

Харківський національний університет будівництва та архітектури  
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Мозговий Андрій Олексійович

УДК 625/626

## ДИСЕРТАЦІЯ

# ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД КАСКАДІВ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди  
19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело



А.О. Мозговий

Науковий консультант:  
Вайнберг Олександр Ісаакович  
доктор технічних наук,  
професор

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди (19 – Архітектура та будівництво). – Харківський національний університет будівництва та архітектури, Харків, 2019.

У представленій роботі виконано математичне моделювання міцності і стійкості гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій та їх основ імовірнісними методами в рамках системної теорії надійності. Актуальність роботи обумовлена тим, що імовірнісні методи, на відміну від детерміністичних, дають більш об'єктивну оцінку ресурсу узагальненої несівної здатності, а відповідно – надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій.

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

У **першому розділі** розглянуто основні аспекти параметричної і системної теорії надійності, які використовуються для оцінки надійності і безпеки гідротехнічних об'єктів. Проаналізовано роль гідроенергетики в сучасних умовах і перспективи розвитку гідроенергетики в Україні. Розглянуто особливості роботи каскадів гідроелектростанцій і основні фактори, що впливають на їх надійність і безпеку, статистичні дані аварій гідротехнічних споруд. Наведено стан розвитку теорії надійності гідротехнічних об'єктів, а саме залучення математичного апарату теорії випадкових функцій, теорії випадкових процесів до методів розрахунку надійності конструкцій і споруд. Проаналізовано сучасні підходи щодо оцінки надійності бетонних гребель, гребель із ґрунтових матеріалів, водоскидних споруд гідровузлів, статистичні методи аналізу їх стану з урахуванням натурних даних, критерії їх надійності. Не оминули уваги інженерно-геологічні та геоекологічні

аспекти надійності і безпеки експлуатації споруд промислової гідротехніки, а також питання забезпечення їх соціально-екологічної безпеки, надійність технологічного обладнання і затворів гідротехнічних споруд. Проаналізовано питання гармонізації національних стандартів щодо оцінки надійності і безпеки об'єктів гідротехнічного будівництва із закордонними нормами. Проаналізовано підходи щодо моделювання гідрологічного режиму, обґрунтування допустимих гідрологічних ризиків.

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

У **другому розділі** здійснено збір і аналіз статистичних даних сейсмічних впливів на території України, які спричинені сейсмічною активністю району Карпатських гір, району Вранча, району Криму. Підібрано функції розподілів щорічної максимальної бальності землетрусів. На основі аналізу статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду підібрано функції розподілів щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур. На основі аналізу статистичних даних щорічних максимальних швидкостей вітру у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду підібрано функції розподілів щорічних максимальних швидкостей вітру. На основі аналізу статистичних даних підібрано функції розподілів щорічної максимальної товщини льоду у водосховищах Дніпровського каскаду. Обчислено параметри підібраних функцій розподілів випадкових величин.

У **третьому розділі** на основі опрацювання статистичних даних природних факторів досліджено кореляційні зв'язки між наступними випадковими величинами:

між щорічними максимальними паводковими витратами, між щорічною максимальною товщиною льоду, між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами, між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду. В результаті розрахунків обчислено параметри функцій лінійної регресії, коефіцієнти кореляції зазначених випадкових величин для пар гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Отримані дані свідчать про тісну, а іноді, практично функціональну залежність між випадковими величинами природних факторів.

У **четвертому розділі** здійснено детерміністичну оцінку надійності загальних водопідпірних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій на основі методу граничних станів. В рамках параметричної теорії надійності удосконалено алгоритми оцінки їх імовірнісної надійності. Згідно із запропонованим алгоритмом в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності гребель із ґрунтових матеріалів, бетонних водозливних гребель, гравітаційних стоянів за критеріями граничних станів, регламентованими нормами проектування гідротехнічних споруд. При виконанні розрахунків розглянуто скельові та нескельові основи загальних водопідпірних гідротехнічних споруд в місцях розташування гідровузлів. Ураховано випадковий характер гідрологічного режиму р. Дніпро, випадковий характер сейсмічних, температурних і вітрових впливів, випадковий характер льодового режиму, випадковий характер властивостей основи.

У **п'ятому розділі** здійснено детерміністичну оцінку надійності спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій на основі методу граничних станів. В рамках параметричної теорії надійності удосконалено алгоритми оцінки надійності спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій. Згідно із запропонованим алгоритмом здійснено імовірнісну оцінку надійності будівель гідроелектростанцій і будівель монтажних майданчиків, камер і голів шлюзів за критеріями граничних станів, регламентованими нормами проектування гідротехнічних споруд. При виконанні розрахунків розглянуто скельові та нескельові основи спеціальних водопідпірних

гідротехнічних споруд в місцях розташування гідровузлів. Ураховано випадковий характер гідрологічного режиму р. Дніпро, випадковий характер сейсмічних, температурних і вітрових впливів, випадковий характер властивостей основи.

У шостому розділі розроблено дерева відмов і несправностей гідротехнічних споруд гідровузлів на основі аналізу компоновочних і конструктивних рішень гідровузлів Дніпровського каскаду. Пропонуються підходи, які дозволяють ураховувати кореляційні зв'язки між випадковими величинами, що описують різноманітні впливи на гідротехнічні споруди пар гідровузлів каскаду гідроелектростанцій. Розглядаються наступні випадкові величини: щорічні максимальні паводкові витрати, щорічна максимальна товщина льоду, щорічна максимально низька середньомісячна температура, а також максимальні амплітуди середньомісячних температур.

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

Матеріали дисертаційної роботи впроваджені при виконанні розрахунків надійності і безпеки Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках роботи «Відповідність споруд ГЕС ПрАТ «Укргідроенерго» вимогам сучасних норм проектування, у тому числі з урахуванням сейсмічних впливів», що виконується в ПрАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ», м. Харків. Також результати досліджень знайшли практичне застосування в навчальному процесі і при дипломному проектуванні у Харківському національному університеті будівництва та архітектури.

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

## ABSTRACT

Mozgovuy A.O. Probabilistic assessment of reliability and safety of hydraulic structures of cascades of hydropower plants. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences in the specialty 05.23.01 "Building constructions, buildings and structures" (19 – Architecture and construction). – Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv, 2019.

In the presented work, a mathematical modeling of the strength and stability of hydraulic structures of the cascade of hydropower plants and their bases by probabilistic methods in the framework of the system reliability theory was performed. The urgency of the work is due to the fact that probabilistic methods, in contrast to deterministic ones, give a more objective assessment of the potential of generalized load bearing capacity, and, respectively, of reliability and safety of hydraulic structures in cascades of hydropower plants.

**The content of the dissertation.** In the **introduction**, a general characteristic of the work is presented, the relevance, the connection with scientific themes, the purpose and tasks of research are formulated, the practical value of work and scientific novelty are presented.

In the **First Chapter**, main aspects of the parametric and system reliability theory are considered, which are used to assess the reliability and safety of hydraulic structures. The role of hydropower in the current conditions and prospects of hydropower development in Ukraine are analyzed. Peculiarities of the operation of cascades of hydropower plants and main factors influencing their reliability and safety, statistical data of accidents in hydraulic structures are considered. The state of development of the theory of reliability of hydraulic structures, namely, the involvement of mathematical apparatus of the theory of random functions, the theory of random processes and the methods in calculating the reliability of components and structures, is presented. The modern approaches to assessing the reliability of concrete dams, dams made of soil materials, spillway structures in hydropower schemes and statistical methods for analyzing their state,

taking into account natural data and criteria of their reliability, are analyzed. Engineering and geological and geo-ecological aspects of the reliability and safety of the operation of industrial hydraulic structures, as well as the issues of ensuring their socio-ecological safety, the reliability of technological equipment and gates of hydraulic structures, are also discussed. Issues related to harmonization of national standards for assessing the reliability and safety of hydraulic structures with foreign standards are analyzed. Approaches to modeling the hydrological regime, justification of permissible hydrological risks are analyzed.

Despite the wide application of probabilistic methods for assessing the reliability of hydraulic structures, guidelines for assessing the reliability of complex technical systems, taking into account multifactorial influences, are not formulated. The existing standards are lacking probabilistic methods for modeling the behavior of hydrosystems, assessing the reliability and safety of complex natural-technical systems – cascades of hydroelectric power plants. It is shown that modern literary sources overlook correlations between natural factors of influence, obviously inherent to hydroelectric power plants, in particular. Based on the above, main objectives of the study were formulated.

In the **Second Chapter**, statistical data on seismic influences on the territory of Ukraine, which are caused by seismic activity of the Carpathian Mountains region, the Vranča area and the Crimea region, are collected and analysed. Distribution functions for the annual maximum earthquake magnitudes are selected. On the basis of the analysis of statistical data of temperature influences in hydroelectric schemes of the Dnipro Cascade, distribution functions for the annual lowest average monthly temperature and the annual maximum amplitude of the average monthly temperatures are selected. On the basis of the analysis of statistical data of annual maximum wind speeds in the geographical locations of hydroelectric power plants of the Dnipro Cascade, distribution functions for the annual maximum wind speeds are selected. On the basis of analysis of statistical data, distribution functions for the annual maximum ice thickness in reservoirs of the Dnipro Cascade are selected. Parameters of the selected random distribution functions are calculated.

In the **Third Chapter**, on the basis of processing statistical data of natural factors, correlations between the following random variables are investigated: between annual

maximum flood flows, between annual maximum ice thickness, between annual maximum average monthly temperatures, between annual maximum amplitudes of average monthly temperatures on the sites of hydropower schemes of the Dnipro Cascade. As a result of calculations, parameters of linear regression functions, correlation coefficients of the aforementioned random variables for the pairs of hydropower schemes of the Dnipro Cascade of hydropower plants are calculated. The obtained data testify to the close, and sometimes, practically functional dependence between random variables of natural factors.

In the **Fourth Chapter**, a deterministic assessment of the reliability of general water retaining hydraulic structures of the cascade of hydropower plants on the basis of the boundary state method is carried out. In the framework of the parametric theory of reliability, algorithms for assessing their probabilistic reliability are refined. According to the proposed algorithm, in the framework of the parametric reliability theory, a probabilistic assessment of the reliability of dams made of soil materials, concrete spillway dams and gravity abutments, according to criteria of the boundary states prescribed by design standards for hydraulic structures is carried out. When carrying out calculations, rock and non-rock bases of general water retaining hydraulic structures in locations of hydropower schemes are considered. A random character of the hydrological regime of the Dnipro River, a random nature of seismic, temperature and wind influences, a random character of the ice regime and a random nature of the base's properties are taken into account.

In the **Fifth Chapter**, a deterministic assessment of the reliability of special water retaining hydraulic structures of the cascade of hydropower stations is carried out on the basis of the boundary state method. In the framework of the parametric reliability theory, algorithms for assessing the reliability of special water retaining hydraulic structures of the cascade of hydropower plants are refined. According to the proposed algorithm, a probabilistic assessment of the reliability of powerhouses and erection bays, chambers and headgates, according to criteria of the boundary states prescribed by design standards for hydraulic structures is carried out. When carrying out calculations, rock and non-rock bases of general water retaining hydraulic structures in locations of hydropower schemes



are considered. A random character of the hydrological regime of the Dnipro River, a random nature of seismic, temperature and wind influences and a random character of the base's properties are taken into account.

In the **Sixth Chapter**, trees of failures and malfunctions of hydraulic structures in hydropower schemes are developed on the basis of the analysis of layout and design solutions for hydropower schemes of the Dnipro Cascade. Approaches that take into account the correlation between random variables describing various influences on hydraulic structures in pairs of hydropower schemes of the cascade of hydropower plants are suggested. The following random variables are considered: annual maximum flood flows, annual maximum ice thickness, annual lowest average monthly temperature and maximum amplitudes of average monthly temperatures.

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

The dissertation materials were implemented when carrying out calculations of reliability and safety of the Dnipro Cascade of hydropower plants in the framework of the work "Conformity of structures in hydropowerpower plants of Ukrhydroenergo PrJSC to the requirements of modern design standards, including taking into account seismic influences", which is being carried out at UKRHIDROPROEKT PrJSC, Kharkiv. The research results have also found practical application in the educational process and in thesis projects at the Kharkiv National University of Construction and Architecture.

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

**Список публікацій здобувача:**

1. Мозговий А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 54. С. 272–277.
2. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2010. Вип. 58. С. 264–270.
3. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 65. С. 364–370.
4. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними. *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2011. Вип. 127. С. 171–175.
5. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і вибір параметрів функції розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 2011. Вип. 101. С. 123–127.
6. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2011. Вип. 1 (53). С. 119–126.
7. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних аварій гідротехнічних споруд. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 66. С. 192–196.
8. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву бетонних гребель гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 154–165.

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

16. Оценка напряженно-деформированного состояния агрегатной шахты первой очереди Днестровской гидроаккумулирующей электростанции / А. А. Мозговой и др. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2008. Вип. 48. С. 106–112.
17. Оцінка напружено-деформованого стану бетонних труб іригаційних водоводів / А. О. Мозговий та ін. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 52. С. 260–263.
18. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 161. С. 90–101.
19. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 165. С. 99–109.
20. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 168. С. 62–70.
21. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 174. С. 70–80.
22. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності температурних впливів за статистичними даними по гідровузлах Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 72. С. 135–145.

23. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 181. С. 81–91.
24. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм стійкості укосів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 113–126.
25. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 182. С. 6–17.
26. Мозговий А. О. Узагальнена оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на гідротехнічних спорудах каскаду гідроелектростанцій. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Польща, 2019. Т. 2 (42), ч. 1. С. 31–40.
27. Мозговий А. О., Балабай О. О. Комплексна ймовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на прикладі бетонної греблі Дніпровської ГЕС. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Польща, 2017. Т. 1 (17), ч. 1. С. 117–126.
28. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності греблі із ґрунтових матеріалів гідровузла ГЕС Тхакмо у В'єтнамі за критерієм переливу води через гребінь греблі. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2016. Т. 86, № 4. С. 122–127.
29. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Імовірнісний спосіб комплексної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельовій основі за нормативною методикою. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур, присвячено 100-річчю створення Харківської каналізації* : тези за матеріалами VI Всеукраїнського наукового семінару, 15–16 жовтня 2014 р. Харків : ХНУБА, 2014. С. 139–141.

30. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Умови формування замулювання водосховищ річкових гідровузлів. *Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства* : матеріали IV міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 25 листопада–25 грудня 2014 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. С. 117–120.
31. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер і голів шлюзів. *70-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 17–19 березня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 12.
32. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву монтажних майданчиків будівель ГЕС гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VII Міжнародної наукової конференції, 20–21 жовтня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 78–80.
33. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур* : тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару, 11–12 жовтня 2016 р. Харків : ХНУБА, 2016. С.56–58.
34. Мозговий А. О. Метод розв'язання задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи. *72-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 14–17 березня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 38–39.
35. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за

матеріалами VI Міжнародної науково-технічної конференції, 19–21 квітня 2017 р. Харків : УкрДУЗТ, 2017. С. 140–141.

36. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VIII Міжнародної наукової конференції, 18–19 жовтня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 119–122.
37. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VII-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018. – С. 164–165.
38. Mozgovuy A. O., Butnik S. V. Probable reliability prediction of the dam constructed by ground materials of the hydraulic power system Nam Chien in Vietnam using Monte–Carlo method. *Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings : 7th International Scientific Conference. Transbud-2018. MATEC Web of Conferences, November 14-16, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. Volume 230, 02019 (2018). P. 1–7.*
39. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності каскадів гідроелектростанцій. *74-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 5–6 березня 2019 р. Харків : ХНУБА, 2019. С. 73–74.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ.....	22
ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПЕРЕДУМОВИ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ КАСКАДІВ ГІДРОВУЗЛІВ.....	36
1.1 Роль гідроенергетики в сучасних умовах і перспективи розвитку гідроенергетики в Україні.....	36
1.2 Особливості роботи каскадів гідроелектростанцій і основні фактори, що впливають на їх надійність і безпеку.....	37
1.3 Аналіз статистичних даних аварій гідротехнічних споруд.....	41
1.4 Сучасний стан розвитку теорії надійності гідротехнічних об'єктів.....	46
1.5 Висновки за розділом 1 і завдання досліджень .....	60
РОЗДІЛ 2 ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРОДНИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ КАСКАДУ ГІДРОВУЗЛІВ.....	62
2.1 Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними.....	62
2.2 Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функцій розподілу температурних впливів за статистичними даними.....	68
2.3 Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функцій розподілу вітрових впливів за статистичними даними.....	73
2.4 Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функцій розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними.....	78
2.5 Висновки за розділом 2.....	82
РОЗДІЛ 3 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ЩОДО ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	84



3.1 Особливості гідрологічного режиму і регулювання витрат каскаду гідроелектростанцій.....	84
3.2 Дослідження кореляційних залежностей між максимальними витратами р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	89
3.3 Дослідження кореляційних залежностей між максимальною товщиною льоду за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій .....	93
3.4 Дослідження кореляційних залежностей між максимальними низькими середньомісячними температурами, між максимальними амплітудами середньомісячних температур за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій .....	97
3.5 Висновки за розділом 3.....	103
<b>РОЗДІЛ 4 ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ЗАГАЛЬНИХ ВОДОПІДПІРНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....</b>	<b>105</b>
4.1 Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм переливу води через гребінь греблі.....	105
4.2 Метод розв'язку задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи.....	117
4.3 Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм втрати стійкості верхового і низового укосів.....	122
4.4 Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критеріями втрати фільтраційної міцності тіла греблі і основи.....	131
4.5 Імовірнісна оцінка надійності кріплення укосів гребель із ґрунтових матеріалів.....	135
4.6 Імовірнісна оцінка надійності бетонних гребель на скельовій основі за критерієм втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності тіла греблі, механічної міцності основи, відмови затвору водозливу.....	138

4.7 Імовірнісна оцінка надійності бетонних гребель на нескельовій основі за критеріями втрати механічної міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, фільтраційної міцності основи, відмови затвору водозливу.....	172
4.8 Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів за критерієм втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи.....	184
4.9 Висновки за розділом 4.....	198
<b>РОЗДІЛ 5 ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СПЕЦІАЛЬНИХ ВОДОПІДПІРНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....</b>	<b>200</b>
5.1 Імовірнісна оцінка надійності будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи.....	200
5.2 Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи.....	218
5.3 Імовірнісна оцінка надійності камер шлюзів на нескельовій основі за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, руйнування нижніх воріт.....	233
5.4 Імовірнісна оцінка надійності камер шлюзів на скельовій основі за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, перекидання, механічної міцності, механічної міцності основи, руйнування нижніх воріт.....	241
5.5 Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, перекидання, механічної міцності, механічної міцності основи, руйнування нижніх воріт.....	250
5.6 Висновки за розділом 5.....	263
<b>РОЗДІЛ 6 УЗАГАЛЬНЕНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....</b>	<b>264</b>

6.1 Постановка задачі і короткі відомості про особливості компоновочних і конструктивних рішень Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	264
6.2 Основні положення побудови дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	269
6.3 Побудова умовних законів розподілів між максимальними витратами Дніпровського каскаду гідроелектростанцій .....	273
6.4 Побудова умовних законів розподілів між максимальною товщиною льоду у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій .....	276
6.5 Побудова умовних законів розподілів між максимально низькими середньомісячними температурами і між максимальними амплітудами середньомісячних температур Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	279
6.6 Оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій.....	284
6.7 Висновки за розділом 6.....	319
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	320
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	323
ДОДАТКИ .....	377
Додаток А – Статистичні дані про чинники пошкоджень і руйнувань гідротехнічних споруд .....	377
Додаток Б – Статистичні дані про землетруси Кримсько-Чорноморського регіону, району Карпат і району Вранча.....	387
Додаток В – Результати опрацювання статистичних даних про землетруси Кримсько-Чорноморського регіону, Карпат і району Вранча.....	398
Додаток Г – Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду.....	404
Додаток Д – Результати опрацювання статистичних даних про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду.....	431

Додаток Е – Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру по гідровузлах Дніпровського каскаду.....	443
Додаток Ж – Результати опрацювання статистичних даних про максимальні щорічні швидкості вітру по гідровузлах Дніпровського каскаду.....	449
Додаток И – Статистичні дані про щорічну максимальну товщину льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду.....	455
Додаток К – Результати опрацювання статистичних даних про щорічну максимальну товщину льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду	458
Додаток Л – Статистичні дані про максимальні паводкові витрати у пунктах спостережень річки Дніпро.....	464
Додаток М – Графіки функцій регресії кореляційних залежностей між максимальними витратами р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	471
Додаток Н – Графіки функцій регресії кореляційних залежностей між максимальною товщиною льоду за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій .....	474
Додаток П – Графіки функцій регресії кореляційних залежностей між максимальними низькими середньомісячними температурами і між максимальними амплітудами середньомісячних температур за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій .....	476
Додаток Р – Результати розрахунків по визначенню необхідних позначок гребенів гребель із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій за нормативною методикою .....	479
Додаток С – Фрагменти планів гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	484
Додаток Т – Деревяні відмови і несправності для гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.....	490
Додаток У – Криві забезпеченості максимальних витрат води р. Дніпро перетворені до умовних нормальних законів розподілу.....	547

Додаток Ф – Криві забезпеченості щорічних максимальних товщин льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій перетворені до умовних нормальних законів розподілу.....	551
Додаток Х – Криві забезпеченості щорічних максимально низьких середньомісячних температур та щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій перетворені до умовних нормальних законів розподілу.....	557
Додаток Ц – Результати імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності.....	562
Додаток Ш – Дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій.....	574
Додаток Щ – Акти впровадження .....	583
Додаток Ю – Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	585

## ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

**Аварія** – пошкодження, вихід із ладу, руйнування, що сталося з техногенних: конструктивних, виробничих, технологічних, експлуатаційних або природних причин.

**Безвідмовність** – здатність об'єкта безперервно зберігати роботоздатний стан протягом заданого терміну експлуатації.

**Безпечність** – властивість об'єкта при експлуатації, а також у випадку порушення роботоздатності не створювати загрози для життя і здоров'я людей, а також загрози для довкілля.

**Відмова** – подія, що полягає в переході через один із граничних станів або в реалізації позаграничного стану.

**Відповідальний елемент** – елемент, руйнування якого призводить до руйнування або загрози руйнування споруди в цілому.

**Вплив** – будь-яка причина, в результаті якої в конструкції змінюються внутрішні напруження, деформації або інші параметри стану.

**Встановлений термін експлуатації** – календарна тривалість експлуатації об'єкта, при досягненні якої його подальше застосування за призначенням допускається лише після спеціального підтвердження роботоздатності.

**Гідротехнічні споруди** – споруди, що підпадають під вплив водного середовища, призначені для використання і охорони водних ресурсів, а також для захисту від шкідливого впливу вод.

**Граничний стан** – стан, за якого подальша експлуатація будівельного об'єкта недопустима, пов'язана з труднощами або недоцільна.

**Граничне розрахункове значення навантаження** – значення навантаження, що відповідає екстремальній ситуації, яка може виникнути не більше одного разу протягом терміну експлуатації конструкції, та використовується, як правило, для перевірки граничних станів першої групи, вихід за межі яких еквівалентний повній втраті роботоздатності конструкції.

**Довговічність** – властивість об'єкта зберігати роботоздатний стан до настання граничного стану в умовах установленної системи технічного обслуговування та ремонту.

**Експлуатаційне розрахункове значення навантаження** – значення навантаження, що характеризує умови нормальної експлуатації конструкції. Як правило, експлуатаційне розрахункове значення використовується для перевірки граничних станів другої групи, пов'язаних із труднощами нормальної експлуатації: виникнення недопустимих переміщень конструкції, недопустима вібрація та недопустимо велике розкриття тріщин у залізобетонних конструкціях тощо.

**Експлуатація будівлі чи споруди** – використання об'єкта за функціональним призначенням з проведенням необхідних заходів щодо збереження стану конструкцій, за якого він здатен виконувати задані функції, зберігаючи значення параметрів, встановлені вимогами технічної документації

**Епізодичне навантаження** – навантаження, яке реалізується надзвичайно рідко і тривалість дії якого незрівнянно мала порівняно з терміном експлуатації *T<sub>ef</sub>*. Як правило, епізодичними є аварійні навантаження і впливи.

**Ефект впливу або навантажувальний ефект** – реакція: внутрішні зусилля, напруження, переміщення, деформації будівельних конструкцій на впливи, що враховуються.

**Живучість** – властивість об'єкта зберігати обмежену роботоздатність під впливами, що не передбачені умовами експлуатації, за наявності деяких дефектів і пошкоджень, а також за відмови деяких компонентів об'єкта.

**Забезпеченість значення випадкової величини** – якщо несприятливим є перевищення певного значення, це імовірність неперевищення цього значення; якщо несприятливим є зменшення відносно певного значення, це імовірність перебування вище цього значення.

**Забезпечення безпеки гідротехнічних споруд** – розробка та втілення відповідних заходів по попередженню аварій гідротехнічних споруд.

**Катастрофа** – великомасштабна аварія, яка спричинила численні людські жертви, значні матеріальні збитки або інші тяжкі наслідки.

**Квантиль** – значення випадкової величини, яке відповідає заданому значенню її інтегральної функції розподілу.

**Коефіцієнт надійності за відповідальністю** – коефіцієнт, що враховує значущість конструкції чи об'єкта в цілому, а також можливі наслідки відмови.

**Коефіцієнт надійності моделі** – коефіцієнт, який враховує невизначеність розрахункової моделі.

**Критерії безпеки гідротехнічних споруд** – граничні значення кількісних і якісних показників стану гідротехнічних споруд та умов їх експлуатації, що відповідають припустимому рівню ризику аварії гідротехнічних споруд і затверджені у встановленому порядку органами виконавчої влади, що здійснюють державний нагляд за безпекою гідротехнічних споруд.

**Максимально можлива катастрофа** – передбачена спеціальними нормами в умовах існування об'єкта природна або техногенна катастрофа, за появи якої головні несучі конструкції повинні забезпечити виконання всіх функцій, пов'язаних із безпекою.

**Навантаження** – вплив, під яким розуміють як безпосередньо силові впливи, так і впливи від зміщення опор, зміни температури, усадки та інших подібних явищ, що викликають реактивні сили.

**Нормальна експлуатація будівлі чи споруди** – експлуатація об'єкта, здійснювана без обмежень відповідно до передбачених у нормах або в завданні на проектування технологічних чи природних умов.

**Змінне навантаження** – навантаження, для якого не можна нехтувати зміною у часі його значень відносно середнього.

**Квазіпостійне розрахункове значення навантаження** – значення навантаження, яке використовується для врахування реологічних процесів, що відбуваються під дією змінних навантажень, і визначається як рівень постійного



впливу, еквівалентного за результуючою дією до фактичного випадкового процесу навантаження.

**Короткочасне навантаження** – змінне навантаження, яке реалізується багато разів протягом терміну експлуатації споруди і для якого тривалість дії значно менша встановленого терміну експлуатації конструкції *T<sub>ef</sub>*.

**Навантажувальний ефект** – зусилля, напруження, деформації, розкриття тріщин, переміщення або інші механічні параметри стану конструкції чи основи, які викликаються впливами на неї.

**Надзвичайна ситуація** – обстановка на певній території, що склалася в результаті аварії гідротехнічної споруди і, може спричинити або спричинила людські жертви, завдала або може завдати збитки здоров'ю людей або навколишньому природному середовищу чи значні матеріальні витрати і порушення умов життєдіяльності людей.

**Надійність будівельного об'єкта** – властивість об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу.

**Оточуюче середовище** – сукупність природних, соціальних та техногенних умов існування суспільства.

**Оцінка безпеки гідротехнічних споруд** – визначення відповідності стану гідротехнічних споруд і кваліфікації працівників експлуатуючої організації відповідним нормам і правилам.

**Показник безпеки гідротехнічних споруд** – показник, що характеризує властивість гідротехнічних споруд забезпечувати захист життя, здоров'я і законних інтересів людей, навколишнього природного середовища і господарських об'єктів.

**Припустимий рівень ризику аварії гідротехнічних споруд** – значення ризику аварії гідротехнічних споруд, установлене нормативними документами.

**Постійне навантаження** – навантаження, яке діє практично не змінюючись протягом усього терміну експлуатації споруди і для якого можна нехтувати зміною у часі його значень відносно середнього.

**Позаграничний стан** – перевищення межі, встановленої нормами для граничного стану.

**Ремонтопридатність** – пристосованість об'єкта до підтримання і відновлення роботоздатого стану за допомогою технічного обслуговування і ремонту.

**Режим експлуатації нормальний** – режим експлуатації, за якого об'єкт експлуатується в передбачених проектом кліматичних умовах із додержанням режиму виконання передбачених ремонтно-профілактичних робіт

**Роботоздатний стан чи роботоздатність** – технічний стан, за якого об'єкт виконує всі свої функції, зберігаючи при цьому допустимий рівень ризику.

**Розрахункова ситуація** – комплекс умов, який враховується при розрахунку і визначає розрахункові вимоги до конструкції. Розрахункова ситуація характеризується розрахунковою схемою конструкції, видами навантажень, значеннями коефіцієнтів умов роботи і коефіцієнтів надійності, переліком граничних станів, які слід розглядати в даній ситуації.

**Справний стан об'єкта** – такий стан об'єкта, за якого він виконує всі передбачені функції, при цьому на об'єкті регулярно здійснюються ремонтно-профілактичні роботи.

**Схематизоване або еквівалентне розрахункове значення навантаження** – значення з ідеалізованою залежністю від часу, яке встановлюється з умови еквівалентності результатів розрахунку до дії реального процесу навантаження.

**Тривале навантаження** – змінне навантаження, тривалість дії якого може наближатися до встановленого терміну експлуатації конструкції *T<sub>ef</sub>*.

