

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

МОЗГОВИЙ АНДРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 625/626

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ
ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД
КАСКАДІВ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті будівництва та архітектури (ХНУБА) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Вайнберг Олександр Ісаакович,
Приватне Акціонерне Товариство
«УКРГІДРОПРОЕКТ», м. Харків,
заступник генерального директора.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бамбура Андрій Миколайович,
Державне підприємство «Державний
науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій», м. Київ,
завідувач відділу надійності
конструкцій, будівель і споруд;

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Воскобійник Олена Павлівна,
Харківський національний університет
міського господарства ім. О.М. Бекетова,
професор кафедри будівельних конструкцій;

доктор технічних наук, професор
Клименко Євгеній Володимирович,
Одеська державна академія
будівництва та архітектури,
завідувач кафедри залізобетонних конструкцій
та транспортних споруд.

Захист відбудеться «24» жовтня 2019 р. о 12³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7 та сайті <http://kart.edu.ua>.

Автореферат розісланий «10» вересня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Гідротехнічні споруди, гідровузли і каскади гідровузлів являються технічно складними інженерними об'єктами. Достатньо поширеними є гідровузли комплексного призначення, до складу яких, зазвичай, входять гідроелектричні станції (ГЕС). Як в Україні, так і у світі виробництво електроенергії гідроелектростанціями за рахунок використання відновлюваних гідроенергетичних ресурсів належить до важливих природоохоронних, ресурсозберігаючих технологій і дозволяє запобігти забрудненню навколишнього середовища відходами виробництва альтернативними джерелами видобутку електроенергії.

Одним із важливих аспектів загальної проблеми безпеки, яка виникає під час проектування, будівництва та експлуатації гідротехнічних споруд, у тому числі і споруд каскадів гідровузлів, являється проблема забезпечення їх надійності і безпеки. Важливість цієї проблеми зумовлена широким розповсюдженням гідротехнічних споруд гідровузлів, високим рівнем їх відповідальності, складністю і значною потенційною небезпекою.

Діючі в Україні норми проектування гідротехнічних споруд регламентують здійснювати оцінку надійності і безпеки цих споруд за допомогою методу граничних станів у напівімовірнісній чи детерміністичній постановці, а також – на основі розрахунків імовірнісними методами. Слід зазначити, що обидва методи є нормативними. Крім того, у закордонних нормах проектування гідротехнічних споруд значний акцент робиться на урахування ризиків від випадкового характеру гідрологічних режимів водотоку і сейсмічних впливів.

Метод граничних станів, незважаючи на цілий ряд переваг, в деяких випадках не дає змоги об'єктивно оцінити ресурс узагальненої несучої здатності об'єкта за рахунок того, що значення нормативних коефіцієнтів не завжди є об'єктивними і носять умовний характер. Без сумніву, імовірнісні методи дають більш об'єктивну оцінку ресурсу узагальненої несучої здатності, а відповідно – надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій. Вони здатні урахувувати навантаження і впливи в усьому діапазоні їх дії, у тому числі – видатні значення малої повторюваності (імовірності). Також, при використанні імовірнісних методів, з'являється можливість урахування кореляційних зв'язків між природними факторами, визначальними з точки зору впливу на гідротехнічні споруди, а саме: між паводковими витратами водотоку, між товщиною льоду у водосховищах каскаду гідроелектростанцій, між температурними впливами по гідровузлах каскаду. Слід зауважити, що існування кореляційних зв'язків між природними факторами притаманне лише таким складним природно-техногенним об'єктам як гідросистеми.

Важко переоцінити роль гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій у забезпеченні надійної роботи об'єднаної енергетичної системи України. Підсумковий виробіток електроенергії гідроелектростанціями

Дніпровського каскаду становить до 90% виробітку усіх гідроелектростанцій України. Водосховища Дніпровського каскаду забезпечують комунально-побутові, промислові і сільськогосподарські потреби більш 50% території України. Тому питання надійної і безпечної експлуатації гідровузлів Дніпровського каскаду, розробка й удосконалення методів оцінки їх надійності і безпеки являються актуальними.

У зв'язку з вище означеним, дана дисертаційна робота спрямована на розробку алгоритму імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами. Дисертаційна робота є актуальною та має теоретичне і практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційного дослідження 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.

Мета дослідження – розробка методології імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності.

Об'єкт дослідження – мінливість факторів, які впливають на надійність і безпеку каскаду гідроелектростанцій.

Предмет дослідження – імовірнісні математичні моделі надійності і безпеки комплексів гідротехнічних споруд, які входять до складу вузлів каскаду гідроелектростанцій.

Задачі досліджень:

– дослідити випадковий характер природно-кліматичних явищ, а саме: щорічних максимальних бальностей землетрусів, щорічних максимальних низьких середньомісячних температур, щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур, щорічних максимальних швидкостей вітру, щорічної максимальної товщини льоду та здійснити підбір функцій розподілів зазначених природно-кліматичних явищ із визначенням їх параметрів для географічних місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій за результатами аналізу статистичних даних;

– дослідити кореляційні зв'язки між природно-кліматичними явищами: 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 максимальними 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;

– в рамках параметричної теорії надійності виконати імовірнісну оцінку надійності загальних і спеціальних типів гідротехнічних споруд на скельових і нескельових основах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, у тому числі: гребель із ґрунтових матеріалів, бетонних водозливних гребель, гравітаційних стоянів, будівель гідроелектростанцій, будівель монтажних майданчиків, камер і голів шлюзів;

– побудувати дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації (аварії) на кожному гідровузлі Дніпровського каскаду. Побудувати узагальнене дерево відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації (аварії) на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій;

– розробити алгоритм імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами. Здійснити апробацію алгоритму на гідротехнічних спорудах Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.

Методи дослідження: математичне моделювання напружено-деформованого стану гідротехнічних споруд та їх основ із залученням методів механіки суцільного середовища. Методи параметричної і системної теорій надійності комплексів гідротехнічних споруд – гідровузлів, які розглядаються як складні технічні системи. Метод статистичних випробовувань (або метод Монте-Карло) для моделювання навантажень і впливів на гідротехнічні споруди, властивостей матеріалів та основ. Методи 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. Загальні методи теоретичних та емпіричних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

– вперше досліджено випадковий характер природно-кліматичних явищ, а саме: щорічних максимальних бальностей землетрусів, щорічних максимально низьких середньомісячних температур, щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур, щорічних максимальних швидкостей вітру, щорічної максимальної товщини льоду та здійснено підбір функцій розподілів зазначених природно-кліматичних явищ, визначено їх параметри для географічних місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;

– вперше досліджено кореляційні зв'язки між природно-кліматичними явищами: 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 максимальними 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 імовірнісної оцінки надійності загальних і спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності;

– вперше побудовано та застосовано узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;

– вперше розроблено та застосовано алгоритм імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами;

– вперше отримано чисельне значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій.

Достовірність положень і висновків дисертації підтверджена: співставленням результатів власних досліджень 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. При розробці імовірнісних математичних моделей надійності і безпеки комплексів гідротехнічних споруд, які входять до складу вузлів каскаду гідроелектростанцій застосовано методи механіки деформівного твердого тіла, метод імітаційного моделювання навантажень і впливів на гідротехнічні споруди, методи теорії імовірності і математичної статистики.

Отримані автором дисертації результати є новими, при цьому наукові положення і результати кандидатської дисертації в докторській дисертації на захист не виносяться.

Практичне значення отриманих результатів. У результаті впровадження підходів, регламентованих у даному дослідженні, очікується підвищення технічного рівня розрахунку складних природно-технічних систем, зокрема, гідровузлів каскадів гідроелектростанцій, а також підвищення надійності 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.

Результати досліджень знайшли практичне застосування в навчальному процесі і при дипломному проектуванні у Харківському національному університеті будівництва та архітектури.

Особистий внесок здобувача. Огляд та аналіз літератури за тематикою дослідження. Збір та аналіз статистичних даних максимальної бальності землетрусів, статистичних даних температурних впливів, статистичних даних вітрових впливів, статистичних даних щорічної максимальної товщини льоду. Підбір та обчислення параметрів функцій розподілів певних випадкових величин: щорічної максимальної бальності землетрусів, щорічної максимальної низької середньомісячної температури, щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур, щорічних максимальних швидкостей вітру, щорічної максимальної товщини льоду. Дослідження кореляційних зв'язків між такими випадковими величинами: щорічними максимальними паводковими витратами, щорічною максимальною товщиною льоду, щорічними максимально низькими середньомісячними температурами, щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур. Побудова та застосування узагальненого дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Розробка та застосування алгоритму імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами. Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях: науково-технічних конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ХДТУБА – ХНУБА (м. Харків, 2009 – 2019 рр.); IV-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХДТУБА, 20-22 жовтня 2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві" (м. Харків, ХДТУБА, 27-28 жовтня 2011 р.); Науково-технічній конференції "Гідротехнічні та гідроенергетичні об'єкти України" (м. Рівне, НУВГП, 5-6 квітня 2011 р.); V-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХДТУБА, 18-19 жовтня 2011 р.); 6-й Міжнародній науково-практичній конференції гідроенергетиків "Світові тенденції й перспективи розвитку гідроенергетики України" (м. Рівне, Асоціація "УКРГІДРОЕНЕРГО", 14-15 березня 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 100-річчю з дня народження професора І. Є. Прокоповича "Проблеми теорії і практики будівельних конструкцій" (м. Одеса, ОДАБА, 15-17 квітня 2013 р.); VI-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХНУБА, 15-17 жовтня 2013 р.); VI-му Всеукраїнському науковому семінарі "Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур"

присвяченому 100-річчю створення Харківської каналізації (м. Харків, ХНУБА, 15-16 жовтня 2014 р.); IV-й міжнародній науково-технічній інтернет-конференції "Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства" (м. Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 25 листопада - 25 грудня 2014 р.); VII-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХНУБА, 20-21 жовтня 2015 р.); VII-му Всеукраїнському науковому семінарі "Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур" (м. Харків, ХНУБА, 11-12 жовтня 2016 р.); VI-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті" (м. Харків, УкрДУЗТ, 19-21 квітня 2017 р.); Міжнародній виставці «Інтер-Транспорт» і міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, ОДАБА, 01 червня 2017 р.); VIII-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХНУБА, 18-19 жовтня 2017 р.); VII-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті" (Трансбуд-2018), (м. Харків, УкрДУЗТ, 14-16 листопада 2018 р.).

