

## Удосконалення системи технічної діагностики та екологічно безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд на малих річках

Г. В. Гапіч, Д. С. Пікареня, О. В. Орлінська, В. В. Коваленко, Л. М. Рудаков,  
І. В. Чушкіна, Н. М. Максимова, Т. К. Макарова, В. В. Кацевич

*Представлені результати досліджень ґрунтових гідротехнічних споруд (ГТС) класу наслідків (відповідальності) СС1 на малих річках. Репрезентативність отриманих результатів для вітчизняної і світової практики подальшої експлуатації таких споруд забезпечується типовістю технічних і технологічних підходів до будівництва, матеріалу та умов їх роботи. Греблі зведені з ґрунтових матеріалів, експлуатуються значні терміни часу та вичерпали нормативний термін експлуатації, що посилює екологічну та технічну небезпеку їх подальшої роботи. Проведені візуальні обстеження, інструментальна діагностика технічного стану геофізичним методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) та математичний аналіз отриманих даних спостережень. Представлена можливість встановлення в тілі ГТС ділянок підвищеної фільтрації води крізь споруду, обводнення, розуцілення та суфозії, визначення потенційно небезпечних зон формування зсувів, тріщин та можливих проранів. Виконано оцінювання імовірності ризику виникнення аварії на дамбах при їх каскадному розташуванні внаслідок фільтраційних деформацій тіла та основи споруди. За сучасних умов експлуатації розрахована можливість пропуску водоскидними пристроями нормативних та понаднормових (форсованих) витрат води внаслідок опадів або прориву розташованої вище за течією споруди. Запропонований підхід надає можливість управління каскадом гідротехнічних споруд на різних стадіях експлуатації: планової, оперативного прийняття рішень, прогнозування. Це дозволяє виконувати діагностичні обстеження з метою виявлення споруд, які потребують першочергового залучення коштів на проведення ремонтно-відновлювальних робіт або знесення (демонтажу).*

*Ключові слова: гідротехнічна споруда, ґрунтова дамба, мала річка, геофізичні методи досліджень, фільтраційні деформації.*

### 1. Вступ

Динамічне зростання усіх сфер економіки потребувало залучення значних об'ємів водних ресурсів для галузей промисловості, сільського господарства та комунально-побутових цілей. Це сприяло активному розвитку гідротехнічного будівництва та водогосподарського комплексу в усьому світі. За даними [1] налічується більше ніж півмільйона ставків і водосховищ. Найбільш активне накопичення великих обсягів водних ресурсів відбувалось у степових, маловодних та промислово розвинутих регіонах світу. Внаслідок цього, водогосподарський комплекс має у своєму складі велику кількість ґрунтових гідротехнічних споруд (ГТС) побудованих на малих та середніх річках. В переважній своїй бі-

льшості, такі споруди зведені в минулому сторіччі та відносяться до класу наслідків (відповідальності) СС1 [2].

Саме будівництво (створення) ставків і є надзвичайно великою проблемою зарегулювання малих річок та водотоків. Це призводить до фрагментації їх русла; зниження самоочисної здатності; погіршення якості води; накопичення твердого стоку; значного забруднення водою хімічними сполуками; має екологічну небезпеку використання таких водних ресурсів. Без попереднього поліпшення якості води, її досить обмежено можна використовувати для цілей зрошення, риборозведення, водопостачання чи рекреації [3–5].

Переважна більшість малих річок перетворились з природних водотоків у каскади штучних водойм. За тривалої експлуатації гідротехнічних споруд у понад 50–70 років, одним з важливих питань, також, є безпека і надійність роботи цих об'єктів. Найбільш небезпечним фактором у даному аспекті є каскадне розташування дамб. Незначна відстань між спорудами за течією річки та різні за об'ємом акумульованої води, здебільшого не розраховані на утримання надлишкових вод у випадку прориву розташованої вище споруди. Через це, під час аварії на одній з дамб, можливе руйнування декількох споруд каскаду за «принципом доміно» [6]. Ситуація щодо екологічно безпечної експлуатації та надійності подальшої роботи всіх ґрунтових ГТС старої побудови викликає значну зацікавленість даним питанням багатьох вчених [7–9].

Актуальність даного питання на сьогодні підсилюється значним розвитком у світовій практиці застосування дистанційних (геофізичних) методів досліджень технічного стану ґрунтових ГТС [10]. Їх достовірність дозволяє під час експлуатації приймати термінові ефективні управлінські рішення та прогнозувати стан споруди у часі. Одними з найбільш поширених геофізичних методів є дослідження питомого електричного опору [11–13], сейсмоакустичні методи тощо. Але запропоновані методи і методики є доволі дорогими та трудомісткими. Це потребує пошуку ефективних та недорогих експрес-методів. У роботах [14, 15] автори висвітлюють можливість широкого застосування сучасних систем геоінформаційного забезпечення і нової апаратурної бази. За даними [16], велику роль у впровадженні комплексного підходу під час оцінювання технічного стану споруд та можливих ризиків виникнення і наслідків аварійних ситуацій мають експертні оцінки фахівців. Сукупний перелік наведених факторів надає змогу підвищити безпеку та надійність роботи таких гідроспоруд, що підкреслює актуальність відповідних досліджень.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Статистика гідродинамічних аварій на греблях і дамбах з ґрунтових матеріалів [17] свідчить, що серед переважаючих факторів ризику виникнення аварійних ситуацій є фільтраційні деформації основи та тіла ГТС. Додатковими чинниками є утворення внутрішніх поздовжніх і поперечних тріщин та розущільнення ґрунтів. Однак їх виявлення на початкових стадіях розвитку є складною задачею та не ідентифікується шляхом візуального обстеження, що потребує пошуку нових підходів під час діагностики та експлуатації таких споруд. В роботі [18] зазначається, що кількість аварійних ситуацій значно збільшується

через 50 років експлуатації. Це обґрунтовує актуальність питання забезпечення безпеки всіх ґрунтових ГТС старої побудови. Але досі не реалізований системний підхід до оцінювання технічного стану та екологічних ризиків виникнення аварій при управлінні каскадами таких споруд. За даними [6] встановлено, також, невідповідність конструктивних параметрів водоскидів на пропуск максимальних витрат води при дощових (зливових) паводках або весняного сніготанення, а також неспроможність витримати перелив води через гребінь споруди. Посилуючими чинниками, що впливають на безпеку експлуатації ґрунтових ГТС та ведуть до відмов і гідродинамічних аварій є тривалий термін експлуатації та низький рівень інженерно-технічної якості будівництва за відсутності належної проєктної документації [19]. Відмічається недостатність або відсутність моніторингових спостережень і діагностики технічного стану споруд [9]. Як правило, це викликано фінансовими труднощами та трудоємністю проведення таких досліджень, а також незначною застосовністю закладної контрольновимірювальної апаратури (КВА). Вирішенням цього може бути застосування дистанційних методів контролю.

Слід відмітити, що у відповідності до [2] ГТС поділяються на 3 класи наслідків (відповідальності): СС3, СС2, СС1. Даним стандартом регламентується: «застосування технічних і програмних засобів систем моніторингу технічного стану ГТС лише для споруд класу СС2 та СС3». Разом з тим, майже 99 % споруд, що формують каскади водойм на малих річках, відносяться до класу СС1, для яких не передбачаються ні експлуатуючий штат працівників, ні технічні засоби контролю, ні система моніторингових спостережень.

Додатковим чинником небезпеки експлуатації таких споруд є надзвичайно стрімка тенденція зміни клімату. В роботах [20, 21] авторами констатується перерозподіл кількості опадів у часі, тобто загальна їх річна кількість майже не змінюється, а спостерігається понаднормове випадіння опадів у короткі терміни часу в теплі періоди року. Таким чином, сучасні кліматичні зміни вносять корективи до розрахункових підходів під час проєктування та експлуатації ГТС, що були 50 років тому але, по суті, є діючими. Але окрім самих споруд, застарілими з технічної та технологічної точки зору, залишаються проєкти водоскидних пристроїв. В більшості своїй вони частково зруйновані, засмічені та неспроможні пропускати понаднормові об'єми дощових і паводкових вод. Це, в свою чергу, призводить до підвищення рівня води зі сторони верхнього б'єфу споруди, збільшує градієнти напору, поровий тиск тощо. Сукупність таких небезпечних інженерно-геологічних явищ спричиняє фільтраційні деформації в тілі та основі споруди і може спровокувати як прорив (проран) ГТС, так і перелив води через гребінь [22]. Але дієвої системи діагностування та попередження таких негативних явищ для ґрунтових споруд класу СС1 немає. Саме попередження та запобігання прояву негативних природних і техногенних процесів дозволить підвищити ефективність роботи цих споруд на різних рівнях експлуатації.

