

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет будівництва та архітектури

**БАЛАБАЙ Олена Олександрівна**



УДК 627.824.7:624.012.44:519.879

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ НА  
БЕТОННИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ГРЕБЛЯХ**

Спеціальність 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Мозговий Андрій Олексійович,**  
Харківський національний університет  
будівництва та архітектури, доцент  
кафедри гідротехнічного будівництва.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Рогачко Станіслав Іванович,**  
Одеський національний морський  
університет, професор кафедри морських  
та річкових портів, водних шляхів та їх  
технічної експлуатації.

кандидат технічних наук, доцент  
**Кічаєва Оксана Володимирівна,**  
Харківський національний університет  
міського господарства ім. О.М. Бекетова,  
завідувач кафедри механіки ґрунтів,  
фундаментів та інженерної геології.

Захист дисертації відбудеться «09» листопада 2016 р. о 12<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.056.04 Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету будівництва та архітектури за адресою: 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40 та на сайті університету: [www.kstuca.kharkov.ua](http://www.kstuca.kharkov.ua).

Автореферат розіслано «07» жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Т.О. Костюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Гідротехнічні споруди – споруди, що підпадають під вплив водного середовища, призначені для використання та охорони водних ресурсів, а також для захисту від шкідливого впливу вод. Серед споруд гідровузлів енергетичного призначення можна виділити такий клас споруд, як бетонні гравітаційні греблі. Такі греблі отримали широке розповсюдження у всьому світі та, звичайно, й в Україні.

Зараз в Україні діють норми проектування гідротехнічних споруд на основі детерміністичного за формою підходу, заснованого на методі граничних станів. Згідно з методом граничних станів урахування випадкових навантажень і впливів, показників властивостей матеріалів і ґрунтів, розрахункових термінів експлуатації споруд, а також умов їх роботи здійснюється на основі системи нормативних коефіцієнтів. Метод граничних станів не дозволяє отримати об'єктивну оцінку надійності споруд, зокрема і бетонних гравітаційних гребель. Це пов'язано з тим, що значення нормативних коефіцієнтів не завжди є об'єктивними і мають умовний характер. Більш об'єктивна оцінка надійності бетонних гравітаційних гребель може бути отримана ймовірнісними методами сучасної теорії надійності.

Зараз загальносвітового поширення зазнав розвиток ймовірнісних підходів щодо оцінки надійності та безпеки будівельних конструкцій і споруд, які засновані на системній теорії надійності складних технічних систем. Норми проектування України та інших країн рекомендують застосовувати під час розрахунку надійності та безпеки гідротехнічних споруд ці підходи.

В сучасних нормах проектування та в технічній літературі немає апробованих підходів щодо комплексної ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях. Тому розробка методів розрахунку та комплексної ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях є важливим та актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає напряму науково-технічної політики держави в галузі оцінювання технічного стану будівель і споруд згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 409 від 5 травня 1997 р. «Про забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель, споруд та мереж». Дисертаційне дослідження виконано згідно з напрямом науково-дослідної роботи кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури «Удосконалення способів розрахунку конструктивних елементів гідротехнічних споруд» із державним реєстраційним номером 0115U005723 від 08.12.2015р.

**Метою дослідження** є розробка методу ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях.

### **Задачі дослідження:**

– підбір функції розподілу фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі та отримання чисельних значень ймовірнісних параметрів цієї функції;

- розробка ймовірнісного методу та отримання кількісної оцінки міцності тіла бетонної гравітаційної греблі на скельній основі, міцності її контактного перерізу та міцності основи греблі;

- розробка ймовірнісного методу та отримання кількісної оцінки стійкості проти зсуву, стійкості проти перекидання бетонної гравітаційної греблі на скельній основі;

- розробка методу комплексної ймовірнісної оцінки міцності та стійкості бетонної гравітаційної греблі на скельній основі.

*Об'єкт дослідження* – імовірнісний процес формування напружено-деформованого стану бетонних гравітаційних гребель в період їх експлуатації.

*Предмет дослідження* – бетонні гравітаційні греблі та їх основа.

**Методами дослідження** є чисельні методи механіки твердого деформованого тіла для визначення напружено-деформованого стану бетонних гравітаційних гребель, а також чисельні методи розв'язку ймовірнісних задач теорії надійності складних технічних систем для кількісної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель.

**Наукова новизна** отриманих результатів:

- уперше визначено ймовірнісні параметри випадкової функції протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель;

- уперше запропоновано функцію розподілу фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі;

- отримав подальшого розвитку метод ймовірнісної оцінки міцності тіла бетонної гравітаційної греблі на скельній основі, міцності її контактного перерізу та міцності її основи;

- отримав подальшого розвитку метод ймовірнісної оцінки стійкості проти зсуву, стійкості проти перекидання бетонної гравітаційної греблі на скельній основі;

- уперше запропоновано метод комплексної ймовірнісної оцінки міцності та стійкості бетонних гравітаційних гребель на скельній основі;

- отримано кількісну ймовірнісну оцінку ризику виникнення аварії на бетонних гравітаційних греблях гідровузла «Великої енергетичної греблі Ефіопського відродження» та Дніпровської ГЕС в Україні.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у використанні результатів досліджень у проектних організаціях для отримання кількісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях, у науково-дослідних організаціях під час виконання дослідних робіт по науковому обґрунтуванні ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях, що проектуються, будуються чи експлуатуються.

Крім того, результати роботи можливо застосовувати у процесі розробки нових нормативних документів з проектування бетонних гравітаційних гребель під час підготовки студентів-гідротехніків у навчальних закладах.

Результати дисертаційного дослідження були впроваджені при виконанні розрахунків по обґрунтуванню проектної документації «Великої енергетичної греблі Ефіопського відродження», розробленої у ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків, а також під час виконання розрахунків надійності та безпеки гравітаційної греблі

Дніпровської ГЕС у рамках роботи «Відповідність споруд ГЕС ПАТ «Укргідроенерго» вимогам сучасних норм проектування, у тому числі із урахуванням сейсмічних впливів», яка виконувалась у ПАТ «Укргідропроєкт», м. Харків.

**Особистий внесок здобувача** складають: розробка ймовірнісної методики визначення фільтраційного протитиску на підшву бетонної греблі на скельній основі та отримання чисельних значень ймовірнісних параметрів випадкової функції протитиску; виконання ймовірнісної оцінки міцності тіла бетонної гравітаційної греблі на скельній основі, міцності її контактного перерізу та міцності її скельної основи; виконання ймовірнісної оцінки стійкості проти зсуву та стійкості проти перекидання бетонної гравітаційної греблі на скельній основі; розробка методу комплексної ймовірнісної оцінки міцності та стійкості бетонних гравітаційних гребель.

**Апробація отриманих результатів.** Основні результати дисертаційної роботи були викладені та обговорені на VI-му Всеукраїнському науковому семінарі, «Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур» (15–16 жовтня 2014р., м. Харків, Україна); IV-й Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства» у Харківському національному університеті міського господарства ім. О.М. Бекетова (25 листопада – 25 грудня 2014р., м. Харків, Україна); 70-й науково-технічній конференції Харківського національного університету будівництва та архітектури (17–19 березня 2015р., м. Харків, Україна); VII-й Міжнародній науковій конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (20–21 жовтня 2015р., м. Харків, Україна).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційних досліджень викладені в 11 статтях, 8 із яких опубліковані в збірниках і журналах, рекомендованих ДАК України (4 без співавторства), а також 1 стаття у зарубіжному періодичному виданні та 2 статті у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 132 найменувань та 4 додатків. Повний об'єм дисертації складає 170 сторінок, у тому числі загального тексту – 116 сторінок, 32 рисунки, 9 таблиць, 12 сторінок списку використаних джерел інформації.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** сформульовані мета і задачі дослідження, обґрунтовано актуальність теми, практична значущість роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, наведено основні отримані наукові результати, надані відомості про апробацію та публікації результатів дослідження.

