини	Протікання, несправність обладнання, засмічення	ДКПА, оснащені датчиками, використовуються для візуальних оглядів для виявлення витоків вуглеводнів
5	Потокові лінії	Корозія, ерозія, витоки, засмічення, деформація внаслідок руху ґрунту або морських течій	БПЛА використовуються для інспекцій на далеких відстанях. Також інструменти внутрішнього контролю вставляються в трубопровід і переміщаються по ньому для виявлення аномалій

Висновки. У статті досліджується використання безпілотних літальних апаратів, автономних надводних апаратів, дистанційно керованих підводних апаратів і автономних підводних апаратів для інспекцій морських споруд. Ці методи вважаються ефективною альтернативою використанню водолазів під водою і робітників, що проводять роботи на великих висотах, забезпечуючи розширені можливості контролю, технічного обслуговування і ремонту у важкодоступних місцях, більш швидке отримання великих обсягів даних і більшу економічність.

Як і раніше, потребує вирішення визначення оптимального часу і частоти перевірок для балансування потенційних ризиків відмови обладнання і витрат на інспекцію в нафтогазовій галузі.

Основним напрямком подальшої роботи є дослідження можливості інтеграції передових сенсорних технологій з наявними БПЛА, ДКПА, АНА та АПА для досягнення більш ефективних інспекцій. Другим напрямком досліджень є використання ШІ та машинного

навчання для аналізу отриманих у результаті цих інспекцій даних для поліпшення автоматизованого виявлення дефектів і аномалій та зниження можливих ризиків. Розроблення правил і стандартів для безпечного та ефективного використання цих безпілотних апаратів становить ядро третього напряму досліджень.

REFERENCES

1. Tang, K.H.D.; Md Dawal, S.Z.; Olugu, E.U. A review of the offshore oil and gas safety indices. *Saf. Sci.* 2018, 109, 344–352.
2. Angulo, Á.; Tang, J.; Khadimallah, A.; Soua, S.; Mares, C.; Gan, T. Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth in mooring chains. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2187.
3. Feijóo, M.; Zambrano, Y.; Vidal, Y.; Tutivén, C. Unsupervised damage detection for offshore jacket wind turbine foundations based on an autoencoder neural network. *Sensors* 2021, 21, 3333.
4. Sørensen, J. Framework for risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind turbines. *Wind Energy* 2009, 12, 493–506.
5. Lian, J.; Cai, O.; Dong, X.; Jiang, Q.; Zhao, Y. Health monitoring and safety evaluation of the offshore wind turbine structure: A review and discussion of future development. *Sustainability* 2019, 11, 494.
6. Sharp, J.V.; Ersdal, G. *Underwater Inspection and Repair for Offshore Structures*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2021.
7. Bond, T.; Prince, J.; McLean, D.L.; Partridge, J.C. Comparing the utility of industry roV and hybrid-aUV imagery for surveys of fish along a subsea pipeline. *Mar. Technol. Soc. J.* 2020, 54, 33–42.
8. Jones, D.O.; Gates, A.R.; Huvenne, V.A.; Phillips, A.B.; Bett, B.J. Autonomous marine environmental monitoring: Application in decommissioned oil fields. *Sci. Total Environ.* 2019, 668, 835–853.
9. Sverdrup-Thygeson, J.; Kelasidi, E.; Pettersen, K.; Gravidahl, J. Modeling of underwater swimming manipulators. *Ifac-Papersonline* 2016, 49, 81–88.
10. He, Y.; Wang, D.W.; Ali, Z. A review of different designs and control models of remotely operated underwater vehicle. *Meas. Control* 2020, 53, 1561–1570.
11. Jung, J.; Lee, Y.; Park, J.; Yeu, T. Multi-modal sonar mapping of offshore cable lines with an autonomous surface vehicle. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 361.
12. Campos, D.; Matos, A.; Pinto, A. Modular multi-domain aware autonomous surface vehicle for inspection. *IEEE Access* 2022, 10, 113355–113375.
13. Sayed, M.; Roberts, J.; McKenzie, R.; Aracri, S.; Buchoux, A.; Stokes, A. Limpet ii: A modular, untethered soft robot. *Soft Robot.* 2021, 8, 319–339.
14. Chemisky, B.; Menna, F.; Nocerino, E.; Drap, P. Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods. *Remote Sens.* 2021, 13, 2789.
15. Varela, G. Cost–benefit assessment of offshore structures considering structural deterioration. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 1348.
16. Sands, T.D. Development of deterministic artificial intelligence for unmanned underwater vehicles (uuv). *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, 8, 578.
17. Liniger, J.; Jensen, A.L.; Pedersen, S.; Sørensen, H.; Mai, C. On the Autonomous Inspection and Classification of Marine Growth on Subsea Structures. In *Proceedings of the OCEANS 2022, Chennai, India, 21–24 February 2022*; pp. 1–7.
18. Spahić, R.; Poolla, K.; Hepsø, V.; Lundteigen, M.A. Image-based and risk-informed detection of subsea pipeline damage. *Discov. Artif. Intell.* 2023, 3, 23.
19. Amaechi, C.V.; Reda, A.; Butler, H.O.; Ja'e, I.A.; An, C. Review on Fixed and Floating Offshore Structures. Part II: Sustainable Design Approaches and Project Management. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 973.
20. Moan, T. Life Cycle Structural Integrity Management of Offshore Structures. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2018, 14, 911–927.
21. Zhu, J. Review on Structural Health Monitoring of Offshore Platform. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 2014, 012019.