Поряд з переліченими факторами, актуальності набуває питання екологічної та експлуатаційної безпеки подальшої роботи всіх ГТС. Науковці працюють над перспективами використання сучасних геоінформаційних технологій [23] та ефективного забезпечення надійності роботи низьконапірних ГТС [9]. Але

недостатньо вирішеними залишаються питання комплексності підходів під час управління та експлуатації ґрунтових ГТС при їх каскадному розташуванні. Зважаючи на незначну відстань між спорудами у каскадах, аварія на одній з дамб у верхів'ях за течією може спровокувати поступове руйнування розташованих нижче споруд внаслідок надходження значних об'ємів води та мулу. В зв'язку з цим, майже усі ґрунтові ГТС потребують виконання ремонтно-відновлювальних заходів та впровадження постійно діючої системи моніторингу їх технічного стану. Одночасно виконати ці роботи неможливо, тому необхідне поступове застосування обґрунтованого комплексу діагностичних обстежень та визначення споруд, які в першу чергу потребують ремонту або поступового демонтажу споруд, які не відповідають критеріям надійності тощо. Оцінювання технічного стану (ТС) та відповідності комплексу показників безпечної експлуатації таких дамб здійснюється, як правило, лише візуально. Це надає змогу встановити лише проявлені ззовні (наочно) небезпечні інженерно-геологічні процеси та конструктивні недоліки і порушення параметрів роботи споруд. За даними [17] на греблях, які мають експлуатуючий персонал, виконуються геодезичні спостереження за осадками та переміщеннями, а також контролюється положення рівня води (депресійної кривої) в тілі ГТС. Але такі систематичні дослідження ведуться лише на середньо- та високонапірних ГТС і спорудах, що відносяться до класу наслідків (відповідальності) СС2 та СС3. Для діагностичних обстежень технічного стану гребель класу СС1 сільськогосподарського призначення такі дослідження недостатньо застосовуються або не застосовуються взагалі.

В роботі [24] запропоновано вдосконалений алгоритм та складові діагностичного контролю ГТС. Але невирішеним залишається питання розробки діючої системи такого контролю для споруд класу СС1. Таким чином, актуальними завданнями, яке вирішуються даним дослідженням, є наступні. По-перше – це удосконалення технічного діагностування стану споруд класу СС1 із застосуванням геофізичних методів. По-друге – спроба розробки алгоритму безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд при каскадному розташуванні на малих річках.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є удосконалення існуючих підходів до системи управління та оцінювання технічного стану гідротехнічних споруд з ґрунтових матеріалів класу наслідків (відповідальності) СС1. Це дасть можливість підвищити експлуатаційний рівень управління каскадом гідротехнічних споруд на різних стадіях експлуатації: планової, оперативного прийняття рішень, прогнозування.

Досягнення поставленої мети здійснюється через реалізацію ряду завдань:

- провести візуальне оцінювання та інструментальну діагностику технічного стану ґрунтових дамб і водоскидів, які мають каскадне розташування й оцінити ефективність застосування геофізичного методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі;

- виконати гідрологічні розрахунки та уточнити гідравлічні параметри роботи водоскидних пристроїв на випадок проходження зливових (дощових) паводків;

- встановити імовірність руйнування та втрати стійкості тіла гідротехнічних споруд і їх підвалин внаслідок фільтраційних деформацій;
- запропонувати алгоритм управління та екологічно безпечної експлуатації каскадами гідротехнічних споруд класу СС1 на малих річках.

#### 4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження є процеси і явища природного і техногенного характеру, що призводять до зниження рівня екологічно безпечної експлуатації та надійності роботи ґрунтових ГТС на малих річках.

Предметом дослідження виступає каскад гідротехнічних споруд, які побудовані на одній з малих річок степової зони України – річці Нижня Терса.

Дана річка протікає у Синельниківському районі Дніпропетровської області (рис. 1). Її довжина складає 39 км, а площа водозбірного басейну 312 км<sup>2</sup>. Долина річки переважно трапецієподібна, шириною до 1,5–2,0 км, похил становить 2 м/км. У басейні р. Нижня Терса побудовано 61 ставок. Безпосередньо на самій річці розташовані 19 водойм. Найбільше зарегулювання штучними водоймами відмічається на ділянці довжиною близько 15 км від витоку річки з площею водозбору ~105 км<sup>2</sup>. Далі річка протікає у природному руслі.

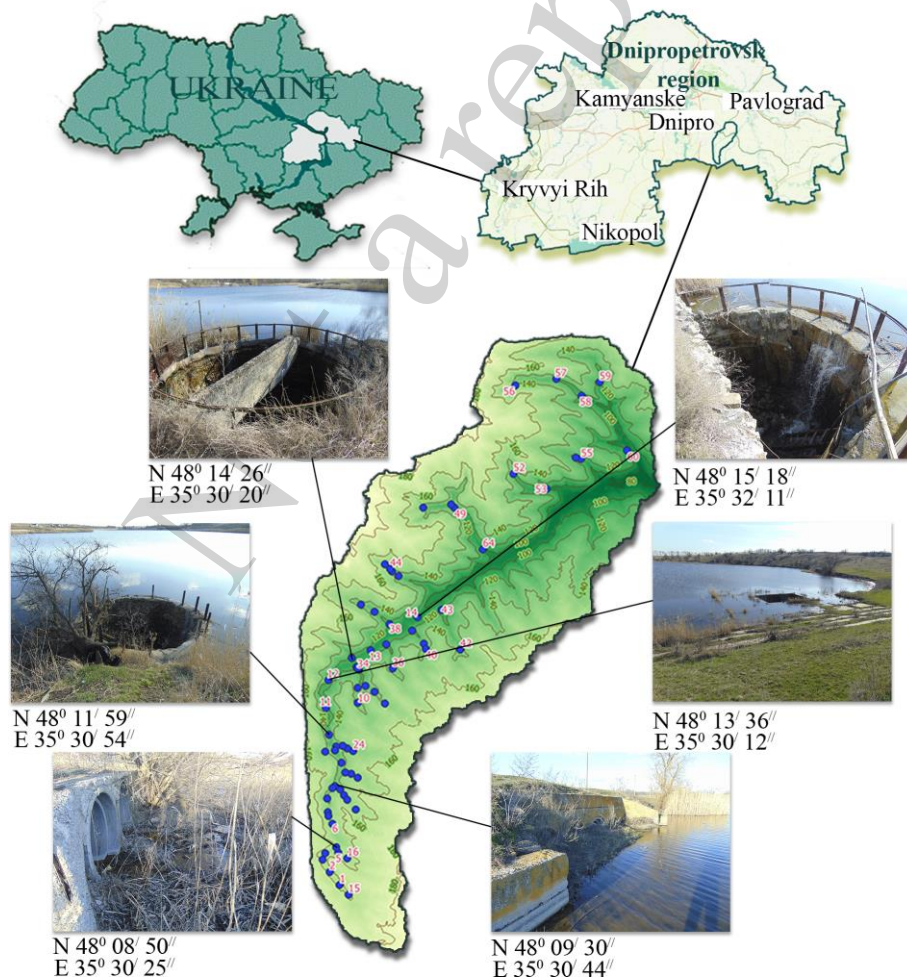


Рис. 1. Оглядові карти території досліджень – басейн річки Нижня Терса (точками позначені водойми; водоскидні споруди – авторське фото)

Наявні у каскаді ґрунтові гідротехнічні споруди мають наступні технічні параметри: довжина  $\sim 600$  м, висота споруд не перевищує 15 м, ширина по гребеню – 6–15 м. Площі ставків і водосховищ коливаються в межах від  $1 \cdot 10^5$  до  $1 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>, середня глибина – 3–4 м. Акумуляючі об'єми водойм не перевищують  $1 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>. ГТС побудовані з використанням місцевих будівельних матеріалів: суглинків і глин.

Слід зазначити, що спорудження ГТС і будівництво водойм розміщених нижче по течії виконувалось без належного гідрологічного обґрунтування внаслідок неповного врахування регулюючої ємності ставків і водосховищ розміщених вище за течією.

Досліджувані об'єкти є аналогічними по відношенню до переважної більшості гребель і дамб, побудованих на річках степової зони країни. Вони мають спільні конструктивні параметри роботи, умови експлуатації, технологію і способи зведення, складені з місцевих ґрунтових матеріалів та експлуатуються тривалий термін часу (50–70 років), що обґрунтовує високу репрезентативність проведених досліджень.

Для визначення загального рівня технічної експлуатації ГТС та розробки алгоритму управління і екологічно безпечної експлуатації гідроспоруд при каскадному розташуванні, використовувались декілька методів. Виконані візуальні обстеження та інструментальна діагностика із використанням геофізичного методу ПЕМПЗ [25], гідравлічні розрахунки параметрів водоскидних пристроїв та математичне моделювання імовірності виникнення аварійних ситуацій внаслідок фільтраційних деформацій.