У **першому розділі** дисертації виконано аналіз світового досвіду проектування, будівництва та експлуатації бетонних гравітаційних гребель. Також у розділі наведено конструктивні особливості та умови роботи бетонних гравітаційних гребель на скельній основі. У цьому розділі опрацьовано статистичні дані щодо аварій і пошкоджень бетонних гравітаційних гребель.

У першому розділі описано контрольно-вимірювальну апаратуру для спостереження за тілом та основою бетонних гравітаційних гребель на скельній основі. Також розглянуто значну кількість натурних вимірювань щодо визначення властивостей бетону та основи бетонних гравітаційних гребель, що дозволило виявити основні особливості роботи цих споруд.

У розділі наведено властивості бетону, основи та їх вплив на надійність та безпечність бетонних гравітаційних гребель.

Також описані навантаження та впливи на бетонні гравітаційні греблі та їх мінливість.

Розглянуто та проаналізовано нормативні методи оцінки надійності та безпеки бетонних гравітаційних гребель. Ці методи засновано на методі граничних станів. Крім того, діючими в Україні нормами проектування ДБН В.2.4-3:2010. «Гідротехнічні споруди. Основні положення» рекомендовано для оцінки надійності та безпеки гідротехнічних споруд, зокрема бетонних гравітаційних гребель на скельній основі, виконувати ймовірнісну оцінку ризику виникнення аварій в рамках системної теорії надійності складних технічних систем. Однак до теперішнього часу відсутні апробовані методи ймовірнісної оцінки надійності та безпеки бетонних гравітаційних гребель.

Питанням надійності та безпеки гідротехнічних споруд присвячені роботи Є.А. Беллендіра, А.Л. Бобровського, В.В. Болотіна, Т.А. Бохуа, О.І. Вайнберга, А.Б. Векслера, Е.Г. Газієва, С.П. Гордєєвої, Н.Н. Єрмолаєва, Л.А. Золотова, Д.А. Івашинцова, І.Н. Іващенко, А.П. Кірілова, Ю.Б. Мгалобелова, Є.Ц. Мірцхулави, О.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, А.Р. Ржаніцина, Н.С. Розанова, І.Б. Соколова, З.І. Соловійової, С.В. Сольського, Д.В. Стефанішина, І.А. Ушакова, М.П. Федорова, О.М. Фінагенова, С.Г. Шульмана, L. Verga, H. Blind, D.N. Hartford, H. A. Kreuzer, R.Q. Wen.

Однією з основних проблем, що виникають під час ймовірнісної оцінки надійності та безпеки бетонних гравітаційних гребель на скельній основі, є отримання достовірної інформації про випадковий характер навантажень та впливів, властивостей бетону тіла греблі, а також властивостей основи.

Ймовірнісними методами розрахунку займалися такі автори, як Г. Аугусті, Е.А. Беллендір, В.В. Болотін, О.І. Вайнберг, Е.С. Вентцель, Д.А. Івашинцов, М.В. Караковський, О.В. Кічаєва, А.О. Мозговий, Г. Райфа, А.П. Сініцин, С.В. Смолич, І.М. Соболев, Д.В. Стефанішин, М.С. Сявавко, G.B. Baecher, A.J. Brown, K.V. Bury, J.T. Christian, R.M. Cook, J.D. Gosden, D.N. Hartford, R.E. Melchers, M. Modarres, M.G. Stewart, S.G. Vick.

На даний час у нормах проектування та технічній літературі відсутні апробовані методи ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях на скельній основі.

Як наслідок, наведені обставини в сукупності з проведеним аналізом, дали можливість сформулювати завдання цієї дисертаційної роботи.

У **другому розділі** наведені умови формування фільтраційного протитиску у скельній основі греблі. Питаннями визначення фільтраційного протитиску у скельній основі займалися такі науковці як, В.М. Ліпкінд, В. Вітке, І.В. Володько,

Г.М. Ломізе, К. Луї, В.М. Насберг, М.М. Павловський. Під час визначення фільтраційного навантаження на бетонну гравітаційну греблю та її основу необхідно враховувати вплив наступних конструктивних особливостей та умов роботи споруди: дренажних та протифільтраційних пристроїв, порожнин та розширених швів у основі, галерей у тілі греблі, водопроникності бетону, напружено-деформованого стану греблі й основи, температури підземних вод та їх мінералізації. Згідно зі статистичними даними значна кількість аварій гідротехнічних споруд відбувається внаслідок неврахованих під час проектування руйнівних явищ, зумовлених фільтрацією води в самій споруді та її основі.

Автором зібрано та опрацьовано статистичні дані натурних вимірювань фільтраційних протитисків в основах бетонних гравітаційних гребель та експериментально отриманих значень фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі, що дає уявлення щодо впливу фільтраційного протитиску на надійність та безпеку бетонних гравітаційних гребель на скельній основі.

Дані натурних вимірювань фільтраційного протитиску на бетонну гравітаційну греблю на скельній основі наведені на рис. 1. Ці дані дозволяють розробити ймовірнісну модель фільтраційного протитиску.

Ймовірнісна модель фільтраційного протитиску представляє собою функцію випадкових величин, яка характеризується функцією математичного очікування та функцією середньоквадратичних відхилень по довжині основи греблі.

Методом найменших квадратів було отримано функцію математичного очікування фільтраційного протитиску уздовж підшви бетонної гравітаційної греблі на скельній основі у вигляді рівняння (1). Встановлено, що це рівняння найкраще описує характер розподілу фільтраційного протитиску по довжині підшви греблі:

$$y = (1 - x^a)^b, \quad (1)$$

де  $y$  – значення відносного напору, що відповідає фільтраційному протитиску;  $x$  – відносна відстань від напірної грані;  $a$ ,  $b$  – константи, значення яких складають:  $a = 0,425$ ;  $b = 2,041$ .

Вигляд функції у відповідності до рівняння (1) наведено на рис. 1.

У кожному вертикальному перерізі підшви бетонної гравітаційної греблі отримано значення середньоквадратичного відхилення експериментальних значень фільтраційного протитиску від функції математичного очікування (1).

Значення середньоквадратичних відхилень наведені на рис. 1; 2. За цими даними було отримано наступну функцію розподілу середньоквадратичних відхилень фільтраційного протитиску  $y_1 = y_1(x)$ . Ця функція має вигляд:

$$y_1 = \frac{x}{c^2} \cdot e^{\frac{-x^2}{2d^2}}, \quad (2)$$

де  $c$ ,  $d$  – константи, значення яких складають:  $c = 2,053$ ;  $d = -0,144$ .

Отримана функція розподілу середньоквадратичних відхилень фільтраційного протитиску представлена на рис. 2.

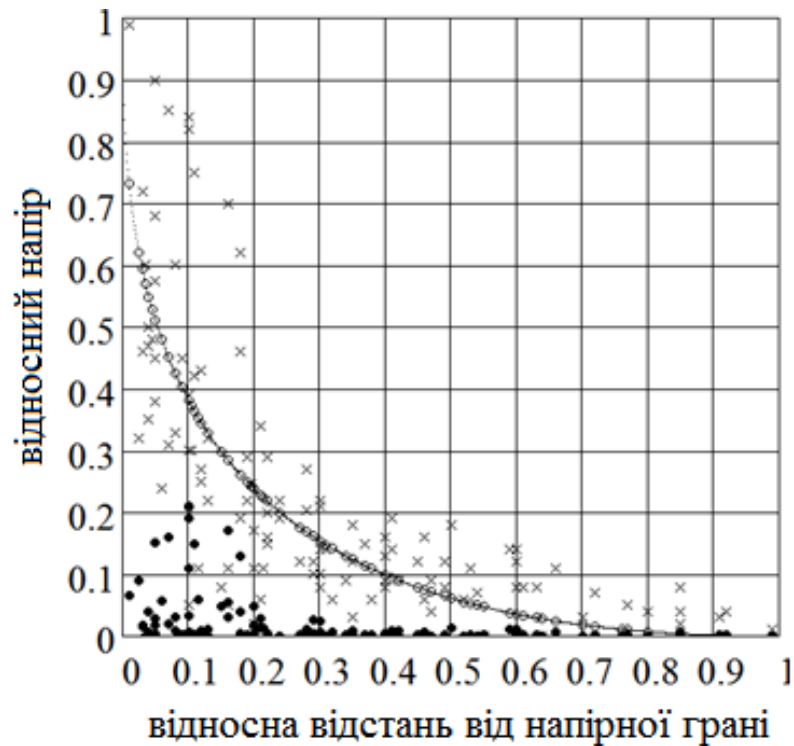


Рис. 1. Дані спостережень фільтраційного протитиску і функція математичного очікування фільтраційного протитиску та значення середньоквадратичного відхилення фільтраційного протитиску:  
 xxx — значення фільтраційного протитиску; - - — математичне очікування;  
 ooo — функція математичного очікування;  
 ●●● — значення середньоквадратичного відхилення

