

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання курсової роботи

**«ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ГРЕБЛІ
ІЗ ҐРУНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми
навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія
та водні технології)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025

Методичні рекомендації до виконання курсової роботи «Імовірнісна оцінка надійності та безпеки греблі із ґрунтових матеріалів» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. А. О. Мозговий. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 27 с.

Укладач д-р техн. наук, доц. А. О. Мозговий

Рецензент

І. В. Храпатова, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, протокол № 1 від 20.08.2024

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Завдання на курсову роботу. Вихідні дані.....	5
Визначення відмітки гребеня греблі детерміністичним методом.....	5
Приклад визначення відмітки гребеня греблі Кременчуцького гідровузла детерміністичним методом.....	5
Визначення класу споруд гідровузла.....	7
Встановлення основних розмірів поперечного профілю греблі.....	7
Обрис укосів греблі.....	7
Приклад визначення відмітки гребеня греблі Кременчуцького гідровузла детерміністичним методом.....	9
Загальна характеристика Кременчуцького гідровузла.....	10
Загальна характеристика лівобережної греблі із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла.....	10
Приклад розрахунку.....	11
Визначення відмітки гребеня греблі.....	13
Приклад розрахунку.....	14
2 Методика розрахунку ймовірності переливу води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів методом статистичних випробувань.....	16
3 Визначення ризику переливу води через гребінь ґрунтової греблі.....	17
4 Аналіз отриманих результатів.....	21
Висновки.....	23
Список посилань.....	24

ВСТУП

Електроенергетика є однією з базових галузей промисловості, яка відіграє значну роль в розвитку народного господарства і економіки. Тенденція все більшої електрифікації виробничих процесів визначає випереджаючий розвиток електроенергетики в загальному зростанні використання енергоресурсів усіх видів. Гідроенергетика являється ефективною галуззю електроенергетики.

Гідротехнічні споруди та їх комплекси представляють собою широко розповсюджені складні інженерні об'єкти. Економічна, екологічна і соціальна відповідальність цих об'єктів надзвичайно висока, тому питанням надійності і безпеки гідротехнічних споруд у всьому світі приділяється значна увага.

Гідротехнічні споруди суттєво відрізняються від інших інженерних споруд. Це пов'язано з механічним, фізико-хімічним і біологічним впливом води на такі споруди. Іншим важливим фактором є індивідуальність гідротехнічних споруд, що пов'язана з унікальністю гідрологічних, топографічних, інженерно-геологічних та ін. природних умов, в яких зводяться гідротехнічні споруди.

Курсове проектування є складовою частиною навчального процесу підготовки здобувачів освіти гідротехнічної спеціальності, від якої залежить підвищення якості підготовки спеціалістів для будівельної галузі. Знання і навички студентів, отримані під час курсового проектування, сприяють формуванню сучасних поглядів щодо розвитку проектування та будівельного виробництва, створенню і впровадженню прогресивних технологій.

Курсова робота присвячена імовірнісній оцінці надійності греблі із ґрунтових матеріалів. Основними природними факторами, що визначають надійність і безпеку гідротехнічних споруд, є гідрологічний режим ріки, кліматичні впливи, інженерно-геологічні умови району розміщення споруд гідровузла й водоймища, мінливість фізико-механічних характеристик ґрунтів основи в просторі й у часі, сейсмічність району будівництва. До природних факторів варто віднести небезпеку виникнення зсувів, заторів і зажорів, біологічні впливи.

Найважливішими природними факторами, які впливають на надійність і безпеку гідротехнічних споруд, є кліматичні умови. До складу цих факторів відносять вітер і температуру навколишнього середовища. Параметри хвиль, які спричиняє вітер, визначають незатоплені відмітки гребня споруд. Одним із найважливіших природних факторів є сейсмічні впливи при землетрусах, які призводять до виникнення інерційних сейсмічних навантажень в споруді і основі, а також сейсмічного гідродинамічного тиску води на грані споруди. До складу природних факторів також потрібно віднести небезпеку виникнення оповзнів, заторів і зажорів, біологічний вплив [1–36].

1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ. ВИХІДНІ ДАНІ

Визначення відмітки гребня греблі детерміністичним методом

Вихідні дані:

1. Дані про розрахункові рівні води у водосховищі:
 - 1.1. Відмітка нормального підпірного рівня (НПР) $Z_{\text{НПР}}$, м.
 - 1.2. Відмітка форсованого підпірного рівня (ФПР) $Z_{\text{ФПР}}$, м.
 - 1.3. Відмітка підосви греблі (дна) $Z_{\text{д}}$, м.
2. Дані про розрахункові швидкості вітру:
 - 2.1. Розрахункова максимальна швидкість вітру при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів V_{w1} , м/с.
 - 2.2. Розрахункова максимальна швидкість вітру при ФПР у водосховищі для особливого сполучення навантажень і впливів V_{w2} , м/с.
3. Дані про довжину розгону хвилі:
 - 3.1. Довжина розгону хвилі при НПР у водосховищі L_1 , м.
 - 3.2. Довжина розгону хвилі при ФПР у водосховищі L_2 , м.
4. Дані про середню глибину води у водосховищі:
 - 4.1. Середня глибина води у водосховищі при НПР H_{m1} , м.
 - 4.2. Середня глибина води у водосховищі при ФПР H_{m2} , м.
5. Кут між поздовжньою віссю водосховища і напрямом вітру α_w , град.

Приклад визначення відмітки гребня греблі Кременчуцького гідровузла детерміністичним методом

Вихідні дані:

1. Дані про розрахункові рівні води у водосховищі:
 - 1.1. Відмітка нормального підпірного рівня (НПР) $Z_{\text{НПР}} = 81$ м.
 - 1.2. Відмітка форсованого підпірного рівня (ФПР) $Z_{\text{ФПР}} = 82,4$ м.
 - 1.3. Відмітка підосви греблі (дна) $Z_{\text{д}} = 75,0$ м.
2. Дані про розрахункові швидкостях вітру:
 - 2.1. Розрахункова максимальна швидкість вітру при НПР для основного сполучення навантажень і впливів $V_{w1} = 28,715$ м/с.
 - 2.2. Розрахункова максимальна швидкість вітру при ФПР для особливого сполучення навантажень і впливів $V_{w2} = 23,866$ м/с.
3. Дані про довжину розгону хвилі:
 - 3.1. Довжина розгону хвилі при НПР у водосховищі $L_1 = 38\ 000$ м.
 - 3.2. Довжина розгону хвилі при ФПР у водосховищі $L_2 = 38\ 000$ м.
4. Дані про середні глибинах води у водосховищі:
 - 4.1. Середня глибина води у водосховищі при НПР $H_{m1} = 6$ м.

4.2. Середня глибина води у водосховищі при ФПР $H_{m2} = 7,4$ м.