**Характеристичне значення навантаження** – основне чи базове значення навантаження, встановлене в нормах проектування.

**Циклічне розрахункове значення навантаження** – значення навантаження, яке використовується для розрахунків конструкцій на витривалість і визначається як гармонійний процес, еквівалентний за результуючою дією реальному випадковому процесу змінного навантаження.

## ВСТУП

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

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

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

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

видатні значення малої повторюваності (імовірності). Також при використанні імовірнісних методів з'являється можливість урахування кореляційних зв'язків між природними факторами, визначальними з точки зору впливу на гідротехнічні споруди, а саме: між паводковими витратами водотоку, між товщиною льоду у водосховищах каскаду гідроелектростанцій, між температурними впливами по гідровузлах каскаду. Слід зауважити, що існування кореляційних зв'язків між природними факторами притаманне лише таким складним природно-техногенним об'єктам, як гідросистеми.

Важко переоцінити роль гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій у забезпеченні надійної роботи об'єднаної енергетичної системи України. Підсумковий виробіток електроенергії гідроелектростанціями Дніпровського каскаду становить до 90% виробітку усіх гідроелектростанцій України. Водосховища Дніпровського каскаду забезпечують комунально-побутові, промислові і сільськогосподарські потреби більш 50% території України. Тому питання надійної і безпечної експлуатації гідровузлів Дніпровського каскаду, розробка і удосконалення методів оцінки їх надійності і безпеки являються актуальними.

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційного дослідження відповідає загальнодержавній програмі Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», яка затверджена Кабінетом Міністрів України розпорядженням №605-р від 18.08.2017 р. Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури за 2013 – 2018 рр.: «Удосконалення способів розрахунку конструктивних елементів гідротехнічних споруд» – № ДР

0115U005723; «Удосконалення методів статичного і динамічного розрахунків гідротехнічних споруд у детерміністичній та імовірнісній постановках» – № ДР 0116U003337.

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

**Об'єкт дослідження** – мінливість факторів які впливають на надійність і безпеку каскадів гідроелектростанцій.

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

**Задачі досліджень:**

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

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

– в рамках параметричної теорії надійності виконати імовірнісну оцінку надійності загальних і спеціальних типів гідротехнічних споруд на скельових і

нескельових основах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, у тому числі: гребель із ґрунтових матеріалів, бетонних водозливних гребель, гравітаційних стоянів, будівель гідроелектростанцій, будівель монтажних майданчиків, камер і голів шлюзів;

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

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

Питання оцінки довговічності, живучості, ремонтпридатності гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій, а також вплив на їх надійність зміни у часі властивостей матеріалів, дефектів і пошкоджень конструкцій гідротехнічних споруд в даному дослідженні не розглядаються і можуть слугувати предметом подальших досліджень.

**Методи дослідження** – математичне моделювання напружено-деформованого стану гідротехнічних споруд та їх основ із залученням методів механіки суцільного середовища. Методи параметричної і системної теорій надійності комплексів гідротехнічних споруд – гідровузлів, які розглядаються як складні технічні системи. Метод статистичних випробовувань (або метод Монте-Карло) для моделювання навантажень і впливів на гідротехнічні споруди, властивостей матеріалів та основ. Методи теорії імовірності, математичної статистики, які використовуються для аналітичного опису і визначення параметрів функцій розподілів випадкових величин різноманітних природних факторів, для дослідження кореляційних зв'язків між випадковими величинами природних факторів. Загальні методи теоретичних та емпіричних досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:**

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

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

– отримала подальшого розвитку методика імовірнісної оцінки надійності загальних і спеціальних водопідпірних гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності;

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

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

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

**Достовірність положень і висновків дисертації** підтверджена: співставленням результатів власних досліджень із дослідженнями вітчизняних та зарубіжних авторів, даними чисельного моделювання роботи гідротехнічних споруд

та порівнянням їх з результатами натурних досліджень стану гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду; обґрунтуванням передумов використаних для визначення параметрів функцій розподілів природно-кліматичних явищ, які приймалися на основі опрацювання статистичних даних із відкритих джерел. При розробці імовірнісних математичних моделей надійності і безпеки комплексів гідротехнічних споруд, які входять до складу вузлів каскаду гідроелектростанцій застосовано методи механіки деформівного твердого тіла, метод імітаційного моделювання навантажень і впливів на гідротехнічні споруди, методи теорії імовірності і математичної статистики.

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

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

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

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

**Особистий внесок здобувача.** Огляд та аналіз літератури за тематикою дослідження. Збір та аналіз статистичних даних максимальної бальності землетрусів, статистичних даних температурних впливів, статистичних даних вітрових впливів, статистичних даних щорічної максимальної товщини льоду. Підбір та обчислення параметрів функцій розподілів певних випадкових величин:



щорічної максимальної бальності землетрусів, щорічної максимальної низької середньомісячної температури, щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур, щорічних максимальних швидкостей вітру, щорічної максимальної товщини льоду. Дослідження кореляційних зв'язків між такими випадковими величинами: щорічними максимальними паводковими витратами, щорічною максимальною товщиною льоду, щорічними максимальними низькими середньомісячними температурами, щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур. Побудова та застосування узагальненого дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Розробка та застосування алгоритму імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами. Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

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

конструкцій” (м. Одеса, ОДАБА, 15–17 квітня 2013 р.); VI-й Міжнародній науковій конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд” (м. Харків, ХНУБА, 15–17 жовтня 2013 р.); VI-му Всеукраїнському науковому семінарі “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур” присвяченому 100-річчю створення Харківської каналізації (м. Харків, ХНУБА, 15-16 жовтня 2014 р.); IV-й міжнародній науково-технічній інтернет-конференції “Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства” (м. Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 25 листопада–25 грудня 2014 р.); VII-й Міжнародній науковій конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд” (м. Харків, ХНУБА, 20–21 жовтня 2015 р.); VII-му Всеукраїнському науковому семінарі “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур” (м. Харків, ХНУБА, 11–12 жовтня 2016 р.); VI-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті” (м. Харків, УкрДУЗТ, 19–21 квітня 2017 р.); Міжнародній виставці «Інтер-Транспорт» і міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, ОДАБА, 01 червня 2017 р.); VIII-й Міжнародній науковій конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд” (м. Харків, ХНУБА, 18–19 жовтня 2017 р.); VII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті” (Трансбуд-2018), (м. Харків, УкрДУЗТ, 14–16 листопада 2018 р.) (Особиста участь).

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

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 28 наукових праць, з них 27 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 10 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 2 статті у зарубіжних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 1 додаткова публікація; 11 публікацій апробаційного характеру, з яких 1 у матеріалах конференції, що індексується в Scopus.

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

## РОЗДІЛ 1

# ОСНОВНІ ПЕРЕДУМОВИ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ І НАДІЙНОСТІ КАСКАДІВ ГІДРОВУЗЛІВ

### 1.1 Роль гідроенергетики в сучасних умовах і перспективи розвитку гідроенергетики в Україні

Енергетика являється основним рухомим фактором розвитку добробуту населення, економіки і характеризується найбільш високими темпами зростання. Виробництво електроенергії у світі з 1950 по 2000 роки збільшилось у 14 разів, досягнувши 14100 млрд. кВтг, у тому числі за рахунок використання гідроенергетичних ресурсів – 2650 млрд. кВтг, що становить приблизно 19% від усього виробництва електроенергії. Загальне споживання водних ресурсів у світі з 1950 по 2000 роки збільшилось у 5 разів і склало 6000 км<sup>3</sup> [162].

Виробництво електроенергії гідроелектростанціями за рахунок використання відновлюваних гідроенергетичних ресурсів належить до важливих природоохоронних, ресурсозберігаючих технологій і дозволяє запобігти забрудненню навколишнього середовища відходами виробництва альтернативними джерелами видобутку електроенергії.

Важливу роль в об'єднаних енергетичних системах відіграють гідроелектростанції (ГЕС) і гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС). При цьому ГЕС, як за правило, покривають "пікову" частину графіку навантаження енергосистеми. ГАЕС покривають "провальну" частину графіку навантаження і виконують функцію аварійного та навантажувального резервів. Загальноприйнятим у світовій практиці вважається факт, що найбільш ефективно комплексне використання гідроенергетичних ресурсів передбачене на ГЕС із водосховищем [1]. Саме ГЕС із крупними водосховищами комплексного призначення і їх каскади виконують задачі регулювання річкового витоку, утворюють водногосподарські комплекси. При цьому прискорюється розвиток оточуючої інфраструктури й економічне зростання регіону.

Статистичні дані [162] свідчать, що при загальній потужності ГЕС 4.7 млн. кВт освоєно лише 60% економічно ефективного потенціалу. Потужність ГАЕС складає 0.23 млн. кВт, потужність ГАЕС, що будуються – 3.17 млн. кВт. Зі 150 малих ГЕС експлуатуються 50 ГЕС загальною потужністю 0.1 млн. кВт. В Україні на ГЕС виробляється лише 6% від загальної кількості електроенергії й існує дефіцит високоманеврених потужностей.

Концепції стратегії розвитку енергетики України передбачене наступне [228]: розвиток енергетики з оптимізацією структури генеруючих потужностей в об'єднаній енергетичній системі можливий на основі сучасних технологій і обладнання, що забезпечують високу економічну ефективність, надійність, ресурсозбереження, дотримання екологічних вимог; якість електроенергії має відповідати вимогам стандартів, енергосистема повинна мати необхідний аварійний і частотний резерви для забезпечення надійного енергозабезпечення.

Для досягнення цього передбачається: ввести в експлуатацію ГАЕС, що будуються; завершити реконструкцію ГЕС Дніпровського каскаду із збільшенням на 10% їх встановленої потужності; поновити будівництво нових ГЕС із водосховищами комплексного призначення; відновити, реконструювати існуючі малі ГЕС і побудувати нові.

## **1.2 Особливості роботи каскадів гідроелектростанцій і основні фактори, що впливають на їх надійність і безпеку**

Високоєфективним використанням гідроенергетичних ресурсів являється будівництво й експлуатація на річках каскадів гідровузлів, що утворюють єдиний водногосподарський комплекс. У каскад можуть входити різні за призначенням гідровузли, в тому числі і ГЕС. Робота ГЕС у каскаді має певні переваги [162]: можливість найбільш повного зарегулювання річкового витoku; збільшення потужності і виробітки ГЕС; забезпечення роботи ГЕС у "піковій" зоні графіку навантажень у зв'язку з усуненням обмежень по режиму попусків і рівнів води в

нижньому б'єфі. Провідним принципом в усіх країнах світу являється утворення на річках каскадів ГЕС із водосховищами комплексного призначення. У багатьох випадках утворення каскадів ГЕС має вирішальне значення в соціально-економічному розвитку цілих регіонів. Дані по каскадах гідровузлів на великих річках світу наведені в табл. 1 за даними [162].

Таблиця 1.1

## Найкрупніші каскади гідроелектростанцій у світі [162]

№	Країна річка	Кількість ступеней каскаду ГЕС загальна потужність ГЕС, млн. кВт	Об'єм водо- сховища, км <sup>3</sup> повний корисний	Площа дзеркала водосховищ, км <sup>2</sup> Протяжність водосховищ, км	Учасники водно- господар- ського комплек- су
1	Іспанія Тахо	<u>11</u> -	<u>7.6</u> 6.0	<u>0.3</u> 500	Г, І
2	Росія Волга	<u>8</u> 8.6	<u>152.3</u> 70.5	<u>20.7</u> 3000	Г, В, І, Р, С, П, Рк
3	Росія Ангара	<u>4</u> 13.5	<u>334.6</u> 99.9	<u>42.7</u> 1940	Г, В, І, Р, С, Рк
4	Україна Дніпро	<u>6</u> 3.7	<u>43.8</u> 18.4	<u>7.0</u> 860	Г, В, І, Р, С, П, Рк
5	Україна, Молдова Дністер	<u>3</u> 0.8	<u>3.6</u> 2.3	<u>0.2</u> -	Г, В, І, Р, П, Рк
6	Канада, США Колумбія	<u>15</u> -	<u>56.3</u> 20.0	<u>1.5</u> 1500	Г, В, Р, С, Рк
7	США Тенесі	<u>15</u> 4.0	<u>32.4</u> 16.0	<u>3.5</u> 1290	Г, В, Р, С, П, Рк
8	США, Мексика Колорадо	<u>11</u> -	<u>78.2</u> 66.6	<u>1.8</u> 1400	Г, І, П

Примітка: Г – гідроенергетика, В – водопостачання, І – іригація, Р – рибне господарство, П – захист від повеней, С – судноплавство, Л – лісосплав, Рк – рекреація.

Експлуатаційна надійність і безпека споруд каскадів гідровузлів здебільшого визначається сукупністю природних некерованих факторів, під вплив яких підпадають споруди гідровузлів каскадів гідроелектростанцій у процесі будівництва й експлуатації.

Найбільш впливовим фактором на експлуатаційну надійність споруд гідровузлів каскаду безумовно вважається гідрологічний режим річки і гідросистеми каскаду. Гідрологічний режим пов'язаний із необхідністю пропуску повеневих і паводкових витрат через створи споруд гідровузлів каскаду в період будівництва і експлуатації, а також із труднощами, які виникають при недостатньому меженому витокі річки. При каскадному розташуванні водосховищ існує певна залежність між їх водно-енергетичними балансами, що обов'язково потребує планування їх сумісної роботи. Важливість впливу гідрологічного режиму річки на гідросистему каскадів гідровузлів переконливо ілюструється статистичними даними [422], які свідчать, що більше 80% аварій гідротехнічних споруд на гідровузлах в період будівництва відбулись унаслідок недостатньої пропускної спроможності будівельних водоскидів. Більше 60% аварій на греблях із ґрунтових матеріалів відбулось унаслідок переливу води через гребінь греблі, що пов'язано з недостатньою пропускною спроможністю експлуатаційних водоскидів. Недостатній межений виток річки в період експлуатації часто призводить до зниження виробітки ГЕС, унеможливлення роботи річкового транспорту, зменшення витрат води на потреби іригації.

У процесі будівництва й експлуатації гідротехнічні споруди гідровузлів підпадають під вплив кліматичних умов: опадів, дію вітру, температурний вплив, пов'язаний із сезонним коливанням температур повітря і води, під вплив хвиль води, вплив льодових явищ. Унаслідок дії зазначених кліматичних факторів у бетонних спорудах виникають значні температурні напруження, що призводять до появи температурних тріщин, відбуваються руйнівні процеси заморожування-відтавання бетону в районах із суворим кліматом. Особлива небезпека вітрових хвиль полягає у перехльості хвиль через гребінь гребель із ґрунтових матеріалів. Окрім того, з хвильовими явищами пов'язані руйнування кріплень верхових укосів гребель із

грунтових матеріалів, переробка берегів водосховищ із порушенням їх локальної стійкості. Під час значних льодоставів у верхніх і нижніх б'єфах гідровузлів виникають заторно-зажорні явища, що стають чинниками значних повеней, які знижують експлуатаційну надійність споруд гідровузлів. Значні опади або інтенсивне сніготанення призводять до обвальних-зсувних явищ, поверхневої ерозії берегів водосховищ, до різкого зростання води в річці.