Природне імпульсне електромагнітне поле є одним з природних геофізичних полів Землі та характеризується нестаціонарним станом у часі [26–28]. Поле ПЕМПЗ добре поширюється в земній корі завдяки хвильовій природі. Енергія електромагнітного випромінювання (ЕМВ) значно розсіюється (знижується) в газі або поглинається рідиною. Оскільки ГТС складені з ґрунтових матеріалів, то для ПЕМПЗ такі споруди є умовно прозорими. При утворенні тріщини або надмірному обводненні ґрунтів усередині тіла споруди і її підвалині, інтенсивність поля різко знижується. Така закономірність обґрунтовує зниження щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ [25], що відповідає кількості імпульсів, які реєструються приладом за певний часовий інтервал вимірювання (як правило 0,5–1,0 с). В цьому випадку за імпульс приймається будь-яке перевищення частотно-хвильової амплітуди або ЕМВ ПЕМПЗ над деяким заданим значенням рівнем дискримінації. Таким чином, величина щільності потоку імпульсів лежить в основі інтерпретації досліджень ПЕМПЗ.

Спостереження ПЕМПЗ виконувались за загальноприйнятими методиками проведення геофізичних досліджень. Під час польових робіт на ґрунтових ГТС враховували їх конструктивні параметри. У зв'язку із незначною шириною гребеня споруди по відношенню до загальної довжини, профілі спостережень були закладені вздовж осі гребеня ГТС. Відстань між профілями складала від 2 до 5 м один від одного залежно від ширини споруди. Вимірювання та фіксація щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ виконувались геофізичним пристроєм «СІМЕІЗ». Даний прилад є авторською розробкою ТОВ «Слов'янський міст» (м. Дніпро, Україна). Комплектація приладу наступна: мо-

дуть реєстрації електромагнітних імпульсів, переносна карта пам'яті для запису сигналів, три високочутливі антени [25]. Прилад дозволяє фіксувати щільність потоку імпульсів магнітної і електричної складових ПЕМПЗ в діапазоні низьких частот 1–50 кГц. Апаратура «СІМЕІЗ» дозволяє реєструвати значення щільності потоку ПЕМПЗ в режимі безперервного запису сигналу з частотою відліку від 0,1 секунди і більше. Приймачем імпульсних електромагнітних сигналів слугують виносні антени. Перевагою «СІМЕІЗу» є вбудований частотний фільтр, що дозволяє в процесі спостережень «відсікати» електромагнітні поля техногенного походження, які викликані впливом ліній електропередач, підземними комунікаціями, системами зв'язку, зокрема стільникового (мобільного) тощо.

Вимірювання електромагнітних імпульсів ПЕМПЗ на дамбах виконували в точках на профілях з кроком 2–5 м одночасно із застосуванням трьох антен в діапазоні низьких частот від 1 до 25 кГц. Одна з антен розташовувалась вертикально вниз. Дві інші антени направлені горизонтально вздовж і у поперек дамби на відстані 0,2–0,4 м від поверхні споруди. Дане розташування геофізичної мережі спостережень пов'язане з припущенням про розмір порушених ділянок. Наприклад, параметри зони зосередженого фільтраційного потоку води крізь тіло ґрунтової дамби або тріщини, які знаходяться на початкових стадіях формування, можуть бути незначної ширини у декілька метрів. Це обґрунтовує вибір відстані між профілями та кроку точок спостережень на них, щоб зафіксувати ділянку аномальних значень та порушену зону ГТС декількома профілями і точками (рис. 2).

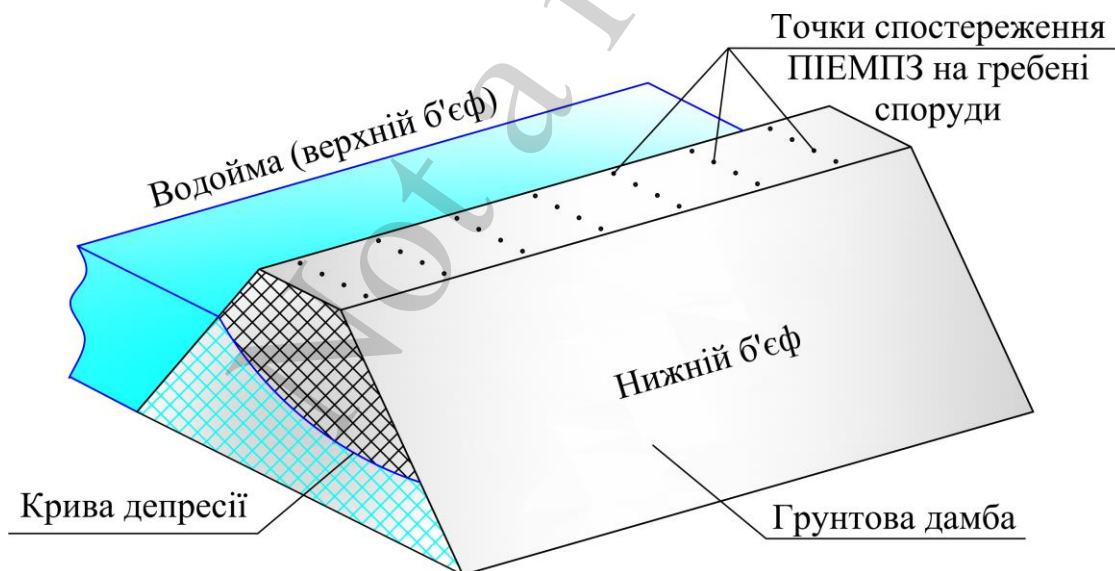


Рис. 2. Схема до методики досліджень технічного стану ґрунтової гідротехнічної споруди геофізичним методом: фрагмент гідротехнічної споруди на водоймі з розташуванням мережі точок спостережень природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ)

За результатами геофізичної зйомки були побудовані карти-схеми щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ. Інтерпретація отриманих карт ви-

конувалась із застосуванням відомих критеріїв та ознак характерних зонам тріщинуватостей і розущільнення, розроблених для геофізичних полів Землі.

Оцінювання технічного стану ГТС проведено шляхом узагальнення результатів візуальних обстежень та даних інструментального спостереження за ПЕМПЗ. Виявленні ділянки розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів в тілі та основі споруди, були винесені в натуру безпосередньо на об'єкті дослідження. За малюнком (контуром) поля ПЕМПЗ додатково встановлювались місця різнонапруженого стану ґрунтів, якими складена дамба. Це враховувалось під час діагностики та прогнозуванні можливих зон формування зсувів і утворення тріщин відриву на спорудах, які візуально оцінюються задовільним технічним станом та не мають наочних ознак прояву цих процесів.

Згідно діючих нормативів [2] систематичні моніторингові спостереження, технічні і програмні засоби систем моніторингу технічного стану гідротехнічних споруд даного класу (СС1) непередбачені взагалі. Геофізичний метод ПЕМПЗ є загальноприйнятим та стандартизованим для виконання різного виду інженерно-геологічних завдань згідно низки діючих нормативних стандартів. Важливим елементом, що підтверджує достовірність досліджень із застосуванням ПЕМПЗ є ряд відомих науково-практичних досліджень щодо можливості його застосування під час діагностики технічного стану ґрунтових ГТС [4, 29].

Наступним кроком у реалізації поставлених завдань є визначення максимальних витрат і об'єму стоку води під час дощових (зливових) паводків, які виконані за емпіричною редуційною формулою при відсутності матеріалів гідрометричних спостережень:

$$Q_{p\%} = q_{200} \cdot \left( \frac{200}{F} \right)^n \cdot \lambda_{p\%} \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot F, \quad (1)$$

де  $Q_{p\%}$  – миттєва витрата 1 %-вої забезпеченості;  $q_{200}$  – модуль максимальної (миттєвої) витрати ( $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ ) імовірністю перевищення 1 %, яка приведена до водозбору площею 200  $\text{км}^2$ ;  $\lambda_{p\%}$  – коефіцієнт переходу від 1 %-вої імовірності перевищення до заданої імовірності;  $\delta_1$  – коефіцієнт врахування зарегульованості максимальної витрати проточними (природними) озерами ( $\delta_1=1,0$ );  $\delta_2$  – коефіцієнт, що враховує зменшення витрат води в умовах залісених та заболочених водозбірних басейнів ( $\delta_2=1,0$ );  $n$  – показник зменшення модуля розрахункової витрати;  $F$  – площа водозбірного басейну,  $\text{км}^2$ .

Об'єм стоку дощового паводку розрахункової забезпеченості встановлений за виразом:

$$W_{p\%} = F \cdot h_{p\%} \cdot 10^3, \quad (2)$$

де  $h_{p\%}$  – шар стоку води при розрахунковій забезпеченості, мм.

Гідравлічні розрахунки водоскидних споруд виконані за умови досягнення рівня води зі сторони верхнього б'єфу (ВБ) відміток форсованого підпірного



горизонту (ФПГ). Розрахункову зарегульовану витрату для створу кожної окремої споруди визначено за формулою:

$$Q_r = Q_{p\%} \cdot \left( 1 - \frac{W_r}{W_p} \right), \quad (3)$$

де  $Q_{p\%}$  – витрата розрахункової забезпеченості, м<sup>3</sup>/с;  $W_r$  – об'єм регулювання, м<sup>3</sup>;  $W_p$  – об'єм паводка, м<sup>3</sup>.

