

## **В І Д Г У К**

**офіційного опонента доктора технічних наук,**

**старшого наукового співробітника**

**ВОСКОБІЙНИК ОЛЕНИ ПАВЛІВНИ**

**на дисертаційну роботу Мозгового Андрія Олексійовича**

**“ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ ГІДРОТЕХНІЧНИХ  
СПОРУД КАСКАДІВ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ”,**

**представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук**

**за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди**

**Актуальність теми.** Тема представленої дисертаційної роботи спрямована на вирішення комплексної науково-технічної проблеми забезпечення надійності і безпеки складних інженерних об'єктів – гідровузлів каскадів гідроелектростанцій. Найкрупніший Дніпровський каскад гідроелектростанцій відіграє вагомий роль у забезпеченні надійної роботи енергетичної системи України. Підсумковий виробіток електроенергії гідроелектростанціями Дніпровського каскаду становить до 90% виробітку усіх гідроелектростанцій України, а водосховища Дніпровського каскаду забезпечують комунально-побутові, промислові і сільськогосподарські потреби більш 50% території України. Виробництво електроенергії гідроелектростанціями за рахунок використання відновлюваних гідроенергетичних ресурсів сприяє вирішенню нагальних, визнаних у всьому світі, проблем охорони довкілля і запровадження ресурсозберігаючих технологій.

Окрім того, такі об'єкти – є об'єктами відповідальності, адже їх відмова може призвести до значних соціальних та економічних наслідків, а отже, забезпечення надійності та конструктивної безпеки гідротехнічних споруд є важливою науково-технічною проблемою, що потребує вирішення.

Таким чином тема дисертаційної роботи, присвяченої удосконаленню методології оцінювання надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами, є **актуальною**.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Тематика дисертаційної роботи відповідає загальнодержавній програмі Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», яка затверджена Кабінетом Міністрів України розпорядженням № 605-р від 18.08.2017 р. Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури за 2013 – 2018 рр.: «Удосконалення способів розрахунку конструктивних елементів гідротехнічних споруд» – № ДР 0115U005723; «Удосконалення методів статичного і динамічного розрахунків гідротехнічних споруд у детерміністичній та імовірнісній постановках» – № ДР 0116U003337.

**Наукова новизна** докторської дисертаційної роботи отримана і обґрунтована за новими результатами комплексних наукових теоретичних положень та опрацювання статистичних даних натурних спостережень природно-кліматичних явищ. Основні положення наукової новизни дисертаційної роботи полягають у наступному:

–перше досліджено кореляційні зв'язки між природно-кліматичними явищами, а саме: кореляційні зв'язки між щорічними максимальними паводковими витратами у створах гідровузлів Дніпровського каскаду; кореляційні зв'язки між щорічною максимальною товщиною льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду; кореляційні зв'язки між щорічними максимальніми низькими середньомісячними температурами, а також кореляційні зв'язки між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду на підставі аналізу й опрацювання статистичних даних.

–отримала подальшого розвитку методика ймовірнісної оцінки надійності загальних і спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд гідровузлів розроблена на прикладі Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.

–вперше розроблено та застосовано алгоритм ймовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами, а також отримано чисельне значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій.

**Практична цінність результатів роботи** полягає у подальшому розвитку методів теорії надійності, що враховують конструктивні особливості гідротехнічних споруд і базуються на чисельному моделюванні методом статистичних випробовувань випадкового характеру навантажень і впливів, механічних властивостей матеріалів, ґрунтів основи.

Це загалом дало змогу удосконалити методику розрахунку складних природно-технічних систем, зокрема, гідровузлів каскадів гідроелектростанцій, а також підвищити надійність існуючих гідротехнічних споруд гідровузлів каскаду при відповідному рівні їх технічного моніторингу.

Матеріали дисертаційної роботи були впроваджені при виконанні розрахунків надійності і безпеки Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках роботи «Відповідність споруд ГЕС ПрАТ «Укргідроенерго» вимогам сучасних норм проектування, у тому числі з урахуванням сейсмічних впливів», що виконується в ПрАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ», м. Харків.