У багатьох випадках інженерно-геологічні умови району розташування гідровузла являються визначальними при оцінці їх безпеки і надійності. За статистичними даними [422] 38% руйнувань бетонних гребель спричинили порушення в основі. Ці порушення пов'язані зі зсувом в ослабленій зоні, із неоднорідною деформованістю порід основи, зі збільшенням їх проникності. Негативно на експлуатацію водосховищ впливають фільтраційні втрати внаслідок недостатньої фільтраційної стійкості ґрунтів основи. Слід урахувати зміну фізико-механічних властивостей ґрунтів основи у часі і просторі, зміни властивостей ґрунтів основи після зведення споруд гідровузла і наповнення водосховища.

Сейсмічність району будівництва є достатньо впливовим фактором при проектуванні гідротехнічних споруд. Статистичні дані [422] свідчать про значну сейсмостійкість гідротехнічних споруд. Кількість аварій на греблях із ґрунтових матеріалів унаслідок сейсмічної активності не перевищує 4% від загальної кількості аварій на спорудах такого типу. Бетонні греблі являються ще більш сейсмостійкими. При каскадному розташуванні гідровузлів і водосховищ при оцінці їх надійності сейсмостійкість споруд може бути вирішальним фактором. Це зумовлено появою при землетрусах інерційних навантажень, гідродинамічного тиску води на грані споруд, гравітаційних хвиль у водосховищі, сейсмотектонічних деформацій ложа водосховища, обвальних-зсувних явищ.

Таким чином, одним із важливих аспектів загальної проблеми безпеки являється проблема надійності і безпеки гідротехнічних споруд, у тому числі і споруд гідровузлів каскадів гідроелектростанцій. Важливість цієї проблеми зумовлена широким розповсюдженням гідротехнічних споруд, високим рівнем їх відповідальності, складністю і значною потенційною небезпекою.



Основні передумови оцінки безпеки і надійності каскадів гідровузлів полягають у необхідності урахування впливу природних факторів на сукупність споруд каскаду гідроелектростанцій, при цьому, найбільш важливими природними некерованими факторами слід вважати гідрологічний режим, кліматичні умови, інженерно-геологічні умови (разом із сейсмічним впливом). Обов'язковим є дослідження кореляційного зв'язку між випадковими величинами або випадковими функціями, які характеризують вплив природних факторів на каскад гідровузлів, дослідження їх впливу на експлуатаційний ресурс споруд із урахуванням факту будівництва гідровузлів за нормами проектування із суттєво різними критеріями безпеки і надійності. Постає необхідність вивчення впливу режиму роботи окремого гідровузла на інші гідровузли каскаду, а також каскаду в цілому з урахуванням значної кількості постійно діючих контрольних-вимірних пристроїв і системи зв'язку між гідровузлами каскаду, а також розробка способів оцінки безпеки і надійності експлуатації енергосистеми.

### **1.3 Аналіз статистичних даних аварій гідротехнічних споруд**

Проектування і розрахунок гідротехнічних споруд потребують оцінки їх надійності і безпеки на основі імовірнісних методів [73]. Імовірнісні розрахунки базуються на чіткому розумінні можливої поведінки гідротехнічних споруд у процесі їх будівництва та експлуатації. Зростає роль імовірнісної оцінки ресурсу гідротехнічних споруд у процесі їх проектування і виборі варіантів. Важливим є аналіз статистичної інформації щодо характерних для заданої гідротехнічної споруди руйнувань, пошкоджень, аварій тощо.

Найбільша за обсягами статистика випадків аварій, пошкоджень, руйнувань гідротехнічних споруд наведена у [422], де відображено статистику приблизно по 200 греблях. Серед них 50% гребель розташовано на території США, а інші – по різних континентах планети (окрім країн колишнього СРСР). Згідно з наведеною статистикою 2.20% гребель, що зазнали пошкоджень були побудовані до 1950 року, а 0.5% – побудовані після 1950 року. Найбільший відсоток відмов зазнали греблі

побудовані у 1910 – 1920 рр. При цьому 70% відмов у роботі гребель спостерігалось у перші 10 років після введення у експлуатацію, особливо у перший рік.

Чинником пошкоджень у 21% випадків для бетонних гребель слугували внутрішня ерозія тіла греблі і недостатній опір стійкості на зсув по основі [422].

Стосовно земляних і кам'яно-накидних гребель наведено таку статистику [422]: перелив води через гребінь греблі був первинним чинником пошкоджень у 31% випадків і вторинним чинником у 18% випадків; внутрішня ерозія у тілі греблі була первинним чинником пошкоджень у 15% випадків і вторинним чинником у 13% випадків; чинники на контакті гребля–основа були первинними у 12% випадків і вторинними у 5% випадків.

Для гребель із кам'яної кладки у 43% чинником руйнувань був перелив води через гребінь греблі і у 29% – внутрішня ерозія в основі [422].

Недостатня пропускна спроможність водоскидів бетонних водозливних гребель виявилася первинним чинником їх пошкоджень у 22% випадків і вторинним чинником у 39% випадків [422].

Найбільш вразливими щодо відмов у роботі виявились греблі заввишки до 30м – приблизно 70%, заввишки від 30м до 60м – 22%, заввишки від 60м до 100м – 4%, інші – 4% [422].

Статистичні дані [422] відносно обсягів водосховищ, греблі яких зазнали відмов у роботі виявились такими: найбільша кількість – понад 15% водосховищ об'ємом до 1.0 млн. м<sup>3</sup>; 9% водосховищ об'ємом 40.0 – 100.0 млн. м<sup>3</sup>; 8% водосховищ об'ємом 100.0 – 1000.0 млн. м<sup>3</sup>; по 7% водосховищ об'ємом 8.0 – 16.0 млн. м<sup>3</sup> і 16.0 – 20.0 млн. м<sup>3</sup>, а також 20.0 – 40.0 млн. м<sup>3</sup> відповідно; від 3% до 5% водосховищ об'ємом 1.0 – 2.0 млн. м<sup>3</sup>, 2.0 – 3.0 млн. м<sup>3</sup>, 3.0 – 4.0 млн. м<sup>3</sup>, 4.0 – 8.0 млн. м<sup>3</sup>, 1000.0 – 8000.0 млн. м<sup>3</sup> відповідно (рис. А.1).

Серед гребель що зазнали пошкоджень співвідношення є такими [422]: 81% – греблі із ґрунтових матеріалів; 12% – бетонні гравітаційні греблі; 4% – бетонні

контрфорсні греблі; 2% – бетонні аркові греблі; 1% – бетонні багатоаркові греблі (рис. А.2).

Первинні чинники пошкоджень (рис. А.3): 7% – помилки при проектуванні; 6% – недостатня дослідженість основи; 27% – перевищення силою зсуву розрахункової величини; 7% – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; 20% – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 6% – старіння бетону; 7% – переповнення водосховища стихійного характеру; 20% – пошкодження стоянів стихійного характеру. Вторинні чинники пошкоджень (рис. А.4): 7% – помилки при проектуванні; 7% – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; 7% – надмірні розтягуючі напруження у верховому укосі; 7% – недостатній опір бетону циклічному "заморожуванню – відтаненню"; 7% – надмірна водопроникність бетону; 7% – порушення структурної міцності ґрунтів основи аркових і багатоаркових гребель; 14% – надмірні розтягуючі напруження в тілі гравітаційних і контрфорсних гребель; 44% – інші.

Первинні чинники пошкоджень (рис. А.5): 2% – деформування і випір основи; 4% – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; 10% – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 1% – особливості рел'єфу місцевості; 3% – невдала компоновка гідровузла; 3% – землетрус; 35% – перелив води через гребінь греблі стихійного характеру; 3% – прорив напірного фронту розташованої вище греблі; 4% – руйнування конструкції греблі; 1% – порушення суцільності конструкційних матеріалів тіла греблі; 3% – зміщення ділянок тіла греблі; 2% – руйнування кріплення укосів греблі; 1% – руйнування структурних елементів тіла греблі; 3% – розкриття тріщини; 4% – просочування води крізь тіло греблі; 16% – надмірна фільтрація; 1% – текучість водонасиченого матеріалу тіла греблі; 3% – прорив трубопроводу у тілі греблі; 1% – навмисне руйнування греблі на локальній ділянці для запобігання переповнення водосховища. Вторинні чинники пошкоджень (рис. А.6): 6% – деформування і випір основи; 4% – перевищення силою зсуву розрахункової величини; 2% – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; 6% – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 2% – силовий

вплив на греблю; 2% – зсуви ґрунту біля греблі; 2% – розмивання глини тіла греблі; 2% – вимивання піску з тіла греблі; 2% – особливості рел'єфу місцевості; 2% – гідростатичний тиск, наноси, льод; 9% – атмосферний вплив; 2% – руйнування поблизу греблі; 21% – перелив води через гребінь греблі стихійного характеру; 2% – пошкодження ядра греблі; 2% – порушення суцільності конструкційних матеріалів тіла греблі; 2% – руйнування кріплення укосів греблі; 2% – надмірне навантаження, тріщини, гідравлічні фактори; 8% – розкриття тріщини; 3% – просочування води крізь тіло греблі; 13% – надмірна фільтрація; 2% – текучість водонасиченого матеріалу тіла греблі; 4% – руйнування низового укосу.

Чинники пошкоджень гребель із кам'яної кладки: 14% – прорив напірного фронту розташованої вище греблі; 7% – перевищення силою зсуву розрахункової величини; 7% – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; 29% – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 7% – перевищення протитиску стихійного характеру; 36% – перелив води через гребінь греблі стихійного характеру (рис. А.7).

Первинні чинники пошкоджень водопровідних пригребельних споруд: 4% – пошкодження тунелів або каналів; 9% – надмірна деформація і осідання ґрунтів основи; 5% – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 14% – порушення структурної міцності водоскиду; 27% – недостатня пропускна спроможність водоскиду; 17% – ерозія основи водоскиду; 4% – порушення структурної міцності тунелів або каналів; 4% – надвисокі швидкості течії; 4% – хвильовий вплив; 4% – відмова водопропускної системи; 4% – неадекватне керування механічним обладнанням; 4% – відмова механічного обладнання (рис. А.8). Вторинні чинники пошкоджень (рис. А.9): 3% – надмірна деформація і осідання ґрунтів основи; 3% – впливи механічного характеру; 3% – порушення структурної міцності водоскиду; 47% – недостатня пропускна спроможність водоскиду; 15% – надвисокі швидкості течії; 7% – суфозія; 3% – потрапляння плаваючих тіл; 12% – відмова водопропускної системи; 7% – відмова механічного обладнання.

Додаткові статистичні дані про пошкодження, руйнування, аварії гідротехнічних споруд міститься у [423]. Детальна статистична і хронологічна інформація про аварії, пошкодження і руйнування 32 аркових гребель, побудованих у різних країнах світу в період 1909–1974 рр. наведена у [410]. Дані свідчать, що у 40% випадків чинниками відмов гребель були тріщини силового характеру в тілі гребель.

Аналіз статистичних даних [454, 494] свідчить, що 70% відмов великих гребель притаманні греблям заввишки не більше 30 м. Для гребель заввишки 15–20 м відсоток відмов – 50%, 20 – 25 м – 16%, 25 – 30м – 6%, 30 – 35м – 16%, 40 – 45м – 6%, 45 – 50м – 12%, 55 – 60м – 3% (рис. А.10). Більш 50% відмов таких гребель виникають унаслідок переповнення водосховищ під час повенів і паводків. Значний відсоток відмов гребель обумовлений їх конструюванням без належного інженерного супровіду, недостатньою вивченістю гідрологічних даних.

За інформацією Європейського клубу Всесвітнього комітету з великих гребель [418] статистичні дані по 58-ми насипним греблям у країнах Європи (у тому числі Великобританії) свідчать про наступні чинники руйнувань і пошкоджень: 20% – ерозія у місцях контакту з водопроводящою трубою, безпосередньо у трубі або на виході з неї; 10% – відмова мембрани; 2% – відмова глинистого екрану; 24% – перелам ядра; 25% – неадекватний дренаж; 3% – суфозія ґрунту основи; 9% – неякісна підготовка основи; 3% – військові дії; 4% – інші чинники (рис. А.11).

За даними Європейської економічної комісії організації об'єднаних націй [261] найбільшою за кількістю людських жертв є аварія на гідровузлі Баньцяо (Китай), пов'язана із переливом води через гребінь греблі під час повені у 1975 році, унаслідок чого загинуло ~26000 осіб. Статистичні дані щодо найбільших за кількістю людських жертв аварій гідротехнічних споруд наведено в табл. А.1, ілюстрації аварій гідротехнічних споруд наведено на рис. А.12 – А.16.

Статистична інформація щодо заходів з усунення пошкоджень, руйнувань і аварій гідротехнічних споруд [422] свідчить про наступне:

а) загальні заходи: 0.5% – зниження рівня водосховища; 1.5% – підняття позначки гребеня греблі; 11% – повна реконструкція із збереженням попереднього

дизайну; 12% – повна реконструкція із новим дизайном; 3% – заходів не вжито; 19% – інформація відсутня; 25% – об'єкт виведено із експлуатації;

б) основа: 1.0% – покращення протифільтраційних властивостей;

в) бетонні і кам'яні греблі: 1.5% – реконструкція несівних ділянок;

г) греблі із ґрунтових матеріалів: 0.5% – улаштування водонепроникної основи; 2.5% – заповнення тріщин і порожнин; 9% – реконструкція несівних ділянок; 0.5% – підсилення укосів і берм;

д) водозливні греблі: 1% – відновлення структури бетону; 0.5% – ремонт водозливів; 0.5% – ремонт дренажу; 0.5% – ремонт затворів.

Опрацювання статистичної інформації про основні чинники дефектів, пошкоджень і руйнувань основних типів гідротехнічних споруд дало можливість виявити найбільш вразливі і найменш надійні гідротехнічні споруди, що входять до складу гідровузлів, що дозволить засосувати їх при виконанні розрахунків щодо визначення імовірностей виникнення аварій гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій.

#### **1.4 Сучасний стан розвитку теорії надійності гідротехнічних об'єктів**

Хронологічно розвиток теорії надійності будівельних конструкцій, у тому числі і конструкцій гідротехнічних об'єктів, відбувався паралельно із розвитком теорій надійності у машинобудуванні і електричних системах, що обумовило достатньо потужний обмін результатами. На сьогодні можна відзначати проникнення методів теорії надійності практично в усі галузі науки і техніки.

Особливість теорії надійності об'єктів будівництва полягає у необхідності урахування "стихійних" непередбачуваних кліматичних і експлуатаційних впливів у поєднанні із випадковими міцносними характеристиками будівельних матеріалів.

Перші кроки в напрямі розвитку теорії надійності об'єктів будівництва з точки зору випадковості міцносних характеристик будівельних матеріалів були зроблені в роботах німецького вченого М. Мауера (1926 р.) і пізніше

Н. Ф. Хоциалова (1929 р.). Подальший розвиток теорії надійності у контексті випадкових параметрів навантажень наведений у роботах М. С. Стрілецького (1935 р.).