Пропускна спроможність водоскидів розрахована для дощових (злизових) паводків різної забезпеченості від  $P=0,5\%$  до  $P=25\%$ . Відповідно до [2] регламентуються два розрахункових випадки пропуску максимальних витрат: основний та перевіірочний: 5,0 %-вої та 1,0 %-вої забезпеченості відповідно.

В залежності від типу конструкції водоскиду, розрахунок їх пропускної спроможності виконано за наступними виразами:

$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot (H + z_{rp})}, \quad (5)$$

де  $\mu$ ,  $m$  – коефіцієнт витрати водоскиду (в залежності від типу);  $b$  – периметр вхідної частини водоскиду, м;  $\omega$  – площа живого перерізу відвідної труби водоскиду, м<sup>2</sup>;  $H$ ,  $Z_{rp}$  – напір, м.

Оцінювання імовірності ризику виникнення аварії на дамбах каскаду внаслідок фільтраційних деформацій тіла та основи споруди проведенні за методикою [30]. Загальна розрахункова схема наступна (рис. 3).

Загальна умова утворення фільтраційних деформацій ґрунту тіла дамби і основи має вигляд:

$$J_{est,m} > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m}, \quad (6)$$

де  $J_{est,m}$  – діючий середній градієнт напору;  $J_{cr,m}$  – критичний середній градієнт напору;  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності, що приймається відповідно до класу ГТС.

Оцінка ризику руйнування тіла дамби та основи внаслідок процесів надмірної фільтрації визначається за формулою:

$$\lambda_{T(O)} = \frac{\gamma_n}{K_{HJ_{est,m}}^{rap}} \cdot \lambda_H, \quad (7)$$

де  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності;  $\lambda_H$  – нормативний ризик, який визначається в залежності від наслідків (відповідальності) споруди для основного випадку

навантажень;  $K_H^{rap}$  – гарантований коефіцієнт надійності тіла і основи споруди відповідно.

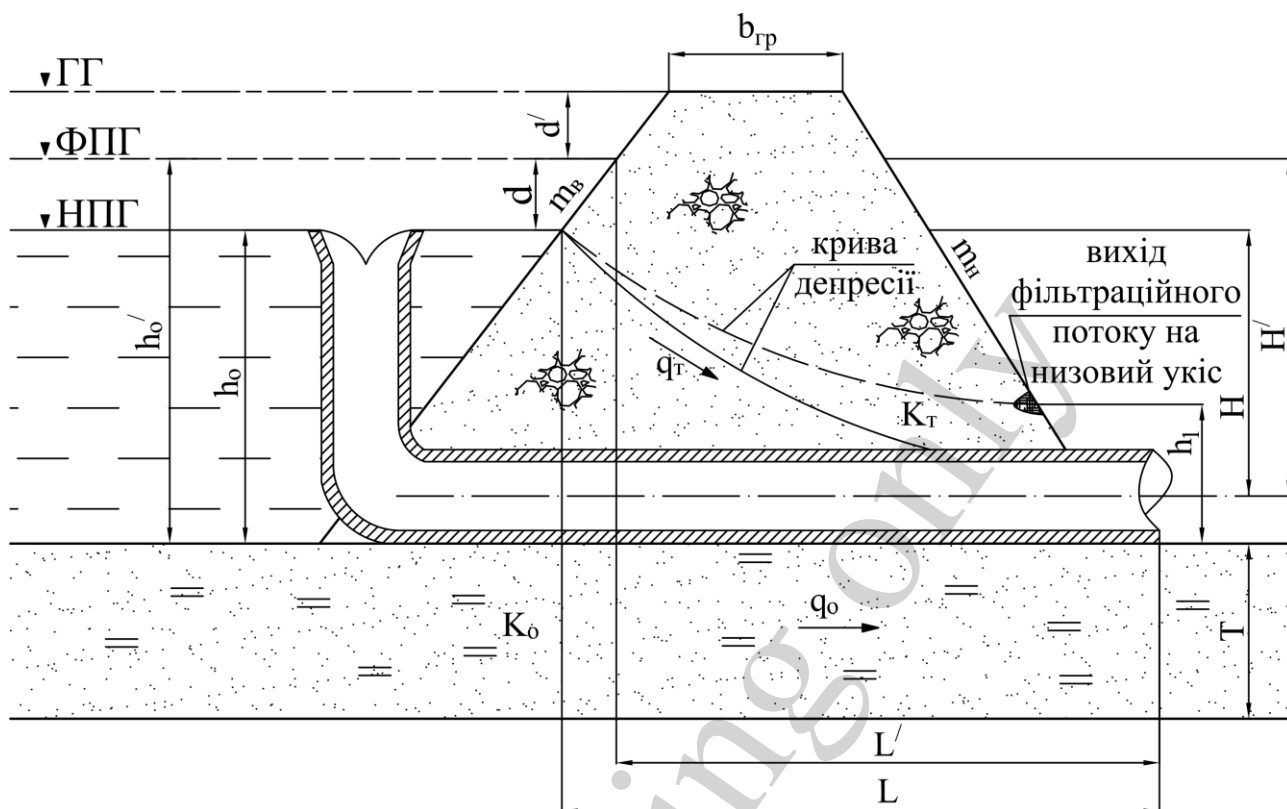


Рис. 3. Схема до розрахунку імовірного ризику виникнення аварії внаслідок фільтраційних деформацій ґрунтової дамби: ГГ – гребінь греблі (гідротехнічної споруди) ГТС; ФПГ – рівень води на відмітці форсованого підпірного горизонту; НПГ – нормальний підпірний горизонт; Н, Н' – діючий напір води на споруду; Т – потужність шару водопроnikної основи ГТС;  $b_{гр}$  – ширина по гребню споруди;  $d, d'$  – перевищення гребня ГТС над розрахунковим рівнем води;  $q_t$  – величина питомої витрати фільтраційних вод крізь тіло ґрунтової споруди;  $q_0$  – величина питомої витрати води в підвалині споруди;  $h_0, h_0'$  – глибина води зі сторони верхнього б'єфу;  $h_1$  – висота виходу депресійної кривої зі сторони низового укосу;  $K_0$  – коефіцієнт фільтрації ґрунтів основи дамби;  $K_t$  – коефіцієнт фільтрації ґрунтів тіла споруди;  $m_в, m_н$  – коефіцієнти закладання верхнього та низового укосів відповідно.

З метою реалізації і впровадження комплексного підходу до оцінювання загального рівня безпеки при експлуатації ГТС у каскаді запропонований підхід на основі експертних оцінок за різними групами показників (категорій). Ці показники характеризують як умови роботи (екологічні ризики, які можуть виникнути у випадку аварійної ситуації), так і технічний стан споруд [16]. Оцінку рівня небезпеки експлуатації «R» та невідповідності показників технічного стану «ТС» нормативним умовам роботи, запропоновано виражати у відсотках за формулою:

$$R(TC) = \frac{1}{N_{\max} \cdot k} \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot 100 \% , \quad (8)$$

де  $N_{\max}$  – максимальний можливий бал при оцінюванні;  $k$  – кількість показників, за якими здійснюється оцінювання;  $N_i$  – бал оцінки окремого  $i$ -го показника;  $n$  – загальна кількість показників (критеріїв) оцінки.

Узагальнення всіх результатів досліджень надає змогу оцінити можливі негативні наслідки прориву каскаду водойм. В цьому випадку основна увага приділяється показникам рівня технічного стану ГТС і забезпечення безпеки їх подальшої надійної експлуатації, а також можливих ризиків та екологічних наслідків руйнування споруд на оточуюче середовище. За основу прийнято аналогічний досвід країн ЄС щодо підвищення рівня безпеки експлуатації хвостосховищ різного призначення [31]. Удосконалено даний підхід та адаптовано його до умов роботи каскаду ГТС на малих річках. Це дозволило розробити алгоритм оцінювання та ранжування споруд за принципом поділу на декілька локальних зон забезпечення екологічно безпечної експлуатації (рис. 4).