22. de Souza, A.P.F.; de Souza, M.I.L.; Netto, T.A.; Brandão, G.; Estefen, S.; Rubi, V.; Vilardo, G.P.; Procaci, M. Técnicas de Inspeção de Sistemas Submarinos—Uma Visão Geral Para Uma Implementação Ideal de Inspeção Baseada em Risco (IBR). In Proceedings of the 8th International Congress on Waterborne Transportation, Shipbuilding and Offshore Constructions Proceedings, Campinas, Galoá, Rio de Janeiro, Brazil, 26 October 2020.
23. dos Santos, N.F.G. Inspeção Estrutural Utilizando Drones; Undergraduate project; Federal University of Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, Brazil, 2023.
24. Kabbabe Poleo, K.; Crowther, W.J.; Barnes, M. Estimating the impact of drone-based inspection on the Levelised Cost of electricity for offshore wind farms. *Results Eng.* 2021, 9, 100201.
25. Poggi, L.; Gaggero, T.; Gaiotti, M.; Ravina, E.; Rizzo, C.M. Recent developments in remote inspections of ship structures. *Int. J. Nav. Archit. Ocean. Eng.* 2020, 12, 881–891.
26. Zeng, Y.; Wang, X.; Qin, X.; Hua, L.; Xu, M. Laser Ultrasonic inspection of a Wire + Arc Additive Manufactured (WAAM) sample with artificial defects. *Ultrasonics* 2021, 110, 106273.
27. Liu, X.; Guo, Z.; Bai, D.; Yuan, C. Study on the mechanical properties and defect detection of low alloy steel weldments for large cruise ships. *Ocean. Eng.* 2022, 258, 111815.
28. Sahadan, S.N.; Abdullah, S.; Arifin, A.; Singh, S.S.K. Assessing the magnetic flux leakage contraction parameters for the fatigue life prediction of SAE1045 steel specimens. *Structures* 2021, 34, 4077–4085.
29. Angelo, J.; Bennecer, A.; Picton, P.; Kaczmarczyk, S.; Soares, A. Eddy current analysis of shipped stainless steel heat exchanger bundle. *Case Stud. Nondestruct. Test. Eval.* 2016, 6, 89–93.
30. Tang, R.; Zhang, S.; Wu, W.; Zhang, S.; Han, Z. Explainable deep learning based ultrasonic guided wave pipe crack identification method. *Measurement* 2023, 206, 112277.
31. Britton, J.; Taylor, M.L. 25—Advancements in Cathodic Protection of offshore structures. In *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*; El-Sherik, A., Ed.; Woodhead Publishing Series in Energy; Woodhead Publishing: Boston, MA, USA, 2017; pp. 593–612.
32. Inspection in the Splash Zone. Available online: <https://oceantech.no/inspection/> (accessed on 24.06.24).
33. Palomer, A.; Ridao, P.; Ribas, D. Inspection of an underwater structure using point-cloud SLAM with an AUV and a laser scanner. *J. Field Robot.* 2019, 36, 1333–1344.
34. Thomas, C.; Simetti, E.; Casalino, G. A unifying task priority approach for autonomous underwater vehicles integrating homing and docking maneuvers. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 162.
35. Liu, T.; Hu, Y.; Xu, H.; Ghami, M. Investigation of an underwater vectored thruster based on 3rps parallel manipulator. *Math. Probl. Eng.* 2020, 2020, 9287241.
36. Zhou, D.; Yu, Y.; Wang, J.; Li, Z. Design and validation of a fast wireless low-frequency vibration inspection system for offshore platform structures. *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control* 2019, 39, 720–728.
37. Zhang, B.; Ji, D.; Liu, S.; Zhu, X.; Xu, W. Autonomous Underwater Vehicle navigation: A review. *Ocean Eng.* 2023, 273, 113861.
38. Liu, F.; Long, Y.; Luo, J.; Pu, H.; Duan, C.; Zhong, S. Active fault localization of actuators on torpedo-shaped autonomous underwater vehicles. *Sensors* 2021, 21, 476.
39. Yang, W.R.; Chen, C.Y.; Hsu, C.M.; Tseng, C.J.; Yang, W.C. Multifunctional Inshore Survey Platform with Unmanned Surface Vehicles. *Int. J. Autom. Smart Technol.* 2011, 1, 19–25.
40. Leedekerken, J.C.; Fallon, M.F.; Leonard, J.J. Mapping Complex Marine Environments with Autonomous Surface Craft. In *Experimental Robotics: The 12th International Symposium on Experimental Robotics*; Khatib, O., Kumar, V., Sukhatme, G., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 525–539.
41. Zhao, C.; Thies, P.; Johannig, L. Offshore inspection mission modelling for an asv/rov system. *Ocean Eng.* 2022, 259, 111899.
42. Danielis, P.; Parzyjegla, H.; Ali, M.A.M.; Torres, F.S. Simulation model for energy consumption and acoustic underwater communication of autonomous underwater vehicles. *WMU J. Marit. Aff.* 2021, 21, 89–107.