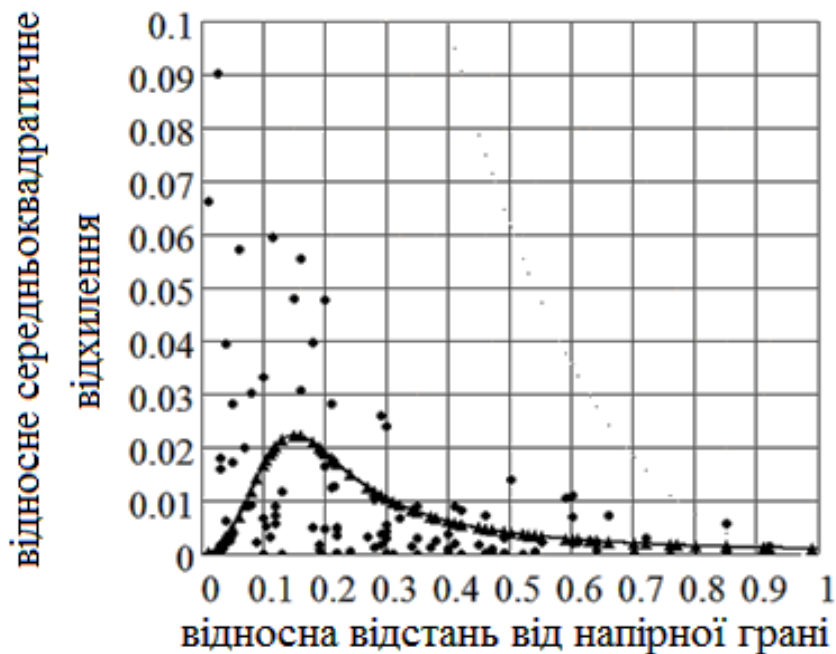


Рис. 2. Функція розподілу середньоквадратичного відхилення фільтраційного протитиску: ●●● — значення середньоквадратичного відхилення;  
 ▲ — функція розподілу середньоквадратичного відхилення



**Третій розділ** присвячений розробці методів розрахунку ймовірності досягнення граничних станів, які пов'язані з вичерпанням міцності тіла та контактного перерізу бетонної гравітаційної греблі на скельній основі, а також її основи.

Згідно з нормами проектування ймовірнісні розрахунки виконувались для нормативного призначеного строку служби споруди  $T = 100$  років, як для споруди класу ССЗ.

У процесі вирішення поставлених ймовірнісних завдань використовувався метод статистичних випробувань (Монте-Карло).

Запропоновано наступний підхід для вирішення завдань з визначення ймовірності настання граничного стану за умови вичерпання міцності бетону у горизонтальних перерізах тіла греблі. При цьому необхідно визначити максимальні напруження у горизонтальних перерізах греблі. Ці напруження зумовлюються діючими на греблю навантаженнями, які можуть бути розділені на дві групи: ймовірнісні та детерміновані величини.

Ймовірнісними величинами прийнято вважати: навантаження від горизонтального гідростатичного тиску з боку верхнього б'єфа  $W_w$ , тиску наносів  $P_{ng}$ , хвильового тиску  $P_w$ , фільтраційного протитиску  $W_{fc}$ , сейсмічного впливу  $S$  (інерційного сейсмічного навантаження  $S'$ , сейсмічного гідродинамічного тиску води  $E_{psg}$ , сейсмічного тиску наносів  $E_{psn}$ ).

Детермінованими величинами прийнято вважати: власна вага греблі та геометричні розміри греблі.

Вважаються відомими закони розподілу випадкових навантажень.

Випадкові значення максимальних розрахункових напружень в горизонтальних перерізах тіла греблі визначаємо у залежності від випадкових значень зусиль: поздовжньої сили  $N$ , кН, та згинального моменту  $M$ , кН·м. Ці зусилля залежать від наведених вище випадкових навантажень.

Під час визначення максимальних нормальних напружень треба враховувати значення ексцентриситету:

$$e_0 = \frac{M}{N}. \quad (3)$$

Ймовірнісне значення максимальних нормальних напружень для кожного розрахункового перерізу визначаються методом опору матеріалів за формулою позацентрового стискання.

$$\text{Якщо } e_0 \leq \frac{1}{6} \cdot b_d, \text{ тоді} \quad \sigma = \frac{N}{b_d} + \frac{6 \cdot M}{b_d^2}, \quad (4)$$

де  $b_d$  – ширина розрахункового горизонтального перерізу, м.

$$\text{Якщо } \frac{1}{6} \cdot b_d \leq e_0 \leq \frac{1}{2} \cdot b_d, \text{ тоді} \quad \sigma = \frac{4}{3} \cdot \frac{N}{b_d - 2 \cdot e_0}. \quad (5)$$

$$\text{Якщо } e_0 \geq \frac{b_d}{2}, \text{ тоді} \quad \sigma = \infty. \quad (6)$$

За знайденим значенням напруження  $\sigma$  визначається ймовірнісне головне стискаюче напруження  $\sigma_3$  на низовій грані греблі за наступною формулою:

$$\sigma_3 = (1 + m_u^2) \cdot \sigma, \quad (7)$$

де  $m_u$  – закладання грані з боку верхнього б'єфа.

Умова забезпечення міцності бетону на стискання, визначається за нерівністю

$$\frac{|\sigma_3|}{R_b} \leq 1, \quad (8)$$

де  $R_b$  – розрахунковий опір бетону на стискання.

Для визначення ймовірності досягнення граничного стану за умови вичерпання міцності бетону на стискання, як вказувалося вище, доцільно використовувати метод статистичних випробувань (Монте-Карло).

Згідно з цим методом виконується  $N_c$  статистичних випробувань. Для кожного випробування виконуються розрахунки згідно з наступним алгоритмом:

1. Задаємося випадковими ймовірностями розрахункових навантажень: горизонтальний гідростатичний тиск з боку верхнього б'єфа  $P_{Ww}$ , тиск наносів  $P_{Png}$ , хвильовий тиск  $P_{Pw}$ , сейсмічні впливи  $P_S$ .

2. Задаємося випадковими ймовірностями міцності бетону на стискання  $P_{Rb}$ .

3. За відомими значеннями  $P_{Ww}$ ,  $P_{Png}$ ,  $P_{Pw}$ ,  $P_S$  та їх законів розподілу знаходимо квантілі  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S'$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$  – випадкові значення навантажень, а також випадкові значення зусиль  $N$ ,  $M$  у перерізі та ексцентриситету  $e_0$ .

4. Визначаємо випадкові значення вертикальних напружень  $\sigma$  та головних стискаючих напружень  $\sigma_3$  поблизу низової грані греблі за формулами (4) – (7).

5. За знайденими значеннями випадкової ймовірності  $P_{Rb}$  із використанням закону розподілу міцності бетону знаходимо квантіль – випадкову величину міцності бетону  $R_b$ .

6. Перевіряємо виконання умови міцності бетону на стискання за формулою (8).