Дисертаційна робота розглядалася на: науково-технічній раді Харківського національного університету будівництва та архітектури, (м. Харків, ХНУБА, 12 грудня 2018 р.); розширеному засіданні кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки Національного університету водного господарства та природокористування, (м. Рівне, НУВГП, 19 березня 2019 р.); розширеному засіданні кафедри геотехніки та підземних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури, (м. Харків, ХНУБА, 12 квітня 2019 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 28 наукових праць, 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 Scopus.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 592 сторінках і містить 304 – сторінки основного тексту, 47 – таблиць, 56 – рисунків, 504 – найменування літератури, 23 додатка на 216 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** представлена загальна характеристика роботи, наведено актуальність, зв'язок із науковими темами, сформульовано мету та задачі досліджень, представлено практичне значення роботи та наукова новизна.

У першому розділі проаналізовано роль гідроенергетики в сучасних умовах і перспективи розвитку гідроенергетики в Україні. Розглянуто особливості роботи каскадів гідроелектростанцій і основні фактори, що впливають на їх надійність і безпеку, статистичні дані аварій гідротехнічних споруд. Наведено стан розвитку теорії надійності гідротехнічних об'єктів, а саме залучення 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 оцінки 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, розробці яких присвячені роботи Г. Аугусті, А. Баратта, С. М. Беллендіра, В. В. Болотіна, О. І. Вайнберга, А. Б. Векслера, О. П. Воскобійник, Ф. Г. Гурвича, Д. А. Івашинцова, К. Капура, Ф. Кашиаті, Х. Кумамото, Л. Ламберсона, А. І. Лантух-Ляценка, А. Л. Можевітінова, А. О. Мозгового, В. А. Пашинського, А. В. Перельмутера, С. Ф. Пічугіна, В. Д. Райзера, А. Р. Ржаніцина, С. І. Рогачка, Д. В. Стефанишина, О. В. Семка, О. М. Фінагенова, Г. Хана, Е. Дж. Хенлі, С. Шапіро, Г. Шпете, С. Г. Шульмана та ін. 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. Зокрема, в табл. 2.4 із ДБН В.2.4-3:2010. «Гідротехнічні споруди. Основні положення» наведено допустимі значення імовірностей виникнення аварій на напірних гідротехнічних спорудах різних класів наслідків (табл. 1).

Таблиця 1

Допустимі значення імовірностей виникнення аварій на напірних гідротехнічних спорудах різних класів наслідків (відповідальності), 1/рік

Клас (підклас) наслідків (відповідальності) споруд	Імовірність виникнення аварії
СС3	$5 \cdot 10^{-5}$
СС2-1	$5 \cdot 10^{-4}$
СС2-2	$3 \cdot 10^{-3}$
СС1	$6 \cdot 10^{-3}$

Не оминули уваги інженерно-геологічні та геоекологічні аспекти надійності і безпеки експлуатації споруд промислової гідротехніки, а також питання забезпечення їх соціально-екологічної безпеки, надійність технологічного обладнання і затворів гідротехнічних споруд. Проаналізовано питання гармонізації національних стандартів щодо розрахунку і забезпечення надійності залізобетонних конструкцій із закордонними нормами, які розглянуто в роботах А. М. Бамбури, А. Я. Барашикова, А. Б. Голишева, О. Б. Гурківського, О. В. Дорогової, С. В. Клименка, П. І. Кривошеєва, О. М. Перлової,

В. С. Шмуклера та ін. Проаналізовано підходи щодо моделювання гідрологічного режиму, обґрунтування допустимих гідрологічних ризиків.

Сучасні методи оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану, розробка критеріїв їх надійності розглянуто у закордонних роботах М. Alembagheri, L. Altarejos-García, N. S. Arunraj, P. Boccotti, D. S. Bowles, M. Calamak, C. Callari, Z. Cao, C. Carvajal, J. A. Charles, J. K. Chen, Y. M. Cheng, S. E. Cho, D. De-León-Escobedo, D. J. Delgado-Hernández, D. Dias, K. Douglas, I. Escuder-Bueno, H. Felix, R. Fell, W. Fu, A. Gaspar, X. Guo, J. Hu, I. M. Idriss, J. Jeppsson, F. Johansson, A. Krounis, Laginha, T. Lansivaara, F. Lemperiere, B. Li, D. Li, H. J. Li, L. Li, Y. Li, Y. Liao, F. Lopez-Caballero, A. Lupoi, L. A. McDonald, S. Mandal, J. Maiti, T. Matsui, A. Modaresi-Farahmand-Razavi, O. Morales-Nápoles, L. Peyras, S. Rahman, R. Rosso, K. C. San, H. F. Schweiger, J. Serafim, A. Serrano-Lombillo, M. Seyedkazemi, S. W. Sloan, M. Spannagle, H. Z. Su, Y. Sun, F. Tschuchnigg, Y. Wang, W. B. Wei, Z. P. Wen, M. Westberg, Z. Y. Wu, H. Xu, Z. W. Yan, A. M. Yanmaz, Y. Y. Zhang та ін.

Встановлено, що поряд із широким запровадженням імовірнісних методів оцінки надійності об'єктів гідротехнічного будівництва не сформульовані керівні принципи щодо оцінки надійності складних технічних систем з урахуванням багатофакторних впливів. З'ясовано, що в існуючих нормативних документах відсутні імовірнісні методики моделювання поведінки гідросистем, оцінки надійності і безпеки складних природно-технічних систем, а саме – каскадів гідроелектростанцій. Показано, що поза увагою сучасних літературних джерел залишились, притаманні саме каскадам гідроелектростанцій, кореляційні зв'язки між природними факторами впливу. Виходячи з вище зазначеного були сформульовані основні задачі дослідження.

У **другому розділі** здійснено збір і аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України, яка спричинена 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. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу бальності землетрусів шляхом порівняння параметрів оцінки точності підібрано функції розподілів та обчислено їх параметри (рис. 1). За оцінкою точності результатів розрахунків встановлено, що найбільш повно відображає характеристики мінливості сейсмічної активності логарифмічно-нормальний розподіл. Отримано параметри логарифмічно-нормального розподілу сейсмічної активності Карпатських гір, району Вранча, Криму.

Статистичні дані температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду опрацьовано за період спостережень з 1812 р. по 2010 р. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур шляхом порівняння параметрів оцінки точності підібрано функції розподілів та обчислено їх параметри (рис. 2).

Встановлено, що імовірності щорічних максимально низьких середньомісячних температур у м. Київ, м. Кам'янське, м. Запоріжжя, м. Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом, імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Канів може бути представлена біекспоненціальним розподілом, імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Кременчук може бути представлена біекспоненціальним або нормальним розподілами, імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Київ, м. Кам'янське, м. Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом, імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Канів, м. Кременчук, м. Запоріжжя можуть бути представлені логарифмічно-нормальним або нормальним розподілами.

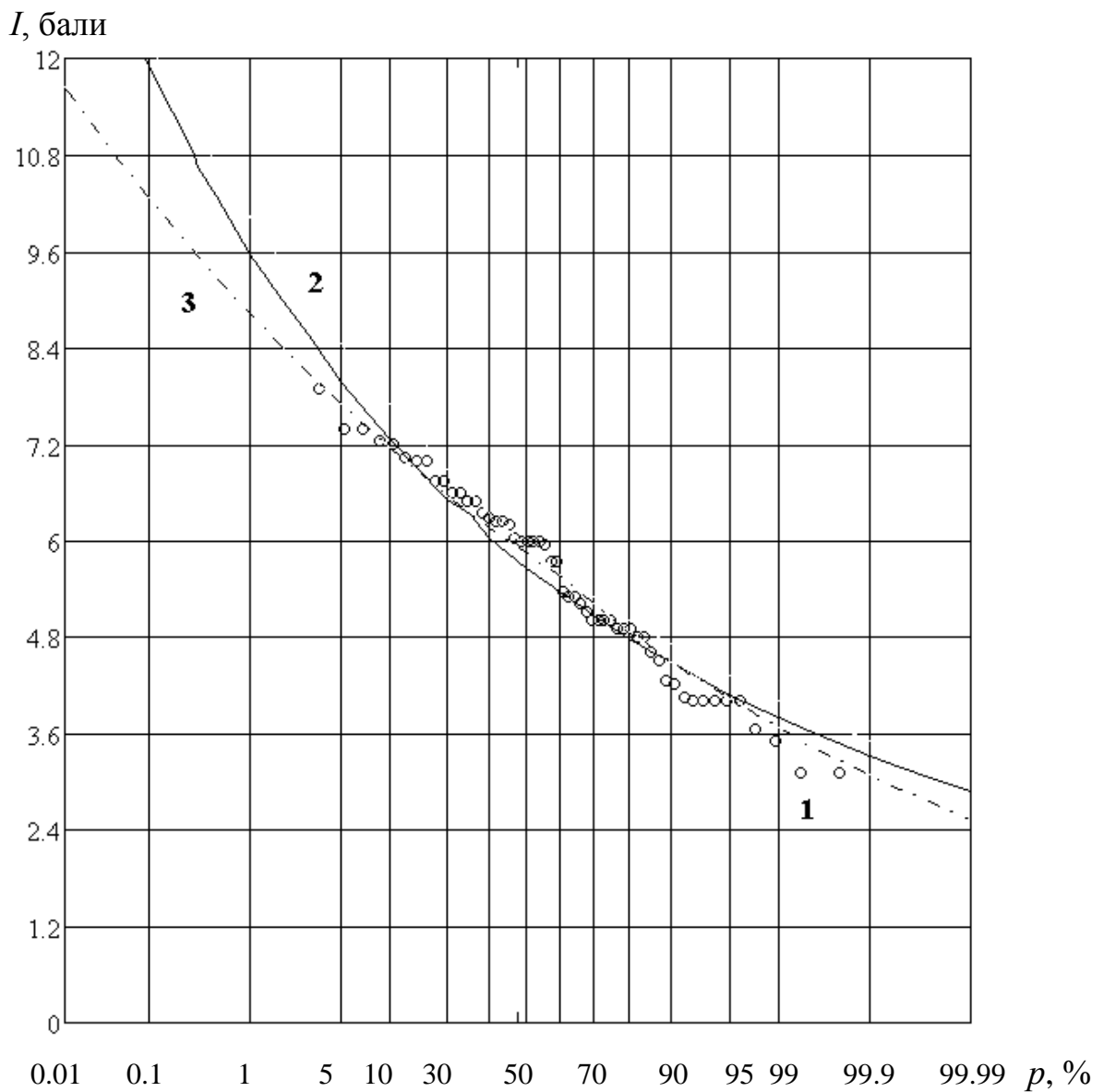


Рис. 1. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної бальності землетрусів I , бали Карпатських гір за період спостережень з 1908 р. по 2009 р.:
 1 – зафіксована бальність, 2 – трьохпараметричний гамма-розподіл,
 3 – логарифмічно-нормальний розподіл.