5. Кут між поздовжньою віссю водосховища і напрямом вітру $\alpha_w = 0$ град.
Вихідні дані представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані

№ з/п	$Z_{НПР}$, м	$Z_{ФПР}$, м	Z_d , м	V_{w1} , м/с	V_{w2} , м/с	L_1 , м	L_2 , м	H_{m1} , м	H_{m2} , м
1	81,1	82,6	75,3	28,6	23,2	3 100	3 220	5,0	6,5
2	82,3	84,3	70,1	29,6	23,3	2 750	2 900	6,0	8,0
3	83,4	85,6	74,2	30,3	25,4	2 650	2 830	4,5	6,7
4	85,5	87,7	71,3	28,7	20,1	1 480	1 760	4,7	6,9
5	86,7	88,9	72,5	28,8	22,5	1 630	1 690	7,4	9,6
6	88,9	89,7	73,3	27,7	23,5	1 470	1 490	16,5	17,3
7	90,1	90,8	80,1	30,3	24,6	920	980	10,2	10,9
8	92,4	92,9	81,1	31,2	28,7	1 810	1 920	11,1	11,6
9	93,5	94,7	82,2	27,7	23,6	1 550	1 650	9,8	10,3
10	94,6	96,2	85,1	25,5	22,1	1 370	1 480	7,6	9,2
11	96,0	98,1	82,2	26,9	21,4	1 240	1 390	14,2	16,3
12	98,7	99,8	83,4	28,7	23,8	1 750	1 860	13,3	14,4
13	99,7	101,1	85,5	31,2	25,5	1 860	1 930	12,7	14,1
14	100,1	101,5	90,4	32,3	26,4	1 850	1 890	8,6	9,0
15	102,5	103,7	87,1	29,4	23,4	1 935	1 990	14,4	15,6
16	103,6	105,2	89,4	28,7	22,7	2 100	2 150	12,6	14,2
17	104,9	106,0	95,2	27,7	25,4	1 760	1 860	4,4	5,5
18	105,8	106,7	93,3	28,7	23,7	1 520	1 630	10,9	11,8
19	107,2	108,4	100,2	30,3	27,1	1 370	1 420	6,2	7,4
20	109,9	111,0	101,1	24,7	20,1	1 120	1 230	7,8	8,9
21	112,3	113,5	105,1	28,8	22,4	1 000	1 150	3,3	4,5
22	114,7	116,4	106,2	29,1	25,7	950	980	7,1	8,8
23	116,8	117,7	107,5	28,8	26,6	1 480	1 610	9,3	10,2
24	118,7	119,9	107,4	27,4	24,7	1 750	1 810	10,3	11,5
25	121,3	122,6	111,2	26,5	22,6	1 860	1 890	8,5	9,8
26	122,5	123,4	110,7	27,7	22,0	1 730	1 790	10,1	11,0
27	126,8	127,7	122,4	30,1	26,4	1 600	1 680	3,3	4,2
28	130,1	131,4	121,4	29,4	24,5	1 300	1 350	4,8	6,1
29	132,5	133,8	122,1	22,1	18,9	1 150	1 190	8,7	10,0
30	133,8	134,9	120,3	23,2	18,5	1 070	1 150	11,4	12,5

Визначення класу споруд гідровузла

Постійні гідротехнічні споруди, до яких належить земляна гребля, згідно з ДБН В.2.4–3:2010 [11] поділяються на IV класи відповідальності. Відповідно до класу споруди встановлюються диференційовані вимоги щодо міцності та стійкості, довговічності, ступеня надійності споруд проти руйнівного впливу природних факторів. У курсовій роботі клас споруд встановлюється залежно від висоти земляної греблі та типу ґрунтів основи відповідно до таблиці 2. Ґрунт основи здобувач може прийняти самостійно.

Висота земляної греблі H_d приблизно визначається за формулою

$$H_d = Z_{ФПР} - Z_{дна} + (2,0 \dots 2,5) \text{ м}, \quad (1)$$

де $Z_{ФПР}$ – відмітка форсованого підпірного рівня води у водосховищі;

$Z_{дна}$ – відмітка дна річки.

Таблиця 2 – Класи земляних гребель

Тип ґрунтів основи	Висота земляних гребель H_d , м при їх класі			
	СС3	СС2-1	СС2-2	СС1
А	Понад 100	Від 70 до 100	Від 25 до 70	Менше 25
Б	Понад 75	Від 35 до 75	Від 15 до 35	Менше 15
В	Понад 50	Від 25 до 50	Від 15 до 25	Менше 15

Примітка. Ґрунти: А – скельні; Б – піщані, великоуламкові та глинисті в твердому та напівтвердому стані; В – глинисті, водонасичені у пластичному стані.

За висотою греблі H_d і типом ґрунту основи встановлюється клас споруд проектного гідровузла.

Встановлення основних розмірів поперечного профілю греблі. При проектуванні поперечного профілю греблі необхідно встановити обрис укосів греблі, ширину та позначку гребеня, а також його конструкцію, конструкцію та розміри кріплення верхового та низового укосів, розміри протифільтраційних пристроїв у тілі греблі та в основі, тип, конструкцію та розміри дренажних пристроїв. Схема поперечного профілю земляної греблі показана на рисунку 1.

Обрис укосів греблі. При проектуванні земляних насипних гребель коефіцієнти закладення укосів приймаються залежно від типу греблі, її висоти, виду ґрунту тіла греблі та основи за даними практики. Попередньо призначені укоси гребель піддаються перевірному розрахунку стійкості.

Верховий укіс, насичений водою, утворений під впливом хвиль і льоду, зазвичай влаштовується більш пологим, а низовий – більш крутим.

Закладення укосів греблі призначається з урахуванням таких основних факторів:

- а) характеру ґрунту, з якого складений укіс;
- б) характеру ґрунту основи;
- в) сил, що діють на укіс;
- г) умов виконання робіт та експлуатації греблі;
- д) типу греблі;
- е) висоти греблі.

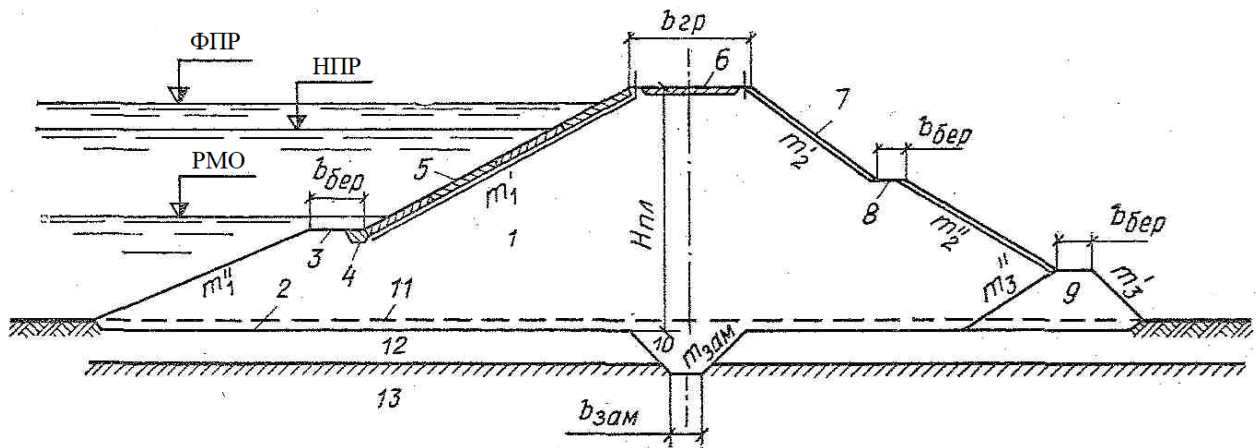


Рисунок 1 – Поперечний переріз земляної греблі:

1 – тіло греблі; 2 – підшва греблі; 3 – берма верхового укосу; 4 – упертя кріплення верхового укосу; 5 – кріплення верхового укосу; 6 – гребінь греблі; 7 – кріплення низового укосу; 8 – берма низового укосу; 9 – дренаж греблі; 10 – замок; 11 – природна поверхня ґрунту; 12 – водопроникний ґрунт; 13 – водоупір