Після виконання усіх  $N_c$  статистичних випробувань визначається кількість випробувань  $n$ , при яких не виконується умова міцності бетону на стискання (8).

Ймовірність руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за умовою вичерпання міцності тіла греблі визначається як відношення:

$$P_{er} = \frac{n}{N_c}. \quad (9)$$

Розглянуто визначення ймовірності досягнення граничного стану за умови вичерпання міцності на розтягання контактного перерізу та скельної основи бетонної гравітаційної греблі. Для цього визначаються випадкові навантаження  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S'$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$ , які наведені вище, а також фільтраційний протитиск  $W_{fc}$  у контактному перерізі греблі. Від цих навантажень визначаються значення зусиль  $N$ ,  $M$ , вертикальних максимальних напружень  $\sigma_0$  та головних стискаючих напружень  $\sigma_3$  за наведеною раніше методикою. Міцність на розтягання контактного перерізу визначається аналогічно нерівності (8). Міцність скельної основи визначається згідно з наступною нерівністю:

$$\frac{\sigma_0}{R_m} \leq 1, \quad (10)$$

де  $R_m$  – межа міцності на зминання масиву скельного ґрунту.

Для визначення ймовірності досягнення граничного стану за умови вичерпання міцності на розтягання контактного перерізу та скельної основи, доцільно використовувати метод статистичних випробувань (Монте-Карло).

Згідно з цим методом виконується  $N_c$  статистичних випробувань. Для кожного випробування виконуються розрахунки згідно з наступним алгоритмом:

1. Задаємося випадковими ймовірностями розрахункових навантажень: горизонтальний гідростатичний тиск з боку верхнього б'єфа  $P_{Ww}$ , тиск наносів  $P_{Png}$ , хвильовий тиск  $P_{Pw}$ , фільтраційний протитиск  $P_{Wfc}$ , сейсмічні впливи  $P_S$ .

2. Задаємося випадковими ймовірностями міцності скельної основи  $P_{Rm}$  та випадковими ймовірностями міцності бетону на стискання  $P_{Rb}$ .

3. За відомими значеннями  $P_{Ww}$ ,  $P_{Png}$ ,  $P_{Pw}$ ,  $P_S$ ,  $P_{Wfc}$  та їх законів розподілу знаходимо квантилі  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$ ,  $W_{fc}$  – випадкові значення навантажень, а також значення зусиль  $N$  та  $M$  у перерізі та ексцентриситету  $e_0$ .

4. Визначаємо випадкові значення вертикальних напружень  $\sigma_0$  та головних стискаючих напружень  $\sigma_{03}$  поблизу низової грані греблі за формулами (4) – (7).

5. За знайденими значеннями випадкової імовірності  $P_{Rm}$  із використанням закону розподілу міцності скельної основи знаходимо квантиль – випадкову величину міцності скельної основи  $R_m$ .

6. За знайденими значеннями випадкової імовірності  $P_{Rb}$  із використанням закону розподілу міцності бетону знаходимо квантиль – випадкову величину міцності бетону на стискання  $R_b$ .

7. Перевіряємо виконання умови міцності контактного перерізу за формулою (8).

8. Перевіряємо виконання умови міцності скельної основи за формулою (10).

Після виконання усіх  $N_c$  статистичних випробувань визначається кількість випробувань  $n$ , при яких не виконуються умови міцності (8) та/або (10).

Імовірність руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за вичерпанням міцності контактного перерізу на розтягання та скельної основи визначається як відношення

$$P_{yr} = \frac{n}{N_c}. \quad (11)$$

Запропоновані методи визначення ймовірності руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за умовами втрати міцності тіла греблі, контактного перерізу та скельної основи в подальшому будуть використані під час виконання розрахунків комплексної ймовірнісної оцінки надійності та безпеки бетонних гравітаційних гребель на скельній основі.

**У четвертому розділі** розроблено методи ймовірнісної оцінки стійкості бетонної гравітаційної греблі на скельній основі.

Імовірнісна оцінка стійкості бетонних гравітаційних гребель виконується на основі здійснення розрахунків з визначення ймовірності виникнення аварій на бетонній гравітаційній греблі за умови втрати стійкості греблі проти перекидання, втрати стійкості греблі проти зсуву. При цьому використовуються нормативні методи розрахунку.

Під час виконання розрахунків стійкості бетонної гравітаційної греблі на скельній основі проти перекидання згідно з нормативною методикою визначаються момент сил, що утримують греблю  $M_r$  та момент сил, що перекидають її  $M_l$ . Ці моменти повинні визначатися відносно центра ваги майданчику зминання. Розташування та розміри цього майданчика визначаються залежно від навантажень, що діють на греблю, та від опору скельного ґрунту зминанню. Згідно з нормативною

методикою стійкість бетонної гравітаційної греблі на скельній основі проти перекидання вважається забезпеченою, якщо буде виконуватись нерівність (12):

$$\gamma_{lc} \cdot M_t \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot M_r, \quad (12)$$

де  $\gamma_{lc}$  – коефіцієнт сполучення навантажень;  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи;  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності за класом відповідальності споруд.

Необхідно зазначити, що момент  $M_r$  залежить тільки від власної ваги греблі, а момент  $M_t$  – від випадкових навантажень  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}, W_{fc}$ , які діють на греблю. Таким чином,  $M_t$  є випадковою величиною.

Для визначення імовірності втрати стійкості бетонної гравітаційної греблі на скельній основі проти перекидання, як і до цього, доцільно використовувати метод статистичних випробувань (Монте-Карло) з використанням нормативною методики розрахунку.

Згідно з цим методом виконується  $N_c$  статистичних випробувань. Для кожного випробування виконуються розрахунки згідно з наступним алгоритмом:

1. Задаємося випадковими ймовірностями розрахункових навантажень: горизонтальний гідростатичний тиск з боку верхнього б'єфа  $P_{Ww}$ , тиск наносів  $P_{Png}$ , хвильовий тиск  $P_{Pw}$ , фільтраційний протитиск  $P_{Wfc}$ , сейсмічні впливи  $P_s$ .

2. Задаємося випадковими ймовірностями міцності скельної основи  $P_{Rm}$ .

3. За відомими значеннями  $P_{Ww}, P_{Png}, P_{Pw}, P_s, P_{Wfc}$  та їх законів розподілу знаходяться квантілі – випадкові значення навантажень  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}, W_{fc}$ .

4. За відомим значенням  $P_{Rm}$  та за відомим законом розподілу знаходимо квантілі – випадкове значення міцності скельного ґрунту на змінання  $R_m$ .

5. За відомими значеннями навантажень  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}, W_{fc}$  та  $R_m$  визначаємо положення та розміри майданчика змінання, а також положення її центра ваги.

6. Визначаємо значення моментів що утримують греблю  $M_r$  та моментів що перекидають її  $M_t$  відносно центра ваги майданчика змінання.

7. Перевіряємо виконання умови стійкості греблі проти перекидання за наступною нерівністю:

$$M_t \leq M_r. \quad (13)$$

Після виконання усіх  $N_c$  статистичних випробувань визначається кількість випробувань  $n$ , при яких не виконується умова стійкості (13).

Імовірність руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за умовою втрати стійкості греблі проти перекидання визначається як відношення:

$$P_t = \frac{n}{N_c}. \quad (14)$$

Під час виконання розрахунків стійкості бетонної гравітаційної греблі на скельній основі проти зсуву згідно з нормативною методикою визначаються сили, що утримують греблю  $R$ , та сили зсуву  $F$ . Згідно з нормативною методикою стійкість бетонної гравітаційної греблі на скельній основі проти зсуву вважається забезпеченою, якщо буде виконуватись наступна нерівність:

$$\gamma_{lc} \cdot F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot R. \quad (15)$$

Необхідно зазначити, що утримуюча сила  $R$ , МПа, є підсумком сил тертя  $R_{fr}$  та сил зчеплення по підошві греблі  $R_{ad}$  згідно з наступною формулою:

$$R = R_{fr} + R_{ad} = V \cdot tg\varphi + c \cdot A, \quad (16)$$

де  $V$  – алгебраїчний підсумок проєкцій на нормаль до підошви греблі усіх сил, які діють на споруду: власна вага греблі, вертикальне привантаження водою, зважувальний та фільтраційний протитиски, кН;  $tg\varphi$  – параметр опору зсуву контакту греблі з основою, який відповідає коефіцієнту тертя;  $c$  – питоме зчеплення контакту греблі з основою, кПа;  $A$  – площа підошви греблі, м<sup>2</sup>.