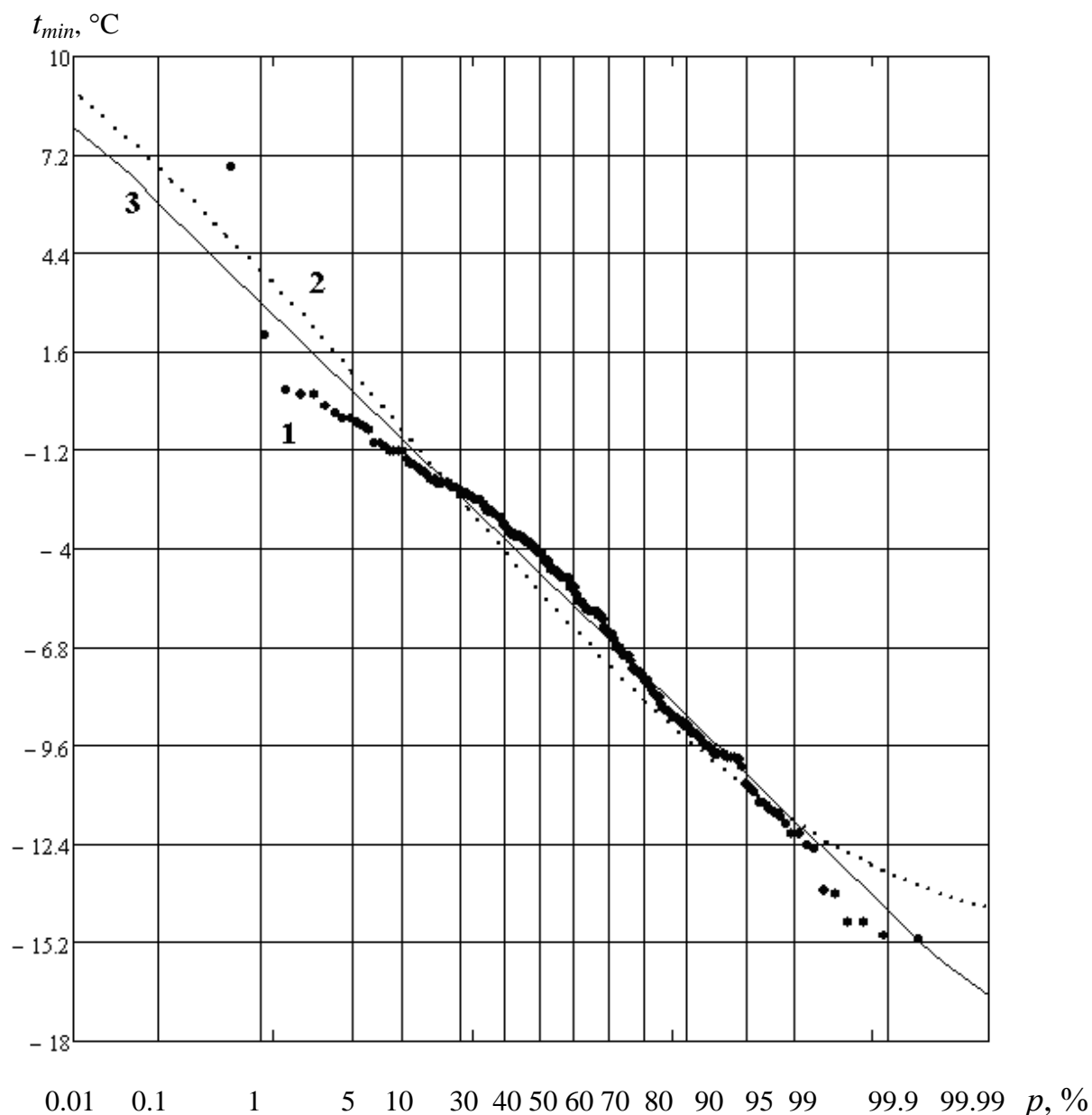


Рис. 2. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури t_{min} , °C у м. Вишгород за період спостережень 1812–1847, 1852–2010 рр.: 1 – зафіксована температура, 2 – біекспоненціальний розподіл, 3 – нормальний розподіл.

Статистичні дані щорічних максимальних швидкостей вітру у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду опрацьовано за період спостережень з 1936 р. по 1960 р. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу щорічних максимальних швидкостей вітру шляхом порівняння параметрів оцінки точності підібрано функції розподілів та обчислено їх параметри. Встановлено, що імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Київ, м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом, імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Канів, м. Кременчук, м. Каховка можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом.

Здійснено збір і аналіз статистичних даних щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1956 р. по 1966 р. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу щорічної максимальної товщини льоду шляхом порівняння параметрів оцінки точності підібрано функції розподілів та обчислено їх параметри. Встановлено, що імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах Київського, Канівського і Каховського гідровузлів можуть бути представлені трьохпараметричним гамма-розподілом, імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах Кременчуцького, Середньодніпровського і Дніпровського гідровузлів можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом.

Вибір типу аналітичної функції розподілу здійснюється на підставі порівняльної оцінки відповідності аналітичних кривих імовірностей емпіричним кривим за рекомендаціями міжнародного посібника по методам розрахунку основних гідрологічних характеристик. Окрім візуальної оцінки при кількості елементів вибірки більш 40, аналіз відповідності необхідно здійснювати за модифікованим критерієм $n\omega^2$ (критерій Смирнова-Крамера-фон Мізеса), який визначається за формулою (1):

$$n\omega^2 = \frac{n}{12(n+1)^2} + \sum_{i=0}^n (p_{0,i} - p_i)^2, \quad (i = 0 \dots n) \quad (1)$$

де n – кількість членів ряду; $p_{0,i}$ – імовірність, визначена за аналітичною кривою; p_i – імовірність, визначена за емпіричною кривою.

Краща відповідність аналітичних кривих до емпіричних спостерігається при меншому значенні критерія $n\omega^2$.

Іншим важливим критерієм вважається рівень значущості α . Краща відповідність аналітичних кривих до емпіричних спостерігається при більшому значенні критерія α .

Найбільш впливовими критеріями вважаються: середньоквадратичне відхилення імовірностей σp емпіричних випадкових величин від величин визначених за аналітичною кривою (2):

$$\sigma p = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=0}^n (p_{0,i} - p_i)^2}, \quad (i = 0 \dots n), \quad (2)$$

середньоквадратичне відхилення σX випадкової емпіричної величини X від величини за аналітичною кривою X_0 , яке визначається за формулою (3):

$$\sigma X = \sqrt{\frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=0}^n (X_{0,i} - X_i)^2}, \quad (i = 0 \dots n). \quad (3)$$

Результати оцінки точності розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури за порівнянням параметрів $\sigma p, \%$ та $\sigma t, \%$ наведено в табл. 2, а результати оцінки точності розрахунків ймовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур $\sigma p, \%$ та $\sigma \Delta t, \%$ наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Результати оцінки точності розрахунків імовірності щорічної
максимально низької середньомісячної температури

№	Район спостережень	Біекспоненціальний розподіл		Нормальний розподіл	
		$\sigma_p, \%$	$\sigma_t, \%$	$\sigma_p, \%$	$\sigma_t, \%$
1	м. Вишгород	6.2	0.9	3.2	0.5
2	м. Канів	3.4	0.4	4.1	0.5
3	м. Кременчук	3.9	0.6	4.3	0.5
4	м. Кам'янське	2.7	0.4	2.4	0.4
5	м. Запоріжжя	–	–	4.0	0.6
6	м. Нова Каховка	4.5	0.6	1.5	0.3

Таблиця 3

Результати оцінки точності розрахунків імовірності щорічної
максимальної амплітуди середньомісячних температур

№	Район спостережень	Нормальний розподіл		Логарифмічно- нормальний розподіл	
		$\sigma_p, \%$	$\sigma_{\Delta t}, \%$	$\sigma_p, \%$	$\sigma_{\Delta t}, \%$
1	м. Вишгород	2.5	0.4	2.8	0.4
2	м. Канів	3.3	0.8	3.7	0.6
3	м. Кременчук	3.8	0.9	4.2	0.8
4	м. Кам'янське	2.5	0.4	2.8	0.5
5	м. Запоріжжя	6.1	1.1	6.9	0.9
6	м. Нова Каховка	2.6	0.4	2.9	0.5

У третьому розділі на підставі опрацювання статистичних даних щорічних максимальних паводкових витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1787 р. по 1999 р. отримано кореляційні залежності щорічних максимальних паводкових витрат (рис. 3), обчислено функції лінійної регресії для щорічних максимальних витрат, обчислено коефіцієнти кореляції двох вибірок для пар гідровузлів, коваріацію двох вибірок, оцінено стандартну похибку. Отримані дані свідчать про тісну, практично функціональну залежність між максимальними витратами р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

На підставі опрацювання статистичних даних щорічної максимальної товщини льоду р. Дніпро у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1956 р. по 1966 р. отримано кореляційні залежності щорічної максимальної товщини льоду, обчислено функції лінійної регресії для щорічної максимальної товщини льоду, обчислено коефіцієнти кореляції двох вибірок для пар гідровузлів, коваріацію двох вибірок, оцінено стандартну похибку. Отримані дані свідчать про тісну залежність, а іноді, практично функціональну залежність між максимальною товщиною льоду р. Дніпро у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду.