На стадії проектування споруди для попереднього визначення коефіцієнтів закладення укосів можна використовувати дані, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Рекомендовані коефіцієнти закладення укосів земляних гребель

Висота греблі, м	Закладення укосів	
	верхового	низового
менше 5	2,0–2,5	1,50–1,75
від 5 до 10	2,25–2,75	1,75–2,25
від 10 до 15	2,50–3,00	2,00–2,50
від 15 до 50	3,00–4,00	2,50–4,00
понад 50	4,00–5,00	4,00–4,50

Укоси гребель заввишки до 15 м зазвичай приймаються такими, що не змінюються по висоті. При більшій висоті зазвичай приймається ламаний обрис верхового та низового укосів, поступово зменшуючи їх ухил від гребеня до

основи. Переломи укосів влаштовуються через 7–15 м за висотою греблі. Зазвичай коефіцієнт закладення верхового укосу нижче точки перелому на 0,5 більше, ніж коефіцієнт закладення укосу вище точки перелому. Для низового укосу – 0,25.

На укосах греблі можуть влаштовуватись горизонтальні майданчики – берми зазвичай у місцях перелому укосу. Берми призначені:

- а) для нагляду за укосом;
- б) для ремонту укосу та його покриття;
- в) збільшення загальної стійкості укосу;
- г) для збільшення ширини греблі по низу з метою подовження шляху фільтрації в основі;
- д) для включення в тіло греблі попередньо збудованих перемичок, під захистом яких зводиться гребля;
- е) для заглиблення під поверхнею укосу кривої депресії на глибину, більшу за глибину промерзання;
- ж) для влаштування у разі потреби дороги по укосу;
- и) для запобігання розмиву низового укосу атмосферними опадами.

Ширина берм приймається щонайменше 2–3 м з умови виконання робіт. Зазвичай ширина берм становить 3–5 м. На верховому укосі влаштовується берма для створення упору кріплення укосу. На низовому схилі берми використовуються для влаштування службових проїздів, а також для відведення атмосферних вод. У курсовій роботі необхідно прийняти коефіцієнти закладення верхового та низового укосів, встановити позначки переломів укосів, прийняти розміри берм.

Приклад визначення відмітки гребеня греблі Кременчуцького гідровузла детерміністичним методом

Вихідні дані:

1. Дані про розрахункові рівні води у водосховищі:
 - 1.1. Відмітка нормального підпірного рівня (НПР) $Z_{\text{НПР}} = 81$ м.
 - 1.2. Відмітка форсованого підпірного рівня (ФПР) $Z_{\text{ФПР}} = 82,4$ м.
2. Дані про розрахункові швидкості вітру:
 - 2.1. Розрахункова максимальна швидкість вітру при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $V_{w1} = 28,715$ м/с.
 - 2.2. Розрахункова максимальна швидкість вітру при ФПР у водосховищі для особливого сполучення навантажень і впливів $V_{w2} = 23,866$ м/с.
3. Дані про довжину розгону хвилі:
 - 3.1. Довжина розгону хвилі при НПР у водосховищі $L_1 = 38\,000$ м.

- 3.2. Довжина розгону хвилі при ФПР у водосховищі $L_2 = 38\ 000$ м.
4. Дані про середні глибини води у водосховищі:
- 4.1. Середня глибина води у водосховищі при НПР $H_{m1} = 6$ м.
- 4.2. Середня глибина води у водосховищі при ФПР $H_{m2} = 7,4$ м.
5. Кут між поздовжньою віссю водосховища і напрямом вітру $\alpha_w = 0$ град.

Загальна характеристика Кременчуцького гідровузла

Кременчуцька ГЕС – третій ступінь Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. В експлуатації перебуває з 1959 р., коли був введений в дію 1-й агрегат. Останній, 12-й агрегат, запущений в 1960 р. Водосховище Кременчуцької ГЕС – одне з найбільших в Україні (площа дзеркала $2\ 250$ км²). Встановлена потужність станції становить $682,8$ МВт, середньорічне виробництво електроенергії – $1\ 506$ млн кВт.-год.

Кременчуцька ГЕС розташовується на річці Дніпро в 14 км вгору за течією від міста Кременчук на відстані 619 км від гирла Дніпра.

Кременчуцький гідровузол є об'єктом комплексного призначення і враховує вимоги енергетики, водного транспорту, зрошення та рибного господарства.

Термін експлуатації Кременчуцької ГЕС перевищує 60 років.

До складу гідровузла входять будівля ГЕС, водозливна гребля, земляні греблі, берегоукріплення Табурищенського мису, безнапірна дамба, судноплавний шлюз.

Кременчуцька ГЕС призначена для покриття піків навантажень Енергосистеми України. На ГЕС можливо необмежену добове і тижневе регулювання. Гідроелектростанція бере участь в покритті графіка навантажень енергосистеми.

Гідротехнічні споруди Кременчуцької ГЕС входять до складу споруд Дніпровського каскаду і відносяться до найбільш відповідальних інженерних об'єктів з підвищеною економічною, соціальною та екологічною значущістю та потребують підвищеного контролю за їх станом.

Загальна характеристика лівобережної греблі із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла

Лівобережна земляна гребля має ширину по гребеню $98,0$ м. Відмітка гребеня з верхової сторони – $+85,000$ м, з низової – $+83,000$ м. Тіло греблі однорідне, намивне. Загальна довжина греблі $9\ 783,5$ м. Максимальна висота греблі на русловому ділянці становить $29,5$ м і $15,5$ м – на терасному.

Конструкція всіх ділянок лівобережної греблі в основному однакова, за винятком руслового, де є кам'яний банкет в нижньому б'єфі і збільшена товщина начерки з гірської маси до $3,0$ м на верховому укосі.

Верховий укіс лівобережної дамби із закладенням 1 : 4 від гребеня до берми на позначці +73,000 м закріплений залізобетонними плитами завтовшки 0,3–0,45 м, укладеними з одношарової фільтрової підготовки завтовшки 0,3–0,4 м. Нижче берми укоси закріплені кам'яною накидкою.

Поверхня гребеня, не зайнята дорогами, і суха частина низового укосу (вище позначки +72,000 та +73,000 м) закріплені посівом трав, нижче укіс захищений від впливу хвиль при паводкових умовах кам'яним накиданням.

Низовий укіс має ухил 1 : 4. На нижній частині укосу греблі покладений насланий дренаж у вигляді шару каменю по двошаровому щебеневому фільтру. Біля підніжжя греблі насланий дренаж закінчується водозбірною канавою, обладнаною водовипускними трубами. Під насланим дренажем перед канавою в тілі греблі по всій її довжині прокладений трубчастий дренаж з перфорованих залізобетонних труб діаметром 0,4–1,0 м, обсипаний тришаровим зворотним фільтром. Профільтрувавшись через тіло греблі вода відводиться за допомогою закритих трубчастих водовідводів у відкриті колектори, далі, по водозбірних канавах, у русло річки і кар'єрні прорізи.

Дренаж має 44 закритих трубчастих водовипусків, виведених: на руслову ділянку – безпосередньо в нижній б'єф (6 випусків), на інших ділянках – у відкритий дренажний колектор, виконаний у вигляді канави з облицьованими схилами, що проходить уздовж греблі на відстані 40–50 м від трубчастого дренажу.