Сила зсуву  $F$  представляє собою алгебраїчний підсумок проєкцій по напрямку зсуву усіх зсувних сил, що діють на споруду,  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}$ .

Так як сили  $R$  та  $F$  залежать від випадкових навантажень та від випадкових параметрів зсуву, тому ці сили представляють собою випадкові величини.

Для визначення ймовірності втрати стійкості бетонної гравітаційної греблі на скельній основі проти зсуву використовуємо метод статистичних випробувань (Монте-Карло) із застосуванням нормативною методики розрахунку.

Згідно з цим методом виконується  $N_c$  статистичних випробувань. Для кожного випробування виконуються розрахунки згідно з наступним алгоритмом:

1. Задаємося випадковими ймовірностями розрахункових навантажень: горизонтальний гідростатичний тиск з боку верхнього б'єфа  $P_{Ww}$ , тиск наносів  $P_{Png}$ , хвильовий тиск  $P_{Pw}$ , фільтраційний протитиск  $P_{Wfc}$ , сейсмічні впливи  $P_s$ .

2. Задаємося випадковими ймовірностями параметра опору зсуву контакту греблі з основою  $P_{tg\varphi}$  та питомим зчепленням контакту греблі з основою  $P_c$ .

3. За відомими значеннями  $P_{Ww}, P_{Png}, P_{Pw}, P_s, P_{Wfc}$  та їх законів розподілу знаходимо квантилі – випадкові значення навантажень  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}, W_{fc}$ .

4. За відомим значенням  $P_{tg\varphi}$  та  $P_c$  а також за відомим законом розподілу системи випадкових корельованих величин знаходимо квантилі – випадкові значення параметрів опору зсуву контакту греблі з основою  $tg\varphi$  та  $c$ .

5. За відомими значеннями навантажень від власної ваги, фільтраційного та зважувального протитисків знаходимо значення сили  $V$ , а також сили  $R$  із урахуванням параметрів  $tg\varphi$  та  $c$ .

6. За відомими значеннями навантажень  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}$  визначаємо значення сили зсуву  $F$ .

7. Перевіряємо виконання умови стійкості греблі проти зсуву за наступною нерівністю:

$$F \leq R. \quad (17)$$

Після виконання усіх  $N_c$  статистичних випробувань визначається кількість випробувань  $n$ , при яких не виконується умова стійкості (17).

Ймовірність руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за умовою втрати стійкості греблі проти зсуву визначається як відношення

$$P_{or} = \frac{n}{N_c}. \quad (18)$$

Запропоновані методи визначення ймовірності руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за умовами втрати стійкості греблі проти перекидання та зсуву в подальшому будуть використані під час виконання розрахунків комплексної ймовірнісної оцінки надійності та безпеки бетонних гравітаційних гребель на скельній основі.

**У п'ятому розділі** представлено метод комплексної ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях.

Вважається, що аварії на бетонних гравітаційних греблях виникають унаслідок досягнення граничних станів, які можуть бути пов'язані із втратою міцності тіла споруди, міцності контактного перерізу, міцності основи, стійкості греблі проти перекидання, стійкості греблі проти зсуву.

Однак метод граничних станів не дозволяє враховувати взаємний вплив можливості виникнення різноманітних граничних станів, у зв'язку з чим не можливо отримати об'єктивну оцінку надійності і безпеки бетонних гравітаційних гребель. Ураховуючи вищезазначене для отримання об'єктивної комплексної оцінки надійності і безпеки таких споруд необхідно застосовувати ймовірнісний метод, заснований на системній теорії надійності складних технічних систем.

У попередніх розділах наведено методи оцінки ймовірності виникнення аварії на бетонній гравітаційній греблі унаслідок досягнення кожного із наступних граничних станів: втрати міцності тіла споруди  $P_b$ , або втрати міцності контактного перерізу  $P_p$ , або втрати міцності основи  $P_o$ , або втрати стійкості греблі проти перекидання  $P_m$ , або втрати стійкості греблі проти зсуву  $P_c$ . Цей розділ присвячено розробці методу комплексної ймовірнісної оцінки надійності і безпеки бетонних гравітаційних гребель на скельній основі. При цьому ризик виникнення аварії на споруді, що розглядається, визначається як ймовірність досягнення хоча б одного з вказаних вище граничних станів.

У процесі оцінки надійності та безпеки бетонних гравітаційних гребель на скельній основі повинні враховуватися навантаження та впливи, які регламентуються діючими нормами проектування, до яких входять: власна вага греблі та геометричні розміри греблі, горизонтальний гідростатичний тиск з боку верхнього б'єфа  $W_w$ , тиск наносів  $P_{ng}$ , хвильовий тиск  $P_w$ , фільтраційний протитиск  $W_{fc}$ , сейсмічні впливи  $S$  (інерційне сейсмічне навантаження  $S'$ , сейсмічний гідродинамічний тиск води  $E_{psg}$ , сейсмічний тиск наносів  $E_{psn}$ ). Вказані навантаження та впливи є випадковими величинами, ймовірнісні характеристики яких наведено у розділі 3.

Виконуючі комплексну ймовірнісну оцінку ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях, доцільно використовувати метод статистичних випробувань (Монте-Карло). У результаті може бути отримано значення ризику (ймовірності) виникнення аварії на цих спорудах. Розрахунки за методом Монте-Карло пропонується виконувати з використанням методик, наведених у розділах 3 та 4.

Згідно з методом Монте-Карло виконується  $N_c$  статистичних випробувань. Для кожного випробування виконуються розрахунки згідно з наступним алгоритмом:

1. Задаємося випадковими ймовірностями розрахункових навантажень: горизонтальний гідростатичний тиск з боку верхнього б'єфа  $P_{Ww}$ , тиск наносів  $P_{Png}$ , хвильовий тиск  $P_{Pw}$ , фільтраційний протитиск  $P_{Wfc}$ , сейсмічні впливи  $P_s$ .

2. Задаємося випадковими ймовірностями міцності бетону на стискання  $P_{Rb}$ , міцності скельної основи  $P_{Rm}$ , параметра опору зсуву контакту греблі з основою  $P_{tgv}$  та питомим зчепленням контакту греблі з основою  $P_c$ .

3. За відомими значеннями  $P_{Ww}$ ,  $P_{Png}$ ,  $P_{Pw}$ ,  $P_S$ ,  $P_{Wfc}$  та за відомими законами розподілу відповідних випадкових величин знаходимо квантилі – випадкові значення навантажень  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S'$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$ ,  $W_{fc}$ .

4. За відомим значенням  $P_{Rm}$ ,  $P_{Rb}$ ,  $P_c$ ,  $P_{tg\varphi}$  та за відомими законами розподілу відповідних випадкових величин знаходимо квантилі – випадкове значення міцності бетону на стискання  $R_b$ , випадкове значення міцності скельного ґрунту на зминання  $R_m$ , випадкове значення параметра опору зсуву контакту греблі з основою  $tg\varphi$ , випадкове значення питомого зчеплення контакту греблі з основою  $c$ .

5. Виконуємо розрахунки стосовно отримання оцінки міцності бетону тіла греблі.

5.1. За відомими значеннями навантажень  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S'$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$  визначаємо випадкові значення зусиль  $N$ ,  $M$  та ексцентриситету  $e_0$  у розрахункових перерізах тіла греблі.