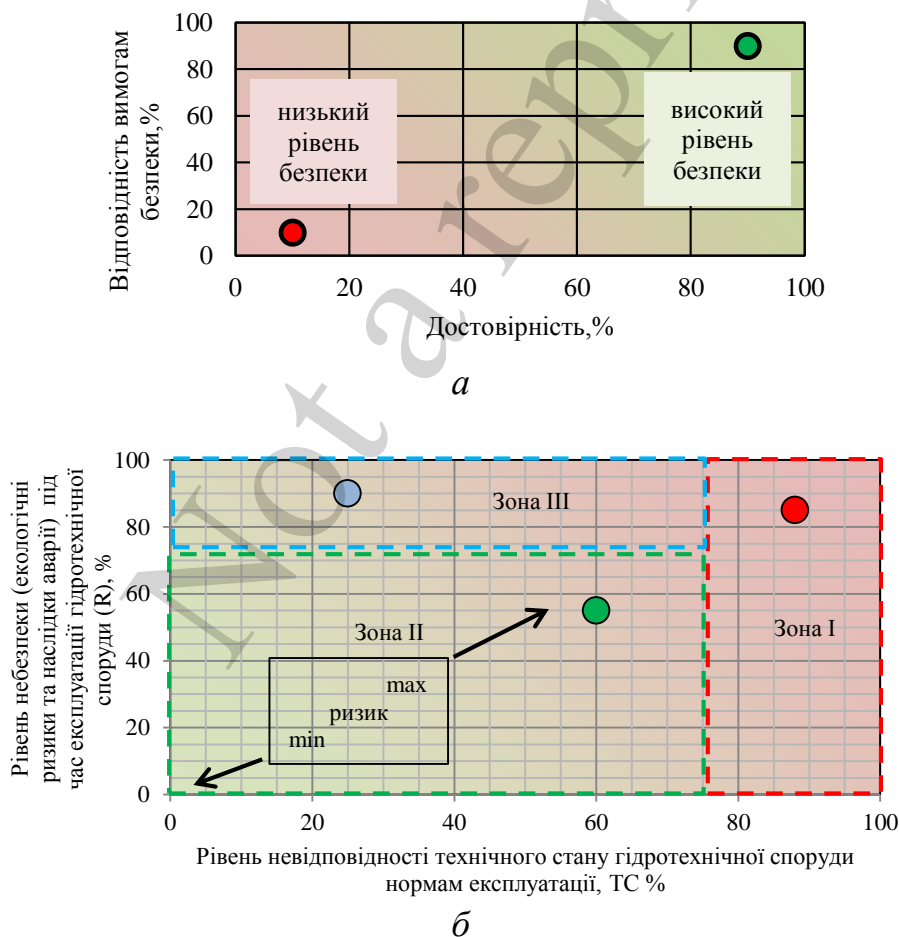


Рис. 4. Схеми до наочного представлення результатів оцінювання безпеки експлуатації гідротехнічної споруди під час управління каскадом гідроспоруд: *а* – досвід Європейського Союзу [30]; *б* – розроблений авторами алгоритм

У цьому випадку «зона І» відповідає небезпечному рівню, а «зона ІІ» – задовільним умовам роботи. Умовна «зона ІІІ» задовольняє показники рівня технічної експлуатації ГТС, але потребує значної уваги щодо моніторингу технічного стану споруди. Це обґрунтовується високим рівнем небезпеки та можливих негативних екологічних наслідків у разі прориву або аварії на дамбі.

## **5. Результати досліджень щодо управління та екологічно безпечної експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд**

### **5. 1. Результати візуального та інструментального оцінювання технічного стану гідротехнічних споруд**

Результати оцінювання рівня технічної експлуатації ґрунтових ГТС представлено на прикладі однієї із досліджуваних дамб. На споруді проведені діагностичні візуальні обстеження та польові дослідження із застосуванням методу ШЕМПЗ за вищезазначеною методикою. За даними вимірів побудована карта-схема щільності потоку імпульсів магнітної складової ШЕМПЗ (рис. 5).

За результатами візуальних обстежень виявлено ділянку просідання тіла дамби у центральній частині, а також зону зосередженого фільтраційного потоку крізь тіло споруди у її правій частині (рис. 5, а). Після інтерпретації карти-схеми та її аналізу за результатами геофізичних досліджень встановлено додаткові недоліки технічного стану. В тілі ґрунтової ГТС, окрім візуально діагностованих порушених ділянок, виявлено локальні зони фільтрації води крізь тіло споруди та водонасичення ґрунтів (рис. 5, б, позиція 3 і 4). Геофізичними дослідженнями ШЕМПЗ зафіксовано зону обводнення та розмиву частини гребня дамби (рис. 5, б, позиція 5), яка підтверджується виходом фільтраційного потоку води зі сторони нижнього б'єфу (рис. 5, а, фото праворуч).

Таким чином, загальні результати обстеження на всіх досліджуваних об'єктах показали, що переважна більшість споруд знаходиться у незадовільному технічному стані. Окрім порушених частин, які діагностуються візуально, на всіх гідротехнічних спорудах додатково, за даними інструментальних спостережень, встановлюються ділянки зосередженої фільтрації та зсувонебезпечні зони. Враховуючи, що вниз по течії кожної з водойм розташовані не лише ставки і водосховища, а й населені пункти, каскадне руйнування ГТС може мати значні екологічні ризики, негативні наслідки і збитки соціально-економічні характеру.



а

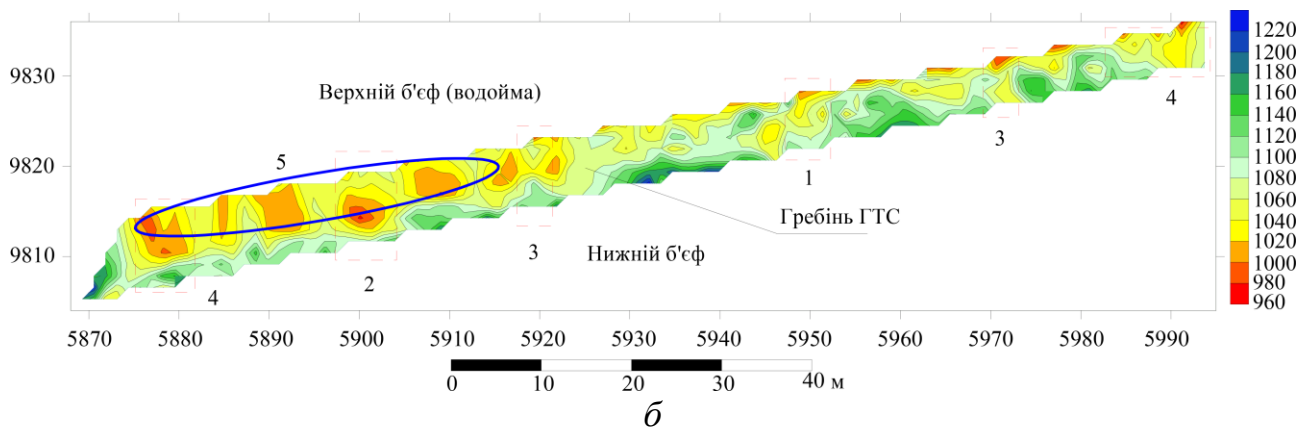


Рис. 5. Приклад дослідження водогосподарського об'єкту: *а* – супутниковий знімок водойми та зона виходу фільтраційного потоку води крізь тіло гідротехнічної споруди; *б* – карта-схема щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ. Примітка: застосована умовна система координат в метрах; вісь *X* – напрямком на схід; вісь *Y* – орієнтування на північ; кольорова шкала праворуч показує градацію щільності потоку імпульсів магнітної складової природного імпульсного електромагнітного поля Землі; прямокутниками показані зони розривних порушень та розуцільнення ґрунту; синьою лінією відмічена ділянка водонасичення і розмиву гребня

## 5. 2. Гідралічний розрахунок пропускної спроможності водоскидів

Для пропуску надлишкових витрат води при дощових (зливових) паводках або весняного сніготанення, ГТС обладнані скидними пристроями. У зв'язку з тим, що проєктна документація відсутня або частково втрачена, за результатами візуального обстеження встановлено, що переважна більшість конструкцій водоскидів виконані у вигляді переливних залізобетонних труб або шахтних колодязів. Водоскидні пристрої мають низку конструктивних і технічних недоліків. Вони частково зруйновані, відсутні сміттєзатримуючі ґрати, засмічені уламками залізобетонних елементів конструкцій та деревиною, замулені тощо.

Результати гідрологічних розрахунків зарегульованої витрати води у створі досліджуваних гідротехнічних споруд наведені в табл. 1.

Оцінювання гідралічних параметрів і пропускної здатності водоскидів (табл. 2) виконані для основного і перевірного випадків.

Розрахунками визначається невідповідність нормативним вимогам щодо пропуску максимальних витрат і об'ємів паводкових (дощових) вод заданої забезпеченості, які регламентуються чинним державним стандартом [2]. Встановлено, що незадовільний технічний стан водоскидних пристроїв суттєво знижує гідралічні параметри їх пропускної здатності. При проходженні паводків високої забезпеченості існує потенційна небезпека досягнення рівня води до відміток гребня споруд з подальшим переливом. У випадку формування прорану у тілі дамби, обсяги води, які накопичені у верхніх водоймах і раптово надійдуть до розташованих нижче ставків, значно ускладнюють пропускну спроможність водоскидів. За таких умов роботи імовірність переливу води через гребінь ґрунтових дамб з подальшим їх руйнуванням зростає.