Приклад розрахунку

1. Визначення висоти вітрового нагону води Δh_{set1} , середньої висоти хвилі h_{m1} , м, середнього періоду хвилі T_{m1} , с, середньої довжини хвилі λ_{m1} , м, висоти хвилі 1 % забезпеченості $h_{1\%1}$, м, для основного сполучення навантажень і впливів при НІР у водосховище.

1.1. Знаходиться висота вітрового нагону води Δh_{set1} , м:

$$\begin{aligned} \Delta h_{set1} &= (0.3 + 0.09 \cdot V_{w1}) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V_{w1}^2 \cdot L_1}{g \cdot H_{m1}} \cdot \cos(\alpha_w) = \\ &= (0.3 + 0.09 \cdot 28.715) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{28.715^2 \cdot 38000}{9.807 \cdot 6} \cdot \cos(0) = 1.536 \text{ м.} \end{aligned} \quad (2)$$

1.2. Обчислюються середні значення висоти h_{m1} , м і періоду T_{m1} , с хвилі:

$$h_{m1} = 0.16 \cdot \frac{V_{w1}^2}{g} \cdot \left[1 - \left(1 + 0.006 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_1}{V_{w1}^2}} \right)^{-2} \right] =$$

$$= 0,16 \cdot \frac{28,715^2}{9,807} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 38000}{28,715^2}} \right)^{-2} \right] = 2,871 \text{ м}, \quad (3)$$

$$T_{m1} = 1,972 \cdot \pi \cdot \frac{V_{w1}}{g} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_1}{V_{w1}^2}} \right)^{-2} \right]^{0,625} =$$

$$= 1,972 \cdot 3,14 \cdot \frac{28,715}{9,807} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 38000}{28,715^2}} \right)^{-2} \right]^{0,625} = 6,906 \text{ с.} \quad (4)$$

1.3. Визначається середня довжина хвилі λ_{m1} , м:

$$\lambda_{m1} = \frac{g \cdot T_{m1}^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,807 \cdot 6,906^2}{2 \cdot 3,142} = 74,43 \text{ м.} \quad (5)$$

1.4. Знаходиться висота хвилі 1 % забезпеченості в системі хвиль $h_{1\%1}$, м:

$$h_{1\%1} = h_{m1} \cdot \left(2,043 + 0,00344 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_1}{V_{w1}^2}} \right) =$$

$$= 2,871 \cdot \left(2,043 + 0,00344 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 38000}{28,715^2}} \right) = 10,329 \text{ м.} \quad (6)$$

2. Визначення висоти вітрового нагону води Δh_{set2} , середньої висоти хвилі h_{m2} , м, середнього періоду хвилі T_{m2} , с, середньої довжини хвилі λ_{m2} , м, висоти хвилі 1 % забезпеченості $h_{1\%2}$, м для основного сполучення навантажень і впливів при ФПР у водосховищі.

2.1. Знаходиться висота вітрового нагону води Δh_{set2} , м:

$$\Delta h_{set2} = (0,3 + 0,09 \cdot V_{w2}) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V_{w2}^2 \cdot L_2}{g \cdot H_{m2}} \cdot \cos(\alpha_w) =$$

$$= (0,3 + 0,09 \cdot 23,866) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{23,866^2 \cdot 38000}{9,807 \cdot 7,4} \cdot \cos(0) = 0,73 \text{ м.} \quad (7)$$

2.2. Обчислюються середні значення висоти h_{m2} , м і періоду T_{m2} , с хвилі:

$$h_{m2} = 0,16 \cdot \frac{V_{w2}^2}{g} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_2}{V_{w2}^2}} \right)^{-2} \right] =$$

$$= 0,16 \cdot \frac{23,866^2}{9,807} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 38000}{23,866^2}} \right)^{-2} \right] = 2,307 \text{ м}, \quad (8)$$

$$T_{m2} = 1,972 \cdot \pi \cdot \frac{V_{w2}}{g} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_1}{V_{w2}^2}} \right)^{-2} \right]^{0,625} =$$

$$= 1,972 \cdot 3,14 \cdot \frac{23,866}{9,807} \cdot \left[1 - \left(1 + 0,006 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 38000}{23,866^2}} \right)^{-2} \right]^{0,625} = 6,308 \text{ с.} \quad (9)$$

2.3 Визначається середня довжина хвилі λ_{m2} , м:

$$\lambda_{m2} = \frac{g \cdot T_{m2}^2}{2 \cdot \pi} = \frac{9,807 \cdot 6,308^2}{2 \cdot 3,142} = 62,098 \text{ м.} \quad (10)$$

2.4. Знаходиться висота хвилі 1% забезпеченості в системі хвиль $h_{1\%2}$, м:

$$h_{1\%2} = h_{m2} \cdot \left(2,043 + 0,00344 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot L_2}{V_{w2}^2}} \right) =$$

$$= 2,307 \cdot \left(2,043 + 0,00344 \cdot \sqrt{\frac{9,807 \cdot 38000}{23,866^2}} \right) = 4,916 \text{ м.} \quad (11)$$

Визначення відмітки гребеня греблі

Вихідні дані:

1. Дані про розрахункові рівнях води у водосховищі:

1.1. Відмітка нормального підпірного рівня (НПР) $Z_{НПР} = 81 \text{ м.}$

1.2. Відмітка форсованого підпірного рівня (ФПР) $Z_{ФПР} = 82,4 \text{ м.}$

2. Дані про розрахункові швидкостях вітру:

2.1. Розрахункова максимальна швидкість вітру при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $V_{w1} = 28,715 \text{ м/с.}$

2.2. Розрахункова максимальна швидкість вітру при ФПР у водосховищі для особливого сполучення навантажень і впливів $V_{w2} = 23,866 \text{ м/с.}$

3. Дані про висоту вітрового нагону води у водосховищі:

3.1. Висота вітрового нагону води при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $\Delta h_{set1} = 1,536 \text{ м.}$

3.2. Висота вітрового нагону води при ФПР у водосховищі для особливого сполучення навантажень і впливів $\Delta h_{set2} = 0,73 \text{ м.}$

4. Дані про параметри хвиль у водосховищі:

- 4.1. Висота хвилі 1% забезпеченості в системі хвиль при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $h_{1\%1} = 10,329$ м.
- 4.2. Середня довжина хвилі при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $\lambda_{m1} = 74,43$ м.
- 4.3. Висота хвилі 1 % забезпеченості в системі хвиль при ФПР у водосховищі для особливого сполучення навантажень і впливів $h_{1\%2} = 4,916$ м.
- 4.4. Середня довжина хвилі при ФПР у водосховищі для особливого сполучення навантажень і впливів $\lambda_{m2} = 62,098$ м.
5. Коефіцієнт закладення верхового укосу греблі $m_1 = 5$.
6. Тип кріплення верхового укосу – залізобетонні плити.
7. Запас піднесення гребеня греблі $a = 0,5$ м.

Приклад розрахунку

1. Визначається відмітка гребеня греблі $Z_{ГГ1}$, м, для основного сполучення навантажень і впливів при НПР в водосховище.