5.2. Визначаємо випадкові значення вертикальних напружень  $\sigma$  та головних стискаючих напружень  $\sigma_3$  поблизу низової грані греблі за формулами (4) – (7).

5.3. За знайденими значеннями випадкової імовірності  $P_{Rb}$  із використанням закону розподілу міцності бетону знаходимо квантиль – випадкову величину міцності бетону  $R_b$ .

5.4. Перевіряється виконання умови міцності бетону на стискання за формулою (8).

6. Виконуються розрахунки стосовно отримання оцінки міцності контактного перерізу та основи.

6.1. За відомими значеннями навантажень  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S'$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$ ,  $W_{fc}$  та  $R_m$  визначаємо положення та розміри майданчика зминання, а також положення його центра ваги.

6.2. За відомими значеннями навантажень  $W_w$ ,  $P_{ng}$ ,  $P_w$ ,  $S'$ ,  $E_{psg}$ ,  $E_{psn}$ ,  $W_{fc}$  визначаємо випадкові значення зусиль  $N$ ,  $M$  та ексцентриситету  $e_0$  у контактному перерізі греблі.

6.3. Визначаємо випадкові значення вертикальних напружень  $\sigma$  та головних стискаючих напружень  $\sigma_3$  у контактному перерізі греблі поблизу низової грані за формулами (4) – (7).

6.4. Перевіряємо виконання умови міцності контактного перерізу за формулою (8).

6.5. Перевіряємо виконання умови міцності скельної основи за формулою (10).

7. Виконуємо розрахунки стосовно отримання оцінки стійкості греблі проти перекидання.

7.1. Визначаємо значення моментів, що утримують греблю  $M_r$ , та моментів, що перекидають її  $M_t$  відносно центра ваги майданчика зминання.

7.2. Перевіряємо виконання умови стійкості греблі проти перекидання за формулою (13).

8. Виконуємо розрахунки стосовно отримання оцінки стійкості греблі проти зсуву.

8.1. За відомими значеннями навантажень від власної ваги, фільтраційного та зважувального протитисків знаходимо значення сили  $V$ , а також сили  $R$  із врахуванням параметрів  $tg\varphi$  та  $c$ .

8.2. За відомими значеннями навантажень  $W_w, P_{ng}, P_w, S', E_{psg}, E_{psn}$  визначаємо значення сили зсуву  $F$ .

8.3. Перевіряємо виконання умови стійкості греблі проти зсуву за формулою (17).

9 Після виконання усіх  $N_c$  статистичних випробувань виконуємо наступні розрахунки:

9.1. Визначаємо кількість випробувань  $n_b$ , при яких не виконується умова (8), і визначається ймовірність втрати міцності бетону тіла греблі як відношення  $P_b = \frac{n_b}{N_c}$ .

9.2. Визначаємо кількість випробувань  $n_p$ , при яких не виконується умова (8), і визначається ймовірність втрати міцності контактного перерізу як відношення  $P_p = \frac{n_p}{N_c}$ .

9.3. Визначаємо кількість випробувань  $n_o$ , при яких не виконується умова (10), і визначається ймовірність втрати міцності основи як відношення  $P_o = \frac{n_o}{N_c}$ .

9.4. Визначаємо кількість випробувань  $n_m$ , при яких не виконується умова (13), і визначається ймовірність втрати стійкості греблі проти перекидання як відношення  $P_M = \frac{n_M}{N_c}$ .

9.5. Визначаємо кількість випробувань  $n_c$ , при яких не виконується умова (17), і визначається ймовірність втрати стійкості греблі проти зсуву як відношення  $P_c = \frac{n_c}{N_c}$ .

9.6. Визначаємо кількість випробувань  $n$ , при яких не виконується хоча б одна із умов та визначається узагальнений ризик (узагальнена ймовірність) виникнення аварії на бетонній гравітаційній греблі, яка пов'язана з настанням хоча б одного з граничних станів:

$$P = \frac{n}{N_c}. \quad (19)$$

Необхідно зазначити, що для отримання достатньо достовірних значень ймовірностей досягнення граничних станів потрібно виконати досить велику кількість статистичних випробувань, яка може складати мільйони та десятки мільйонів випробувань.

Згідно з наведеним алгоритмом розроблено комп'ютерну програму «Визначення ризику (ймовірності) виникнення аварій на високій бетонній гравітаційній греблі на скельній основі». Ця програма розроблена у рамках програмного комплексу MathCad. З її застосуванням було виконано розрахунки стосовно оцінки надійності і безпеки високої бетонної гравітаційної греблі на скельній основі гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження», розріз якої наведено на рис. 3.



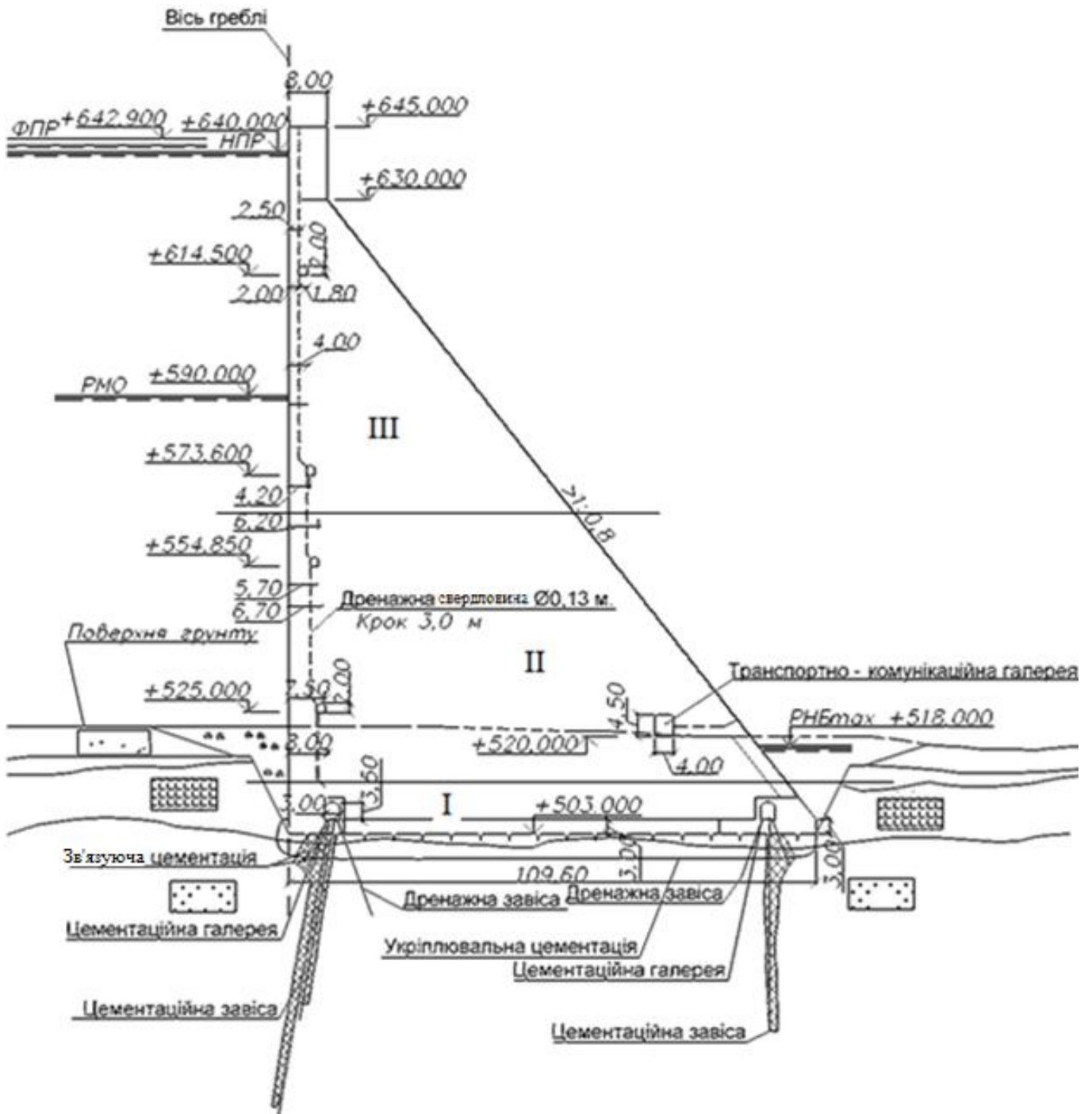


Рис. 3. Переріз глухої бетонної гравітаційної греблі «Великої енергетичної греблі Ефіопського відродження»

Розрахунки були виконані за нормативним детерміністичним методом граничних станів та за допомогою ймовірнісного методу теорії надійності складних технічних систем.