Таблиця 1

Розрахунок зарегульованої витрати  $P_1$  %-вої забезпеченості на водоскидах у каскаді гідротехнічних споруд на р. Нижня Терса

| № водоскиду | Параметри та показники гідрологічних розрахунків |  |  |                          |
|-------------|--|--|--|--------------------------|
|             | $Q_1$ %, м <sup>3</sup> /с                       | $Wr$ , ×10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> | $Wp$ , ×10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> | $Qr$ , м <sup>3</sup> /с |
| 1           | 38,20  | 2,286                                  | 3,26                                   | 11,41                    |
| 2           | 35,02  | 0,035                                  | 2,44                                   | 34,51                    |
| 3           | 34,27  | 0,570                                  | 2,27                                   | 25,68                    |
| 4           | 31,96  | 0,065                                  | 1,80                                   | 30,81                    |
| 5           | 31,48  | 0,350                                  | 1,71                                   | 25,04                    |
| 6           | 28,33  | 0,115                                  | 1,20                                   | 25,62                    |
| 7           | 24,56  | 0,143                                  | 0,75                                   | 19,86                    |
| 8           | 17,72  | 0,074                                  | 0,25                                   | 12,52                    |

Таблиця 2

Визначення параметрів пропускної спроможності водоскидних пристроїв у каскаді гідротехнічних споруд на р. Нижня Терса

| № ГТ С у каскаді | Клас наслідків (відповідальності) ГТС | Об'єм води $W$ , ×10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup> | Площа водозбірної басейну $F$ , га | Нормативні показники ймовірності $P$ , %, перевищення розрахункових максимальних витрат води за основним (перевірочним) розрахунковими випадками | Теоретична (6) та фактична (7) витрати водоскидів $Q$ , м <sup>3</sup> /с (забезпеченість $P$ , %) |             | Відповідність розрахункових параметрів нормативним значенням |
|------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|--|--|-------------|--|
|                  |                                       |  |                                    |  |  |             |  |
| 1                | СС1                                   | 0,993  | 8150                               | 5,0 (1,0)  | 8,3  | 7,0 (2,0)   | +  |
| 2                | СС1                                   | 0,594  | 6320                               | 5,0 (1,0)  | 14,2   | 12,7 (10,0) | -  |
| 3                | СС2-2                                 | 1,050  | 5680                               | 3,0 (0,5)  | 45,0   | 45,0 (0,5)  | +  |
| 4                | СС1                                   | 0,120  | 4340                               | 5,0 (1,0)  | 7,0  | 7,0 (15,0)  | -  |
| 5                | СС1                                   | 0,534  | 4280                               | 5,0 (1,0)  | 6,8  | 5,6 (8,0)   | -  |
| 6                | СС1                                   | 0,165  | 3010                               | 5,0 (1,0)  | 1,1  | 1,1 (20,0)  | -  |
| 7                | СС1                                   | 0,187  | 2270                               | 5,0 (1,0)  | 5,8  | 3,1 (10,0)  | -  |
| 8                | СС1                                   | 0,184  | 1870                               | 5,0 (1,0)  | 2,8  | 2,3 (7,0)   | -  |

### 5.3. Розрахунок імовірнісного ризику виникнення аварії внаслідок фільтраційних деформацій тіла і основи дамб

На основі встановлених експлуатаційних недоліків конструкції водоскидів та їх гідравлічних параметрів роботи виконаний розрахунок імовірнісного ризику виникнення аварії внаслідок фільтраційних деформацій тіла і основи дамб. Такі розрахунки проведені на відмітках нормального підпірного горизонту, форсованого підпірного горизонту та гребня споруди (табл. 3) до переливу води через нього, що для ґрунтових ГТС має фактично безповоротну руйнацію.

Таблиця 3

Оцінювання параметрів фільтраційних деформацій та імовірного ризику виникнення аварії на ГТС каскаду за різних рівнів води (на відмітках НПГ/ФПГ/гребня гідротехнічної споруди)\*

| № ГТС у каскаді | Питома фільтраційна витрата води крізь тіло дамби $q_T, \text{ м}^2/\text{с}$ | Питома витрата фільтраційного потоку в основі дамби $q_o, \text{ м}^2/\text{с}$ | Загальна питома фільтраційна витрата води $q, \text{ м}^2/\text{с}$ | Середній градієнт напорів в тілі споруди $J_{est,m}$ | Середній градієнт напорів в основі споруди $J_{est,o}$ | Критичний градієнт напорів $J_{cr,m}$ | Максимальний місцевий градієнт напорів при виході на денну поверхню $J_{est}$ | Ризик руйнування тіла гідротехнічної споруди $\lambda_T, \times 10^{-3}$ | Ризик руйнування основи ГТС $\lambda_o, \times 10^{-3}$ | Загальний ризик руйнування дамби $\lambda, \times 10^{-3}$ | Нормативний ризик руйнування** $\lambda_n, \times 10^{-3}$ |
|-----------------|---|---|---|--|--|---------------------------------------|---|--|---|--|--|
| 1               | 0,392   | 0,138   | 1,063   | 0,226  | 0,153  | 0,8                                   | 1,060   | 1,942  | 1,297   | 3,240  | 6  |
|                 | 0,535   | 0,155   | 1,380   | 0,265  | 0,172  | 0,8                                   | 1,184   | 2,247  | 1,461   | 3,708  |  |
|                 | 0,779   | 0,179   | 1,917   | 0,329  | 0,199  | 0,8                                   | 1,372   | 2,791  | 1,689   | 4,481  |  |
| 2               | 0,540   | 0,138   | 1,358   | 0,220  | 0,154  | 0,8                                   | 1,040   | 1,892  | 1,302   | 3,193  | 6  |
|                 | 0,805   | 0,160   | 1,931   | 0,270  | 0,178  | 0,8                                   | 1,199   | 2,288  | 1,512   | 3,800  |  |
|                 | 1,006   | 0,176   | 2,363   | 0,308  | 0,195  | 0,8                                   | 1,312   | 2,610  | 1,658   | 4,268  |  |
| 3               | 0,577   | 0,110   | 1,376   | 0,170  | 0,121  | 0,8                                   | 0,798   | 1,460  | 1,026   | 2,485  | 3  |
|                 | 0,928   | 0,127   | 2,111   | 0,211  | 0,141  | 0,8                                   | 0,931   | 1,791  | 1,199   | 2,991  |  |
|                 | 1,729   | 0,159   | 3,775   | 0,293  | 0,176  | 0,8                                   | 1,153   | 2,483  | 1,494   | 3,977  |  |
| 4               | 0,347   | 0,125   | 0,948   | 0,196  | 0,140  | 0,8                                   | 0,953   | 1,687  | 1,180   | 2,867  | 6  |
|                 | 0,598   | 0,154   | 1,505   | 0,259  | 0,171  | 0,8                                   | 1,166   | 2,200  | 1,454   | 3,654  |  |
|                 | 0,830   | 0,175   | 2,012   | 0,313  | 0,195  | 0,8                                   | 1,325   | 2,650  | 1,653   | 4,303  |  |
| 5               | 0,767   | 0,160   | 1,857   | 0,268  | 0,177  | 0,8                                   | 1,195   | 2,298  | 1,491   | 3,791  | 6  |
|                 | 0,988   | 0,173   | 2,323   | 0,303  | 0,193  | 0,8                                   | 1,298   | 2,568  | 1,633   | 4,201  |  |
|                 | 1,131   | 0,184   | 2,630   | 0,329  | 0,204  | 0,8                                   | 1,371   | 2,789  | 1,729   | 4,518  |  |
| 6               | 0,395   | 0,152   | 1,098   | 0,268  | 0,170  | 0,8                                   | 1,196   | 2,302  | 1,433   | 3,734  | 6  |
|                 | 0,492   | 0,164   | 1,313   | 0,298  | 0,183  | 0,8                                   | 1,285   | 2,530  | 1,549   | 4,079  |  |
|                 | 0,521   | 0,170   | 1,382   | 0,314  | 0,188  | 0,8                                   | 1,331   | 2,667  | 1,597   | 4,264  |  |
| 7               | 0,394   | 0,141   | 1,072   | 0,234  | 0,156  | 0,8                                   | 1,084   | 2,005  | 1,322   | 3,328  | 6  |
|                 | 0,522   | 0,156   | 1,356   | 0,269  | 0,174  | 0,8                                   | 1,197   | 2,284  | 1,472   | 3,756  |  |
|                 | 0,642   | 0,174   | 1,633   | 0,319  | 0,193  | 0,8                                   | 1,344   | 2,706  | 1,639   | 4,345  |  |
| 8               | 0,250   | 0,121   | 0,744   | 0,191  | 0,134  | 0,8                                   | 0,933   | 1,641  | 1,134   | 2,776  | 6  |
|                 | 0,343   | 0,137   | 0,960   | 0,225  | 0,152  | 0,8                                   | 1,054   | 1,911  | 1,290   | 3,201  |  |
|                 | 0,366   | 0,145   | 1,022   | 0,245  | 0,161  | 0,8                                   | 1,120   | 2,078  | 1,366   | 3,444  |  |

Примітка: для кожної з ГТС каскаду перше значення – розрахунки для НПГ; друге значення – ФПГ; третє значення – показники на відмітці гребеня споруди; \*\* нормативний ризик виникнення аварії відповідно до [2]

Встановлено, що загальний ризик (імовірність) виникнення аварії не перевищує нормативний (за виключенням випадку з підвищенням рівня води до рі-

вня гребня на третій споруді). Разом з тим, відмічається суттєве підвищення загального ризику аварії тіла дамби при рівні води на відмітці гребня дамби відносно нормального підпірного горизонту, що у відсотковому відношенні становить від 15 до 60 %.