1.1. Приймаються значення коефіцієнтів шорсткості k_r і проникності укосу k_p залежно від типу кріплення, а також коефіцієнта, що враховує швидкість вітру і значення коефіцієнта закладення укосу k_{sp} :

$$k_r = 1, \quad k_p = 0,9, \quad k_{sp} = 0,33. \quad (12)$$

1.2. Знаходиться значення коефіцієнта k_{run1} , який враховує положистість хвилі і коефіцієнт закладення укосу:

$$k_{run1} = 1,2 \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{m1}}{h_{1\%1} \cdot (1+m_1^2)}} = 1,2 \cdot \cos 0^\circ \cdot \sqrt{\frac{74,43}{10,329 \cdot (1+5^2)}} = 0,632. \quad (13)$$

1.3. Обчислюється висота нахату хвилі на укіс забезпеченістю 1 % в системі хвиль при НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $h_{run1\%1}$, м:

$$h_{run1\%1} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run1} \cdot h_{1\%1} = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,33 \cdot 0,632 \cdot 10,329 = 1,938. \quad (14)$$

1.4. Визначається піднесення гребеня греблі над НПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів h_{s1} , м:

$$h_{s1} = \Delta h_{set1} + h_{run1\%1} + a = 1,536 + 1,938 + 0,5 = 3,974 \text{ м.} \quad (15)$$

1.5. Знаходиться відмітка гребеня греблі $Z_{ГП1}$, м, для основного сполучення навантажень і впливів при НПР у водосховищі:

$$Z_{ГП1} = Z_{НПУ} + h_{s1} = 81 + 3,974 = 84,974 \text{ м.} \quad (16)$$

2. Визначається відмітка гребеня греблі $Z_{ГП2}$, м для особливого сполучення навантажень і впливів при ФПР у водосховищі.

2.1. Приймаються значення коефіцієнтів шорсткості k_r і проникності укоосу k_p залежно від типу кріплення, а також коефіцієнта, що враховує швидкість вітру і значення коефіцієнта закладення укоосу k_{sp} :

$$k_r = 1, \quad k_p = 0,9, \quad k_{sp} = 0,33. \quad (17)$$

2.2. Знаходиться значення коефіцієнта k_{run2} , який враховує положистість хвилі і коефіцієнт закладення укоосу:

$$k_{run2} = 1,2 \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{m2}}{h_{1\%2} \cdot (1+m_1^2)}} = 1,2 \cdot \cos 0^\circ \cdot \sqrt{\frac{62,098}{4,916 \cdot (1+5^2)}} = 0,836. \quad (18)$$

2.3. Обчислюється висота нахату хвилі на укіс забезпеченістю 1 % в системі хвиль при ФПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів $h_{run1\%2}$, м:

$$h_{run1\%2} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run2} \cdot h_{1\%2} = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,33 \cdot 0,836 \cdot 4,916 = 1,22. \quad (19)$$

2.4. Визначається піднесення гребеня греблі над ФПР у водосховищі для основного сполучення навантажень і впливів h_{s2} , м:

$$h_{s2} = \Delta h_{set2} + h_{ran1\%2} + a = 0,73 + 1,22 + 0,5 = 2,45 \text{ м.} \quad (20)$$

2.5. Знаходиться відмітка гребеня греблі $Z_{ГП2}$, м для основного сполучення навантажень і впливів при ФПР у водосховищі:

$$Z_{ГП2} = Z_{ФПР} + h_{s2} = 82,4 + 2,45 = 84,85 \text{ м.} \quad (21)$$

3. Приймається відмітка гребеня греблі $Z_{ГП}$, м як більша величина з $Z_{ГП1}$ і $Z_{ГП2}$ з округленням у більшу сторону і точністю до 10 см:

$$Z_{ГП1} = 84,974 \text{ м,} \quad Z_{ГП} = 85 \text{ м.} \quad (22)$$

2 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ІМОВІРНОСТІ ПЕРЕЛИВУ ВОДИ ЧЕРЕЗ ГРЕБІНЬ ГРЕБЛІ ІЗ ҐРУНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Аналіз літературних джерел [1–36] свідчить, що для виконання розрахунків по оцінці імовірності переливу води через гребінь греблі найбільш зручним є метод статистичних випробувань. Нижче наведена методика визначення значення ризику переливу води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів у рамках параметричної теорії надійності методом статистичних випробувань.

Відповідно до методу Монте-Карло виконується N випробувань. Послідовність розрахунків при кожному випробуванні прийнята такою:

1. Задаються рівномірно розподіленою в інтервалі від 0 до 1 випадковою ймовірністю позначки рівня води перед греблею P_Q , обумовленою максимальною паводковою витратою.

2. За значенням P_Q визначається квантиль – позначка статичного рівня води перед греблею Z_Q , що обумовлена максимальною паводковою витратою.

3. По відомій позначці Z_Q знаходяться значення довжини розгону хвилі L і середньої глибини води у водосховищі H , користуючись відомими залежностями $L = L(Z_Q)$, $H = H(Z_Q)$.

4. Задаються рівномірно розподіленою в інтервалі від 0 до 1 випадковою ймовірністю швидкості вітру P_V .

5. За значенням P_V визначається квантиль – швидкість вітру V .

6. Використовуючи нормативну методику, за відомим значенням довжини розгону хвилі L , середньої глибини води у водосховищі H і швидкості вітру V визначаємо значення висоти нахату хвилі на укіс $h_{\text{гун}}$ і висоту вітрового нагону.

6.1. Знаходиться середня висота хвилі.

6.2. Обчислюється середній період хвиль.

6.3. Визначається середня довжина хвиль.

6.4. Обчислюється висота хвилі 1 % забезпеченості в системі хвиль.

6.5. Визначається висота нахату хвилі на укіс.

6.6. Знаходиться висота вітрового нагону води.

7. Визначається позначка рівня води перед греблею Z .

8. Перевіряється виконання умови $Z < Z_{\text{ГП}}$.

Після виконання всіх N випробувань обчислюється ймовірність переливу води через гребінь греблі P_{OVT} як відношення числа випробувань N_1 , при яких $Z_{\text{РВБ}} < Z_{\text{ГП}}$ до числа всіх випробувань N .

Варто зазначити, що через мале значення P_{OVT} , число статистичних випробувань повинне бути порівняно великим для того, щоб забезпечити достатню ймовірність одержуваних значень.

3 ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКУ ПЕРЕЛИВУ ВОДИ ЧЕРЕЗ ГРЕБІНЬ ГРУНТОВОЇ ГРЕБЛІ

1. Задається випадкова імовірність швидкості вітру pV , розподілена від 0 до 1 (рис. 2). За вихідними даними імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру можуть бути представлені нормальним розподілом.

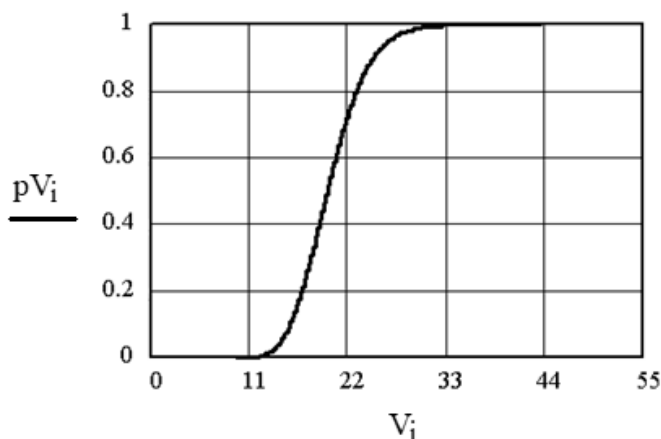


Рисунок 2 – Імовірнісна крива розподілу максимальної швидкості вітру V , м/с у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла

2. За значенням pV визначається квантиль – швидкість вітру V , м/с.

3. Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pZ позначки рівня води Z , м перед греблею із ґрунтових матеріалів (рис. 3).

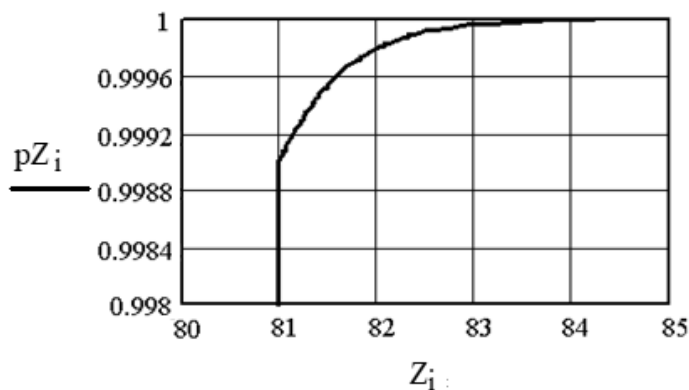


Рисунок 3 – Імовірнісна крива розподілу статичного рівня води перед греблею із ґрунтових матеріалів Z , м Кременчуцького гідровузла

При цьому статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами.

4. По значенню pZ визначається квантиль – позначка рівня води Z , м перед греблею із ґрунтових матеріалів.

5. Залежно від статичного рівня води Z , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі H , м (рис. 4) і глибина води у водосховищі H_c , м перед греблею із ґрунтових матеріалів.

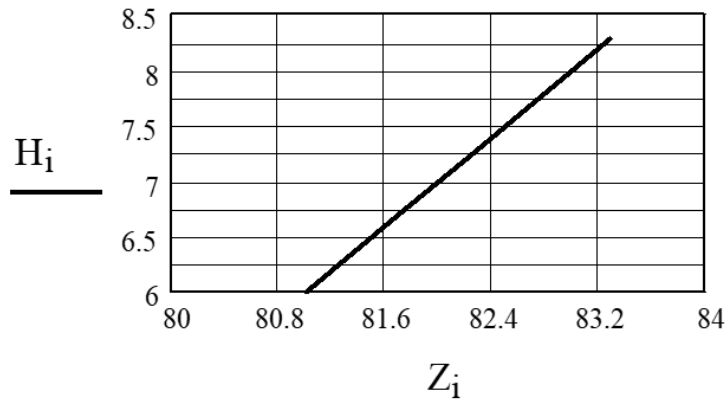


Рисунок 4 – Залежність середнього значення глибини води у водосховищі H , м від позначки статичного рівня води Z , м

6. Залежно від середньої глибини води у водосховищі H , м, а також топографічних характеристик водосховища визначається довжина розгону хвилі L , м.

7. Залежно від довжини розгону хвилі L , м, глибини води у водосховищі H_c , м перед греблею і швидкості вітру V , м/с визначається висота вітрового нагону dh , м (рис. 5) за формулою

$$dh = (0,3 + 0,09 \cdot V) \cdot 10^{-6} \frac{V^2 \cdot L}{g \cdot H_c} \cdot \cos(\alpha_w), \quad (23)$$

де 0,3 та 0,09 – емпіричні коефіцієнти,

g – прискорення вільного падіння, м/с²,

α_w – кут між поздовжньою віссю водосховища і напрямом вітру.

8. Залежно від довжини розгону хвилі L , м, глибини води у водосховищі H , м перед греблею і швидкості вітру V , м/с визначається середня висота хвилі h_{cp} , м (рис. 6) за формулою

$$h_{cp} = 0,16 \frac{V^2}{g} \left[1 - \left[1 + 0,006 \sqrt{g \frac{L}{V^2}} \right]^{-2} \right] \cdot th \left[\frac{0,625 \left[g \frac{H}{V^2} \right]^{0,8}}{1 - \left[1 + 0,006 \sqrt{g \frac{L}{V^2}} \right]^{-2}} \right], \quad (24)$$

де 0,006; 0,16; 0,625 – емпіричні коефіцієнти.

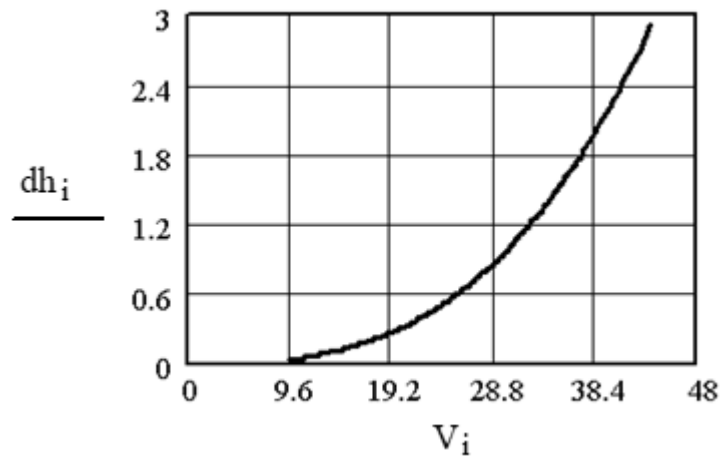


Рисунок 5 – Залежність висоти вітрового нагону dh_i , м від швидкості вітру V_i , м/с

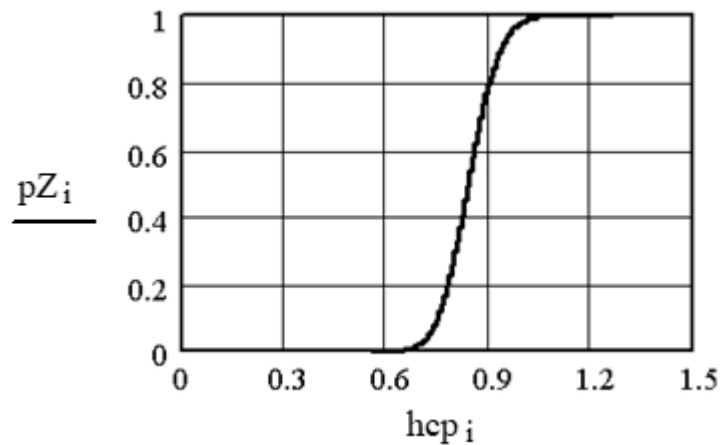


Рисунок 6 – Залежність середньої висоти хвилі dh_{cp} , м від випадкової величини позначки статичного рівня води Z , м

9. Залежно від середньої висоти хвилі h_{cp} , м і швидкості вітру V , м/с визначається середній період хвилі T_{cp} , с за формулою

$$T_{cp} = 3,1 \cdot 2\pi \frac{V}{g} \left[g \frac{h_{cp}}{V^2} \right]^{0,625}, \quad (25)$$

де 0,625, 3,1 – емпіричні коефіцієнти.

10. Залежно від середнього періоду хвилі T_{cp} , с визначається середня довжина хвилі λ_{cp} , м за формулою

$$\lambda_{cp} = \frac{g \cdot T_{cp}^2}{2\pi}. \quad (26)$$

11. Залежно від довжини розгону хвилі L , м, швидкості вітру V , м/с і середньої висоти хвилі h_{cp} , м визначається висота хвилі 1 % забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$, м (рис. 7) за формулою

$$h_{1\%} = h_{cp} \frac{(-\ln(0,01)) \cdot 0,001 \left[\sqrt{g \frac{L}{V^2} + 390} \right]}{\Gamma \left[0,001 \left[\sqrt{g \frac{L}{V^2} + 390} \right] + 1 \right]}, \quad (27)$$

де 0,001, 1, 390 – емпіричні коефіцієнти;

0,01 – забезпеченість висоти хвилі;

Γ – позначення гамма-функції.