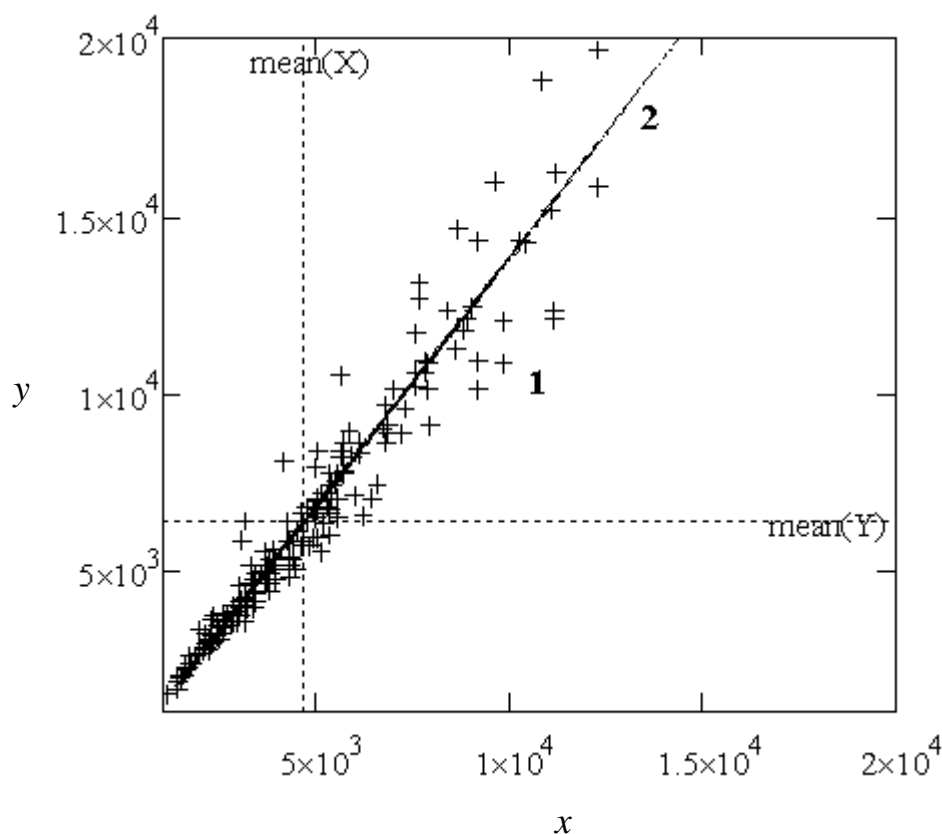


Рис. 3. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат Q , м³/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Вишгород (вісь x), на статистичну вибірку максимальних витрат Q , м³/с, що спостерігались у м. Київ (вісь y) з 1787 по 1999 рр.: 1 – емпіричні дані випадкових величин максимальних витрат р. Дніпро; 2 – функція лінійної регресії.

На підставі опрацювання статистичних даних щорічних максимально низьких середньомісячних температур, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 р. по 2008 р. отримано кореляційні залежності між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами і кореляційні залежності між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур, обчислено функції лінійної регресії для щорічних максимально низьких середньомісячних температур, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур, обчислено коефіцієнти кореляції двох вибірок для пар гідровузлів, коваріацію двох вибірок, оцінено стандартну похибку (табл. 3). Отримані дані свідчать про тісну, а іноді, практично функціональну залежність між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами, а також між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

За результатами кореляційного аналізу статистичних вибірок щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря, t °С у створах гідровузлів отримано рівняння лінійної регресії (4):

$$y(x) = b_0 + b_1 x, \quad (4)$$

де $y(x)$ – регресія статистичної вибірки щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря, t , °C по осі x на статистичну вибірку щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря, t , °C по осі y ; x – статистична вибірка щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря, t , °C по осі x ; b_0 , b_1 – емпіричні коефіцієнти (табл. 4).

Таблиця 4

Результати кореляційного аналізу статистичних вибірок щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря, t , °C у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 р. по 2008 р.

Пункт спостереження (створ гідровузла, водосховище)	Вільний член b_0	Коефіцієнт b_1	Коефіцієнт кореляції двох вибірок	Коваріація двох вибірок	Стандартна похибка
Київське-Канівське	1.791	1.131	0.826	7.3	2.0
Київське-Кременчуцьке	1.873	1.113	0.833	7.1	2.0
Київське-Кам'янське	1.508	1.114	0.804	7.2	2.2
Київське-Дніпровське	1.573	1.029	0.738	6.6	2.5
Київське-Каховське	2.985	0.938	0.791	6.0	1.9

У **четвертому розділі** здійснено детерміністичну оцінку надійності загальних водопідпирних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій на підставі методу граничних станів, а також імовірнісну оцінку надійності в рамках параметричної теорії надійності за критеріями, регламентованими нормами проектування.

Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критеріями стійкості верхового та низового укосів в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову залежності між позначками рівнів верхнього і нижнього б'єфів, значеннями розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхових і низових укосів гребель. Для визначення коефіцієнтів запасу стійкості укосів при різних позначках рівнів води використано чисельний метод скінчених елементів, реалізований у програмному комплексі Midas GTS NX. Даний програмний комплекс для оцінки стійкості укосів використовує метод зниження міцності (або метод редукції сил). Метод зниження міцності є прямим методом, який передбачає поступове зниження значень параметрів зсуву (φ , c) ґрунту укосів до настання руйнування.

Вихідними даними слугують: щільність ґрунту, у тому числі й у взваженому стані, коефіцієнт пористості, коефіцієнт внутрішнього тертя,

питоме зчеплення, модуль деформації, коефіцієнт Пуасона.

У результаті виконання систематичних розрахунків отримано значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхового і низового укосів в залежності від рівнів води у верхньому і нижньому б'єфах, кута внутрішнього тертя ґрунтів тіла гребель і основи, які є суттєво неоднорідними (табл. 5), ізополя пластичних деформацій.

Алгоритм передбачає використання вбудованого в програмний комплекс Mathcad модуля інтерполяції функцій, який дає можливість будувати функціональні залежності при використанні емпіричних даних. Фіксовані значення внутрішніх параметрів системи $K_{i,j}$ ($i = 1...n, j = 1...n$) – значення коефіцієнтів запасу стійкості укосів греблі визначені у вузлових точках із координатами, представленими фіксованими значеннями зовнішніх параметрів X_i, Y_i – позначок рівнів води у верхньому і нижньому б'єфах.

Таблиця 5

Залежності між позначками рівнів верхніх б'єфів, м, кутів внутрішнього тертя ґрунтів тіла греблі Кременчуцького гідровузла, основи і значеннями розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхового і низового укосів

Найменування	Позначка рівня верхнього б'єфа, м	Забезпеченість розрахункового значення кута внутрішнього тертя матеріалу гребель $tg\varphi$	Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості верхового укосу	Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості низового укосу
Гребля Кременчуцького гідровузла	82.4	0.95%	2.48	1.98
		0.5%	3.1	2.48
		0.05%	3.72	2.97
	81.7	0.95%	2.394	1.861
		0.5%	2.99	2.33
		0.05%	3.59	2.79
	81.0	0.95%	2.32	1.77
		0.5%	2.9	2.21
		0.05%	3.48	2.66

Під час інтерполяції будується функціональна залежність, значення якої у вузлових точках співпадатимуть із значеннями фіксованих внутрішніх параметрів системи $K_{i,j}$. Інтерполяція здійснена сплайнами функцій декількох змінних, а саме поліноміальною залежністю. Додатково на інтерполяційну функцію накладається вимога безперервності функції та її похідних у вузлових точках.

Будується залежність між рівнями верхнього Z_{wt} , м і нижнього б'єфів Z_{wb} , м.

Значення кута внутрішнього тертя $tg\varphi$ матеріалу гребель визначається за нормальними розподілами в залежності від випадкової імовірності, рівномірно розподіленої від 0 до 1.

При кожному випробовуванні гребля вважається ненадійною при досягненні хоча б одного граничного стану – втрати стійкості верхового або

низового укосів. Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань N разів. Кількість випробовувань при яких гребля вважається ненадійною, віднесена до загальної кількості випробовувань N , визначає величину ризику настання граничного стану греблі із ґрунтових матеріалів за весь строк експлуатації і здійснюється її перерахунок у щорічну величину ризику.

Результати імовірнісної оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що розрахункові значення щорічних імовірностей настання граничних станів гребель із ґрунтових матеріалів Київського гідровузла дорівнює 1.43×10^{-6} рік⁻¹, Канівського гідровузла 2.76×10^{-5} рік⁻¹, Середньодніпровського гідровузла 1.26×10^{-5} рік⁻¹, які не перевищують допустимого значення імовірності настання граничного стану 5×10^{-4} рік⁻¹ для споруд класу відповідальності СС2-1; Кременчуцького гідровузла 1.88×10^{-6} рік⁻¹, Каховського гідровузла 4.7×10^{-7} рік⁻¹, які не перевищують допустимого значення імовірності настання граничного стану 5×10^{-5} рік⁻¹ для споруд класу відповідальності СС3. Результати імовірнісних розрахунків надійності гребель корелюються із результатами, що отримані за детерміністичною методикою. Обчислено необхідну кількість статистичних випробовувань і межі довірчого інтервалу.

Крім того, в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Кременчуцького, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: переливу води через гребінь греблі; вичерпання фільтраційної міцності тіла греблі; вичерпання фільтраційної міцності основи; руйнування кріплення укусу.

В рамках параметричної теорії надійності виконано імовірнісну оцінку надійності: бетонної водозливної греблі на нескельовій основі (Каховського гідровузла) 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 (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) 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 (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву; гравітаційних стоянів на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) 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.

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

В рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності: будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків гідроелектростанцій на нескельовій основі (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання фільтраційної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти спливання; будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків гідроелектростанцій на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти спливання; камер і голів шлюзів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності, вичерпання механічної міцності основи, втрати стійкості проти зсуву, руйнування нижніх воріт; камер і голів шлюзів на скельовій основі (Кременчуцького, Дніпровського гідровузлів) 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.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву, перекидання, спливання камери шлюзу на скельовій основі, а також механічної міцності основи в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик, визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камери шлюзу, руйнування нижніх воріт, механічної міцності основи. Зазначені критерії настання граничного стану є статистично залежними, тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхньому б'єфі.

