

Дем'яненко С.К., Якусевич Ю.Г., Гімпель Р.М., Дорофєєва З.Я.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Пріоритетним завданням при технічному обслуговуванні (експлуатації) механічного обладнання є забезпечення його безвідмовної роботи.

В статті механічне обладнання судноплавних гідротехнічних споруд розглядається, як елемент системи більш високого порядку. Ймовірними причинами розвитку деструктивних процесів і ушкоджень та реалізації відмов механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд в роботі прийняті: конструктивні, технологічні та експлуатаційні. Показано, що реалізація однієї з перерахованих причин найбільш ймовірна на визначених умовних етапах експлуатації механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд залежно від термінів його експлуатації.

В статті запропоновано структуру методів неруйнівного контролю при оцінці стану механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд.

Відмічено, що фактична чутливість методів неруйнівного контролю (мінімальний розмір дефекту, що виявляється) в умовах експлуатаційного контролю істотно відрізняється від граничних значень, зазначених у нормативних документах, і залежить від параметрів дефектів і умов проведення діагностичних операцій.

Показано, що однією з основних умов своєчасного виявлення втомних ушкоджень в експлуатаційних умовах є раціональний вибір методу визначення зміни технічного стану, який сполучає можливість реалізації його фізичних принципів в умовах проведення операції з урахуванням параметрів дефектів і динаміки деградаційного процесу. Доведено, що раціональний вибір методів для виявлення втомних тріщин може бути зроблений тільки з урахуванням основних параметрів реальних дефектів, їх розташування та умов проведення контролю, вплив яких на чутливість і ймовірність оцінюється сукупністю коефіцієнтів.

Запропоновані коефіцієнти, що враховують параметри дефектів та умови проведення контролю. Досліджено вплив властивостей дефекту (тріщини) і стану контрольованої ділянки на його виявлення методами неруйнівного контролю.

Зроблений висновок, що ефективність пошуку втомних тріщин методами неруйнівного контролю залежить не стільки від граничної чутливості самих методів, скільки від параметрів дефектів і умов проведення контролю.

Ключові слова: втомне ушкодження, дефект, метод, механічне обладнання, неруйнівний контроль, судноплавна гідротехнічна споруда.

Постановка проблеми. Елементи механічного обладнання гідротехнічних споруд, зокрема судноплавних шлюзів, знаходяться в експлуатації довше призначеного терміну служби у 25 років. Наприклад, велика частина воріт, затворів і їх приводів експлуатується довше 40–50 років. Важливою причиною необхідності виконання відновлювальних робіт, включаючи заміну обладнання, є протікання деструктивних процесів різної інтенсивності. До таких процесів, насамперед, відносяться корозійне, втомно–корозійне руйнування. Неконтрольований розвиток зазначених процесів може привести до деградаційної відмови елемента. Для попередження реалізації подібних відмов механічного обладнання виконується оцінка технічного стану його основних елементів з урахуванням динаміки

деструктивних процесів, що потребує застосування відповідних наукових методів. Аналіз сучасних методів і засобів отримання діагностичної інформації про динаміку зміни технічного стану механічних систем, дозволяє допустити, що удосконалення системи контролю за механічним обладнанням гідротехнічних споруд повинно проводитися у таких напрямках:

- локалізація ділянок утворення потенційних дефектів для виявлення їх засобами неруйнівного контролю;
- збільшення тривалості прогнозу зміни технічного стану елементів, шляхом отримання додаткової інформації про їх стан;
- вибір діагностичних показників, що корелюють зі зміною технічного стану елементів.

При спостереженнях за механічним обладнанням судноплавних шлюзів виконується оцінювання їх напружено–деформованого стану за допомогою методу кінцевих елементів і тензометричних вимірів. Основним їх недоліком є низька оперативність і значна залежність результатів відхилень напруг від розрахункових значень, як по величині, так і по напрямку. Останнім часом розвиваються фізичні методи оперативного контролю прикладених напруг у різних галузях промисловості. У зв'язку з цим актуальним дослідженням є аналіз методів визначення зміни технічного стану елементів механічного обладнання гідротехнічних споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними джерелами інформації при виконанні роботи стали праці відомих вітчизняних та закордонних спеціалістів у галузі теорії надійності та механіки твердого тіла: Я.М. Колотиркіна, В.Б. Карпенка, І.А. Одинга, С.В. Серенсена, В.С. Іванової, П.І. Кудрявцева, Д.Н. Відмана, Я.Б. Фрідмана, В.Ф. Терентьєва, С.А. Кораблевой, В.М. Гребенніка, П. Форреста.

Фізичні основи, методики контролю і застосовування технічних засобів розглянуті в нормативних документах на дані методи, а також у роботах В.В. Ключова, П.П. Прохоренка, Г.С. Шеліхова, А.К. Гурвича, І.Н. Єрмолова, А.Д. Ярошека. У більшості з них увага приділена питанням технологічного контролю, що відрізняється від експлуатаційного не тільки за умовами його проведення (доступність, висвітлення, температура навколишнього середовища і т.п.), але й за характером та властивостями ушкоджень, що зменшує ймовірність своєчасного їх виявлення. Важливими для даного дослідження є роботи Кузьмицького М.Л., Ксенофонтова Н.М. [1–3] та Мішина А.С. [4], в яких комплексно досліджуються питання підвищення надійності механічного обладнання гідротехнічних споруд.