Першим запровадженням здобутків теорії надійності у будівельні норми колишнього СРСР (1945 р.) було введення коефіцієнтів однорідності, перевантаження і умов роботи конструкцій. Також, вперше були введені три групи межових станів – за міцністю, за деформаціями і за шириною розкриття тріщин. Цю роботу виконувала державна комісія по уніфікації методів розрахунку у складі: М. С. Стрілецький, В. М. Келдиш, О. О. Гвоздєв, В. О. Балдін, І. І. Гольденблат, М. Г. Костюковський, О. М. Попов. Далі метод межових станів отримав назву "напівімовірнісного" методу.

Подальший розвиток теорії надійності пов'язаний із більш тісним запровадженням теорії імовірності, що на початку 50-х років ХХ-го сторіччя відображено у роботах М. С. Стрілецького [363]. На початку 60-х років ХХ-го сторіччя вже були чітко визначені основні положення теорії надійності і імовірнісного методу розрахунку конструкцій, які оперували випадковими величинами із заданими кривими розподілу. Це знайшло відображення у роботах В. В. Болотіна [34], С. Д. Волкова [48], А. Р. Ржаніцина [267]. На той час вже чітко сформувались поняття забезпеченості або надійності, як різниця між приведеною узагальненою міцністю конструкції і узагальненим навантаженням.

Наступним поштовхом у розвитку методів теорії надійності послугувало залучення математичного апарату теорії випадкових функцій, що відображено у роботах І. І. Гіхмана [366–368], А. В. Скорохода [366–368], М. С. Бартлетта [21], Н. А. Лівшица [167], В. С. Пугачьова [167, 255–259], О. О. Свешнікова [285] та ін.

Запровадження методів параметричної і системної теорій надійності до імовірнісних методів розрахунку конструкцій і споруд присвячені роботи Л. Л. Акінфієва [224], І. З. Аронова [224], В. Л. Аршакунна [224], Г. Аугусті [6], А. Баратта [6], Є. М. Беллендіра [45–46], С. Д. Бешелева [23], В. В. Болотіна [27–34], О. І. Вайнберга [37–39], А. Б. Векслера [43], Є. Б. Волкова [47], О. П. Воскобійник [3,

50], Б. В. Гнеденко [58], В. Н. Гордєєва [223], Ф. Г. Гурвіча [23], Д. А. Золотова [96], Д. А. Івашинцова [43, 45–46], І. Н. Іващенко [96], К. Капура [102], Ф. Кашиаті [6], А. П. Кудзіса [159], Х. Кумамото [394], Є. В. Клименка [135], В. М. Карпюка [135], Л. Ламберсона [102], А. І. Лантух-Ляценка [223], О. В. Лужина [170], В. М. Лятхера [173], А. Л. Можевітінова [189], А. О. Мозгового [127, 188, 190–222, 230–231, 369, 471], І. І. Науменко [225], В. А. Пашинського [223], А. В. Перельмутера [223], С. Ф. Пічугіна [223, 239–243, 474–477], В. Д. Райзера [262–264], А. Р. Ржаніцина [49, 267], В. М. Семенкова [96], О. В. Семка [50], Т. А. Сиріцина [47], Д. В. Стефанишина [43, 45–46], Р. С. Судакова [47], І. А. Ушакова [58], О. М. Фінагенова [45–46, 390], Г. Хана [393], Е. Дж. Хенлі [394], С. Шапіро [393], Г. Шпете [399], С. Г. Шульмана [45–46, 390], В. Б. Янчера [173] та ін.

Слід зазначити, що параметрична теорія надійності дозволяє здійснювати оцінку надійності технічного об'єкта за контрольованим параметром. Системна або структурна теорія надійності використовується для оцінки надійності складних технічних систем за показниками надійності елементів з урахуванням характеру взаємозв'язку між ними.

Математичний апарат теорії надійності наведений у роботах Е. Ю. Барзиловича [18], Р. Барлоу [19–20], Ю. К. Беляєва [18], І. А. Біргера [26], Б. В. Гнеденка [56–57], Ф. Джеймса [344], Б. Діллона [75], Д. Драйарда [344], В. Ід'є [344], М. Ліпова [169], Д. К. Ллойда [169], В. А. Светлицького [284], Ф. Прошана [19–20], Ч. Сінгха [75], В. І. Тіхонова [370], Г. Хана [393], С. Шапіро [393] та ін.

Питання імовірнісної оцінки гідрологічних явищ з точки зору їх впливу на надійність гідротехнічних споруд розглянуті у роботах О. І. Вайнберга [38], Ф. В. Залеського [92], А. Ф. Крашнікова [92], А. О. Мозгового [188, 190–194, 197–199], Д. В. Стефанишина [349–350] та ін.

Урахуванню надійності основ при проектуванні гідротехнічних споруд і розробці їх критеріїв безпеки присвячені роботи І. У. Альберта [2], А. Г. Василевського [41], М. М. Єрмолаєва [90], П. Л. Іванова [97], А. А. Кагана [41],



Н. Ф. Кривоногова [41], В. В. Міхеєва [90], С. Є. Могилевської [185–187], Д. Н. Соболева [3], О. І. Флоріна [392] та ін.

Підходи щодо оцінки надійності бетонних гребель, статистичні методи аналізу їх стану з урахуванням натурних даних, розробка критеріїв їх надійності наведені у роботах О. І. Вайнберга [39], С. М. Гінзбурга [53–54], Л. А. Гордона [61], В. П. Гребенщикова [265], І. В. Добрецової [76, 232], В. Н. Дурчевої [86–87], В. Б. Затєєва [61], Е. С. Калустяна [101], Є. В. Капустіна [103], А. Д. Катанова [265], А. В. Караваєва [364], С. Є. Лисичкіна [265], М. А. Майорової [86], А. О. Мозгового [127, 188, 195, 217, 220], А. В. Нефьодова [265], Д. І. Пономарьова [265], О. Д. Рубіна [265], Т. М. Рукавішнікової [54], Н. І. Стефаненка [61], Д. В. Стефанишина [351], В. Б. Судакова [364], В. А. Цибакова [265], Н. Я. Шейнкера [232, 74], А. М. Юделевича [53, 76, 232] та ін.

Підходи щодо оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів з урахуванням ризику переливу води через гребінь греблі та з урахуванням інших природних факторів, статистичні методи аналізу їх стану з урахуванням натурних даних, розробка критеріїв їх надійності і безпеки, урахування стохастичних зв'язків між подіями наведені у роботах Є. М. Беллендіра [22, 269], О. І. Вайнберга [40], С. М. Вороніна [234], В. Б. Глаговського [55], Д. А. Золотова [96], І. Н. Іващенко [96, 98], В. С. Кузнєцова [160–161], Т. Ф. Ліповецької [269], А. О. Мозгового [196, 200, 208, 210, 219–220, 222, 471], Н. Я. Нікітіна [22], Ю. М. Ніколаєва [234], С. І. Панова [234–235], В. В. Пепояна [238], А. В. Прямицького [235], В. Г. Радченка [269], Д. Д. Сапегіна [269], В. М. Семенкова [96], С. В. Сольського [22], Д. В. Стефанишина [352–356], А. П. Троїцького [238], О. М. Фінагенова [55, 391], Р. Р. Чугаєва [395], Г. С. Шульмана [391] та ін.

Надійність водопропускних споруд гідровузлів розглянута у роботах Т. В. Гавриленко [51], Є. М. Дзюбанова [309], Н. Ю. Дмитрієва [309], М. П. Левіна [309], Л. Д. Лєнтяєва [166], Ц. Є. Мірцхулаві [182], Л. В. Смірнова [166], Д. В. Стефанишина [357], В. Б. Штільмана [309] та ін.

Особливості проектування морських гідротехнічних споруд, питання визначення їх надійності, науковий супровід їх проектування наведені в роботах В. Г. Бааджи [270], О. В. Казмирук [274], І. М. Панова [272], С. І. Рогачка [270–275], М. О. Сахненко [273], Г. В. Слободяник [274], Н. В. Шунько [275].

Питання надійності конструктивних елементів гідротехнічних споруд, атомних станцій при сейсмічних впливах розглянуті у роботах А. Н. Бірбраєра [24–25], Л. С. Буторіна [36], В. А. Кіндера [25], С. М. Левіної [164], Б. А. Томашевського [164], Б. В. Цейтліна [25], Г. С. Шульмана [24, 107] та ін.

Інженерно-геологічні та геоєкологічні аспекти надійності і безпеки експлуатації споруд промислової гідротехніки, а також питання забезпечення їх соціально-екологічної безпеки розглянуті у роботах В. Л. Аськова [278], Б. В. Беляєва [278], Р. Є. Дашка [69], В. С. Пепояна [278], Ю. Г. Ротченка [278], Д. В. Стефанишина [358–359], Є. А. Філіпової [278], М. Л. Халенєвої [278], М. А. Шинтемірова [397–398], Г. С. Шульмана [358] та ін.

Надійність технологічного обладнання гідротехнічних споруд розглянута в роботах С. Г. Гордієнка [60], Є. М. Дзюбанова [227], Н. Ю. Дмитрієва [227], В. І. Климовича [227], С. М. Левіної [227], Т. С. Тіхонової [371], В. Б. Штільмана [227, 400], Г. С. Шульмана [404] та ін.

Оцінка надійності і довговічності затворів розглянута у роботах А. Г. Василевського [42], І. В. Мартенсона [174], Д. В. Стефанишина [360], А. Р. Фрейшиста [174], В. Б. Штільмана [42, 401–403], Г. С. Шульмана [124] та ін.

Прогнозування аварійності гідротехнічних об'єктів, забезпечення надійності складних природно-технічних систем, аналіз ризику у гідротехніці розглянуто у роботах Є. М. Беллендіра [179], С. Н. Беякової [389], А. Р. Бешліян [388], Н. Л. Бондарєвої [319], Д. Д. Бредлоу [35], Т. П. Букарінова [180], В. М. Іванова [180], О. Р. Крупнова [389], М. Г. Лопатної [226], А. Я. Мірзаєва [180], Ц. Є. Мірцхулави [181], Н. Я. Нікітіної [179, 226, 319], А. Пальмієрі [35], М. А. Салман [35], С. В. Сольського [319], Д. В. Стефанишина [361–362], О. М. Фінагєнова [388–389] та ін.

Підходи щодо забезпечення надійності і безпеки експлуатації об'єктів гідротехнічного будівництва відображені у нормативних документах [62–66, 72–73, 79, 318]. Зокрема, в [73] наведено допустимі значення імовірностей виникнення аварій на напірних гідротехнічних спорудах різних класів наслідків (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Допустимі значення імовірностей виникнення аварій на напірних гідротехнічних спорудах різних класів наслідків (відповідальності), 1/рік [73]

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	$6 \cdot 10^{-3}$

Питання гармонізації національних стандартів щодо розрахунку і забезпечення надійності залізобетонних конструкцій із закордонними нормами розглянуто в роботах А. М. Бамбури [8–17, 59], А. Я. Барашикова [8], О. П. Воскобійник [419], А. Б. Голишева [59], О. Б. Гурківського [8–9], О. В. Дорогової [10–11], О. М. Калинчук [13], П. І. Кривошеєва [59], О. М. Перлової [15] та ін.

Сучасні методи оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану, розробка критеріїв їх надійності розглянуто у закордонних роботах Р. Voccotti [413], R. Rosso [413], D. S. Bowles [414], K. Douglas [428], M. Spannagle [428], R. Fell [428], F. Lemperiere [454–455], L. A. McDonald [467], J. Serafim [494], Laginha [494], J. A. Charles [418], N. S. Arunraj [412], S. Mandal [412], J. Maiti [412], L. Altarejos-García [468], I. Escuder-Bueno [468], A. Serrano-Lombillo [468], A. Gaspar [469], F. Lopez-Caballero [469], A. Modaressi-Farahmand-Razavi [469], A. Lupoi [457], C. Callari [457], O. Morales-Nápoles [406], D. J. Delgado-Hernández

[406], D. De-León-Escobedo [406], H. Z. Su [498], J. Hu [498], Z. P. Wen [498], L. Peyras [479], C. Carvajal [411, 479 ], H. Felix [479], Z. Y. Wu [411], Y. L. Li [411], J. K. Chen [411], Y. Li [472], Y. Sun [472], B. Li [472], S. E. Cho [420], M. Calamak [416], A. M. Yanmaz [416], M. Alembagheri [407], M. Seyedkazemi [407], M. Westberg [501–503], F. Johansson [503], J. Jeppsson [451], A. Krounis [452], I. M. Idriss [447], T. Matsui [466], K. C. San [466], S. Rahman [480], H. Xu [480], W. Fu [437], Y. Liao [437], Y. M. Cheng [500], W. B. Wei [500], L. Li [500], H. J. Li [456], Y. Y. Zhang [456], Z. W. Yan [456], Z. Cao [417], Y. Wang [417], D. Li [417], F. Tschuchnigg [499], H. F. Schweiger [499], S. W. Sloan [417], X. Guo [485], D. Dias [485] та ін.

У світі існує цілий ряд урядових і науково-дослідницьких організацій, державних і всесвітніх комітетів, які опікуються безпекою гідротехнічних споруд, розробляють керівні принципи проектування та їх експлуатації, здійснюють аналіз аварій і несправностей. Нижче наведено перелік таких організацій, а також проаналізовано документи стосовно надійності об'єктів гідротехнічного будівництва і будівельної галузі зокрема, які знаходяться у відкритому доступі: Об'єднаний комітет по надійності конструкцій (англ. Joint Committee on Structural Safety, JCSS) [444, 448–450]; Міжнародна рада по дослідженням та інноваціям у будівництві (англ. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB); Міжнародна асоціація по залізобетону (англ. International Federation for Structural Concrete, FIB); Міжнародна асоціація по проектуванню мостів, будівель і споруд (англ. International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE); Міжнародний союз лабораторій й спеціалістів в області будівельних матеріалів, систем и конструкцій (фран. Reunion internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, RILEM); Комісія з ядерного регулювання США (англ. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC) [430]; Федеральна агенція по керуванню у надзвичайних ситуаціях (англ. USA, Federal Emergency Management Agency, FEMA) [431–435]; Федеральна комісія з регулювання енергетики (англ. USA, Federal Energy Regulatory Commission, FERC) [429, 478]; Міжнародна комісія з великих гребель (англ. International Commission on Large Dams, ICOLD), (фран.

Commission Internationale des Grands Barrages, CIGB); Федеральна координаційна рада з науки, техніки та технологій (англ. USA, Federal Coordinating Council for Science, Engineering and Technology, FCCSET); Інженерний корпус армії США (англ. United States Army Corps of Engineers, USACE) [438, 441, 489–490, 492, 495, 497, 504]; Департамент внутрішніх справ, США (англ. United States Department of the Interior, DOI) [408, 415, 421, 425–426, 436, 493]; Американське твариство цивільних інженерів (англ. American Society of Civil Engineers, ASCE) [470]; Американський інститут бетону (англ. American Concrete Institute, ACI); Американське товариство тестування та матеріалів (American Society for Testing and Materials, ASTM International); Міжнародна організація стандартів (International Standard's Organization, ISO) [439, 496]; Німецький інститут нормування (нім. Deutsches Institut für Normung, DIN) [409]; Австралійська організація стандартів (англ. Australian standards, AS) [440]; Національна агенція з водних ресурсів федеративної республіки Бразилія (порт. Agência Nacional do Aguas, Brasil) [458–465]; Асоціація професійних інженерів та геоінспекторів Британської Колумбії, Канада (Association of professional engineers and geoscientists of british Columbia, APEGBC, Canada) [424, 446, 453, 491]; Агенція з охорони навколишнього середовища, (англ. Environment Agency, UK) [443]; Французький комітет по греблям і водоймищам (фран. Comité Français des Barrages et Réservoirs, CFBR) [445, 476, 481–484, 486, 488]; Лундський університет, Швеція (англ. Lund University, Sweden) [451, 501–502, 503]; Шведська рада з питань житлового будівництва та планування, Швеція (Swedish Board of Housing, Building and Planning, Sweden) [427]; Королівський технологічний інститут, Швеція (англ. KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden) [452].