Подальше співставлення отриманих результатів представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Порівняння розрахункових параметрів ризику виникнення аварії на ГТС внаслідок фільтраційних деформацій за різних рівнів води у верхньому б'єфі

| № ГТС у каскаді | Загальний ризик руйнування на відмітці НПГ, $\lambda \cdot 10^{-3}$ | Загальний ризик руйнування на відмітці ФПГ, $\lambda \cdot 10^{-3}$ | Загальний ризик руйнування при рівні води на відмітці гребня дамби, $\lambda \cdot 10^{-3}$ | Підвищення загального ризику руйнування при ФПГ відносно НПГ, % | Підвищення загального ризику руйнування тіла ГТС при рівні води на відмітці гребня споруди відносно НПГ, % |
|-----------------|---|---|---|---|--|
| 1               | 3,240   | 3,708   | 4,481   | 14,4 % ↑  | 38,2 % ↑   |
| 2               | 3,193   | 3,800   | 4,268   | 19,0 % ↑  | 33,6 % ↑   |
| 3               | 2,485   | 2,991   | 3,977   | 20,3 % ↑  | 60,0 % ↑   |
| 4               | 2,867   | 3,654   | 4,303   | 27,4 % ↑  | 50,0 % ↑   |
| 5               | 3,791   | 4,201   | 4,518   | 10,8 % ↑  | 19,2 % ↑   |
| 6               | 3,734   | 4,079   | 4,264   | 9,2 % ↑   | 14,2 % ↑   |
| 7               | 3,328   | 3,756   | 4,345   | 12,8 % ↑  | 30,5 % ↑   |
| 8               | 2,776   | 3,201   | 3,444   | 15,3 % ↑  | 24,0 % ↑   |

Таким чином, отримані результати досліджень показують необхідність системного підходу до оцінювання як технічного стану ГТС так і до визначення рівня їх екологічно безпечної експлуатації, що потребує запровадження нових підходів.

#### 5. 4. Розробка алгоритму управління та екологічно безпечної експлуатації дамб при каскадному розташуванні

Отримані результати оцінки технічного стану та рівня експлуатації об'єктів дослідження покладені в основу запропонованого алгоритму управління та екологічно безпечної експлуатації дамб при каскадному розташуванні, який представлено на рис 6.

Запропонована схема узагальнює перелік основних складових елементів як діагностичного контролю, так і системного алгоритму покрокового забезпечення безпеки, а саме:

- необхідність актуалізації паспортних даних про водойму та ГТС класу СС1 на сучасному рівні експлуатації;
- технічний стан ГТС – візуальні та інструментальні дослідження із застосування геофізичних методів рекомендовано виконувати не лише за ініціативи балансоутримувача, а й у періоди «високих вод»;



- гідрологічні розрахунки є обґрунтованими у зв'язку зі змінами кліматичних умов, відповідних особливостей формування максимального стоку та впливу техногенного і природного чинників на роботу гідроспоруд;
- критеріальні показники оцінки надійності роботи ГТС є невід'ємною складовою якісного та кількісного узагальнення технічного стану споруди;
- на основі виконаних попередніх етапів оцінювання є змога встановити рівень безпечної експлуатації саме при каскадному розташуванні таких ГТС з урахуванням багатьох критеріїв та експертних оцінок;
- прогнозування зміни технічного стану та можливість приймати обґрунтовані управлінські рішення в кінцевому результаті досліджень є невід'ємною складовою забезпечення високого рівня технічної експлуатації для балансоутримуючих організацій.



Рис. 6. Схема до запропонованого алгоритму управління та екологічно безпечної експлуатації гідротехнічних споруд класу СС1 у каскадах

Реалізація запропонованого алгоритму розподілу споруд за рівнем їх технічного стану і небезпеки експлуатації представлена на прикладі каскаду ГТС на річці Нижня Терса. Встановлено, що серед досліджуваних об'єктів три знаходяться в зоні потенційного ризику виникнення аварії. Технічний стан та експлуатаційна безпека семи дамб відноситься до пониженого рівня. Дві ГТС відповідають вимогам безпеки, але потребують підвищеної уваги при експлуатації у зв'язку із високим рівнем негативних соціально-екологічних наслідків у випадку прориву. Отримані результати надають можливість оцінки імовірного кумулятивного ефекту під час руйнування однієї або декількох дамб. В цьому випадку кожна наступна ГТС буде сприймати об'єми води, які надійдуть із розташованих вище водойм. Сумарний об'єм води від дощових (зливових) паводків з додаванням об'єму, накопиченого у водоймах, що може бути вивільнений, складає  $\sim 17,5 \times 10^6 \text{ м}^3$ . У зоні потенційної небезпеки підтоплення (затоплення) території та погіршення санітарно-гігієнічних умов водокористування можуть опинитися близько 9 населених пунктів з понад 2,5 тисячею мешканців.

Запропонований та представлений у практичній реалізації алгоритм надає змогу виконувати середньо- та довготермінові прогностичні рішення щодо планового покращення технічного стану ГТС або їх поступової ліквідації.

## **6. Обговорення результатів оцінювання технічного стану та екологічно безпечної експлуатації гідроспоруд при каскадному розташуванні**

Варто відзначити, що переважна більшість об'єктів будувались понад 50–70 років тому господарським способом без належної проєктної документації (або з плином часу документація була втрачена) за старими нормативами та інженерними підходами. Таким чином, необхідність комплексного підходу до оцінювання рівня технічного стану каскадів ґрунтових гідротехнічних споруд класу СС1, які формують ставки і водосховища на малих річках, потребує розробки дієвого алгоритму експлуатації. З цією метою пропонується розробка технічних паспортів водойм і дамб на них, проведення гідрологічних та гідравлічних (інженерних) розрахунків. Визначення параметрів зміни рівня води у ставках і водосховищах та умов безпечної технічної і екологічної експлуатації гідротехнічних споруд у випадку надходження значної кількості атмосферних опадів і можливого руйнування розташованого вище за течією об'єкта. Запропоновані заходи можуть бути основою для впровадження системи постійно діючого моніторингу технічного стану ГТС та оцінювання (прогнозування) їх впливу на оточуюче середовище.

Проведені дослідження та представлені розрахунки на прикладі репрезентативного об'єкту досліджень є підґрунтям для визначення подальшого рівня екологічно безпечної експлуатації споруд. Встановлена вірогідність значного підвищення рівня води зі сторони верхнього б'єфу у випадку рясних дощів або прориву ГТС вище за течією річки. Такі дані є основою до оцінювання імовірності виникнення аварійної ситуації внаслідок фільтраційних деформацій тіла та основи споруди. Порівняння розрахункових випадків імовірності руйнування ГТС внаслідок фільтраційних деформацій показує, що в цілому загальний ризик не перевищує нормативний. Разом з тим, відмічається суттєве підвищення загального ризику аварії тіла дамби при рівні води на відмітці гребня дамби віднос-

но нормального підпірного горизонту, що у відсотковому відношенні становить від 15 до 60 %.

До переваг проведеного дослідження можна віднести реалізований приклад застосування під час діагностичних обстежень не лише відомих (класичних) методів технічної діагностики, а й використання дистанційного геофізичного методу ПЕМПЗ. Комплексування методів дозволяє виявити ділянки зосередженої фільтрації води крізь тіло ГТС, зони обводнення та деформовано-напруженого стану ґрунтів. Додатково діагностуються початкові стадії формування тріщин відриву, які неможливо встановити візуально та за даними геодезичних спостережень або закладної контрольно-вимірювальної апаратури.

Ефективне управління каскадами гідротехнічних споруд класу СС1, за сучасних умов експлуатації, потребує подальшого удосконалення системи технічної діагностики та алгоритму їх екологічно безпечної експлуатації. Зокрема суттєвим кроком є необхідність системної розробки паспортів водних об'єктів. Обов'язковим є включення до такої документації показників і параметрів роботи ГТС та водоскидів. Даними показниками можуть бути представлені в роботі послідовність та наповненість такої інформації, за запропонованим алгоритмом. Він повинен включати гідрологічні, гідравлічні та імовірнісних показників виникнення аварії внаслідок фільтраційних деформацій. Це дозволяє приймати ефективні планові та оперативні рішення, а також прогнозувати зміну технічного стану споруд у часі. Результати діагностичних обстежень та параметрів інженерних розрахунків надають можливість встановлювати рівень пріоритетності надходження коштів на поточні ремонтно-відновлювальні роботи та капітальну реконструкцію споруд водогосподарського комплексу. Це підвищує експлуатаційну та екологічну безпеку роботи ГТС. За інших випадків та недоцільності подальшої експлуатації ГТС пропонується їх поступова ліквідація.