Метою статті є проведення аналізу існуючих та перспективних методів визначення зміни технічного стану елементів механічного обладнання гідротехнічних споруд для вироблення обґрунтованих рекомендацій щодо порядку їх застосування.

Викладення основного матеріалу дослідження. До судноплавних гідротехнічних споруд (СГТС) відносяться: “шлюзи і суднопідйомники з підхідними каналами, судноплавні канали, греблі, дамби, водоскиди і водоспуски, паромні переправи і загороджувальні пристрої” [5], [6]. Значну частину СГТС складають судноплавні шлюзи, що розрізняються між собою основними характеристиками, конструктивними рішеннями, якістю технологічного виконання, умовами і терміном експлуатації [7].

Механічне обладнання (МО) СГТС представляє собою сукупність пристроїв та обладнання, що перебивають суднопропускні, водозливні, водозабірні та водопропускні отвори, які дозволяють робити наповнення, спорожнювання камер шлюзів, швартування судів, затримку плаваючих предметів, а також комплекс допоміжних пристроїв, що забезпечують можливість експлуатації й ремонту обладнання [8]. Склад МО СГТС варто віднести до механічних систем довгострокового користування, що на думку авторів [1, 8] відрізняються від масових систем рядом особливостей:

- тривалий термін експлуатації;
- індивідуальний або дрібносерійний характер виготовлення елементів;

- малий ступінь відпрацьовування конструкцій через невелику кількість аналогічних виробів і обмеженої можливості проведення повномасштабних випробувань;
- неврахуванні при проектуванні впливів, кількість яких зростає з часом експлуатації;
- значні відновлювальні роботи, які виконуються за різними технологіями;
- великі габарити і вартість виробів та їх елементів;
- можливість експлуатації аналогічних виробів у різних умовах.

З погляду системного аналізу [9, 10] механічне обладнання повинне розглядатися, як елемент системи більш високого порядку СГТС (судноплавний шлюз) (рис. 1).

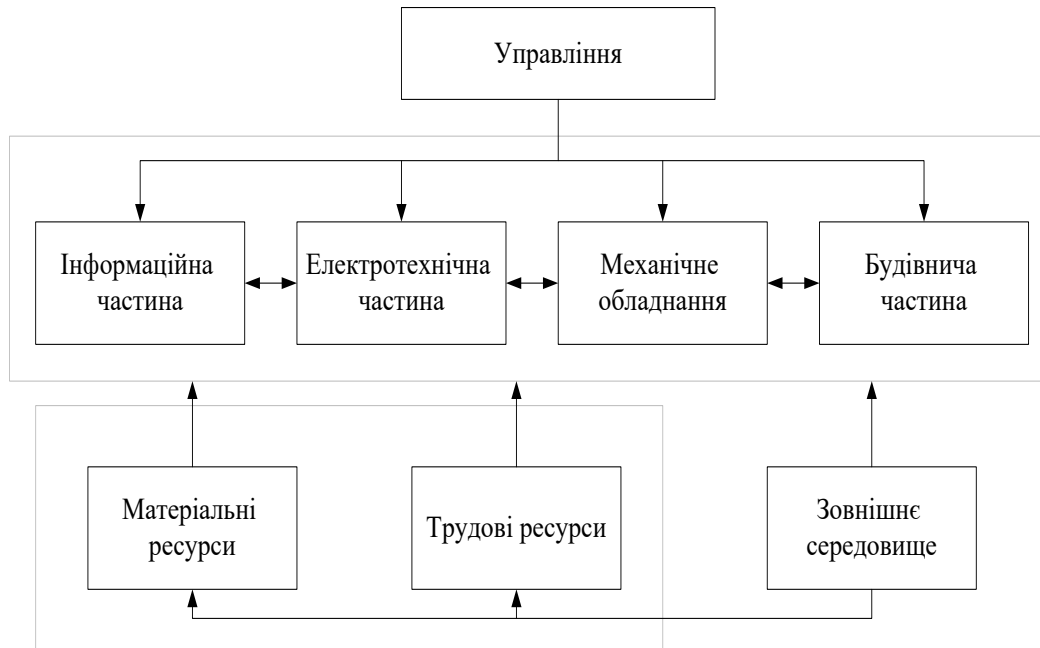


Рисунок 1 – Декомпозиція СГТС як складної системи

Як система, механічне обладнання представляє собою сукупність m елементів, що мають зв'язки між собою та забезпечують його функціонування з необхідним значенням безвідмовності роботи P_{MO} .

У загальному випадку як ймовірні причини розвитку деструктивних процесів і ушкоджень та реалізації відмов МО СГТС можуть розглядатися [8]:

- конструктивні – є наслідком невідповідності проектних рішень МО або окремих його елементів фактичним умовам експлуатації;
- технологічні – викликані невідповідністю технології їх виготовлення або монтажу вимогам проектної документації і нормативно-технічних документів;
- експлуатаційні – розуміються, як зміна технічного стану елементів у результаті об'єктивного протікання деструктивних процесів при проектних умовах експлуатації, що не виключає зміни характеристик динаміки процесів, викликаних зовнішніми не штатними впливами відносно МО, такими як: навали судів, колювання рівнів б'єфів, сейсмічні явища, і вплив інших складових СГТС (будівельна та електрична частини, людський фактор).