Європейські норми [448] у якості стандартного критерію надійності будівельних конструкцій регламентують підсумковий індекс надійності:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f), \quad (1.1)$$

де  $\Phi(\cdot)$  – обернений розподіл Гауса;  $P_f$  – імовірність руйнування.

Іншим еквівалентним критерієм надійності пропонується імовірність виникнення додаткової несприятливої події:

$$P_s = 1 - P_f. \quad (1.2)$$

Імовірність руйнування  $P_f$  обчислюють на основі стандартного розподілу чи стандартизованих формул, які ураховують невизначеність моделі і статистичну невизначеність.

Цільові (мінімально необхідні) значення індексу надійності пропонуються для критичних межових станів (табл. 1.3), а також необоротних межових станів експлуатаційної придатності (табл. 1.4).

Таблиця 1.3

Передбачувані цільові значення індексу надійності  $\beta$  (і відповідні цільові значення швидкості руйнування) для базового періоду часу 1 рік і критичних граничних станів

Відносна вартість заходів безпеки	Незначні наслідки руйнувань	Середні наслідки руйнувань	Значні наслідки руйнувань
Велика (А)	$\beta=3.1 (P_f \approx 10^{-3})$	$\beta=3.3 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-4})$	$\beta=3.7 (P_f \approx 10^{-4})$
Середня (В)	$\beta=3.7 (P_f \approx 10^{-4})$	$\beta=4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta=4.4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-6})$
Мала (С)	$\beta=4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta=4.4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-6})$	$\beta=4.7 (P_f \approx 10^{-6})$

Таблиця 1.4

Передбачувані цільові значення індексу надійності  $\beta$  (та відповідні імовірності) для базового періоду часу 1 рік і необертених граничних станів експлуатаційної придатності

Відносна вартість заходів безпеки	Цільове значення індексу (для необоротних граничних станів експлуатаційної придатності)
Висока	$\beta=1.3 (P_f \approx 10^{-1})$
Середня	$\beta=1.7 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-2})$
Мала	$\beta=2.3 (P_f \approx 10^{-2})$

Гідрологічний режим пов'язаний із забезпеченням надійності гідровузлів і недопущення виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах,

картографування і моделювання ризиків повеней, оцінка економічних ризиків, обґрунтування допустимих гідрологічних ризиків розглянуто в закордонних роботах [409, 429, 433, 436, 446, 470, 482, 488–489, 491–492, 497, 504].

Керівні принципи по забезпеченню експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, плани дій у надзвичайних ситуаціях на гідровузлах викладено в закордонних роботах [317, 424, 429, 430, 431, 434, 442, 453, 458, 489–490, 497, 504].

Моніторинг стану гідротехнічних споруд пов'язаний із ризиком виникнення надзвичайної ситуації, прогнозування остаточного ресурсу, інспектування споруд, контроль стану споруд, сейсмостійкість гідротехнічних споруд, дослідження імовірнісних характеристик ґрунтів основи, питання фільтрації води під гідротехнічними спорудами, протифільтраційні і дренажні пристрої, моніторинг фільтрації під гідротехнічними спорудами представлено в закордонних роботах [317, 408–409, 415, 424, 426, 429–431, 436, 438, 440–442, 458–461, 464, 470, 473, 478, 481, 483–484, 486, 488, 490, 492–493, 495, 497, 504].

Загальні питання нормативно-правової бази забезпечення надійності гідротехнічних споруд, плани дій і рекомендації щодо власників гідротехнічних споруд під час загрози виникнення надзвичайної ситуації, заходи щодо зменшення ризиків, питання аналізу, оцінки і керування ризиками наведено в закордонних роботах [424, 429, 432, 434–435, 442, 445, 459–461, 464–465, 490, 497, 504].

Керівні принципи щодо зменшення ризиків виникнення надзвичайних ситуацій під час проектування, будівництва, експлуатації та виведення із експлуатації гідротехнічних споруд, методологія інженерно-геологічних вишукувань, впливу технології укладання бетону на його властивості, контроль якості, контроль параметрів конструкцій опрацьовано в роботах [408–409, 421, 425–426, 429, 431, 438–444, 446, 448–450, 462–463, 473, 481–483, 486, 489, 491–492, 496, 503–504].

Імовірнісні підходи щодо оцінки ризику в гідротехнічному будівництві регламентуються закордонними нормативно–правовими документами [409, 415,

425, 429–436, 439–440, 443–446, 448–450, 470, 473, 478, 481–482, 486, 491, 493, 495, 496, 497, 504].

У закордонних роботах [427, 451–452, 501–503] пропонуються наведені нижче імовірнісні характеристики для опису характеру поведінки матеріалів, навантажень і впливів на гідротехнічні споруди. Розподіл рівня верхнього б'єфа в залежності від вират (Upstream water head) – нормальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.26H^{0.27}$ , де  $H$  – напір, м. Коефіцієнт протитиску – аналог  $\alpha_2$  (Uplift coefficient) – екстремальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.038$ –0.3. Коефіцієнт (тангенс кута внутрішнього) тертя (Friction coefficient) – нормальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.1203$ –0.22. Питоме зчеплення (Cohesion) - логнормальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.215$ –0.36. Міцність бетону на стискання (Compressive strength of concrete) – нормальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.145$ –0.22. Міцність бетону на розтягання (Tensile strength of concrete) - нормальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.141$ . Модуль деформації бетону (Young's modulus of concrete) – логнормальний розподіл, коефіцієнт варіації  $C_v = 0.115$ .

Першими методами оцінки надійності детерміністичними по формі були метод допустимих напружень, а пізніше – метод руйнуючих навантажень.

Пізніше з'явився, але використовується і сьогодні напівімовірнісний за змістом, але детерміністичний по формі метод граничних станів, згідно з яким урахування випадкового характеру навантажень і впливів, показників властивостей ґрунтів основи, показників властивостей матеріалів, тривалості і умов роботи споруд здійснюється на основі нормативних коефіцієнтів.

Аналіз літературних джерел [38, 43–46, 90, 267] дозволяє зробити висновок, що для імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд можуть бути застосовані наступні методи:

- метод чисельного інтегрування, який може застосовуватись у випадку, якщо сукупний фактор  $Y$  представлено лінійною функцією від узагальненої несучої здатності  $R$  і узагальненого силового впливу  $F$ , тобто справедливо  $Y = R - F$ . Крім того, вважаються відомими функція розподілу і функція щільності імовірності



узагальненої несучої здатності  $R$ , функція розподілу і функція щільності імовірності узагальненого силового впливу  $F$ ;

– метод статистичної лінеаризації, при використанні якого у якості вихідних даних використовується рівняння зв'язку  $Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$ , при якому граничний стан ще не реалізується, а також дані про розподіли випадкових величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ): математичні очікування, дисперсії, середньоквадратичні відхилення, центральні моменти третього і четвертого порядків. Такі самі характеристики визначаються для сукупного фактора  $Y$ . Ризик досягнення межового стану може бути знайдений розкладанням у ряд Грама-Шарл'є;

– метод статистичної параболізації. На відміну від методу статистичної лінеаризації, згідно з яким при розкладанні функції в ряд Тейлора в околі точки, яка відповідає математичному очікуванню випадкового аргументу, утримується два члени ряду, в методі статистичної параболізації утримується три перших члени ряду, тобто окрім лінійних, утримуються нелінійні члени.

– метод статистичних випробовувань (Монте-Карло) передбачає використання у якості вихідних даних рівняння зв'язку  $Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$ , а також функції розподілів випадкових величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Статистичні випробовування виконуються  $N$  разів. При кожному випробовуванні задаються випадкові величини імовірностей випадкових величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , після чого за відомими законами розподілів визначаються квантілі випадкових величин і підставляються у рівняння зв'язку. Імовірність досягнення граничного стану визначається відношенням кількості випробовувань, при яких був досягнутий граничний стан, до їх загальної кількості  $N$ . Виключною особливістю методу статистичних випробовувань є можливість оцінки надійності об'єкта за наявності кореляційних зв'язків між випадковими величинами.

Методи імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд, а саме: чисельного інтегрування, статистичної лінеаризації, статистичної параболізації, статистичних випробовувань згідно з термінологією [79] слід відносити до повністю імовірнісних.

Вибір типу аналітичної функції розподілу здійснюється на основі порівняльної оцінки відповідності аналітичних кривих імовірностей емпіричним даним. Окрім візуальної оцінки при кількості елементів вибірки більш 40, згідно з [178], аналіз відповідності необхідно здійснювати за модифікованим критерієм  $n\omega^2$  (критерій Смирнова-Крамера-фон Мізеса), який визначається за формулою:

$$n\omega^2 = \frac{n}{12(n+1)^2} + \sum_{i=0}^n (p_{0,i} - p_i)^2, \quad (i = 0 \dots n) \quad (1.3)$$

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

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

Іншим важливим критерієм вважається рівень значущості  $\alpha$ . Краща відповідність аналітичних кривих до емпіричних даних спостерігається при більшому значенні критерія  $\alpha$ .

Найбільш впливовими критеріями [178] вважаються: середньоквадратичне відхилення імовірності емпіричних випадкових величин від аналітичної кривої  $\sigma p$ :

$$\sigma p = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=0}^n (p_{0,i} - p_i)^2}, \quad (i = 0 \dots n), \quad (1.4)$$

середньоквадратичне відхилення випадкової емпіричної величини  $X$  від величин, визначених за аналітичною кривою  $X_0$ , яке визначається за формулою  $\sigma X$ :

$$\sigma X = \sqrt{\frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=0}^n (X_{0,i} - X_i)^2}, \quad (i = 0 \dots n). \quad (1.5)$$

Аналіз основних положень методики оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд в рамках системної теорії надійності [38] дозволяє констатувати, що ураховуючи конструктивні і компоновочні особливості гідротехнічних споруд та їх комплексів, можна стверджувати, що при оцінці надійності і безпеки гідротехнічної споруди за методом граничних станів розглядають один або декілька граничних станів. Можливість настання одного з граничних станів може бути пов'язана, або не пов'язана із настанням інших граничних станів. Тому, гідротехнічні споруди слід розглядати у якості системи, яка

складається із певної кількості елементів, кожен з яких відповідає за опір досягненню граничного стану. Крім того, метод статистичних випробовувань може успішно використовуватись для оцінки надійності і безпеки гідротехнічних об'єктів в рамках системної теорії надійності при наявності між елементами системи кореляційних зв'язків [38].

Імовірнісний аналіз ризиків виникнення надзвичайного стану (або аварії) на гідротехнічних спорудах, гідровузлах чи каскадах гідровузлів є більш раціональним на відміну від детерміністичного підходу, заснованого на використанні норм і стандартів. Повний аналіз ризику виникнення надзвичайного стану надає більш повну уяву про надійність гідротехнічного об'єкта, оскільки розглядаються навантаження і впливи в усіх можливих діапазонах, а після оцінки виникнення надзвичайного стану можна дослідити внесок того чи іншого впливу або конструктивного рішення на загальну надійність об'єкта.

Але імовірнісний підхід щодо оцінки надійності не повинен розглядатися у якості заміни традиційним технічним рішенням та експертній оцінці, яка певною мірою залежить від кваліфікації, бази знань і досвіду експертів. Крім того, отримане значення ризику виникнення аварії не є реалістичним очікуванням. Однак, безумовна користь імовірнісного підходу полягає у визначенні відносного базису надійності.

Концепція імовірнісного аналізу може бути застосована для вирішення наступних задач: на етапах проектування об'єктів гідротехнічного будівництва для досягнення сбалансованого дизайну і прийняття рішень в умовах найбільшої невизначеності; на етапі прийняття рішень під час техніко-економічного обґрунтування варіантів розміщення чи компонування гідровузла; під час модернізації існуючих об'єктів гідротехнічного будівництва, з метою оцінки їх залишкового ресурсу; з метою порівняння надійності гідротехнічного об'єкту з рівнем прийнятних критеріїв соціального ризику, регламентованих суспільством.

## 1.5 Висновки за розділом 1 і завдання досліджень

Дослідження нових напрямків розвитку імовірнісних методів розрахунку гідротехнічних споруд, гідровузлів і каскадів засвідчило, що один з перспективних напрямків полягає в урахуванні випадкового характеру природно-кліматичних факторів: гідрологічного режиму, сейсмічного впливу, температурного впливу, вітрового впливу, льодового режиму, у встановленні кореляційних зв'язків між зазначеними природними факторами. Також важливим є розвиток імовірнісних методів в рамках системної теорії надійності, які дають більш об'єктивну оцінку ресурсу узагальненої несівної здатності, а відповідно – надійності і безпеки складних технічних об'єктів, до яких зокрема, можна віднести гідротехнічні споруди каскадів гідроелектростанцій. Зазначені методи здатні урахувувати навантаження і впливи в усьому діапазоні їх дії, у тому числі – видатні значення малої повторюваності (імовірності), саме які і спричиняють аварії на гідротехнічних спорудах.

Метою роботи є розробка методики імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій із залученням імовірнісних математичних моделей в рамках системної теорії надійності.

Огляд методів оцінки надійності і безпеки об'єктів гідротехнічного будівництва дозволяє сформулювати завдання цієї роботи наступним чином:

- дослідити випадковий характер щорічної максимальної бальності землетрусів для географічних місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;

- дослідити випадковий характер щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур для географічних місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;

- дослідити випадковий характер щорічних максимальних швидкостей вітру для географічних місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;

- дослідити випадковий характер щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;
- дослідити кореляційні зв'язки між щорічними максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду;
- дослідити кореляційні зв'язки між щорічною максимальною товщиною льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду;
- дослідити кореляційні зв'язки між щорічними максимальними середньомісячними температурами, а також щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду;
- виконати імовірнісну оцінку надійності основних типів гідротехнічних споруд на скельових і нескельових основах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, у тому числі: гребель із ґрунтових матеріалів, бетонних водозливних гребель, гравітаційних стоянів, будівель гідроелектростанцій, будівель монтажних майданчиків, камер і голів шлюзів в рамках параметричної теорії надійності;
- побудувати дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації (аварії) на кожному гідровузлі Дніпровського каскаду. Побудувати узагальнене дерево відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації (аварії) на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій;
- розробити алгоритм імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності з урахуванням кореляційних зв'язків між природними факторами. Здійснити апробацію алгоритму на гідротехнічних спорудах Дніпровського каскаду гідроелектростанцій;
- впровадити результати досліджень у практику проектування та будівництва.