Розглядається типова камера шлюзу. Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи камери шлюзу A_n , m^2 , інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання, фактичну площу перерізу робочої арматури A_{sf} у небезпечному перерізі камери шлюзу, $R_{c,m}$ – межу міцності масиву скельного ґрунту на стискання, $R_{cs, m}$ – межу міцності масиву скельного ґрунту на зминання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma b} = 0.02$; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma gr} = 0.06$; міцність бетону на стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації

$C_{Rb} = 0.135$; міцність арматури на розтягання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{Rs} = 0.08$.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pZ_{wt} позначки рівня води Z_{wt} , м перед шлюзом. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлам Дніпровського каскаду. По значенню pZ_{wt} визначається квантиль - позначка рівня води Z_{wt} , м перед шлюзом.

Будується залежність між рівнями верхнього Z_{wt} , м і нижнього б'єфів Z_{wb} , м. За значеннями рівнів верхнього Z_{wt} , м і нижнього б'єфів Z_{wb} , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки W_{pw} , кН.

Випадкова імовірність питомої ваги ґрунту обернених засипок $p\gamma_{gr}$ задається рівномірно розподіленою від 0 до 1, а за нею визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту γ_{gr} .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $p_{tg\phi_g}$, за якою визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя $tg\phi_g$.

За значеннями γ_{gr} і $tg\phi_g$ визначається сила бічного тиск ґрунту обернених засипок E_{tw} на стінки камер шлюзу.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск ґрунту $E_{r,tw}$ оберненої засипки.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважувального протитиску в основі шлюзу pW_f . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f , кН.

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпатських гір, району Вранча, району Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла. Під час виконання одного статистичного випробовування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів pJ_r , розподілені від 0 до 1 у районі Карпатських гір, районі Вранча і Криму. За значенням pJ_r визначаються квантили – бальність землетрусів J_r , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу J_r у криву розподілу максимального сейсмічного впливу J за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях g) від максимальної бальності землетрусів J , бали за призначений строк

служби. Сейсмічний вплив на шлюз задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження визначено лінійно-спектральним методом. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення \ddot{U}_0 .

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження S , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях g) камери шлюзу і визначається горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження S . Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води E_{psw} . Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамічної сили тиску води від розрахункової амплітуди прискорення основи. Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок $E_{s,tw}$.

Визначаються рівнодіючі вертикальних сил V і W , і горизонтальних сил F_c , що діють на камеру шлюзу. При цьому ураховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження.

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд. Коефіцієнт внутрішнього тертя $tg\varphi$ і питоме зчеплення c задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування $m_{tg\varphi}$, m_c , середньоквадратичні відхилення $\sigma_{tg\varphi}$, σ_c , коефіцієнт кореляції $r_{tg\varphi c}$. Визначається кореляційний момент $K_{tg\varphi c}$. Коефіцієнт варіації прийнято $C_v=0.122$. Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя $ptg\varphi$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами $m_{tg\varphi}$, $\sigma_{tg\varphi}$ визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя $tg\varphi$. Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{tg\varphi c}$, $\sigma_{tg\varphi c}$. За відомою імовірністю величини питомого зчеплення pc , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення c , кПа.

У небезпечному перерізі визначається розрахункова площа перерізу робочої арматури A_{sp} .

Обчислюються підсумки сил, які намагаються відірвати камеру шлюзу від основи F_t , та сил, які намагаються утримати камеру шлюзу від відриву F_r .

Визначаються підсумок моментів сил, які намагаються перекинути камеру шлюзу відносно низового ребра M_t , та підсумок моментів сил, які намагаються утримати камеру шлюзу відносно низового ребра M_r .

Максимальне за абсолютним значенням головне стискаюче напруження $|\sigma_3|$ визначається по контактному перерізу камера шлюзу – основа.

Максимальне стискаюче напруження σ_{max} визначається по контактному перерізу камера шлюзу – основа.

Перевіряється виконання умов: вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій камер шлюзу $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$; стійкості проти зсуву камер шлюзу на скельовій основі $((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$; стійкості камер шлюзу проти спливання $F_r / F_t \geq 1$; стійкості камер шлюзу на скельовій основі

проти перекидання $M_r / M_t \geq 1$; міцності скельової основи при стисканні $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$; міцності скельової основи на зминання $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$.

Відмова нижніх воріт шлюзу прийнята як імовірність нерозкритої події $p_{не} = 2,0 \times 10^{-6}$ 1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд, проведених іншими авторами.

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань і визначає щорічну величину ризику втрати міцності, втрати стійкості проти зсуву, втрати стійкості проти спливання камер шлюзу, руйнування нижніх воріт, втрати механічної міцності основи за весь строк експлуатації. Визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану камер шлюзу і виконується порівняння із допустимою величиною. Результати розрахунків наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Результати комплексної оцінки імовірності вичерпання міцності, втрати стійкості, спливання камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік ⁻¹ за таким критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік ⁻¹
механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	руйнування нижніх воріт	
Камера шлюзу Кременчуцького гідровузла (клас споруди СС3)						
5.04×10^{-5}	1.60×10^{-6}	6.74×10^{-8}	1.78×10^{-5}	6.1×10^{-10}	2.0×10^{-6}	5×10^{-5}
Камера трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (клас споруди СС3)						
7.14×10^{-6}	2.11×10^{-5}	6.28×10^{-7}	5.10×10^{-7}	5.1×10^{-10}	2.0×10^{-6}	5×10^{-5}
Камера однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (клас споруди СС3)						
3.39×10^{-6}	1.30×10^{-5}	9.60×10^{-7}	4.42×10^{-6}	2.23×10^{-9}	2.0×10^{-6}	5×10^{-5}

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 урахувувати кореляційні зв'язки між випадковими величинами, що описують різноманітні впливи на гідротехнічні споруди пар гідровузлів каскаду гідроелектростанцій. Розглядаються такі випадкові величини: щорічні максимальні паводкові витрати (рис. 5), щорічна максимальна товщина льоду, щорічні максимальні низькі середньомісячні температури, максимальні амплітуди середньомісячних температур.

Забезпеченість максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду представляє систему випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями. При оцінці надійності гідротехнічних споруд каскаду гідровузлів на підставі імовірнісних методів постає необхідність

застосування системи випадкових величин забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро. Для опису максимальних паводкових витрат застосовано трьохпараметричні гамма-розподіли. Але використання системи випадкових величин потребує представлення рядів статистичних даних законом нормального розподілу. При невиконанні гіпотези про нормальність розподілу вихідного статистичного ряду за допомогою існуючих методів вдається таким чином перетворити вихідні дані, що їх розподіл буде підкорятися нормальному закону. Для перетворення вихідного статистичного ряду застосовують підстановки типу $x_{ум} = \lg x$, $x_{ум} = 1/x$, $x_{ум} = 1/x^{1/2}$ або інші, де x – відповідні члени вихідного статистичного ряду, $x_{ум}$ – відповідні члени перетвореного статистичного ряду. В даній роботі застосовано підстановку (5):

$$Q_{ум,i} = a \times mean(Q) \left(\frac{Q_i}{mean(Q)} \right)^b, \quad i = 1 \dots n, \quad (5)$$

де $mean(Q)$ – середнє значення щорічної максимальної паводкової витрати вихідного статистичного ряду; a , b – емпіричні коефіцієнти.

Для максимальних паводкових витрат р. Дніпро по пунктах спостережень отримано параметри виразу (5), які наведено в табл. 7 і на рис. 4.

Таблиця 7

Параметри перетворення законів розподілу максимальних паводкових витрат р. Дніпро в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$mean(Q)$, $м^3/с$	a	b	$(max(Q_{ум,i}) - min(Q_{ум,i})) / \sigma(Q_{ум,i})$
Створ Київського гідровузла (м. Вишгород)	4.692×10^3	1.0272	0.25	$4.93 < \mathbf{4.94} < 6.18$
Створ Канівського гідровузла (м. Київ)	6.407×10^3	1.0234	0.19	$4.93 < \mathbf{5.10} < 6.18$
Створ Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук)	6.573×10^3	1.0216	0.17	$4.93 < \mathbf{5.06} < 6.18$
Створ Дніпровського гідровузла (п.г.т. Лоцманська Кам'янка)	6.694×10^3	1.0189	0.14	$4.93 < \mathbf{4.95} < 6.18$

Умовний закон розподілу максимальних паводкових витрат відповідає нормальному закону, якщо в межах довірчого інтервалу знаходиться значення виразу (6):

$$\frac{max(Q_{ум,i}) - min(Q_{ум,i})}{\sigma(Q_{ум,i})}, \quad (6)$$

де $max(Q_{ум,i})$ – максимальне значення щорічної паводкової витрати перетвореного нормального розподілу; $min(Q_{ум,i})$ – мінімальне значення щорічної паводкової витрати перетвореного нормального розподілу; $\sigma(Q_{ум,i})$ – середньоквадратичне відхилення щорічної паводкової витрати перетвореного нормального розподілу.

При кількості членів статистичного ряду $n = 213$ і рівні значущості $p = 10\%$ нижня межа інтервалу 4.93, верхня межа інтервалу 6.18. Чисельні значення виразу (6) для створів гідровузлів наведено в табл. 6, які підтверджують гіпотезу про нормальність перетворених розподілів.