**Достовірність положень і висновків дисертації** підтверджена співставленням результатів власних досліджень автора із дослідженнями вітчизняних та зарубіжних авторів, даними чисельного моделювання роботи гідротехнічних споруд та порівнянням їх з результатами натурних досліджень стану гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду; обґрунтуванням передумов використаних для визначення параметрів функцій розподілів природно-кліматичних явищ, які приймалися на основі опрацювання статистичних даних із відкритих джерел.



Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки і наведені рекомендації носять практичний характер та достовірні. Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій, обумовлюється обраними загальноприйнятими апробованими методами досліджень: математичним моделюванням напружено-деформованого стану гідротехнічних споруд та їх основ із застосуванням методів механіки суцільного середовища; методами параметричної і системної теорій надійності комплексів гідротехнічних споруд – гідровузлів, які розглядаються як складні технічні системи; методом статистичних випробовувань (або метод Монте-Карло) для моделювання навантажень і впливів на гідротехнічні споруди, властивостей матеріалів та основ; методами теорії імовірності, математичної статистики, які використовуються для аналітичного опису і визначення параметрів функцій розподілів випадкових величин різноманітних природних факторів, для дослідження кореляційних зв'язків між випадковими величинами природних факторів.

**Враховуючи вище наведене, слід вважати ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій такою, що відповідає вимогам щодо дисертаційних робіт, представленим на отримання наукового ступеня доктора технічних наук.**

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація викладена на 592 сторінках, в тому числі 304 сторінки основного тексту, та складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 504 найменувань та 23 додатків. В анотації роботи стисло викладені основні наукові положення та результати дисертаційної роботи.

### **Оцінка змісту дисертації**

Вступ містить всі необхідні елементи загальної характеристики дисертації: сформульовано науково-технічну проблематику, якій присвячені дослідження дисертації, обґрунтована її важливість та актуальність, сформульована мета і основні завдання, викладена наукова новизна й практичне значення, підкреслено особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію роботи.

В розділах описані всі результати досліджень для розкриття теми дисертації, досягнення мети й отримання наукової новизни та нових наукових результатів, коротку характеристику яких наведено нижче.

**У першому розділі** розглянуто особливості роботи каскадів гідроелектростанцій і основні фактори, що впливають на їх надійність і безпеку, наведені статистичні дані аварій гідротехнічних споруд. Наведено сучасний стан розвитку теорії надійності гідротехнічних об'єктів, в тому числі із застосуванням математичного апарату теорії випадкових функцій, теорії випадкових процесів до методів розрахунку надійності конструкцій і споруд. Розглянуто основні аспекти параметричної і системної теорій надійності, які використовуються для оцінювання надійності і безпеки гідротехнічних

об'єктів. Проаналізовано методи параметричної і системної теорій надійності які використовуються для оцінки надійності і безпеки гідротехнічних об'єктів, конструкцій і споруд.

Проаналізовано сучасні підходи щодо оцінки надійності бетонних гребель, гребель із ґрунтових матеріалів, водоскидних споруд гідровузлів, судноплавних шлюзів, будівель гідроелектростанцій, монтажних майданчиків, статистичні методи аналізу їх стану з урахуванням натурних даних, критерії їх надійності. Розглянуто питання забезпечення їх соціально-екологічної безпеки, надійність технологічного обладнання і затворів гідротехнічних споруд.

Встановлено, що поряд із широким запровадженням імовірнісних методів оцінки надійності об'єктів гідротехнічного будівництва на сьогодні не сформульовано керівні принципи щодо оцінки надійності складних технічних систем з урахуванням багатофакторних впливів.

З'ясовано, що в існуючих вітчизняних нормативних документах відсутні ймовірнісні методики моделювання поведінки гідросистем, а також оцінювання надійності і безпеки складних природно-технічних систем, а саме каскадів гідроелектростанцій.