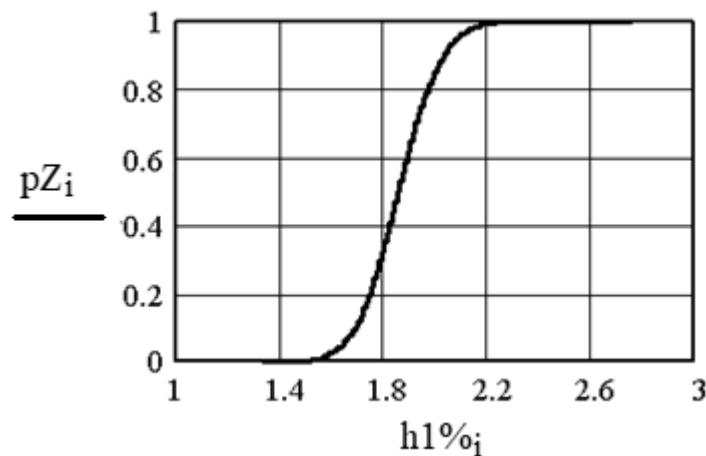


Рисунок 7 – Залежність хвилі 1 % забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$, м від випадкової величини – позначки статичного рівня води Z_i , м

12. Залежно від висоти хвилі 1 % забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$, м визначається висота нахату хвилі на укіс $h_{run1\%}$, м за формулою

$$h_{run1\%} = k_r \cdot k_p \cdot k_{sp} \cdot k_{run} \cdot h_{1\%}, \quad (28)$$

де k_r – коефіцієнт шорсткості кріплення укусу;

k_p – коефіцієнт проникливості кріплення укусу;

k_{sp} – коефіцієнт, який залежить від швидкості вітру і закладення укусу;

k_{run} – коефіцієнт, який визначається за формулою

$$k_{run} = 1,2 \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{h_{1\%} \cdot (1 + ctg^2 \phi)}}, \quad (29)$$

де α – кут між променем хвилі та нормаллю до поверхні води;

ϕ – кут нахилу укусу до горизонту.

13. Залежно від позначки рівня води Z , м, висоти нахату хвилі на укіс $h_{run1\%}$, м і висоти вітрового нагону dh , м визначається позначка рівня води перед греблею Z_f , м (рис. 8) за формулою

$$Z_f = Z + h_{run1\%} + dh. \quad (30)$$

14. Перевіряється виконання умови

$$Z_f < Z_{ГГ}. \quad (31)$$

де $Z_{ГГ}$ – позначка гребня греблі із ґрунтових матеріалів.

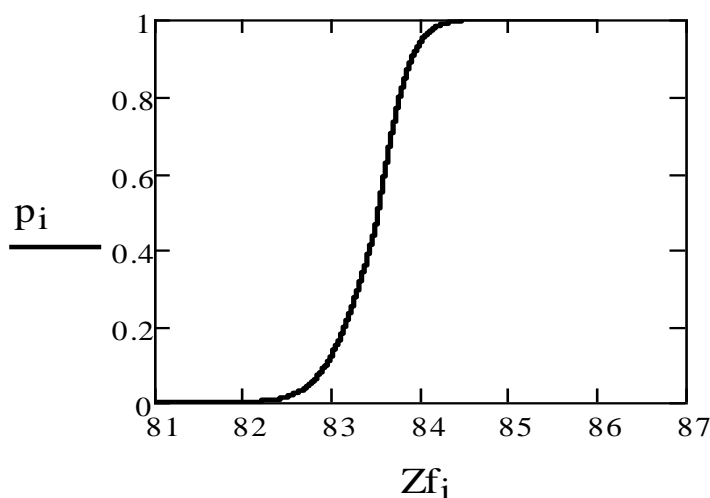


Рисунок 8 – Імовірнісна крива розподілу позначки рівня води перед греблею із ґрунтових матеріалів Z_f , м Кременчуцького гідровузла

Розрахунки проведено у програмних комплексах «MATLAB», «Python».

4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Згідно із програмою чисельного експерименту проводилась запланована кількість статистичних випробувань. Кількість статистичних випробувань, при яких умова (9) не виконувалась, віднесена до загальної кількості випробувань визначала імовірність ризику переливу води через гребінь греблі.

Результати розрахунків земляної греблі Кременчуцького гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку наведено в таблиці 4, для другого розрахункового випадку – у таблиці 5, допустимі значення імовірностей виникнення аварій на напірних гідротехнічних спорудах різних класів наслідків – у таблиці 6, результати імовірнісних розрахунків земляної греблі – у таблиці 7.

Таблиця 4 – Результати розрахунків земляної греблі Кременчуцького гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку

№ з/п	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка нормального підпірного рівня води $Z_{НПР}$, м	81,00
2	Максимальна швидкість вітру V , м/с 2 % забезпеченості	28,715
3	Середнє значення глибини води у водосховищі H , м	6,00
4	Глибина води у водосховищі H_c , м перед греблею	13,00
5	Довжина розгону хвилі L , м	38 000,00
6	Висота вітрового нагону dh , м	1,536
7	Середня висота хвилі h_{cp} , м	2,871
8	Середній період хвилі T_{cp} , с	6,906
9	Середня довжина хвилі λ_{cp} , м	74,43
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль h_1 %, м	10,329
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$; $k_p = 0,9$; $k_{sp} = 0,33$; $k_{run} = 0,632$	
12	Висота нахату хвилі на укіс $h_{run1\%}$, м	1,938
13	Необхідна за розрахунком позначка гребеня греблі $Z_{ГГН}$, м	83,00
14	Фактична позначка гребеня греблі $Z_{ГГФ}$, м	84,974

Таблиця 5 – Результати розрахунків земляної греблі Кременчуцького гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для другого розрахункового випадку

№ з/п	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка форсованого підпірного рівня води $Z_{ФПР}$, м	82,40
2	Максимальна швидкість вітру V , м/с 20 % забезпеченості	23,866
3	Середнє значення глибини води у водосховищі H , м	7,40
4	Глибина води у водосховищі H_c , м перед греблею	14,40
5	Довжина розгону хвилі L , м	38 000,00
6	Висота вітрового нагону dh , м	0,73
7	Середня висота хвилі h_{cp} , м	2,307
8	Середній період хвилі T_{cp} , с	6,308
9	Середня довжина хвилі λ_{cp} , м	62,098
10	Висота хвилі 1 % забезпеченості у системі хвиль h_1 %, м	4,916
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$; $k_p = 0,9$; $k_{sp} = 0,33$; $k_{run} = 0,836$	
12	Висота нахату хвилі на укіс $h_{run1\%}$, м	1,22
13	Необхідна за розрахунком позначка гребеня греблі $Z_{ГГН}$, м	83,00
14	Фактична позначка гребеня греблі $Z_{ГГФ}$, м	84,45

Таблиця 6 – Допустимі значення імовірностей виникнення аварій на напірних гідротехнічних спорудах різних класів наслідків (відповідальності), 1/рік [11]