З аналізу відмов і ушкоджень випливає, що реалізація однієї з перерахованих причин найбільш ймовірна на визначених умовних етапах експлуатації МО СГТС [2] (рис 2).

На першому (початковому) етапі експлуатації (~ до 5 років) реалізуються відмови, обумовлені наявністю конструктивних і технологічних дефектів обладнання. Деструктивні процеси елементів МО в цей період, як правило, рідко приводять до їх відмови, тому що незважаючи на великий діапазон можливих швидкостей їх протікання, самі процеси, при номінальних умовах, мають досить тривалий характер.

Для другого – стаціонарного етапу експлуатації МО (~ до 50 років) характерно найбільша кількість відмов, що обумовлені протіканням деструктивних процесів.

Третій етап характеризується різким збільшенням кількості відмов елементів, зокрема через досягнення багатьох показників технічного стану їх максимально (мінімально) допустимих значень, наслідком чого є зниження надійності споруд.

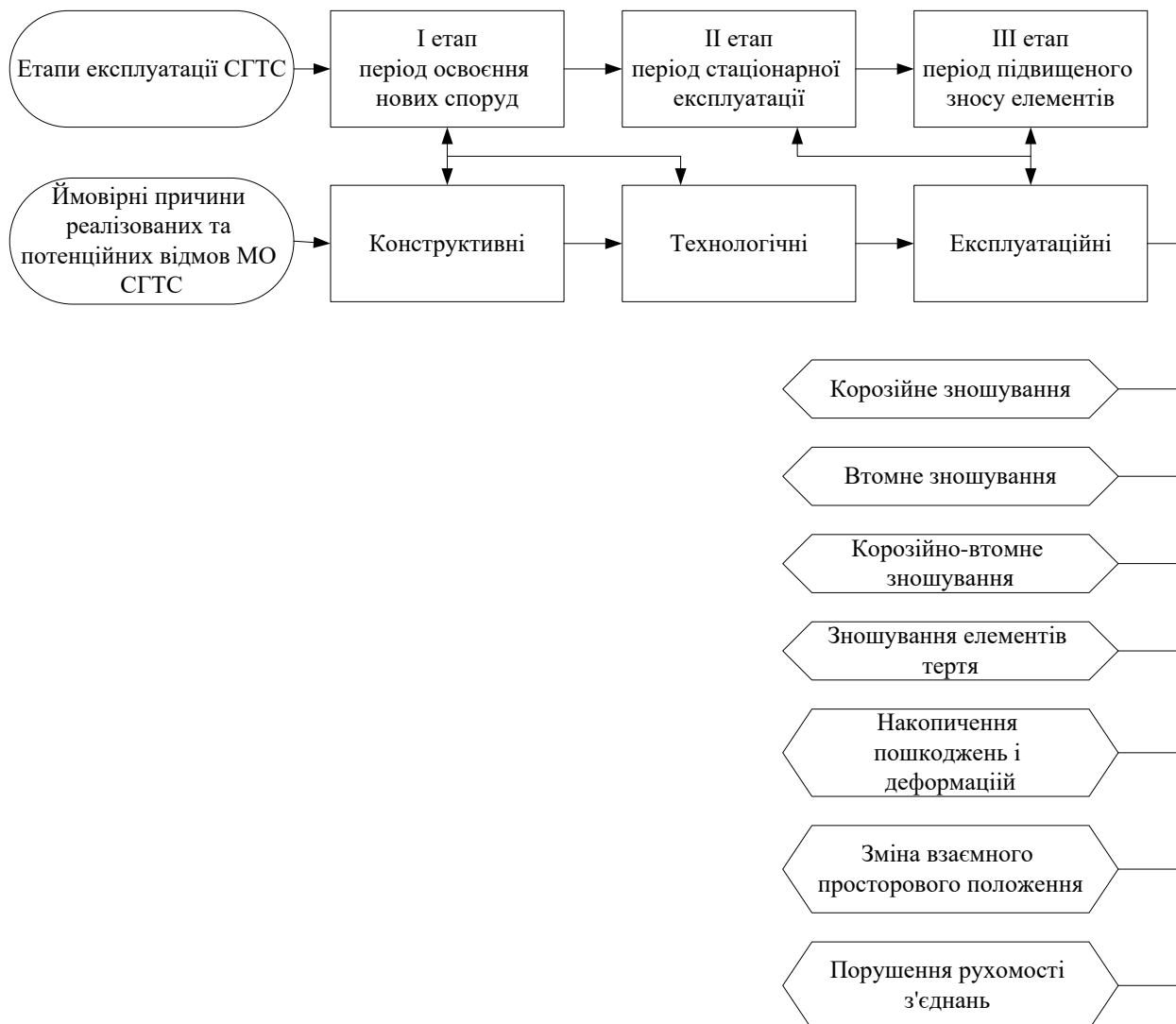


Рисунок 2 – Схема ймовірних причин відмов і ушкоджень МО СГТС залежно від термінів його експлуатації

Для оцінювання зміни технічного стану елементів МО СГТС через вплив деструктивних процесів використовуються різні методи неруйнівного контролю, номенклатура та галузь застосування яких представлена на рис. 3. Результати досліджень і накопичений досвід використання методів неруйнівного контролю (НК) на об'єктах дослідження дозволяє зробити висновок про те, що їх фактична чутливість (мінімальний розмір дефекту, що виявляється) в умовах експлуатаційного контролю істотно відрізняється від граничних значень, зазначених у нормативних документах, і залежить від параметрів дефектів і умов проведення діагностичних операцій.