Показано, що поза увагою сучасних вітчизняних і закордонних літературних джерел залишились, притаманні саме каскадам гідроелектростанцій, кореляційні зв'язки між природними факторами впливу. Саме це і стало основним напрямком наукових досліджень дисертації та основною робочою гіпотезою.

Обґрунтовані автором у першому розділі напрями досліджень дали змогу сформулювати нові наукові задачі для розкриття мети дисертаційного дослідження.

**У другому розділі** здійснено збір і аналіз статистичних даних, що є вихідними параметрами для моделювання випадкового характеру основних природно-кліматичних впливів, що можуть діяти на гідротехнічні споруди:

- сейсмічних впливів, які спричинені сейсмічною активністю району Карпатських гір, району Вранча, району Криму, зафіксованих у період з 1578 р. по 2009 р. Отримано залежності між макросейсмічною бальністю  $I_0$ , енергетичним класом землетрусу  $K$  і магнітудою  $M$  для вказаних районів;

- температурних впливів по місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду опрацьовано за період спостережень з 1812 р. по 2010 р.;

- вітрових впливів у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду опрацьовано за період спостережень з 1936 р. по 1960 р.;

- льодових впливів на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1956 р. по 1966 р.

Для згладжування та екстраполяції емпіричних значень розподілу зазначених природно-кліматичних явищ шляхом порівняння параметрів оцінки точності підібрано функції розподілів та обчислено їх параметри.

Вибір типу аналітичної функції розподілу здійснено шляхом порівняльної оцінки відповідності аналітичних кривих імовірностей емпіричним значенням за



модифікованим критерієм  $n\omega^2$  (критерій Смирнова-Крамера-фон Мізеса), за критерієм порівняння рівня значущості  $\alpha$ , за критерієм порівняння середньоквадратичного відхилення імовірностей  $\sigma p$  емпіричних випадкових величин від величин визначених за аналітичною кривою, за критерієм порівняння середньоквадратичного відхилення  $\sigma X$  випадкової емпіричної величини  $X$  від величини за аналітичною кривою  $X_0$ .

У даному розділі запропоновано підходи щодо визначення видів аналітичних функцій розподілів та їх параметрів для опису мінливості таких природно-кліматичних факторів: щорічної максимальної бальності землетрусів, щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур; щорічних максимальних швидкостей вітру; максимальної товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду.

Слід відмітити, що такий підхід може використовуватись для моделювання випадкового характеру інших природно-кліматичних явищ.

**У третьому розділі** досліджено кореляційні зв'язки і отримано кореляційні залежності таких природно-кліматичних явищ:

- щорічних максимальних паводкових витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1787 р. по 1999 р.;
- щорічної максимальної товщини льоду р. Дніпро у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1956 р. по 1966 р.;
- щорічних максимально низьких середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 р. по 2008 р.;
- щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 р. по 2008 р.

Для зазначених природно-кліматичних явищ обчислено функції лінійної регресії, отримано коефіцієнти кореляції двох вибірок для пар гідровузлів, обчислено коваріацію двох вибірок, оцінено стандартну похибку.

Отримані дані підтвердили гіпотезу про існування кореляційних залежностей і довели існування тісної, а іноді, практично функціональної залежності між природно-кліматичними явищами для місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Саме це використано автором у якості базової ланки при побудові алгоритму імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності.

Важливо те, що вперше на конкретних прикладах показана практична можливість пошуку і виявлення кореляційних зв'язків, що може використовуватись при виявленні зв'язку інших природно-кліматичних явищ.

**У четвертому розділі** в рамках параметричної теорії надійності здійснено оцінювання надійності гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі за критеріями: переливу води через гребінь греблі; стійкості верхового та низового укосів; вичерпання фільтраційної міцності тіла греблі; вичерпання фільтраційної міцності основи; руйнування кріплення укосу.

В рамках параметричної теорії надійності виконано імовірнісну оцінку надійності: бетонної водозливної греблі на нескельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності тіла греблі, вичерпання фільтраційної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти перекидання, втрати стійкості проти спливання, відмови затвору водозливу; бетонної водозливної греблі на скельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності тіла греблі, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти перекидання, відмови затвору водозливу; гравітаційних стоянів на нескельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву; гравітаційних стоянів на скельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти перекидання.