У результаті виконання розрахунків цієї греблі за нормативним детерміністичним методом граничних станів для усіх розрахункових випадків, які було розглянуто, отримано значення коефіцієнтів запасу міцності бетону тіла греблі, міцності контактного перерізу, міцності скельної основи, стійкості греблі проти перекидання та зсуву. Отримані значення коефіцієнтів запасу перевищують необхідні за нормами проектування значення для усіх розрахункових випадків.

З використанням розробленої комп'ютерної програми виконано розрахунок щодо визначення ризику (ймовірності) виникнення аварій на бетонній гравітаційній греблі гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження» класу відповідальності ССЗ. Визначено необхідну кількість статистичних випробовувань, а саме  $1.22 \cdot 10^6$ , за умовою забезпечення достовірних значень розрахункових ймовірностей. Результати розрахунків наведено у табл. 1.

Отримане значення узагальненого щорічного ризику (щорічної ймовірності) виникнення аварії на бетонній гравітаційній греблі гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження» складає  $1.1 \cdot 10^{-5}$  1/рік. Нормативне значення щорічної ймовірності виникнення аварії на гідротехнічних спорудах класу відповідальності ССЗ дорівнює  $5.0 \cdot 10^{-5}$  1/рік. Таким чином, надійність та безпека цієї греблі забезпечена.

Таблиця 1

**Значення ризику виникнення аварій на бетонній гравітаційній греблі класу відповідальності ССЗ, гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження»**

Вид аварії	Розрахункові значення ймовірності виникнення аварії на греблі	
	за весь строк служби	щорічні
Втрата міцності контактного перерізу $P_p$	$5.20 \cdot 10^{-4}$	$5.20 \cdot 10^{-6}$
Втрата стійкості греблі проти зсуву $P_c$	$1.10 \cdot 10^{-3}$	$1.10 \cdot 10^{-5}$
Втрата міцності бетону тіла греблі $P_b$	$2.10 \cdot 10^{-5}$	$2.10 \cdot 10^{-7}$
Втрата міцності основи $P_o$	$1.70 \cdot 10^{-6}$	$1.70 \cdot 10^{-8}$
Втрата стійкості греблі проти перекидання $P_m$	$1.80 \cdot 10^{-6}$	$1.80 \cdot 10^{-8}$
Узагальнена ймовірність виникнення аварії $P$	$1.10 \cdot 10^{-3}$	$1.10 \cdot 10^{-5}$

Аналогічні розрахунки було виконано для бетонної гравітаційної греблі Дніпровської ГЕС класу відповідальності ССЗ.

За нормативним детерміністичним методом граничних станів для усіх розрахункових випадків отримані значення коефіцієнтів запасу міцності бетону тіла греблі, міцності контактного перерізу, міцності скельної основи, стійкості греблі проти перекидання та зсуву. Отримані значення коефіцієнтів запасу перевищують необхідні за нормами проектування значення для усіх розрахункових випадків.

Також було виконано розрахунок визначення ризику (ймовірності) виникнення аварій на бетонній гравітаційній греблі Дніпровської ГЕС. Визначено значення узагальненого щорічного ризику (щорічної ймовірності) виникнення аварії на цій греблі, який складає  $0.9 \cdot 10^{-5}$  1/рік при допустимому нормативному значенні  $5 \cdot 10^{-5}$  1/рік.

## ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу накопичених експериментальних даних уперше було підбрано вигляд випадкової функції фільтраційного протитиску в скельних основах бетонних гравітаційних гребель та визначено параметри випадкової функції на основі статистичної обробки експериментальних даних.

2. Запропоновано та реалізовано метод для визначення ймовірності досягнення кожного граничного стану, який може виникнути на бетонній гравітаційній греблі на скельній основі. Метод використовує спосіб статистичних випробовувань (Монте-Карло) та дозволяє визначати ймовірність втрати міцності тіла греблі  $P_b$ , її контактного перерізу  $P_p$ , та її основи  $P_o$ , втрати стійкості греблі проти перекидання  $P_m$  та зсуву  $P_c$ .

3. Розроблено метод комплексної ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях, який засновано на визначенні ймовірності досягнення хоча б одного з граничних станів, що можуть виникнути на бетонній гравітаційній греблі. Метод використовує спосіб статистичних випробовувань (Монте-Карло) та дозволяє визначати цю ймовірність. Отримано значення загальної щорічної ймовірності виникнення аварії на бетонній гравітаційній греблі гідровузла «Великого енергетичного Ефіопського відродження», яке дорівнює  $1.1 \cdot 10^{-5}$  1/рік, яке менш ніж нормативне значення, яке складає  $5.0 \cdot 10^{-5}$  1/рік. Значення загальної щорічної ймовірності виникнення аварії на бетонній гравітаційній греблі Дніпровського гідровузла склало  $0.9 \cdot 10^{-5}$  1/рік, яке менше ніж нормативне значення і яке складає  $5.0 \cdot 10^{-5}$  1/рік. Таким чином надійність та безпека гребель, яку було розглянуто, є забезпеченими.

4. Складено комп'ютерну програму «Визначення ризику (ймовірності) виникнення аварій на високій бетонній гравітаційній греблі на скельній основі» на основі розробленого методу у рамках програмного комплексу MathCad.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації у фахових виданнях:*

1. Кисляк О.О. Основні передумови оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях: [Текст] / О.О. Кисляк // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків, ХНУБА: ХОТВ АБУ, 2012. – Вип. 67. – С. 128–133.

2. Кисляк О.О. Умови формування фільтраційного протитиску в основах бетонних гравітаційних гребель та фактори, які впливають на нього: [Текст] / О.О. Кисляк // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків, ХНУБА: ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 71. – С. 305–315.

3. Кисляк О.О. Аналіз нормативних підходів до оцінки фізико-механічних властивостей скельних основ бетонних гравітаційних гребель: [Текст] / О.О. Кисляк // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2013. – Вип. 49. – С.120–126.

4. Кисляк О.О. Побудова функції розподілу фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель: [Текст] / О.О. Кисляк, А.О. Мозговий //

Вісник НУВГП. – Рівне, 2013. – Вип. 2(62). – С. 291–301. *Особистий внесок*: постановка проблеми, експериментальні та теоретичні дані, аналіз результатів.

5. Балабай О.О. Імовірнісна оцінка надійності бетонних гравітаційних гребель на скельній основі за критерієм обмеження глибини зони розтягання по перерізу греблі з основою: [Текст] / Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». – Харків, 2015. – Вип. 124. – С. 21–26.

*Публікації у міжнародних виданнях та у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних:*

1. Балабай Е.А. Исследования факторов влияющих на надежность бетонных гравитационных плотин на скальном основании: [Текст] / Е.А. Балабай // «Восточно-Европейский Научный Журнал». – Варшава, 2015. – Вип. 4(4). – С. 52–55.

2. Балабай О.О. Імовірнісна оцінка надійності бетонних гравітаційних гребель на скельній основі за критерієм стійкості греблі проти зсуву та опрокидування: [Текст] / «Серія: галузеве машинобудування, будівництво»: Зб. наук. пр. – Полтава, 2015. – Вип. 3(45) – С. 203–211.