Однією з основних умов своєчасного виявлення втомних ушкоджень в експлуатаційних умовах є раціональний вибір методу визначення зміни технічного стану, який сполучає можливість реалізації його фізичних принципів в умовах проведення операції з урахуванням параметрів дефектів і динаміки деградаційного процесу. У нормативних документах [5, 8] конкретні вимоги до їх вибору, як правило, не наводяться. Можна зробити висновок, що такий вибір повинний ґрунтуватися на дослідженнях впливу зазначених факторів умовам

проведення контролю, розташування, орієнтації і параметрам реальних дефектів. Вплив зазначених факторів оцінюється сукупністю коефіцієнтів.

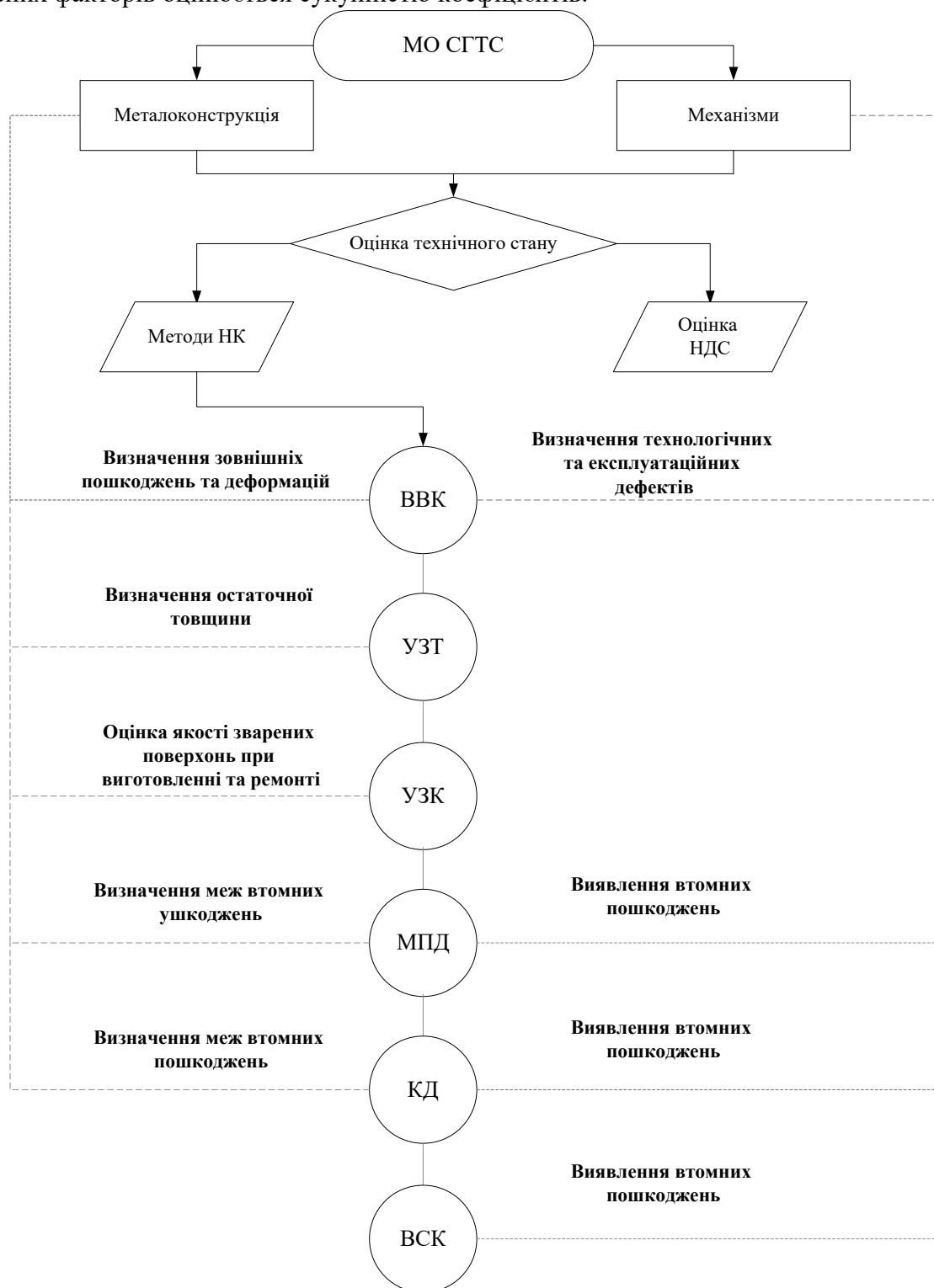


Рисунок 3 – Структура методів неруйнівного контролю при оцінці стану механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд

В даний час при оцінці технічного стану МО СГТС, у тому числі для виявлення втомних ушкоджень, застосовуються такі методи НК, як візуально-вимірний контроль (ВВК), ультразвуковий контроль (УЗК), магнітопорошкова дефектоскопія (МПД) для феромагнітних матеріалів, віхрострумний контроль (ВСК) і капілярні методи контролю, з яких далі буде розглядатися тільки кольорова дефектоскопія (КД).