Ураховано випадковий характер гідрологічного режиму р. Дніпро, випадковий характер сейсмічних, температурних і вітрових впливів, випадковий характер льодового режиму, випадковий характер властивостей основи.

Таким чином даному розділі розглянуто широкий клас задач щодо оцінювання надійності загальних водопідпірних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій, в тому числі з використанням методів чисельного моделювання та урахуванням мінливості природно-кліматичних явищ, механічних властивостей матеріалів та ґрунтів основи.

У **п'ятому розділі** здійснено оцінювання надійності спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій на підставі методу граничних станів.

Крім того, в рамках параметричної теорії надійності здійснено ймовірнісну оцінку надійності: будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків гідроелектростанцій на нескельовій основі за основними критеріями їх можливих відмов, зокрема: вичерпання механічної міцності, вичерпання фільтраційної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти спливання; будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків гідроелектростанцій на скельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти спливання; камер і голів шлюзів на нескельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, руйнування нижніх воріт; камер і голів шлюзів на скельовій основі за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти спливання, втрати стійкості проти перекидання, руйнування нижніх воріт.

Ураховано випадковий характер гідрологічного режиму р. Дніпро, випадковий характер сейсмічних, температурних і вітрових впливів, випадковий характер властивостей основи.

У **шостому розділі** розроблено дерева відмов і несправностей гідротехнічних споруд гідровузлів на підставі аналізу компоновочних і конструктивних рішень



гідровузлів Дніпровського каскаду. Пропонуються підходи, які дозволяють урахувати кореляційні зв'язки між випадковими величинами, що описують різноманітні впливи на гідротехнічні споруди пар гідровузлів каскаду гідроелектростанцій. Це стає можливим при застосуванні нормального закону розподілу для двох випадкових корельованих величин. Розглядаються такі випадкові величини: щорічні максимальні паводкові витрати, щорічна максимальна товщина льоду, щорічні максимальні низькі середньомісячні температури, максимальні амплітуди середньомісячних температур.

За результатами імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності із застосуванням принципу слабкої ланки розроблено блок-схему підсистем розрахункового узагальненого дерева відмов і несправностей, а також узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.

Розроблено алгоритм імовірнісної оцінки надійності каскаду гідроелектростанцій.

На практичному прикладі отримано розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, що становить  $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$  1/рік. Запропоновані підходи можуть бути застосовані при оцінці надійності і безпеки інших гідросистем.

У **загальних висновках** приводяться нові наукові й практичні результати, отримані автором у процесі виконання дисертаційної роботи, а також рекомендації щодо використання отриманих результатів, показано практичне їх застосування і важливість для науки. Загальні висновки роботи свідчать, що усі поставлені в дослідженні завдання виконані.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на 592 сторінках. Основна частина містить 304 сторінки, у тому числі 47 таблиць, 56 рисунків, списку використаних джерел із 504 найменувань літератури, 23 додатка на 216 сторінках. Автореферат дисертації викладено на 36 сторінках.

За змістом та оформленням дисертаційна робота й автореферат відповідають встановленим вимогам з атестації кадрів щодо їх обсягу і структури.

### **Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях**

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи здобувачем представлено в 28 наукових працях, з них 27 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, у тому числі 10 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 2 статті у зарубіжних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 1 додаткова публікація; 11 публікацій апробаційного характеру, з яких 1 у матеріалах конференції, що індексується в наукометричною базою Scopus.

### **Ідентичність змісту реферату та основних положень дисертації.**

Зміст автореферату, викладеного на 36 сторінках, розкриває основні положення дисертації та в необхідній мірі розкриває мету, завдання та отримані в роботі результати.

### **Зауваження до змісту дисертації:**

1. Автору варто було б більш детально розкрити особистий внесок у опублікованих працях за темою дисертації, що наведений на стор. 29-32 автореферату, адже визначення внеску здобувача як «розробка розрахункової схеми» повторюється чотири рази, «чисельне моделювання» - сім разів, «аналіз результатів» - 9 разів та неповною мірою розкривають сутність виконаних досліджень.