## **7. Висновки**

1. Візуальні обстеження і діагностика технічного стану ГТС із застосуванням геофізичного методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі доводять ефективність комплексу таких досліджень. Зокрема, встановлено можливість виявляти потенційні ділянки зосередженої фільтрації води крізь тіло ГТС, зони обводнення та деформовано-напруженого стану ґрунтів, початкові стадії формування суфозії, тріщин відриву тощо, які не мають візуального прояву. Такі приховані зони початкового розвитку негативних інженерно-геологічних процесів мають місце на всіх досліджуваних спорудах і складають близько 50 % від загальної кількості порушень технічного стану.

2. За гідрологічними розрахунками та визначеними гідравлічними параметрами роботи водоскидів встановлено їх невідповідність, у переважній більшості, на пропуск максимальних витрат дощових (зливових) паводків. При нормативних умовах у 5 % та 1 % забезпеченості за основним і перевірочним випадками відповідно, діючі параметри роботи водоскидних пристроїв відповідають умовам забезпечення від 10 % до 2 % в цілому. Це може призводити до підйому рівня води до відміток гребня ГТС та переливу води через дамбу.

3. За діючих умов експлуатації, розрахунок імовірнісного ризику виникнення гідродинамічної аварії внаслідок фільтраційних деформацій, засвідчує значне підвищення рівня від 14 % до 60 %, що в деяких випадках перевищує нормативні показники.

4. На підставі узагальнення існуючого досвіду експлуатації ґрунтових гідротехнічних споруд, запропоновано сучасні підходи до оцінювання технічного стану та подальшої екологічно безпечної експлуатації ґрунтових ГТС на малих річках. Впровадження запропонованого підходу надає можливість управління каскадами гідроспоруд класу СС1 на різних стадіях експлуатації. Це підвищує експлуатаційну та екологічну безпеку роботи ГТС.

### Література

1. Downing, J. A., Prairie, Y. T., Cole, J. J., Duarte, C. M., Tranvik, L. J., Striegl, R. G. et al. (2006). The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51 (5), 2388–2397. doi: <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>

2. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. К.: Мінрегіонбуд України, 37.

3. Andreev, V. H., Napich, H. V., Kovalenko, V. V. (2021). Impact of economic activity on geocological transformation of the basin of the Zhovtenka River (Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30 (1), 3–12. doi: <https://doi.org/10.15421/112101>

4. Rudakov, L. M., Napich, H. V., Orlinska, O. V., Pikarenia, D. S., Kovalenko, V. V., Chushkina, I. V., Zaporozhchenko, V. Y. (2020). Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of irrigation systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29 (4), 776–788. doi: <https://doi.org/10.15421/112070>

5. Andrieiev, V. G., Napich, H. V. (2020). Impact of ponds and reservoirs construction on the environmental safety of small river basins of the steppe zone of Ukraine (the case of Dnipropetrovsk region). *Міжвідомчий Тематичний Науковий Збірник “Меліорація і Водне Господарство”*, 1, 158–166. doi: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-228>

6. Гапич, Г. В. (2019). Аналіз причин гідродинамічної аварії на ґрунтових гідротехнічних спорудах каскаду штучних водойм. *Вісник НУВГП (Серія «Технічні науки»)*, 1 (85), 73–82. doi: <https://doi.org/10.31713/vt120198>

7. Бондар, О. І., Михайленко, Л. Є., Ващенко, В. Л., Лапшин, Ю. С. (2014). Сучасні проблеми гідротехнічних споруд в Україні. *Вісник НАН України*, 2, 40–47.

8. Стефанишин, Д. В. (2009). Про оцінку ймовірностей аварій на річкових гідроспорудах в результаті екстремальних явищ, пов'язаних з повеннями. *Екологічна безпека та природокористування*, 4, 28–48.

9. Щедрин, В. Н., Косиченко, Ю. М., Бакланова, Д. В., Баев, О. А., Михайлов, Е. Д. (2016). Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений. *Новочеркасск: РосНИИПМ*, 283.

10. Johansson, S. (1997). *Seepage Monitoring in Embankment Dams*. Stockholm.
11. Chinedu, A. D., Ogah, A. J. (2013). Electrical Resistivity Imaging of Suspected Seepage Channels in an Earthen Dam in Zaria, North-Western Nigeria. *Open Journal of Applied Sciences*, 03 (01), 145–154. doi: <https://doi.org/10.4236/ojapps.2013.31020>
12. Lin, C.-P., Hung, Y.-C., Yu, Z.-H., Wu, P.-L. (2013). Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. *Journal of GeoEngineering*, 8 (2), 61–70. URL: <http://yo-1.ct.ntust.edu.tw/jge/files/articlefiles/v8i2201309101492635170.pdf>
13. Mainali, G. (2006). *Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods*. Luleå University of Technology.
14. Putrenko, V., Benatov, D., Stefanyshyn, D. (2016). A geoinformation system of “the hydrocomplexes of Ukraine” as an important part in supporting managerial decisions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (79)), 46–53. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.61135>
15. Benatov, D. (2015). System analysis of natural- technogenic safety elements of the largest Ukrainian hydro-complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (77)), 12–21. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.49270>
16. Нарпич, Н. (2019). Assessing level of environmental and operational safety of low-pressure hydroengineering structures. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4, 46–52. doi: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.4.46-52>
17. Малаханов, В. В. (1990). *Техническая диагностика грунтовых плотин*. М.: Энергопромиздат, 120.
18. Гапіч, Г. В. (2013). Оценка технического состояния грунтовых плотин, как элемента системы экологического мониторинга территорий. *Збірник наукових праць НГУ*, 42, 168–173. URL: <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/152565/25.pdf?sequence=1>
19. Яцик, А. В., Бишовець, Л. В., Богатов, Є. О. (1991). *Малі річки України*. К.: Урожай, 296.
20. Ромашенко, М. І., Рокочинський, А. М., Галік, О. І., Колодич, О. Д., Савчук, Т. В. (2007). Сучасні зміни клімату та їх прояви від глобального до регіонального рівнів. *Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво*, 32, 65–79.
21. Вишневський, В. І. (2001). Зміни клімату і річкового стоку на території України і Білорусі. *Наукові праці УкрНДГМІ*, 249, 89–105.
22. Гапіч, Г. В. (2016). Оцінка безпеки експлуатації гідротехнічних споруд на малих річках під час проходження дощових (зливових) паводків. *Вісник НУВГП (Серія «Технічні науки»)*, 3 (75), 98–104. URL: <http://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/tehn/article/view/125/123>
23. Стефанишин, Д. В., Корбутяк, В. М., Трофимчук, О. М. (2013). Перспективи використання геоінформаційних технологій в завданнях забезпечення надійності й безпеки гідроенергетичних об’єктів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, 2 (62), 47–55.

24. Шульга, В. А. (2020). Вдосконалений алгоритм діагностичного контролю гідротехнічних споруд України. Гідроенергетика України, 1-2, 17–23. URL: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2020-07/7.pdf>
25. Пикареня, Д. С., Орлинская, О. В. (2009). Опыт применения метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) для решения инженерно-геологических и геологических задач. Днепропетровск: Изд-во «СВИДЛЕР», 120.
26. Hao, G., Wang, H. (2012). Study on Signals Sources of Earth's Natural Pulse Electromagnetic Fields. Computational Intelligence and Intelligent Systems, 631–638. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34289-9\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34289-9_72)
27. Chushkina, I., Pikarenia, D., Orlinska, O., Maksymova, N. (2019). Experimental substantiation of the NPEMFE geophysical method to solve engineering and geological problems. Visnyk of V.N.Karazin Kharkiv National University. Series «Geology. Geography. Ecology», 51, 109–123. doi: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-08>
28. Kuzmenko, E. D., Bahrii, S. M., Dzioba, U. O. (2019). The depth range of the Earth's natural pulse electromagnetic field (or ENPEMF). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 27 (3). 466–477. doi: <https://doi.org/10.15421/111870>
29. Орлінська, О. В., Пикареня, Д. С., Максимова, Н. М., Гапіч, Г. В., Іщенко, В. М. (2012). Оцінка міцностних властивостей ґрунтових дамб методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, 37, 17–23.
30. Косиченко, Ю. М., Бакланова, Д. В. (2012). Определение вероятного риска аварии крупного канала вследствие фильтрационных деформаций. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, 1 (05), 145–156.
31. Nikolaieva, I. O., Rudakov, D. V. (2015). Development of a Checklist for improvement of tailings safety. Scientific Bulletin of NMU, 2, 97–103.