Раціональний вибір методів для виявлення втомних тріщин може бути зроблений тільки з урахуванням основних параметрів реальних дефектів, їх розташування та умов проведення контролю, вплив яких на чутливість і імовірність оцінюється сукупністю коефіцієнтів K_i , що враховують:

- заповнення порожнини дефекту (K_{II});
- корозійне руйнування порожнини гирла тріщини (K_K);
- форму стінки тріщини (K_u);
- змінний перетин тріщини (K_c);
- величину розмірів тріщини (розкриття, протяжність) (K_p);
- орієнтацію тріщини (K_o);
- геометрію контрольованої ділянки (K_ϕ);
- нестабільність електричних (K_δ) та магнітних (K_μ) властивостей метала контрольованої деталі;
- підвищену шорсткість контрольованої поверхні (K_R);
- структурну неоднорідність матеріалу (K_H);
- умови проведення контролю (K_T).

Значення зазначених коефіцієнтів K_i можуть змінюватися від 1 (висока ймовірність виявлення дефекту до 0 (можливість пропуску дефектів)).

При УЗК чутливість і імовірність виявлення дефектів залежить від:

- форми стінки тріщини ($K_u < 1$) та її орієнтації ($K_o < 1$), які приводять до зміни відбивної здатності дефекту;
- геометрії контрольованої ділянки – через появу додаткових відбивачів акустичного сигналу ($K_\phi < 1$);
- шорсткості контрольованої поверхні – через зміну умов введення ультразвукових коливань ($K_R < 1$);
- наявності локальних ділянок хімічної і структурної неоднорідності, що мають інші акустичні властивості ($K_H < 1$).

При УЗК значення коефіцієнтів K_{II} , K_c , $K_\delta \rightarrow 1$.

На чутливість і імовірність виявлення дефектів МПД впливає:

- корозійне руйнування порожнини гирла тріщини – через осадження магнітного порошку в корозійній раковині незалежно від наявності тріщини ($K_K < 1$);
- орієнтація тріщини, тому найкраще її виявлення забезпечується у випадку, коли магнітні силові лінії в намагніченій деталі спрямовані під прямим (або близьким до нього) кутом до площини тріщини ($K_o < 1$);
- геометрія контрольованої ділянки – через можливе утворення полів розсіювання на ділянках зміни форми деталі незалежно від наявності тріщини ($K_\phi < 1$);
- нестабільність магнітних властивостей, що змінює поширення магнітних силових ліній ($K_p < 1$);

– підвищена шорсткість, при якій утворюються множинні локальні поля розсіювання в кореневій частині виступів, а також погіршуються умови стікання магнітної суспензії ($K_\mu < 1$)

Значення коефіцієнтів K_{II} , K_u , K_c і K_δ при використанні МПД наближаються до одиниці.

Для капілярних методів контролю, варто враховувати:

- наявність попереднього заповнення порожнини і корозійного руйнування порожнини гирла тріщини, що впливають на проникнення пенетранту в порожнину дефекту ($K_{II} < 1$) і на якість капілярного контакту виявляючого складу, з гирлом тріщини ($K_K < 1$);
- змінний перетин тріщини, що ускладнює заповнення її порожнини пенетрантом ($K_c < 1$);

– геометрію контрольованої ділянки, у результаті чого змінюються умови видалення проникаючого пенетранту ($K_\phi < 1$);

– шорсткість поверхні, що визначає умови видалення проникаючого пенетранту з контрольованої поверхні ($K_R < 1$).

Значення коефіцієнтів K_o , K_m , K_δ при використанні КД наближається до одиниці.

У ВСК чутливість і імовірність виявлення дефектів залежить від:

– корозійного руйнування порожнини гирла тріщини – через відмінність геометрії локальної контрольованої ділянки, від геометрії ділянки, по якій виконується настройка приладу ($K_k < 1$):

– нестабільності електричних властивостей окремих ділянок деталі, що впливає на величину вихрових струмів ($K_o < 1$):

– нестабільності магнітних властивостей, що викликають зміну поширення вихрових струмів (K_μ);

– підвищеної шорсткості, через змушене зменшення настроювання порога чутливості приладу ($K_R < 1$).

Значення коефіцієнтів K_{II} , K_u , K_c , K_o і K_ϕ при використанні КД наближаються до одиниці.

Ймовірність виявлення тріщини для перерахованих методів також залежить від її розмірів (розкриття, довжина, для УЗК – мінімальний розмір відбивача) ($K_p < 1$), обмеженою граничною чутливістю методів НК. При експлуатаційному контролі досягнення граничної чутливості всіх методів НК, як правило, малоймовірно ($K_p < 1$) через умови його проведення (досконалість технологій, реальні можливості використаного обладнання, доступність контрольованої ділянки, кваліфікація персоналу, освітленість і т.п.) ($K_T < 1$).

Приведений аналіз залежності K_i для різних методів контролю дозволяє зробити якісну оцінку ефективності методів контролю в залежності від K_i (табл.1), що дозволяє підвищити рівень оптимізації вибору методів контролю в реальних умовах.