43. Bowker, J.; Tan, M.; Townsend, N. Axv: An autonomous vehicle concept capable of operating throughout the ocean space: Air, surface and subsea. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.* 2023, 237, 918–928.
44. Wanasinghe, T.R.; Gosine, R.G.; De Silva, O.; Mann, G.K.I.; James, L.A.; Warriar, P. Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges. *IEEE Access* 2020, 8, 166980–166997.

Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M.

USE OF HYBRID ROBOTIC COMPLEXES FOR INSPECTION OF MARINE OIL AND GAS FACILITIES

The aim of this paper is to analyse the current state and prospects of using hybrid robotic systems for the inspection of offshore oil and gas facilities. This goal is achieved during inspections in the offshore industry through the use of hybrid robotic systems, which include autonomous underwater vehicles, remotely operated underwater vehicles, unmanned aerial vehicles and autonomous surface vehicles, acting according to a single plan to minimise the risk to humans while providing accurate and reliable information about the condition of equipment in any difficult conditions. Remotely operated underwater vehicles and autonomous underwater vehicles are key links in the system for monitoring the condition and safety of offshore industry facilities. With access to hard-to-reach areas on floating structures, modern imaging technology and excellent manoeuvrability, UAVs provide detailed high-resolution images to monitor the condition of structures above the waterline, allow for prompt detection of corrosion or mechanical damage to structures and promptly propose urgent measures to eliminate them. Increased safety during regular inspections by unmanned aerial vehicles in various areas of the platform to identify potential risks that could endanger personnel, assets and the environment is achieved by excluding inspectors from working at high altitude or depth and/or in hazardous conditions. The most significant results are the allocation of several inspection zones depending on the availability of equipment and the procedure for conducting inspections on fixed and floating offshore structures. The significance of the obtained results lies in the development of proposals for the use of unmanned aerial vehicles, surface vehicles and underwater vehicles for the inspection of offshore structures, which is considered an effective alternative to the use of underwater divers and workers working at high altitudes, providing enhanced control, maintenance and repair capabilities in hard-to-reach places and faster acquisition of large amounts of data. Thus, the main direction for further work is to investigate the possibility of integrating advanced sensor technologies with existing unmanned systems to achieve more efficient inspections and using artificial intelligence and machine learning to analyse the data obtained from these inspections to improve automated detection of defects and anomalies and reduce possible risks.

Keywords: hybrid robotic system, autonomous underwater vehicle, remotely operated underwater vehicle, unmanned aerial vehicle, autonomous surface vehicle, navigation, ship, grounding, decision maker, ship hull kit, damage, oil spill, vessel, decision support system