3. Балабай Е.А. Вероятностная оценка риска возникновения аварий на бетонных гравитационных плотинах на скальном основании: [Текст] / Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2015р. – Вип. 157 – С. 86–92.

*Публікації апробаційного характеру:*

1. Балабай О.О. Умови формування замулювання водосховищ річкових гідровузлів: [Текст] / О.О. Балабай, А.О. Мозговий // Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства: тези IV Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф, Харків, 25 листопада–25 грудня 2014 р. / Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. – С. 117–120. *Особистий внесок*: постановка проблеми, експериментальні та теоретичні дані.

2. Балабай О.О. Імовірнісний спосіб комплексної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельній основі за нормативною методикою: [Текст] / О.О. Балабай, А.О. Мозговий // Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур: тези VI всеукр. наук. семінар, 15–16 жовтня 2014 р. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. – С. 139–141. *Особистий внесок*: постановка проблеми, розробка способу розрахунку, аналіз результатів.

3. Балабай О.О. Імовірнісна оцінка ризику виникнення аварії на прикладі глухої бетонної гравітаційної греблі на скельній основі гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження»: [Текст] / О.О. Балабай // Ресурси і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд: тези VII Міжнар. наук. конф., 20–21 жовтня 2015 р. – Харків: ХНУБА, 2015. С. 10–11.

4. Балабай О.О. Імовірнісний спосіб комплексної оцінки надійності високих бетонних гравітаційних гребель на скельній основі: [Текст] / О.О. Балабай // Харківський національний університет будівництва та архітектури: тези наук.-техн. конф., 17–19 березня 2015 р. – Харків: ХНУБА, 2015. – С. 11.

*Додаткові публікації:*

1. Мозговой А.А. Оценка напряженно-деформированного состояния агрегатной шахты первой очереди Днестровской гидроакмулирующей электростанции: [Текст] / А.И. Рязанцев, Кисляк Е.А. [и др.] // Научный вестник строительства: Зб. наук. пр. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – Вип. 48. – С. 106–112. *Особистий внесок:* виконання розрахунку, аналіз результатів.

2. Кисляк О.О. Оцінка напружено-деформованого стану бетонних труб іригаційних водоводів: [Текст] / А.О. Мозговий, Т.К. Бойко, А.О. Мозговий [та ін.] // Научный вестник строительства: Зб. наук. пр. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. – Вип. 52. – С. 260–263. *Особистий внесок:* виконання розрахунку, аналіз результатів.

3. Кисляк О.О. Термічний режим і напружено-деформований стан гравітаційної бетонної греблі Huong Dien на річці Бо у В'єтнамі: [Текст] / А.О. Мозговий, О.О. Кисляк, Ю.І. Чайка [та ін.] // Научный вестник строительства: Зб. наук. пр. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – Вип. 64. – С. 54–58. *Особистий внесок:* побудова розрахункових схем, збір вхідних даних, аналіз результатів.

**АНОТАЦІЯ**

Балабай О.О. Імовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківський національний університет будівництва та архітектури, Харків, 2016.

Дисертація присвячена розробці методів ймовірнісної оцінки ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях.

Запропоновано та реалізовано метод для визначення ймовірності досягнення кожного граничного стану, який може виникнути на бетонній гравітаційній греблі на скельній основі. Метод використовує спосіб статистичних випробовувань (Монте-Карло) та дозволяє визначати ймовірність втрати міцності тіла греблі, її контактного перерізу та її основи, втрати стійкості греблі проти перекидання, та зсуву.

Уперше складено комп'ютерну програму «Визначення ризику (ймовірності) виникнення аварій на високій бетонній гравітаційній греблі на скельній основі» на основі розробленого методу у рамках програмного комплексу MathCad.

Представлений метод може бути використаний для розрахунків бетонних гравітаційних гребель на скельній основі.

Ключові слова: бетонна гравітаційна гребля, скельна основа, ймовірнісний розрахунок, аварії, надійність, безпека.

**АННОТАЦИЯ**

Балабай Е.А. Вероятностная оценка риска возникновения аварий на бетонных гравитационных плотинах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. –

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена разработке метода вероятностной оценки риска возникновения аварий на бетонных гравитационных плотинах.

Подобрано вид случайной функции фильтрационного противодействия в скальных основаниях бетонных гравитационных плотин на основе анализа накопленных экспериментальных данных. Определены параметры случайной функции на основе статистической обработки экспериментальных данных.

Предложен и реализован метод для определения вероятности достижения каждого предельного состояния, которое может возникнуть на бетонной гравитационной плотине на скальном основании. Метод использует способ статистических испытаний (Монте-Карло) и позволяет определять вероятность потери прочности тела плотины, её контактного сечения, и её основания, потери устойчивости плотины против опрокидывания и сдвига.

Впервые разработан метод комплексной вероятностной оценки риска возникновения аварий на бетонных гравитационных плотинах, основанный на определении вероятности достижения хотя бы одного из предельных состояний, которые могут возникнуть на бетонной гравитационной плотине. Метод использует способ статистических испытаний (Монте-Карло) и позволяет определять эту вероятность.

Впервые составлена компьютерная программа «Определение риска (вероятности) возникновения аварий на высокой бетонной гравитационной плотине на скальном основании» на основе разработанного метода в рамках программного комплекса MathCad.

Впервые в рамках метода комплексной вероятностной оценки с использованием разработанной компьютерной программы определено риск возникновения аварий на бетонной гравитационной плотине гидроузла «Великого энергетического Эфиопского возрождения». Получено значение общей ежегодной вероятности возникновения аварии на этом сооружении равно  $1.1 \cdot 10^{-5}$  1/год, которое меньше чем нормативное значение и составляет  $5.0 \cdot 10^{-5}$  1/год. Таким образом надежность и безопасность рассмотренной плотины являются обеспеченными.

Впервые в рамках метода комплексной вероятностной оценки с использованием разработанной компьютерной программы определён риск возникновения аварий на бетонной гравитационной плотине Днепровского гидроузла. Получено значение общей ежегодной вероятности возникновения аварии на этом сооружении равно  $0.9 \cdot 10^{-5}$  1/год, которое меньше чем нормативное значение и составляет  $5.0 \cdot 10^{-5}$  1/год. Таким образом надежность и безопасность рассмотренной плотины являются обеспеченными.

Представленный метод может быть использован при расчетах бетонных гравитационных плотин на скальном основании.

Ключевые слова: бетонная гравитационная плотина, скальное основание, вероятностный расчет, аварии, надежность, безопасность.

## ABSTRACT

Balabai O.O. Probabilistic risk assessment of the accident risk for concrete gravity dams. – manuscript rights.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 – structural elements, buildings and structures. – Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, 2016.

The thesis addresses the development of a method of probabilistic risk assessment of accidents on concrete gravity dams.

A method to determine the probability of achieving each boundary condition, which could occur in a concrete gravitational dam on rock foundation, was proposed and implemented. The method uses a method of statistical tests (Monte Carlo) and allows determining a probability of strength loss of the dam body, its contact section, and its foundation, loss of the dam stability against overturning and shear.

For the first time, a computer program “Determination of risk (probability) of accidents on a high gravitational concrete dam on rock foundation was compiled on the basis of the method developed using the software package Math Cad.

The presented method can be used in analyses of concrete gravity dams on rock foundations.

Keywords: concrete gravity dam, rock foundation, probabilistic analysis, accidents, reliability, safety.

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ НА  
БЕТОННИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ГРЕБЛЯХ**

**БАЛАБАЙ Олена Олександрівна**

Відповідальний за випуск *О.А. Беліченко*

Підписано до друку 03.10.2016. Формат 60×84 1/16.  
Папір офсетний. Друк цифровий.  
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 примірників.  
Замовлення №1437.

Надруковано у друкарні ФОП Тарасенко В. П.  
Свідоцтво № 24800170000043751 від 21.02.2002 р.  
61124, м. Харків, вул. Зернова, 6/267.  
Тел./факс: (0572) 52-82-11, (097) 273-11-77