Таблиця 1– Вплив властивостей дефекту (тріщини) і стану контрольованої ділянки на її виявлення методами неруйнівного контролю

Параметри	Методи неруйнівного контролю			
	УЗК	МПД	КД	ВСК
1	2	3	4	5
Властивості втомної тріщини				
Заповнення порожнини тріщини K_{II}	→ 1	→ 1	→ 0	→ 1
Корозійне руйнування порожнини гирла тріщини K_k	→ 1	(0,1)	→ 0	→ 0
Форма стінки тріщини K_u	→ 0	→ 1	→ 1	→ 1
Перемінний перетин тріщини K_c	(0,1)	→ 1	(0,1)	→ 1
Величина розмірів тріщини K_p	(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,1)
Орієнтація тріщини K_o	→ 0		→ 1	→ 1
Стан контрольованої ділянки				
Геометрія контрольованої ділянки K_ϕ	→ 0	(0,1)	(0,1)	→ 1
Нестабільність електричних властивостей K_δ	→ 1	→ 1	→ 1	→ 0
Нестабільність магнітних властивостей K_m	→ 1	(0,1)	→ 1	(0,1)
Підвищена або різна шорсткість K_R	→ 0	(0,1)	→ 0	(0,1)
Хімічна і структурна неоднорідність K_H	(0,1)	→ 1	→ 1	→ 1

З урахуванням інформації, представленої в таблиці 1, при виборі методів НК та властивостей ймовірних дефектів, їх розмірів, орієнтації і стану контрольованої поверхні повинні виключатися ті з них, у яких серед сукупності коефіцієнтів маються $K_i \rightarrow 0$.

У загальному випадку імовірність виявлення втомних тріщин визначається як добуток коефіцієнтів:

$$P = \prod_{i=1}^n K_i. \quad (1)$$

Оптимальним методом є той, для якого в конкретних умовах отримані найбільші значення P при достатній чутливості. Для підвищення надійності виявлення дефектів рекомендується дублювання контролю декількома методами.

Виконані дослідження показали, що ефективність пошуку утомних тріщин методами НК залежить не стільки від граничної чутливості самих методів, скільки від параметрів дефектів і умов проведення контролю.

Незважаючи на великий обсяг виконаних досліджень, удосконалення конструкцій і технології їх виготовлення з урахуванням закономірності розвитку процесу, руйнування деталей різних механічних систем, що породжено втому, і в даний час є однією з основних причин, що обмежують термін їх безпечної експлуатації, та обумовлює складність спостереження за розвитком процесу.

Висновки. Одним з найбільш критичних деструктивних процесів для елементів механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд є утомне (корозійно–утомне) ушкодження. З урахуванням фактичної кількості циклів навантаження до реалізації відмов, для значної частини розглянутих елементів, процес можна класифікувати як малоциклову утому.

Система попередження втомних руйнувань елементів механічного обладнання, яка використовується в даний час на судноплавних гідротехнічних спорудженнях, заснована на періодичному виявленні втомних тріщин та не в змозі підвищити свою ефективність без збільшення частоти перевірок і відповідного росту експлуатаційних витрат.

Виявлення утомних тріщин методами неруйнівного контролю залежить не стільки від граничної чутливості самих методів, скільки від параметрів дефектів і умов проведення контролю.

Відомі критерії нерозповсюдження утомних тріщин, при існуючому рівні їх розробки не можуть бути повною мірою використані при оцінці технічного стану механічного обладнання, тому що вимагають наявності інформації про ряд параметрів, оперативне отримання якої є проблематичним при експлуатаційному контролі.

До отримання необхідної інформації, що досить точно визначає динаміку розвитку втомних тріщин, своєчасне виявлення цих тріщин є необхідною умовою ефективності розвитку даних діагностичних систем.

Перспективним напрямком оцінки механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд є застосування фізичних методів неруйнівного контролю, що відрізняються від інших необхідною при діагностиці оперативністю і можливістю виміру напруг від фактичних, а не розрахункових навантажень. Їх застосування для оцінки технічного стану елементів механічного обладнання судноплавних гідротехнічних споруд можливо після проведення лабораторних і експериментальних досліджень та перевірки основних характеристик методів, що підтверджують можливість їх використання в необхідному діапазоні вимірів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кузьмицкий М.Л. Оптимизация выбора методов неразрушающего контроля для обнаружения усталостных повреждений элементов механического оборудования / М.Л. Кузьмицкий, Н.М. Ксенофонтов // Журнал университета Водных Коммуникаций. – 2017. – № 3 (15). – С. 6–18.