## РОЗДІЛ 2

### ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИРОДНИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ КАСКАДУ ГІДРОВУЗЛІВ

#### **2.1 Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними**

На території України підвищена сейсмічна активність спостерігається у Карпатських горах, у районі Вранча, у Криму на узбережжі Чорного моря. Найбільша сейсмічна активність Карпатської зони спостерігається в районі вигину Карпатської дуги і в районі Вранча. Більша частина гіпоцентрів землетрусів знаходиться на глибині від 100 до 200 км. Найбільш значні землетруси зафіксовано у 1908, 1912, 1940 рр. [5]. Незначна сейсмічна активність спостерігається по всій довжині Східних Карпат. Епіцентри землетрусів Кримської зони зосереджені в межах континентального схилу Чорного моря у південно-східному напрямку від м. Ялти. Гіпоцентри землетрусів знаходяться на глибині від 10 до 40 км. Найбільш значні землетруси зафіксовано у 1927, 1932, 1934, 1949, 1957 рр. [5].

Перші достовірні дані про землетруси на території України датуються 1091 роком [88]. Інформація про давні землетруси представлена в літературних джерелах [88–89]. Інтенсивність землетрусів оцінена авторами [88–89, 168] за характером руйнування будівель, деформаціями ґрунту та ін. Опис землетрусу містить його час, координати, назву епіцентральної області, глибину гіпоцентру, магнітуду, енергетичний клас. Однак дані про землетруси на території України до другої половини XIX сторіччя не можна вважати достовірними. Лише у другій половині XIX сторіччя почали проводитись інструментальні обстеження епіцентральної області потужних руйнівних землетрусів. Перші сейсмічні станції на території Російської імперії – м. Пулково, м. Єкатеринбург, м. Макіївка, м. Тифліс, м. Баку, м. Ташкент, м. Іркутськ почали проводити регулярні інструментальні

спостереження за землетрусами з 1912 року. До 1957 року на території колишнього СРСР працювало 78 стаціонарних сейсмічних і геофізичних станцій.

Перша сейсмічна шкала інтенсивності землетрусів була запропонована італійцем Поарді у 1627 році [279]. У XVIII і XIX сторіччях з'являється значна кількість шкал землетрусів: Д. Пігнатаро (1783 р.), Д. Брукс (1811 р.), П. Еген (1828 р.), П. Макферлан (1839 р.), А. Петерман (1856 р.), Р. Маллет (1858 р.), Р. Вільямсон (1870 р.). Італієць М. Россі і швейцарець Ф. Форель (1883 р.) запропонували десятибальну шкалу, яка набула поширення в Росії. Японцем Ф. Оморі (1900 р.) запропоновано семибальну шкалу, бали якої мали градацію за величиною прискорення ґрунту. Міжнародна сейсмічна асоціація у 1917 році прийняла 12-ти бальну шкалу Меркалі-Канкані-Зіберга, якою європейські країни користуються і сьогодні. У США в 1931 році Г. Вудом і Ф. Ньюманом запропоновано 12-ти бальну шкалу – "модифіковану шкалу Меркалі" або "шкалу ММ". Ф. Оморі (1920 р.) опубліковано нову шкалу, в якій землетруси поділяються за силою на шість категорій. М. Ішимото (1932 р.) вніс у цю шкалу величини коливань ґрунту. Остання редакція шкали проведена у 1950 р. У СРСР у 1931 р. як стандарт була затверджена 12-ти бальна шкала ОСТ ВКС-4537. У 1952 р. інститутом фізики Землі АН СРСР розроблена нова 12-ти бальна шкала ГОСТ 6249-52. У 1956 р. в Китаї прийнята 12-ти бальна шкала, аналогічна до шкали інституту фізики Землі АН СРСР (1952 р.). У СРСР у 1964 р. прийнята 12-ти бальна сейсмічна шкала MSK-64 авторів С. В. Медведєва, В. Шпонхойєра, В. Карніка. За основу взяті шкали Меркалі-Канкані-Зіберга й інституту фізики Землі АН СРСР. Опис наслідків землетрусів за шкалою MSK-64 диференційовано за розділами: відчуття населенням, поведінка тварин; пошкодження будівель і споруд; остаточні явища у ґрунтах, зміни режиму наземних і ґрунтових вод. Шкала MSK-64 на території колишнього СРСР використовується і сьогодні.

Для класифікації землетрусів за потужністю та оцінки їх впливу на середовище використовують наступні характеристики:

– макросейсмічна бальність  $I_0$ , пов'язана зі струсами поверхні ґрунтів в епіцентральної зоні;

- енергетичний клас землетрусу  $K = \lg E$ , де  $E$  – енергія, що звільнилась під час землетрусу, Дж;
- магнітуда  $M = \lg A$ , де  $A$  – амплітуда переміщень за даними сейсмографа на відстані 100 км від епіцентру землетрусу;
- геометричні характеристики наслідків землетрусу – довжина, ширина, глибина розриву, відносні переміщення ґрунту;
- силові характеристики – напруження на розриві, сейсмічний момент;
- статистичні та часові характеристики – сейсмічна активність або повторюваність землетрусів заданої величини у гіпоцентрі, ступінь ризику.

Емпіричні залежності між інтенсивністю (бальністю), магнітудою та енергетичним класом землетрусу наведені у [93, 177, 260, 307]. Вони отримані М. В. Шебаліним за результатами вивчення значної кількості (більше 250) землетрусів на території колишнього СРСР і представлені у вигляді:

$$I_0 = 1.5 M - 3.5 \lg h + 3.0, \quad \text{при } 0 < h < H_a, \quad (2.1)$$

$$I_0 = 1.5 M - 3.4 \lg h + 5.4, \quad \text{при } H_a < h < 640 \text{ км}, \quad (2.2)$$

де  $I_0$  – інтенсивність (бальність) землетрусу;  $M$  – магнітуда землетрусу;  $h$  – глибина гіпоцентру землетрусу;  $H_a$  – глибина, яка в середньому становить 80 км.

Для оцінювання енергії землетрусу в 60-х роках ХХ сторіччя Гутенбергом, Ріхтером, С. Соловйовим [93] пропонувались співвідношення:

$$\lg E \approx (11.5 \div 12) + 1.5 M, \quad (2.3)$$

де  $E$  – енергія землетрусу, ерг.

Статистичні дані сейсмічної активності території України – Карпатських гір, району Вранча, Криму опрацьовано за період з 1578 по 2006 р.р. До 1908–1912 років сила землетрусу встановлювалась за руйнівними наслідками землетрусів, здобутими з архівних літературних джерел [89]. З 1908–1912 років сила землетрусів вимірювалась сейсмостанціями. Результати спостережень публікувались у збірниках наукових праць Академії наук СРСР, Інституту фізики Землі ім. О. Ю. Шмідта, Академії наук УРСР, Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна, Академії наук Молдавської РСР, Інституту геофізики і геології [80–85, 94–95, 104–126, 136, 138–



156, 244–246, 286–306, 308]. Опрацьовані результати сейсмічної активності Карпатських гір, району Вранча, Криму дозволили отримати залежності між макросейсмічною бальністю  $I_0$ , енергетичним класом землетрусу  $K$  і магнітудою  $M$  для вказаних районів. Також оцінено вплив глибини гіпоцентру землетрусу на його характеристики.

Для району Вранча отримано такі залежності:

$$I_0 = 1.5 M - 4, \quad \text{при } h = 100 \text{ км}, \quad (2.4)$$

$$I_0 = 1.5 M - 4.3, \quad \text{при } h = 120 \text{ км}, \quad (2.5)$$

$$I_0 = 1.5 M - 4.6, \quad \text{при } h = 150 \text{ км}, \quad (2.6)$$

де  $I_0$  – бальність землетрусу за шкалою MSK-64;  $M$  – магнітуда землетрусу;  $h$  – глибина гіпоцентру землетрусу,

$$I_0 = 0.83 \lg E - 6.91, \quad \text{при } h = 100 \text{ км}, \quad (2.7)$$

$$I_0 = 0.83 \lg E - 7.21, \quad \text{при } h = 120 \text{ км}, \quad (2.8)$$

$$I_0 = 0.83 \lg E - 7.51, \quad \text{при } h = 150 \text{ км}, \quad (2.9)$$

де  $E$  – енергетичний клас землетрусу.

Для району Карпатських гір і Криму отримано:

$$I_0 = 1.5 M - 1.55, \quad \text{при } h = 20 \text{ км}, \quad (2.10)$$

$$I_0 = 0.83 \lg E - 2.4, \quad \text{при } h = 5 \text{ км}, \quad (2.11)$$

$$I_0 = 0.83 \lg E - 3.4, \quad \text{при } h = 10 \text{ км}, \quad (2.12)$$

$$I_0 = 0.83 \lg E - 4.4, \quad \text{при } h = 20 \text{ км}, \quad (2.13)$$

$$I_0 = 0.83 \lg E - 5.1, \quad \text{при } h = 30 \text{ км}. \quad (2.14)$$

Перехід від бальності землетрусів старих років до магнітуди здійснювався за формулою Шебаліна М. В. [93].

Статистичні дані про землетруси Кримсько-Чорноморського регіону, району Карпат і району Вранча наведено в табл. Б.1. Застосування статистичних методів зумовлено фізичною сутністю сейсмічних явищ і процесів, які є результатом значної кількості непрогнозованих природних факторів. Аналіз джерел свідчить, що для математичного опису природних факторів найбільше поширення отримали: біноміальний розподіл, трьохпараметричний гамма-розподіл, логарифмічно-нормальний розподіл, геометричний розподіл,  $\chi^2$  розподіл та інші. Для

згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу бальності землетрусів застосовано математичні криві, які найбільш повно відображають характеристики мінливості сейсмічної активності – трьохпараметричний гамма-розподіл, нормальний і логарифмічно-нормальний розподіли.

Трьохпараметричний гамма-розподіл розроблений в середині ХХ сторіччя С. М. Крицьким і М. Ф. Менкелем. Він активно застосовується у гідрології для дослідження характеристик річкового витоку.

Рівняння трьохпараметричного гамма-розподілу має вигляд:

$$f(x) = \left( \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{x}|b|\Gamma(\gamma)} \left( \frac{x}{\bar{x}} \right)^{\frac{\gamma}{b-1}} \exp \left\{ - \left[ \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \cdot \frac{x}{\bar{x}} \right]^{\frac{1}{b}} \right\}, \quad (2.15)$$

де  $\gamma$  та  $b$  – параметри, пов'язані трансцендентними рівняннями із параметрами  $C_v$  і  $C_s$ ;  $C_v$  – коефіцієнт асиметрії;  $C_s$  – коефіцієнт варіації;  $\Gamma(\gamma)$  – гамма-функція,  $x$  – випадкова величина, що досліджується;  $\bar{x}$  – середнє значення  $x$  (або його математичне очікування).

Для визначення параметрів трьохпараметричного гамма-розподілу статистичних даних сейсмічної активності застосовано метод найбільшої правдоподібності. Також для статистичної обробки сейсмічної активності застосовано логарифмічно-нормальний розподіл. Якщо  $y = \ln(x)$  має нормальний розподіл з математичним очікуванням  $\bar{y}$  і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$ , тоді випадкова величина  $x$  має логарифмічно-нормальний розподіл із щільністю розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(\ln(x) - \bar{y})^2}{2\sigma^2} \right], \quad x \geq 0, \quad (2.16)$$

причому, зв'язки між математичними очікуваннями  $M$  і дисперсіями  $D$  нормально розподіленої величини  $y = \ln(x)$  і величини  $x$  мають вигляд:

$$M_y = M_{\ln(x)} = \bar{y}, \quad D_y = D_{\ln(x)} = \sigma^2, \quad (2.17)$$

$$M_x = M_{e^y} = \exp\left(\bar{y} + \frac{\sigma^2}{2}\right), \quad (2.18)$$

$$D_x = \exp(2\bar{y} + \sigma^2)(\exp \sigma^2 - 1), \quad (2.19)$$

$$\bar{y} = \ln \bar{x} - \frac{\sigma^2}{2}, \quad (2.20)$$

$$\sigma^2 = \ln \left[ 1 + \frac{D_x}{(\bar{x})^2} \right]. \quad (2.21)$$

Результати розрахунків ймовірності щорічної максимальної бальності землетрусів за трьохпараметричним гамма-розподілом і логарифмічно-нормальним розподілом наведені на рис. Б.1 – Б.6.

Для оцінки точності результатів розрахунків обчислені значення середньоквадратичного відхилення ймовірностей, визначених за аналітичною кривою забезпеченості, від ймовірностей, визначених за емпіричною кривою забезпеченості  $\sigma p$ , % і значення середньоквадратичного відхилення бальності, що визначена за аналітичною кривою забезпеченості, від зафіксованої бальності  $\sigma J$ , % [178]. Результати статистичного опрацювання даних максимальної щорічної бальності землетрусів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Оцінка точності розрахунків максимальної щорічної бальності землетрусів

№	Район, період спостережень	Максимальне значення $J_{max}$ , бали	Трьохпараметричний гамма-розподіл		Логарифмічно-нормальний розподіл	
			$\sigma p$ , %	$\sigma J$ , %	$\sigma p$ , %	$\sigma J$ , %
1	Район Вранча, 1578 - 2006 р.	10.1	4.67	0.3	4.01	0.3
2	Район Вранча, 1908 - 2006 р.	8.2	6.71	0.3	5.95	0.3
3	Карпатські гори, 1578 - 2006 р.	11.0	5.4	0.2	5.19	0.3
4	Карпатські гори, 1908 - 2006 р.	9.0	5.32	0.2	3.83	0.2
5	Район Криму, 1578 - 2006 р.	9.0	4.9*	0.2*	5.06	0.2
6	Район Криму, 1908 – 2006 р.	8.2	6.16	0.3	5.35	0.3

Примітка: \* - параметри нормального розподілу

Отримано залежності між макросейсмічною бальністю  $I_0$ , енергетичним класом землетрусу  $K$  і магнітудою  $M$  для вказаних районів. Оцінено вплив глибини

гіпоцентру землетрусу на вказані характеристики землетрусу. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу бальності землетрусів сейсмічної активності Карпатських гір, району Вранча, Криму, зафіксованих у період з 1578 р. по 2009 р. застосовано трьохпараметричний гамма-розподіл і логарифмічно-нормальний розподіл, отримано їх параметри. За оцінкою точності результатів розрахунків встановлено, що найбільш повно відображає характеристики мінливості сейсмічної активності логарифмічно-нормальний розподіл.

## **2.2 Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функцій розподілу температурних впливів за статистичними даними**

Відповідно до нормативних документів [73, 314], які регламентують основні підходи щодо проектування гідротехнічних споруд, що входять до складу гідровузлів, до навантажень і впливів входять:

а) температурні впливи будівельного та експлуатаційного періодів, що визначені для року із середньою амплітудою коливання середньомісячних температур зовнішнього повітря [73];

б) температурні впливи будівельного та експлуатаційного періодів, що визначені для року з найбільшою амплітудою коливання середньомісячних температур зовнішнього повітря [73];

в) температурні впливи при розрахунках бетонних гребель на особливі сполучення навантажень і впливів, що визначені для року з максимально низькою середньомісячною температурою зовнішнього повітря [314].