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	$6 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 7 – Результати імовірнісних розрахунків земляної греблі Кременчуцького гідровузла

Клас споруди	Кількість статистичних випробувань	Розрахункове значення імовірності переливу води через гребінь, рік ⁻¹	Довірчий інтервал, рік ⁻¹	Допустиме значення імовірності переливу води через гребінь, рік ⁻¹
Гребля із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла				
СС3	$15 \cdot 10^6$	$4,43 \cdot 10^{-5}$	$4,24 \cdot 10^{-5} - 4,68 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Висновки

За результатами імовірнісної оцінки греблі Кременчуцького гідровузла можна зробити висновок, що імовірність переливу води через гребінь греблі не перевищує допустимого значення і надійність ґрунтової греблі забезпечена. Надійність греблі за критерієм ризику переливу води через гребінь греблі забезпечена.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дистанційний курс. Курсова робота «Імовірнісна оцінка надійності та безпеки греблі із ґрунтових матеріалів». URL: <https://dl.kname.edu.ua/course/view.php?id=3424>.
2. Hydraulic structures : textbook / Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C., Narayanan R. A. I. B. 4-th ed. New York : Taylor & Francis, 2017. 700 p.
3. Ross S. M. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. 4-th ed. Burlington : Elsevier Academic Press, 2009. 664 p.
4. Smith D. J. Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers. 8-th ed. Kidlington : Butterworth-Heinemann, 2021. 435 p.
5. Montgomery D. C., Runger G. C. Applied statistics and probability for engineers : monograph. 6th ed. Danvers : John Wiley & Sons, 2020. 811 p.
6. Гідротехнічні споруди : підручник для вузів / А. Ф. Дмитрієв та ін. ; за ред. А.Ф. Дмитрієва. Рівне: РДТУ, 1999. 328 с.
7. Keith T. Z. Multiple regression and beyond: An introduction to multiple regression and structural equation modelling. 3-rd ed. New York : Taylor & Francis, 2019. 639 p.
8. Chen L., Guo S. Copulas and its application in hydrology and water resources : monograph. Singapore : Springer, 2019. 290 p.
9. ДБН В.1.1–12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. [Чинний від 2014–10–01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, ДП «Укранархбудінформ», 2014. 110 с. (Державні будівельні норми України).
10. ДБН В.1.2–2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007–01–01]. Вид. офіц. Київ : Сталь, 2006. 60 с. (Державні будівельні норми України).
11. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. [Чинний від 2011–01–01]. Вид. офіц. Київ : ДП «Укранархбудінформ», 2010. 37 с. (Державні будівельні норми України).
12. ДСТУ Б. В. 1.1-27: 2010. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011–11–01]. Вид. офіц. Київ : ДП «Укранархбудінформ», 2011. 124 с. (Національний стандарт України).
13. Buildings. Chapter 13: Seismic Design : Design standards No. 9, DS-9(13)-1: Phase 4 (Final). [Existing from 2012-10-01]. Washington : U.S. Department of interior bureau of reclamation, 2012. 47 p. (Design standards signature sheet).
14. Dam Safety Program Report 2015-2016 (F2016). Vancouver : Dam Safety, 2016. 42 p. (Annual Report 2015 / 2016).
15. Dam Incedent and Failures : First Edition. FEMA P-946. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2013. 145 p.

16. Federal Guidelines for Dam Safety : Emergency Action Planning for Dams. FEMA 64. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2013. 73 p.
17. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. FEMA P-1025 : Catalog №14353-1. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2015. 49 p.
18. General principles on reliability for structures : ISO 2394. Geneva : ISO copyright office Case postale 561 CH-1211, 2015. 112 p. (International standard).
19. General principles on reliability for structures. Sydney : Standards Australia Limited, 2017. 114 p. (Australian Standard).
20. Guide to interpretive documents for essential requirements, to EN 1990 and to application and use of Eurocodes : Handbook 1. U K Watford : Garston, 2004. 155 p. (Basis of structural design).
21. Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples 1990 and to application and use of Eurocodes : Handbook 2. Prague, 2005. 254 p. (Reliability backgrounds).
22. Guide to risk assessment for reservoir safety management: Methodology and supporting information. Bristol : Environment Agency, 2013. Volume 2. 311 p. (Report – SC090001/R2).
23. JCSS Probabilistic model code. Part 1. Basis of design. JCSS working materials. JCSS. 2000. 62 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch>.
24. JCSS Probabilistic model code. Part 2. Load models. JCSS working materials. JCSS. 2001. 73 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch>.
25. JCSS Probabilistic model code. Part 3. Material properties resistance models. Memorandum. JCSS. 2000. 41 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch>.
26. Legislated dam safety reviews in BC. Burnaby : The association of professional engineers and geoscientists of British Columbia, 2016. 90 p. (APEGBC professional practice guidelines).
27. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду / А. В. Яцик та ін. Київ : Генеза, 2003. 176 с.
28. Мозговий А. О. Узагальнена оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на гідротехнічних спорудах каскаду гідроелектростанцій. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Польща, 2019. Т. 1 (17), ч. 1. С. 117–126.
29. Мозговий А. О., Самишкін А. Ю. Сучасні методи розрахунку гребель із ґрунтових матеріалів з урахуванням сейсмічних впливів. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2020. Т. 99, №1. С. 137–143.
30. Segura R. L., Padgett J. E., Paultre P. Expected seismic performance of gravity dams using machine learning techniques. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. Wellington, 2021. Vol. 54, No 2. P. 58–68.

31. Mozgovyi A. O. Probabilistic assessment of reliability and safety of hydraulic structures of cascades of hydropower plants : dis. ... of the Doctor of Tech. Sciences : 05.23.01. Kharkiv, 2019. 592 p.
32. Selvan, S., Sinha, S., Khupat, S., Singh, C., Jerin Paul, K., & Ali, R.. Dam Safety Measures Against Earthquakes in Seismic Regions // International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering : materials of the conference. Singapore, 2021. P. 625–639.
33. Butnik S., Mozgovyi A. Prospects of application of roller compacted concrete in hydro schemes of Ukraine. *E3S Web of Conferences*. Les Ulis, 2021. Vol. 280, No 03004. P. 1–6.
34. Mozgovyi A., Spirande K. Simulation of two-dimensional distribution laws of random correlated quantities of natural-climatic factors in context of probabilistic assessment of reliability of hydraulic structures of cascades of hydroschemes. *E3S Web of Conferences*. Les Ulis, 2021. Vol. 280, No 03007. P. 1–7.
35. Mozgovyi A., Spirande K., Butnik S. Simulation of yearly maximal flood discharges of reservoirs of Dnieper cascade. *AIP Conference Proceedings*. Melville, 2023. Vol. 2684, No 030027. P. 1–7.
36. Mozgovyi A., Spirande K., Butnik S. Investigation of correlation between maximal thickness of ice and the lowest average monthly temperature by methods of multivariate correlation on the example of Dnieper cascade of hydroelectric stations. *AIP Conference Proceedings*. Melville, 2023. Vol. 2490, No 040001. P. 1–14.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до виконання курсової роботи

**«ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ГРЕБЛІ
ІЗ ҐРУНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми
навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія
та водні технології)*

Укладач **МОЗГОВИЙ** Андрій Олексійович

Відповідальний за випуск *В. А. Александрович*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *А. О. Мозговий*

План 2025, поз. 15М

Підп. до друку 16.01.2025. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 1,6.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Черноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.