2. Kuz'mitskii M.L. Investigation of the Technical Condition of Miter Gates and Their Lock Support Elements of the Northern Dvina System / M.L. Kuz'mitskii, N.M. Ksenofontov // *Power Technology and Engineering*. – 2017. – 51 (2). – P. 188–193.
3. Кузьмицкий М.Л. Предупреждение разрушения деталей, имеющих усталостные повреждения / М.Л. Кузьмицкий, Г.В. Медведев // *Передовой опыт и новая техника*. – 1982. – Вып. I.
4. Мишин А.С. Оценка действующих напряжений в металлоконструкции нижних двустворчатых ворот судоходных шлюзов / А.С. Мишин // *Журнал университета Водных Коммуникаций*. – 2010. – Вып. 4(8). – С.14–20.
5. Правила технической эксплуатации судоходных гидротехнических сооружений. – М.: Транспорт, 1979. – 56 с.
6. Гапеев, М.А. Системы питания судоходных шлюзов / М.А. Гапеев, В.В. Кононов – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2013. – 268 с.
7. Васильев Г.М. Надежность и долговечность судоходных шлюзов / Г.М. Васильев, В.В.Баланин, М.Л.Кузьмицкий // *Речной транспорт* – 1988 – С.30–33.
8. Кузьмицкий М.Л. Методика оценки фактического риска аварии механического оборудования СГТС (Пояснительная записка). Тема П–02.01 №27–3.01С–00Р. Разработка компьютерной методики оценки фактического риска аварии СГТС. Механическая часть: Отчет о НИР / М.Л. Кузьмицкий. – СПб.: Санкт–Петербургский университет водных коммуникаций, 2002 – 46 с.
9. Згуровський М.З. Основи системного аналізу : підручник / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. –К. : Видавнича група ВНУ, 2017. – 544 с.
10. Теоретичні основи формування та деградації складних організаційно–технічних систем: монографія / Є. Б. Смірнов, В. І. Ткаченко, І. В. Рубан, В. Г. Малюга та ін.– Х.: ФОП Панов А.М., 2018. – 162 с.
11. Ярошек, А.Д. Дослідження зовнішніх шарів деталей машин без руйнування методом вихрових струмів: автореф. дис. канд. тех. наук – Київ, 1999. – 201 с.
12. Романив О.Н. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие: в 4 т. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов – 4 т. / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. Стадник. – К.: Наукова Думка, 2009. – 679 с.
13. Advanced reliability analysis of fatigue cracking in horizontally framed miter gates / Department of the army. U.S. Army Corps of Engineers. –W. : 2010 – 115 p.
14. Commander B.C. Detection of Structural Damage on Miter Gates: Technical Report. REMR–CS–45 / Brett C. Commander, Jeff X. Schulz, George G. Goble. – Bridge Diagnostics: 1994. – 46 p.

REFERENCES

1. Kuz'mitskii, M.L. and Ksenofontov, N.M. (2017), "Optimizatsiya vybora metodov nerazrushayushchego kontrolya dlya obnaruzheniya ustalostnykh povrezhdenii elementov mekhanicheskogo oborudovaniya" [Optimization of the choice of non-destructive testing methods for the detection of fatigue damage to elements of mechanical equipment] *Journal of the University of Water Communications*, No. 3 (15), pp. 6–18.
2. Kuz'mitskii, M.L. and Ksenofontov, N.M. (2017), Investigation of the Technical Condition of Miter Gates and Their Lock Support Elements of the Northern Dvina System, *Power Technology and Engineering*, 51 (2), pp. 188–193.
3. Kuz'mitskii, M.L., Medvedev, G.V. (1982), "Preduprezhdenie razrusheniya detalei, imeyushchikh ustalostnye povrezhdeniya" [Prevention of the destruction of parts with fatigue damage], *Peredovoi opyt i novaya tekhnika*, Vol. I,
4. Mishin, A.S. (2010), "Otsenka deistvuyushchikh napryazhenii v metallokonstruktsii nizhnikh dvustvorchatykh vorot sudokhodnykh shlyuzov" [Assessment of current stresses in the metal structures of the lower bivalve gates of shipping locks], *Journal of the University of Water Communications*, Vol. 4 (8), pp. 14–20.

-
5. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Rules for the technical operation of navigable hydraulic structures], Moscow, 1979, 56 p.
 6. Gapeev, M.A. and Kononov, V.V. (2013), "*Sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov*" [Shipping Gateway Power Systems], GUMRF imeni admiral S.O. Makarova, St. Petersburg, 268 p.
 7. Vasil'ev, G.M., Balanin, V.V. and Kuz'mitskii M.L. (1988), "Nadezhnost' i dolgovechnost' sudokhodnykh shlyuzov" [Reliability and durability of shipping locks], *Rivertransport*, pp. 30–33.
 8. Kuz'mitskii, M.L. (2002), "*Metodika otsenki fakticheskogo riska avari imekhanicheskogo oborudovaniya SGTS (Poyasnitel'naya zapiska). Tema P–02.01 №27–3.01S–00R. Razrabotka komp'yuternoi metodiki otsenki fakticheskogo riska avarii SGTS. Mekhanicheskaya chast': Otchet o NIR*" [Methodology for assessing the actual risk of an accident of mechanical equipment of the GTS (Explanatory note). Subject P–02.01 No. 27–3.01C–00P. Development of a computer-aided methodology for assessing the actual risk of a GTS accident Mechanical: Research Report], St. Petersburg, 46 s.
 9. Zghurovskiy, M.Z. and Pankratova, N.D. (2017), "*Osnovy systemnoho analizu :pidruchnyk*" [Basics of system analysis: a textbook], Kyiv, 544 s.
 10. Smirnov, Ye. B., Tkachenko, V. I., Ruban, I. V. and Maliuha, V. H. (2018), "*Teoretychni osnovy formuvannia ta dehradatsii skladnykh orhanizatsiino–tekhnichnykh system: monohrafiia*" [Theoretical basis for the formation and degradation of folding organizational systems: monograph], Kharkiv, 162 p.
 11. Yaroshek, A.D. (1999), Investigation of the outer layers of machine parts with out the destruction of the eddycurrent method, Abstract of Ph.D. dissertation, Kyiv, Ukraine.
 12. Romaniv, O.N., Yarema, S.Ya., Nikiforhin, G.N., Makhutov, N.A. Mekhanika, Stadnik, M.M. (2009), "*Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov :spravochnoe posobie: v 4 t. Ustalost' i tsiklicheskaya treshchinostoikost' konstruktivnykh materialov – 4 t.*" [Fracture mechanics and strength of materials: reference guide: 4 tomes. Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials – 4 tomes], Kyiv, 679 s.
 13. "Advanced reliability analysis of fatigue cracking in horizontally framed miter gates" (2010), *Department of the army. U.S. Army Corps of Engineers*, Washington, 115 p.
 14. Commander, B.C., Schulz, J.X., Goble G.G. (1994), "Detection of Structural Damage on Miter Gates: Technical Report. REMR–CS–45", *Bridge Diagnostics*, 46 p.