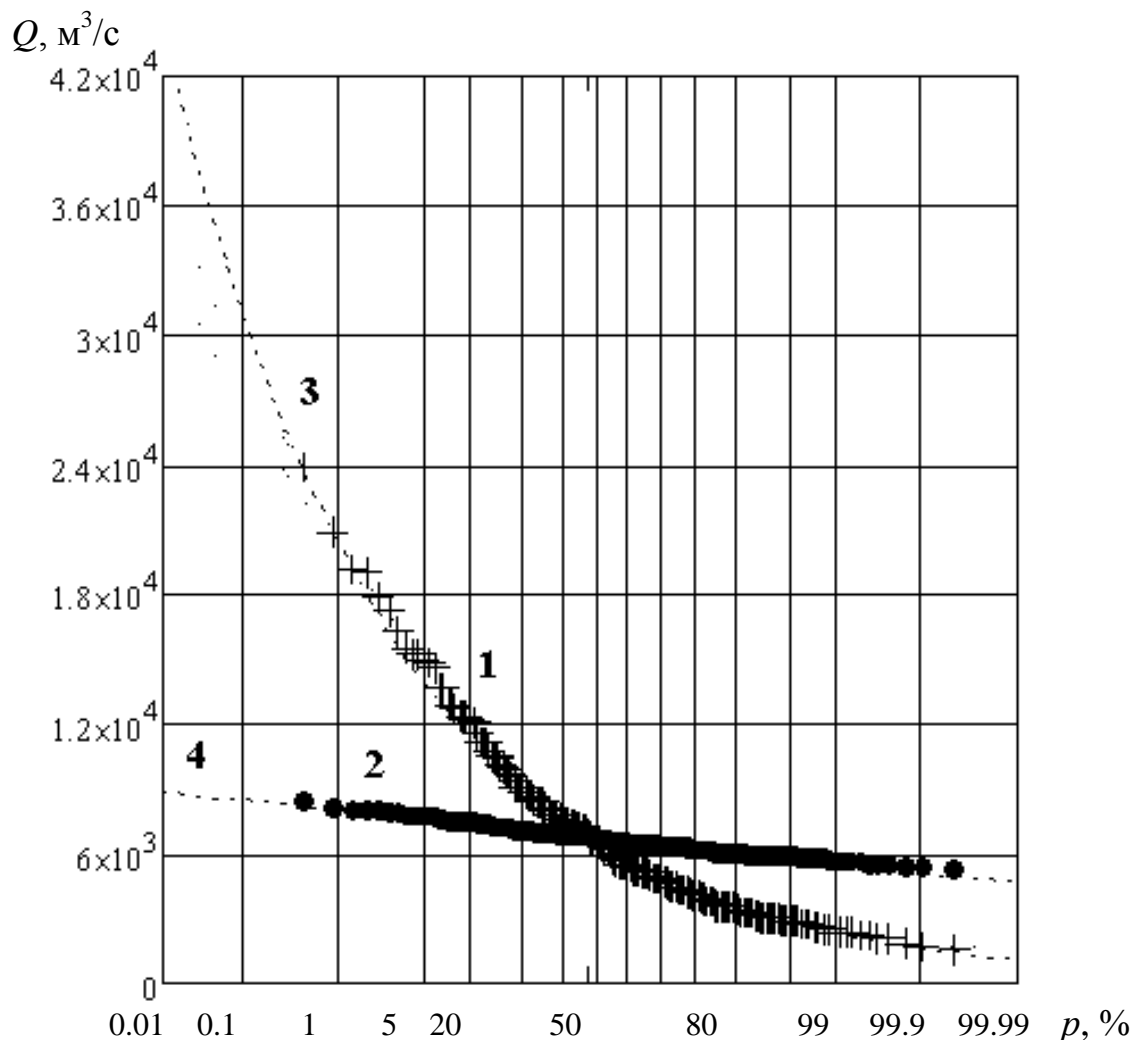


Рис. 4. Криві забезпеченості щорічних максимальних витрат води p . Дніпро у пункті спостереження (м. Кременчук) у координатах Q , m^3/c – витрати, p , % – імовірність: 1 – випадкові величини спостережених витрат Q , m^3/c ; 2 – витрати $Q_{\text{ум}}$, m^3/c , перетворені до умовного нормального закону розподілу; 3 – аналітична функція розподілу спостережених витрат; 4 – аналітична функція розподілу витрат перетворених до умовного нормального закону.

Якщо $Q_{1\text{ум}}$ і $Q_{2\text{ум}}$ – щорічні максимальні паводкові витрати у створах двох гідровузлів, які задані за нормальним законом розподілу як випадкові корельовані величини, то такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування $m_{Q_{1\text{ум}}}$, $m_{Q_{2\text{ум}}}$, середньоквадратичні відхилення $\sigma_{Q_{1\text{ум}}}$, $\sigma_{Q_{2\text{ум}}}$, коефіцієнт кореляції $r_{Q_{1\text{ум}}Q_{2\text{ум}}}$. Крім того визначається кореляційний момент $K_{Q_{1\text{ум}}Q_{2\text{ум}}}$ і коефіцієнт варіації C_v . Задається випадкова імовірність максимальних

паводкових витрат $p(Q_{1ум})$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами $m_{Q_{1ум}}$, $\sigma_{Q_{1ум}}$ визначається квантиль - значення максимальних витрат $Q_{1ум}$ за формулами (7–8):

$$m_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = m_{Q_{2ум}} + r_{Q_{1ум}Q_{2ум}} \cdot \frac{\sigma_{Q_{2ум}}}{\sigma_{Q_{1ум}}} \cdot (Q_{1ум} - m_{Q_{1ум}}), \quad (7)$$

$$\sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = \sigma_{Q_{2ум}} \cdot \sqrt{1 - r_{Q_{1ум}Q_{2ум}}^2}. \quad (8)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$, $\sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$. За відомою імовірністю величини максимальних паводкових витрат $p(Q_{2ум})$, із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль - значення величини максимальних паводкових витрат $Q_{2ум}$. Здійснюється перерахунок величини максимальних паводкових витрат $Q_{1ум}$, $Q_{2ум}$, представлених умовним законом розподілу із підстановкою за формулою (5), у дійсні витрати Q_1 , Q_2 у створах гідровузлів.

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 (рис. 5), а також узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.

Надзвичайна ситуація на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій



Надзвичайна ситуація на Київському гідровузлі:

- стійкість проти зсуву правобережного стояна на нескельовій основі з боку нижнього б'єфа – $p_{розр} = 2.03 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти спливання монтажного майданчика на нескельовій основі – $p_{розр} = 1.14 \times 10^{-8} \text{ рік}^{-1}$.



Надзвичайна ситуація на Канівському гідровузлі:

- стійкість верхового і низового укосів греблі із ґрунтових матеріалів: стійкість верхового укосу – $p_{розр} = 1.217 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$, стійкість низового укосу – $p_{розр} = 1.576 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$.



Надзвичайна ситуація на Кременчуцькому гідровузлі:

- стійкість проти перекидання камери шлюзу на скельовій основі і руйнування нижніх воріт шлюзу: стійкість камери шлюзу – $p_{розр} = 1.78 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$;
- руйнування нижніх воріт шлюзу – $p_{розр} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$.





Надзвичайна ситуація на Середньодніпровському гідровузлі:

- перелив води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів
– $p_{\text{розр}} = 4.46 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$;
- фільтраційна міцність тіла греблі із ґрунтових матеріалів
– $p_{\text{розр}} = 7.63 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- фільтраційна міцність основи греблі із ґрунтових матеріалів
– $p_{\text{розр}} = 5.32 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- втрати стійкості плит кріплення верхового укусу греблі із ґрунтових матеріалів при вириваючій дії примерзлого льоду – $p_{\text{розр}} = 6.13 \times 10^{-18} \text{ рік}^{-1}$;
- механічна міцність камери шлюзу на нескельовій основі і руйнування нижніх воріт шлюзу: стійкість камери шлюзу – $p_{\text{розр}} = 5.327 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$;
- руйнування нижніх воріт шлюзу – $p_{\text{розр}} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$.
- механічна міцність будівлі гідроелектростанції – $p_{\text{розр}} = 5.32 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти зсуву монтажного майданчика будівлі гідроелектростанції – $p_{\text{розр}} = 4.84 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- механічна міцність основи монтажного майданчика будівлі гідроелектростанції – $p_{\text{розр}} = 8.22 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$.



Надзвичайна ситуація на Дніпровському гідровузлі:

- механічна міцність тіла водозливної бетонної греблі на скельовій основі гідроелектростанції I – $p_{\text{розр}} = 1.02 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти зсуву водозливної бетонної греблі на скельовій основі гідроелектростанції I – $p_{\text{розр}} = 1.51 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти перекидання водозливної бетонної греблі на скельовій основі гідроелектростанції I – $p_{\text{розр}} = 2.44 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- механічна міцність скельової основи водозливної бетонної греблі гідроелектростанції I – $p_{\text{розр}} = 5.69 \times 10^{-8} \text{ рік}^{-1}$;
- відмова затворів водозливу водозливної бетонної греблі гідроелектростанції I – $p_{\text{розр}} = 6.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти спливання камери шлюзу на скельовій основі і руйнування нижніх воріт шлюзу: стійкість камери шлюзу – $p_{\text{розр}} = 9.60 \times 10^{-7} \text{ рік}^{-1}$;
- руйнування нижніх воріт шлюзу – $p_{\text{розр}} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$.



Надзвичайна ситуація на Каховському гідровузлі:

- фільтраційна міцність нескельової основи будівлі гідроелектростанції – $p_{\text{розр}} = 7.22 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$.

Рис. 5. Блок-схема підсистем розрахункового дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій

Алгоритм імовірнісної оцінки надійності каскаду гідроелектростанцій

1. Виконується імовірнісна оцінка надійності усіх споруд водопідпірного фронту гідровузлів, які входять до каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності за критеріями ризику виникнення аварії, регламентованими нормами проектування: для гребель із ґрунтових матеріалів прийнято критерії: недопущення переливу води через гребінь, стійкості укосів, фільтраційної міцності тіла греблі і основи; для залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд прийнято критерій міцності; для бетонних і залізобетонних гідротехнічних споруд прийнято критерії: стійкості проти зсуву, перекидання, всплиття, міцності контактного перерізу і основи, фільтраційної міцності основи.

2. За принципом слабкої ланки обираються елементи із кожного типу гідротехнічних споруд з усіх гідровузлів каскаду гідроелектростанцій які мають найбільшу імовірність настання граничного стану за кожним критерієм з урахуванням типу основи. Зазначені гідротехнічні споруди включаються до складу розрахункової системи, яка моделює напірні фронти гідровузлів каскаду гідроелектростанцій.

3. Випадкові природні фактори, які спричиняють навантаження і впливи на гідротехнічні споруди розрахункової системи, задаються з урахуванням кореляційних зв'язків із застосуванням нормального закону розподілу для двох випадкових корельованих величин у створах пар гідровузлів.

4. В рамках системної теорії надійності виконуються розрахунки по оцінці інтегрального ризику виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій. Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань N разів. Каскад гідровузлів вважається ненадійним при досягненні хоча б одного з граничних станів на гідротехнічній споруді. Кількість випробовувань, при яких був досягнутий хоча б один граничний стан, віднесений до загальної кількості випробовувань N визначає величину ризику виникнення аварії за призначений термін експлуатації із подальшим обчисленням щорічної величини ризику виникнення аварії. Для досягнення необхідної точності значення P_{us} проведено 9×10^6 статистичних випробовувань. Отримано розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, яке дорівнює $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$ 1/рік. Обчислено 95% довірчий інтервал $I = (4.58 \times 10^{-4}, 4.82 \times 10^{-4})$ 1/рік для значення імовірності виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій.