2. Не зовсім коректним є застосування терміну «детерміністична оцінка надійності», що відповідно до прийнятої автором методики базується на використанні методу граничних станів. Цей метод за своєю сутністю є напівімовірнісним, тобто хоча й опосередковано, але враховує ймовірнісну природу розрахункових факторів – внутрішніх властивостей споруд та навантажувальних ефектів шляхом відповідного нормування цих параметрів.

При цьому використаний автором критерій для оцінювання «детерміністичної надійності» (залежність (4.19) за своєю суттю є інтегральним коефіцієнтом запасу та фактично оцінює забезпеченість узагальненої несучої здатності споруди чи основи. У зв'язку з цим варто було більш детально висвітлити в роботі прийняту методологію «детерміністичної оцінки надійності» та критеріїв, за якими зроблено висновки щодо отриманих кількісних оцінок.

3. Потребує обґрунтування репрезентативність статистичних вибірок спостережень температурно-кліматичних навантажень на гідровузли Дніпровського каскаду, зокрема: максимальних швидкостей вітру у географічних місцях їх розташування (обраний період спостережень з 1936 по 1960 роки), максимальної товщини льоду на водосховищах (обраний період спостережень з 1956 по 1966 роки), максимально низьких середньомісячних температур, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у створах гідровузлів (обраний період спостережень з 1966 по 2008 роки) Дніпровського каскаду.

4. В розділі 4 дисертації не наведені числові значення щодо прийнятої кількості проведених статистичних випробувань відповідно до програми числового експерименту оцінювання ймовірності відмови гідротехнічних споруд гідроелектростанцій, що ускладнює аналіз отриманих автором результатів.

5. Варто було б більш детально обґрунтувати прийняті передумови оцінювання надійності спеціальних водонапірних споруд каскаду гідроелектростанцій, зокрема щодо встановлення випадкових та детермінованих розрахункових величин, а також проаналізувати яким чином це впливає на точність отриманих результатів.

6. Висновки за розділами дисертації мають здебільшого констатуючий характер та неповною мірою відображають саме сутність та наукову новизну результатів проведених досліджень.



7. Автору варто було проаналізувати яким чином впливають окремі досліджувані фактори та їх мінливість на загальну оцінку ймовірності відмови обраного типу гідротехнічних споруд, більш чітко визначити причини встановленої нерівнонадійності підсистем, а також отриманого ефекту від врахування визначених кореляційних зв'язків між навантажувальними ефектами.

8. Наведення в авторефераті (формули (1) – (3), стор. 11) загальновідомих формул щодо визначення статистичних критеріїв є недоцільним. Натомість варто було б вказати конкретні числові дані, що підтверджують встановлену «тісну, практично функціональну» залежність між досліджуваними параметрами, зокрема щодо максимальними витратами р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду (стор. 12 автореферату).

**Загальна оцінка дисертаційної роботи. Висновки про відповідність дисертації вимогам порядку присудження наукових ступенів.**

Загалом дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди, а вищенаведені зауваження не впливають на позитивну оцінку дисертації в цілому.

Дисертаційна робота «**Імовірнісна оцінка надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій**» за рівнем отриманих наукових результатів та змістом, обсягом є закінченою науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що мають суттєву практичну цінність та в сукупності вирішує важливу науково-технічну проблему **розроблення методології оцінювання надійності та забезпечення безпечної експлуатації гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій** та відповідає вимогам п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» зі змінами та доповненнями, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 зі змінами та доповненнями, її автор **Мозговий Андрій Олексійович** заслуговує надання йому наукового ступеню **доктора технічних наук** за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник



О.П. Воскобійник

**Підпис доктора технічних наук,  
старшого наукового співробітника О.П. Воскобійник завіряю:**

*Т.В.О. Качальник*  
*М. Стеценко*



*...завіряю: ...управління персоналом*