Демьяненко С.К., Якусевич Ю.Г., Гимпель Р.М., Дорфеева З.Я.
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Приоритетной задачей при техническом обслуживании (эксплуатации) механического оборудования является обеспечение его безотказной работы.

В статье механическое оборудование судоходных гидротехнических сооружений рассматривается как элемент системы более высокого порядка. Вероятными причинами развития деструктивных процессов и повреждений и реализации отказов механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений в работе приняты: конструктивные, технологические и эксплуатационные. Показано, что реализация одной из перечисленных причин наиболее вероятна на определенных условных этапах эксплуатации механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений в зависимости от сроков его эксплуатации.

В статье предложена структура методов неразрушающего контроля при оценке состояния механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений.

Отмечено, что фактическая чувствительность методов неразрушающего контроля (минимальный размер дефекта, который обнаруживается) в условиях эксплуатационного контроля существенно отличается от предельных значений, указанных в нормативных документах и зависит от параметров дефектов и условий проведения диагностических операций.

Показано, что одним из основных условий своевременного выявления усталостных повреждений в эксплуатационных условиях является рациональный выбор метода

определения изменения технического состояния, который соединяет возможность реализации его физических принципов в условиях проведения операции с учетом параметров дефектов и динамики деградиационного процесса. Доказано, что рациональный выбор методов для выявления усталостных трещин может быть сделан только с учетом основных параметров реальных дефектов, их расположения и условий проведения контроля, влияние которых на чувствительность и вероятность оценивается совокупностью коэффициентов.

Предложены коэффициенты, учитывающие параметры дефектов и условия проведения контроля. Исследовано влияние свойств дефекта (трещины) и состояния контролируемого участка на его обнаружение методами неразрушающего контроля.

Сделан вывод, что эффективность поиска усталостных трещин методами неразрушающего контроля зависит не столько от предельной чувствительности самих методов, сколько от параметров дефектов и условий проведения контроля.

Ключевые слова: усталостное повреждение, дефект, метод, механическое оборудование, неразрушающий контроль, судоходная гидротехническое сооружение.

Demyanenko S., Yakusevich Yu., Gimpel R., Dorofeeva Z.
**ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING CHANGES IN THE TECHNICAL
CONDITION OF ELEMENTS OF MECHANICAL EQUIPMENT OF
HYDROTECHNICAL STRUCTURES**

The priority task in the maintenance (operation) of mechanical equipment is to ensure its trouble-free operation.

In the article, the mechanical equipment of navigable hydraulic structures is considered as an element of a higher order system. The likely reasons for the development of destructive processes and damage and the failure of mechanical equipment of navigable hydraulic structures in the work accepted: structural, technological and operational. It is shown that the implementation of one of the listed reasons is most likely at certain conditional stages of operation of mechanical equipment of navigable hydraulic structures, depending on the terms of its operation.

The article proposes a structure of non-destructive testing methods for assessing the state of mechanical equipment of navigable hydraulic structures.

It is noted that the actual sensitivity of non-destructive testing methods (the minimum size of a defect that is detected) under operational control conditions differs significantly from the limit values specified in regulatory documents and depends on the parameters of the defects and the conditions for the diagnostic operations.

It is shown that one of the main conditions for the timely detection of fatigue damage under operational conditions is a rational choice of a method for determining changes in the technical condition, which combines the possibility of realizing its physical principles under the conditions of an operation taking into account the parameters of defects and the dynamics of the degradation process. It is proved that a rational choice of methods for identifying fatigue cracks can be made only taking into account the main parameters of real defects, their location and control conditions, the impact of which on sensitivity and probability is estimated by a combination of factors.

Coefficients are proposed that take into account defect parameters and control conditions. The influence of the properties of the defect (crack) and the state of the controlled area on its detection by non-destructive testing methods is investigated.

It is concluded that the effectiveness of the search for fatigue cracks by non-destructive testing methods depends not only on the ultimate sensitivity of the methods themselves, but on the parameters of the defects and the conditions for the control.

Keywords: fatigue damage, defect, method, mechanical equipment, non-destructive testing, navigable hydraulic structure.