Достовірність отриманих результатів підтверджується правдивістю статистичних даних природних факторів, які впливають на надійність і безпеку гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій, отриманих прямими замірами гідрометеорологічними і сейсмологічними станціями; відповідністю даних детерміністичних розрахунків із визначенням коефіцієнтів запасу міцності і стійкості з даними імовірностей аварій на зазначених спорудах;

застосуванням методів механіки суцільного середовища і системної теорії надійності при виконанні розрахунків споруд каскаду гідроелектростанцій.

Очевидно, що імовірність виникнення надзвичайного стану на будь-якому гідровузлі каскаду вище ніж імовірність виникнення надзвичайного стану на будь-якій споруді гідровузла, а імовірність виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій вище ніж імовірність виникнення надзвичайного стану на будь-якому гідровузлі. Отримані результати повинні регламентуватися нормами проектування. У сучасних нормах проектування гідротехнічних споруд відсутні допустимі значення імовірностей виникнення аварій на каскадах гідровузлів. Тому попередньо, із значним запасом, можна прийняти допустиме значення імовірності виникнення аварії на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій за табл. 2.4 із ДБН В.2.4-3:2010. «Гідротехнічні споруди. Основні положення». В подальшому необхідно виконати дослідження, які дозволять обґрунтувати допустиме значення імовірностей виникнення аварій на каскадах гідровузлів, а запропонована методика дозволить забезпечити імовірнісну оцінку надійності і безпеки каскадів гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності. Дані про показники властивостей матеріалів, ґрунтів основи використано за даними проектних і вишукувальних організацій, однак запропонований алгоритм може урахувати дані про властивості матеріалів, ґрунтів з урахуванням їх зміни у часі, а також з урахуванням дефектів і пошкоджень конструкцій гідротехнічних споруд.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі критичного аналізу сучасних літературних джерел щодо існуючих методик оцінки надійності природно-технічних систем запропоновано алгоритм імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням випадкового характеру таких випадкових величин: гідрологічного режиму р. Дніпро, сейсмічних, температурних і вітрових впливів, льодового режиму, властивостей основи гідротехнічних споруд. Ураховано кореляційні зв'язки між випадковими величинами природних факторів впливу.

2. Із використанням методів теорії імовірності і математичної статистики підібрано функції розподілів щорічної максимальної бальності землетрусів, функції розподілів щорічної максимальної низької середньомісячної температури і щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур, функції розподілів щорічних максимальних швидкостей вітру, функції розподілів щорічної максимальної товщини льоду у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій та обчислено їх параметри.

3. Із використанням методів теорії імовірності і математичної статистики досліджено кореляційні зв'язки між щорічними максимальними паводковими витратами, кореляційні зв'язки між щорічною максимальною товщиною льоду, кореляційні зв'язки між щорічними максимальними низькими середньомісячними

температурами і кореляційні зв'язки між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур.

У результаті дослідження кореляційних зв'язків між зазначеними природними факторами довело існування тісної, практично функціональної залежності між статистичними вибірками випадкових величин природних факторів для пар гідровузлів.

Коефіцієнт кореляції вибірок між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у пунктах спостереження м. Вишгород – м. Київ дорівнює 0.9717. Коефіцієнт кореляції вибірок товщини льоду Канівського – Каховського водосховищ дорівнює 0.695. Коефіцієнт кореляції вибірок щорічних максимально низьких середньомісячних температур зовнішнього повітря Київського – Каховського гідровузлів дорівнює 0.791. Наведені дані свідчать про тісну залежність між статистичними вибірками випадкових величин природних факторів для пар гідровузлів. Коефіцієнт кореляції вибірок між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у пунктах спостереження м. Київ – м. Кременчук дорівнює 0.994. Коефіцієнт кореляції вибірок товщини льоду Дніпровського – Каховського водосховищ дорівнює 0.960. Коефіцієнт кореляції вибірок максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря Середньодніпровського – Дніпровського гідровузлів дорівнює 0.964. Представлені дані свідчать про практично функціональну залежність між статистичними вибірками випадкових величин природних факторів для пар гідровузлів.

4. В рамках параметричної теорії надійності отримали подальшого розвитку алгоритми імовірнісної оцінки надійності загальних і спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Згідно із запропонованим алгоритмом в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності гребель із ґрунтових матеріалів, бетонних водозливних гребель, гравітаційних стоянів, будівель гідроелектростанцій, будівель монтажних майданчиків, камер і голів шлюзів за критеріями граничних станів, регламентованими нормами проектування гідротехнічних споруд. При виконанні розрахунків розглянуто скельові та нескельові основи загальних водопідпірних гідротехнічних споруд в місцях розташування гідровузлів. Ураховано випадковий характер гідрологічного режиму р. Дніпро, випадковий характер сейсмічних, температурних і вітрових впливів, випадковий характер льодового режиму, випадковий характер властивостей основи.

5. Розроблено дерева відмов і несправностей гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Запропоновано та реалізовано підходи, які дозволяють урахувати кореляційні зв'язки між випадковими величинами, що описують різноманітні впливи на гідротехнічні споруди пар гідровузлів каскаду гідроелектростанцій. Розглядаються такі випадкові величини: щорічні максимальні паводкові витрати, щорічна максимальна товщина льоду, щорічна максимально низька середньомісячна температура, а також 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 дерева відмов і несправностей, а також узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Обчислено розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, яке дорівнює $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$ 1/рік.

б. У результаті впровадження підходів, регламентованих у даному дослідженні очікується підвищення технічного рівня розрахунку складних природно-технічних систем, зокрема, гідровузлів каскадів гідроелектростанцій, а також підвищення надійності існуючих гідротехнічних споруд гідровузлів каскаду при відповідному рівні їх технічного моніторингу.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Мозговий А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 54. С. 272–277.
2. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2010. Вип. 58. С. 264–270.
3. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 65. С. 364–370.
4. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними. *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2011. Вип. 127. С. 171–175.
5. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і вибір параметрів функції розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 2011. Вип. 101. С. 123–127.
6. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2011. Вип. 1 (53). С. 119–126.
7. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних аварій гідротехнічних споруд. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 66. С. 192–196.

8. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву бетонних гребель гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 154–165.
9. Мозговий А. О. Оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм переливу води через гребінь греблі. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: до 100-річчя від дня народження Заслуженого діяча науки України, докт. техн. наук, проф. Прокоповича І. Є.* Одеса, 2013. Вип. 49, ч. 2. С. 178–184.
10. Мозговий А. О. Загальні підходи щодо керування ризиком втрати надійності каскаду гідровузлів під час проходження катастрофічного паводку. *Науковий вісник будівництва: матеріали VI Міжнародної наукової конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд"*. Харків, 2013. Вип. 73. С. 531–536.
11. Мозговий А. О. Метод розв'язку задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2017. Вип. 66. С. 162–168.
12. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальної товщини льоду за статистичними даними спостережень у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2018. Т. 93, №3. С. 149–155.
13. Моделирование температурного режима бетонной плотины на р. Бо во Вьетнаме / Ю. И. Чайка и др. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 63. С. 516–521.
Особистий внесок: розробка розрахункової схеми, аналіз результатів.
14. Термічний режим і напружено-деформований стан гравітаційної бетонної греблі Huong Dien на річці Бо у В'єтнамі / А. О. Мозговий та ін. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 64. С. 54–58.
Особистий внесок: розробка розрахункової схеми, чисельне моделювання, аналіз результатів.
15. Кисляк О. О., Мозговий А. О. Побудова функції розподілу фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 291–301.
Особистий внесок: чисельне моделювання, аналіз результатів.
16. Оценка напряженно-деформированного состояния агрегатной шахты первой очереди Днестровской гидроаккумулирующей электростанции / А. А. Мозговой и др. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2008. Вип. 48. С. 106–112.
Особистий внесок: розробка розрахункової схеми, чисельне моделювання, аналіз результатів.

17. Оцінка напружено-деформованого стану бетонних труб іригаційних водоводів / А. О. Мозговий та ін. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 52. С. 260–263.

Особистий внесок: розробка розрахункової схеми, чисельне моделювання, аналіз результатів.

Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

18. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 161. С. 90–101. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
19. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 165. С. 99–109. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
20. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 168. С. 62–70. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
21. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 174. С. 70–80. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
22. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності температурних впливів за статистичними даними по гідровузлах Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. *Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 72. С. 135–145. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
23. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 181. С. 81–91. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
24. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм стійкості укосів на прикладі гідровузлів

Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 113–126. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*)

25. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 182. С. 6–17. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
26. Мозговий А. О. Узагальнена оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на гідротехнічних спорудах каскаду гідроелектростанцій. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Польща, 2019. Т. 2 (42), ч. 1. С. 31–40. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
27. Мозговий А. О., Балабай О. О. Комплексна ймовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на прикладі бетонної греблі Дніпровської ГЕС. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Польща, 2017. Т. 1 (17), ч. 1. С. 117–126. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
Особистий внесок: чисельне моделювання, аналіз результатів.

Додаткова публікація:

28. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності греблі із ґрунтових матеріалів гідровузла ГЕС Тхакмо у В'єтнамі за критерієм переливу води через гребінь греблі. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2016. Т. 86, № 4. С. 122–127.

Публікації апробаційного характеру:

29. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Імовірнісний спосіб комплексної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельовій основі за нормативною методикою. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур, присвячено 100-річчю створення Харківської каналізації* : тези за матеріалами VI Всеукраїнського наукового семінару, 15–16 жовтня 2014 р. Харків : ХНУБА, 2014. С. 139–141.
Особистий внесок: чисельне моделювання, аналіз результатів.
30. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Умови формування замулювання водосховищ річкових гідровузлів. *Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства* : матеріали IV міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 25 листопада–25 грудня 2014 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. С. 117–120.
Особистий внесок: постановка проблеми, аналіз результатів.
31. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер і голів шлюзів. *70-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 17–19 березня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 12.
32. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву монтажних майданчиків будівель ГЕС гідровузлів Дніпровського каскаду.

Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд : тези за матеріалами VII Міжнародної наукової конференції, 20–21 жовтня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 78–80.

33. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур* : тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару, 11–12 жовтня 2016 р. Харків : ХНУБА, 2016. С.56–58.
34. Мозговий А. О. Метод розв'язання задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи. *72-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 14–17 березня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 38–39.
35. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VI Міжнародної науково-технічної конференції, 19–21 квітня 2017 р. Харків : УкрДУЗТ, 2017. С. 140–141.
36. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VIII Міжнародної наукової конференції, 18–19 жовтня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 119–122.
37. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VII-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018.– С. 164–165.
38. Mozgovyy A. O., Butnik S. V. Probable reliability prediction of the dam constructed by ground materials of the hydraulic power system Nam Chien in Vietnam using Monte–Carlo method. *Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings* : 7th International Scientific Conference. Transbud-2018. MATEC Web of Conferences, November 14-16, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. Volume 230, 02019 (2018). P. 1–7. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).
Особистий внесок: постановка проблеми, чисельне моделювання, аналіз результатів.
39. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності каскадів гідроелектростанцій. *74-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 5–6 березня 2019 р. Харків : ХНУБА, 2019. С. 73–74.

АНОТАЦІЯ

Мозговий А.О. Імовірнісна оцінка надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківський національний університет будівництва та архітектури МОН України, Харків, 2019.

Дисертація присвячена математичному моделюванню міцності і стійкості гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій та їх основ імовірнісними методами в рамках системної теорії надійності.

Метод граничних станів, незважаючи на цілий ряд переваг, в деяких випадках не дає змоги об'єктивно оцінити ресурс узагальненої несучої здатності об'єкта за рахунок того, що значення нормативних коефіцієнтів не завжди є об'єктивними і носять умовний характер. Імовірнісні методи дають більш об'єктивну оцінку надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій і здатні урахувувати навантаження і впливи в усьому діапазоні їх дії, у тому числі – видатні значення малої повторюваності.

Поряд з широким запровадженням імовірнісних методів оцінки надійності об'єктів гідротехнічного будівництва не сформульовані керівні принципи щодо оцінки надійності складних технічних систем з урахуванням багатofакторних впливів. В існуючих нормах відсутні імовірнісні методики моделювання поведінки гідросистем, оцінки надійності і безпеки каскадів гідроелектростанцій, підходи щодо урахування кореляційних зв'язків між природними факторами впливу.

На підставі аналізу статистичних даних підібрано функції розподілів випадкових величин природних факторів впливу на гідротехнічні споруди: сейсмічних, температурних, вітрових впливів, льодового режиму по гідровузлах Дніпровського каскаду, а також досліджено кореляційні зв'язки між ними. Отримані дані свідчать про тісну, а іноді, практично функціональну залежність між випадковими величинами природних факторів.

За результатами імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності із застосуванням принципу слабкої ланки розроблено узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Із застосуванням алгоритму імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності отримано розрахункове значення ризику виникнення аварії на Дніпровському каскаді, яке дорівнює $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$ 1/рік.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в практику проектування об'єктів гідротехнічного будівництва, а також у навчальному процесі.

Ключові слова: каскад гідроелектростанцій, імовірнісна оцінка, надійність, безпека, метод статистичних випробовувань, природні фактори.

АННОТАЦИЯ

Мозговой А.А. Вероятностная оценка надежности и безопасности гидротехнических сооружений каскадов гидроэлектростанций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Харьковский национальный университет строительства и архитектуры МОН Украины, Харьков, 2019.

В представленной работе выполнено математическое моделирование прочности и устойчивости гидротехнических сооружений каскада гидроэлектростанций и их оснований вероятностными методами в рамках системной теории надежности. Актуальность работы обусловлена тем, что вероятностные методы, в отличие от детерминистических, дают более объективную оценку ресурса обобщенной несущей способности, а соответственно, надежности и безопасности гидротехнических сооружений каскадов гидроэлектростанций.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, приведены актуальность, связь с научными темами, сформулированы цель и задачи исследований, описаны практическая значимость и научная новизна.

В **первом разделе** рассмотрены основные аспекты параметрической и системной теории надежности, которые используются для оценки надежности и безопасности гидротехнических объектов. Несмотря на широкое использование вероятностных методов оценки надежности объектов гидротехнического строительства не сформулированы основные принципы оценки надежности сложных технических систем с учетом многофакторных воздействий. В современных нормах отсутствуют вероятностные методики моделирования поведения гидросистем, оценки надежности и безопасности каскадов гидроэлектростанций. Показано, что без внимания остались вопросы, присущие именно каскадам гидроэлектростанций, связанные с учетом корреляционных связей между природными факторами.

Во **втором разделе** подобраны функции распределения случайных величин природных факторов: ежегодной максимальной бальности землетрясений, ежегодной максимально низкой среднемесячной температуры, ежегодной максимальной амплитуды среднемесячных температур, ежегодных максимальных скоростей ветра, ежегодной максимальной толщины льда в створах гидроузлов Днепровского каскада гидроэлектростанций.

В **третьем разделе** исследованы корреляционные связи между следующими случайными величинами: ежегодными максимальными расходами р. Днепр, ежегодными максимально низкими среднемесячными температурами, ежегодными максимальными амплитудами среднемесячных температур, ежегодной максимальной толщиной льда в створах гидроузлов Днепровского

каскада. В результате расчетов определены параметры функций линейной регрессии, коэффициенты корреляции указанных случайных величин для пар гидроузлов Днепровского каскада гидроэлектростанций. Полученные данные свидетельствуют о тесной, а иногда, практически функциональной зависимости между случайными величинами природных факторов.

В **четвертом разделе** в рамках параметрической теории надежности выполнена вероятностная оценка надежности общих гидротехнических сооружений гидроузлов Днепровского каскада: плотин из грунтовых материалов, бетонных водосливных плотин, гравитационных устоев по критериям граничных состояний, регламентированных нормами проектирования. При выполнении расчетов рассмотрены скальные и нескальные основания гидротехнических сооружений в местах расположения гидроузлов. Учтен случайный характер гидрологического режима реки Днепр, случайный характер сейсмических, температурных и ветровых воздействий, случайный характер ледового режима, случайный характер свойств основания.

В **пятом разделе** в рамках параметрической теории надежности выполнена вероятностная оценка надежности специальных гидротехнических сооружений гидроузлов Днепровского каскада: зданий гидроэлектростанций, зданий монтажных площадок, камер и голов шлюзов по критериям граничных состояний, регламентированных нормами проектирования. При выполнении расчетов рассмотрены скальные и нескальные основания гидротехнических сооружений в местах расположения гидроузлов. Учтен случайный характер гидрологического режима реки Днепр, случайный характер сейсмических, температурных и ветровых воздействий, случайный характер ледового режима, случайный характер свойств основания.

В **шестом разделе** предлагаются подходы, позволяющие учесть корреляционные связи между случайными величинами, описывающими разнообразные воздействия на гидротехнические сооружения пар гидроузлов каскада гидроэлектростанций. В результате вероятностной оценки надежности гидротехнических сооружений гидроузлов Днепровского каскада гидроэлектростанций в рамках параметрической теории надежности в соответствии с принципом слабого звена разработано расчетное обобщенное дерево отказов и неисправностей Днепровского каскада гидроэлектростанций. По предложенному алгоритму вероятностной оценки надежности и безопасности гидротехнических сооружений гидроузлов Днепровского каскада гидроэлектростанций в рамках системной теории надежности получено расчетное значение риска возникновения аварии на Днепровском каскаде гидроэлектростанций, которое составило $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$ 1/год.

Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования объектов гидротехнического строительства, а также в учебный процесс.

Ключевые слова: каскад гидроэлектростанций, вероятностная оценка, надежность, безопасность, метод статистических испытаний, природные факторы.

ABSTRACT

Mozgovuy A.O. Probabilistic assessment of reliability and safety of hydraulic structures of cascades of hydropower plants. – On the rights of the manuscripts.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences in the specialty 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, 2019.

In the presented work, a mathematical modeling of the strength and stability of hydraulic structures of the cascade of hydropower plants and their bases by probabilistic methods in the framework of the system reliability theory was performed.

Despite the wide application of probabilistic methods for assessing the reliability of hydraulic structures, guidelines for assessing the reliability of complex technical systems, taking into account multifactorial influences, are not formulated. It is shown that modern literary sources overlook correlations between natural factors of influence, obviously inherent to hydropower plants, in particular. Based on the above, main objectives of the study were formulated.

Distribution functions for the annual maximum earthquake magnitudes are selected. On the basis of the analysis of statistical data of temperature influences in hydropower schemes of the Dnipro Cascade, distribution functions for the annual lowest average monthly temperature and the annual maximum amplitude of the average monthly temperatures are selected. On the basis of the analysis of statistical data of annual maximum wind speeds in the geographical locations of hydropower plants of the Dnipro Cascade, distribution functions for the annual maximum wind speeds are selected. On the basis of analysis of statistical data, distribution functions for the annual maximum ice thickness in reservoirs of the Dnipro Cascade are selected.

On the basis of processing statistical data of natural factors, correlations between the following random variables are investigated: between annual maximum flood flows, between annual maximum ice thickness, between annual maximum maximum average monthly temperatures, between annual maximum amplitudes of average monthly temperatures on the sites of hydropower schemes of the Dnipro Cascade. The obtained data testify to the close, and sometimes, practically functional dependence between random variables of natural factors.

According to the probabilistic assessment of the reliability of hydraulic structures in hydropower schemes of the Dnipro Cascade of hydropower plants, in the framework of the parametric theory of reliability using a weak link principle, a block diagram of subsystems of the analytical generalized tree of failures and malfunctions, as well as a generalized tree of failures and malfunctions of the Dnipro Cascade of hydropower plants, is developed. An algorithm of probabilistic assessment of reliability and safety of hydraulic structures of the Dnipro Cascade of hydropower plants in the framework of the system reliability theory is developed. A design value of the risk of an accident on the Dnipro Cascade is obtained, which is equal to $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$ 1/year.

The results of the dissertation work are introduced into the practice of designing of hydraulic structures, as well as in the educational process.

Key words: cascade of hydropower plants, probabilistic assessment, reliability, safety, statistical testing method, natural factors.

МОЗГОВИЙ АНДРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ
ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД
КАСКАДІВ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 02.09.2019 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,9.
Тираж 150 прим. Зам. №19090301150

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953).
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. 717-03-54

www.modelist.in.ua