Для виконання розрахунків щодо визначення надійності і безпеки гідротехнічних споруд на основі імовірносних методів [73] необхідно мати статистичні дані температурних впливів різної забезпеченості.

Рекомендовані як нормативні дані стосовно температурних впливів на території України наведено у [78, 310]. Середня температура повітря по місяцях і за рік характеризує температурний режим із забезпеченістю 0.5. Ці дані обчислено за період

спостережень 1881–1960 рр. [310]. Дані щодо абсолютних мінімальних і абсолютних максимальних температур повітря надані із забезпеченістю 1.0 за період спостережень 1891–1964 рр. [310]. Амплітуда температури повітря наведена із забезпеченістю 0,5 за період спостережень 1936–1960 рр. Крім того, відсутні дані по конкретних населених пунктах розташування гідровузлів Дніпровського каскаду. Згадані нормативні документи не містять вичерпних даних для виконання оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідровузлів на основі імовірносних методів.

Статистичні дані температурних впливів по території України наведено у [7, 67–68, 128–134, 137, 163, 184, 229, 236–237, 321–343, 345–348]. Найбільш повні дані про температуру повітря на території Російської імперії і території України до 90-х років XIX сторіччя містяться у [229]. За період з початку XX сторіччя до кінця 30-х років подібні дані містяться у [130–133], а з початку 40-х до кінця 80-х років XX сторіччя дані наведено у [137, 163, 184, 236]. Дані про температуру на території України – басейну р. Дніпро з 1959 по 1964 рр. наведено у гідрологічних щорічниках [338–343], а з 1966 по 1983 рр. – в агрометеорологічних щорічниках по території Української РСР [321–337]. Повні архівні дані за весь період спостережень зберігаються у Центральній геофізичній обсерваторії (м. Київ). З 2002 по 2011 рр. щоденні кліматичні характеристики на території України розміщено на сайті Міністерства з надзвичайних ситуацій.

Опрацювання довідкової літератури дозволило побудувати вибірки щорічних максимально низьких середньомісячних температур і щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду, а саме: у м. Вишгород за період спостережень 1812–1847, 1852–2010 рр.; у м. Канів – 1899, 1959–1964, 1966–1983, 2003–2010 рр.; у м. Кременчук – 1966–1983, 2002–2010 рр; у м. Кам'янське – 1839–1842, 1850–1853, 1855, 1883, 1887–1915, 1959–1964, 1966–1983, 2002–2010 рр.; у м. Запоріжжя – 1850–1855, 1952–1955, 1966–1977, 1979–1982, 2002–2010 рр; у м. Нова Каховка – 1826–1852, 1882–1915, 1959–1964, 1966–1983, 2002–2010 рр. (табл. Г.1–Г.8).

У гідрометеорології застосовують біноміальний, Пірсона III типу, Крицького-Менкеля, Джонсона, Дмитрієва, Грамма-Шарльє, нормальний, логнормальний розподіли: [99]. Для імовірносної оцінки щорічної максимально низької середньомісячної температури застосовано біекспоненціальний і нормальний розподіли, а для щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур – нормальний і логнормальний розподіли. Результати розрахунків імовірності  $p, \%$  щорічної максимально низької середньомісячної температури  $t, ^\circ\text{C}$  наведено на рис. Д.1–Д.6, щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур  $\Delta t, ^\circ\text{C}$  наведено на рис. Д.7–Д.12. Параметри функцій розподілу імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури наведено в табл. 2.2, щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур – в табл. 2.3. Для оцінки точності результатів розрахунків обчислені значення середньоквадратичного відхилення імовірностей, визначених за аналітичною кривою забезпеченості, від ймовірностей, визначених за емпіричними даними  $\sigma p, \%$ , і значення середньоквадратичного відхилення температури (або амплітуди), що визначена за аналітичною кривою забезпеченості, від зафіксованої температури  $\sigma t, \%$  або  $\sigma \Delta t, \%$ .

Таблиця 2.2

Параметри функцій розподілу імовірності щорічної максимально  
низької середньомісячної температури

№	Район спостережень	Нормальний розподіл	
		Математичне очікування	Середньоквадратичне відхилення
1	м. Вишгород	-5.64	3.709
2	м. Канів	-4.82	3.348
3	м. Кременчук	-4.63	3.232
4	м. Кам'янське	-5.62	3.454
5	м. Запоріжжя	-4.65	3.705
6	м. Нова Каховка	-3.30	3.518

Таблиця 2.3

Параметри функцій розподілу імовірності щорічної максимальної  
амплітуди середньомісячних температур

№	Район спостережень	Нормальний розподіл		Логарифмічно-нормальний розподіл	
		Математичне очікування	Середньоквадратичне відхилення	Математичне очікування	Середньоквадратичне відхилення
1	м. Вишгород	25.16	3.74	25.16	1.16
2	м. Канів	24.59	3.73	24.59	1.16
3	м. Кременчук	25.77	3.44	25.77	1.17
4	м. Кам'янське	27.43	4.01	27.43	1.16
5	м. Запоріжжя	27.00	4.19	27.00	1.16
6	м. Нова Каховка	26.72	3.70	26.72	1.16

Результати оцінки точності розрахунків ймовірності щорічної максимальної середньомісячної температури за порівнянням параметрів  $\sigma_p, \%$  та  $\sigma_t, \%$  наведено в табл. 2.4, а оцінки точності розрахунків ймовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.4

Результати оцінки точності розрахунків імовірності щорічної  
максимально низької середньомісячної температури

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

Результати оцінки точності розрахунків імовірності щорічної  
максимальної амплітуди середньомісячних температур

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

За результатами оцінки точності розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду можна зробити наступні висновки:

а) імовірності щорічних максимально низьких середньомісячних температур у м. Вишгород, м. Кам'янське, м. Запоріжжя, м. Нова Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом;

в) імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Канів може бути представлена біекспоненціальним розподілом;

б) імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Кременчук може бути представлена біекспоненціальним або нормальним розподілами;

в) враховуючи, що біекспоненціальний розподіл більш складний у практичному застосуванні, на відміну від нормального розподілу, а точність визначення імовірності за обома законами суттєво не відрізняється, то у практичних розрахунках для визначення імовірностей щорічних максимально низьких



середньомісячних температур у м. Канів, м. Кременчук може бути застосований нормальний розподіл;

д) імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Вишгород, м. Кам'янське, м. Нова Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом;

е) імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Канів, м. Кременчук, м. Запоріжжя можуть бути представлені логарифмічно-нормальним або нормальним розподілами.

### **2.3 Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функцій розподілу вітрових впливів за статистичними даними**

Відповідно до нормативних документів [73, 312–313], які регламентують основні підходи щодо проектування гідротехнічних споруд, до навантажень і впливів входять: навантаження і впливи від максимальних хвиль, вітрові хвилі і вітровий нагін 1%, 2%, 4% (в залежності від класу споруди) імовірності перевищення у системі розрахункового шторму.

Для виконання розрахунків щодо визначення надійності і безпеки гідротехнічних споруд на основі імовірносних методів [73] необхідно мати статистичні дані вітрових впливів різної забезпеченості.

Рекомендовані як нормативні дані щодо вітрових впливів на території колишнього СРСР і України наведено у [78, 310, 312]. У нормативному документі [312] рекомендується визначати просторові характеристики вітру із забезпеченістю за режимом 1%, 2%, 4% за даними натурних досліджень, а при їх відсутності – за даними синоптичних карт для заданої географічної широти, які побудовані для усєї території колишнього СРСР. Стосовно вітрових впливів у [310] подано наступне: повторюваність напрямів вітру у відсотках від загальної кількості випадків; середня швидкість вітру по румбах; максимальна із середніх швидкостей вітру за січень та

мінімальна із середніх швидкостей вітру по румбах за липень. Сучасним нормативним документом, який регламентує вітрові впливи на території України, слід вважати [71]. В ньому детально охарактеризовано вітрові впливи практично в усіх населених пунктах України, надано рекомендації по застосуванню наведених даних у імовірносних розрахунках надійності і безпеки будівель і споруд.

Найбільш вичерпні дані про максимальні щорічні швидкості вітру на території України у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду міститься у [4, 320]. У джерелах [7, 133–134, 137, 175–176] дані наведено по окремих місцях розташування гідровузлів за незначні періоди спостережень. Статистичні дані наведено у табл. Е.1–Е.7. Повні гідрометеорологічні архівні дані за весь період спостережень зберігаються в Центральній геофізичній обсерваторії (м. Київ). З 2002 по 2011 рр. щоденні кліматичні характеристики на території України розміщено на сайті Міністерства з надзвичайних ситуацій.

Математична обробка статистичних даних [4, 320] температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду дозволила побудувати вибірки щорічних максимальних швидкостей вітру у географічних місцях розташування гідровузлів. За даними [99] у якості теоретичних розподілів у гідрометеорології часто застосовують такі: біекспоненціальний (Гумбеля), біномінальний, Пірсона III типу, Крицького-Менкеля, Джонсона, Дмитрієва, Грамма-Шарльє, нормальний, логарифмічно-нормальний,  $U$  – подібний, Гудріча. Для імовірносної оцінки щорічної максимальної швидкості вітру в даній роботі застосовано нормальний і логарифмічно-нормальний розподіли. Результати розрахунків імовірності неперевикнення  $p, \%$  щорічної максимальної швидкості вітру  $V_{max}$ , м/с наведено на рис. Ж.1–Ж.6. Параметри функцій розподілу імовірності неперевикнення  $p, \%$  щорічної максимальної швидкості вітру наведено в табл. 2.6.

Для оцінки точності результатів розрахунків обчислені значення середньоквадратичного відхилення імовірностей, визначених за аналітичною кривою забезпеченості, від ймовірностей, визначених за емпіричною кривою забезпеченості  $\sigma p, \%$  і значення середньоквадратичного відхилення швидкості вітру, що визначена за аналітичною кривою забезпеченості, від зафіксованої швидкості

вітру  $\sigma V_{max}$ ,%. Результати оцінки точності розрахунків неперевикнення  $p$ ,% щорічної максимальної швидкості вітру за порівнянням параметрів  $\sigma p$ ,% та  $\sigma V_{max}$ ,% наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.6

Параметри функцій розподілу імовірності щорічної  
максимальної швидкості вітру

№	Район спостережень	Нормальний розподіл		Логарифмічно-нормальний розподіл	
		Математичне очікування	Середньоквадратичне відхилення	Математичне очікування	Середньоквадратичне відхилення
1	м. Вишгород	21.0	4.75	21.0	1.22
2	м. Канів	20.0	3.9	20.1	1.18
3	м. Кременчук	20.5	4.0	19.9	1.21
4	м. Кам'янське	21.0	3.65	20.9	1.18
5	м. Запоріжжя	24.0	4.7	23.5	1.22
6	м. Нова Каховка	23.0	3.7	22.8	1.16

Таблиця 2.7

Результати оцінки точності розрахунків щорічної максимальної  
швидкості вітру

№	Район спостережень	Нормальний розподіл		Логарифмічно-нормальний розподіл	
		$\sigma p$ , %	$\sigma V_{max}$ , %	$\sigma p$ , %	$\sigma V_{max}$ , %
1	м. Вишгород	0.25	0.1	0.52	0.2
2	м. Канів	1.0	0.2	0.8	0.2
3	м. Кременчук	2.88	0.6	2.18	0.6
4	м. Кам'янське	1.69	0.3	1.92	0.5
5	м. Запоріжжя	2.53	0.4	2.59	0.5
6	м. Нова Каховка	1.89	0.4	1.69	0.3

При застосуванні підходів визначення максимальної швидкості вітру за методиками, наведеними у [71], отримано наступні результати. Характеристичне значення вітрового тиску  $W_0$ , надане у Додатку Е [71], для географічних місць розташування Дніпровського каскаду дозволило визначити максимальні швидкості вітру 98% імовірності або 2% забезпеченості за формулою:

$$W_0 = 0,613 \cdot V_0^2, \quad (2.22)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{W_0}{0,613}}. \quad (2.23)$$

Аналіз максимальних швидкостей вітру 2% забезпеченості, отриманих за [71] і опрацьованих за результатами розрахунків імовірності щорічної максимальної швидкості вітру, наведено у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8.

## Аналіз максимальних швидкостей вітру 2% забезпеченості

№	Район спостережень	Швидкість вітру, м/с забезпеченістю 2%		
		За даними [71]	Нормальний розподіл	Логарифмічно-нормальний розподіл
1	м. Вишгород	24.6	30.8	31.6
2	м. Канів	25.9	28.0	28.2
3	м. Кременчук	26.6	28.7	29.4
4	м. Кам'янське	27.8	28.5	29.3
5	м. Запоріжжя	27.5	33.7	35.4
6	м. Нова Каховка	27.5	30.6	30.9

Різниця між значеннями, отриманими за даними [71] і опрацьованими за нормальним і логарифмічно-нормальним розподілами, пояснюється тим, що дані [71] відображають середню (статичну) складову вітрового впливу на відміну від даних, отриманих прямими замірами швидкості вітру [4, 320].

У якості прикладу визначимо за методикою, наведеною у [71], 1%, 2%, 4% забезпеченості максимальних швидкостей вітру для м. Київ:

а) забезпеченість 1%: по табл. 9.2 [71] для  $P = 0.99$ ,  $K_p = 99,5$ . За формулою (9.6) [71]: при строку експлуатації  $T_{ef} = 100$  років за п. 2.3.10 [73] обчислюємо середній період повторюваності межового значення вітрового навантаження:  $T = T_{ef} \cdot K_p = 100 \cdot 99,5 = 9950$  (років). По табл. 9.1 [71] знаходимо  $\gamma_{fm} = 1.45$ . За формулою (9.1) [71] з урахуванням співвідношень (2.22–2.23) у припущенні  $C = 1$  за п. 9.7 [73] отримаємо:

$$V_{1\%} = \gamma_{fm} \cdot V_0 \cdot C = 1,45 \cdot 24,6 \cdot 1 = 35,67 \text{ м/с.} \quad (2.24)$$

б) забезпеченість 2%: по таблиці 9.2 [71] для  $P = 0.98$ ,  $K_p = 79,5$ . За формулою (9.6) [71]: при строку експлуатації  $T_{ef} = 100$  років за п. 2.3.10 [73] обчислюємо середній період повторюваності межового значення вітрового навантаження:  $T = T_{ef} \cdot K_p = 100 \cdot 79,5 = 7950$  (років). По табл. 9.1 [71] знаходимо  $\gamma_{fm} = 1.45$ . За формулою (9.1) [71] з урахуванням співвідношень (2.22–2.23) у припущенні  $C = 1$  за п. 9.7 [73] отримаємо:

$$V_{2\%} = \gamma_{fm} \cdot V_0 \cdot C = 1,45 \cdot 24,6 \cdot 1 = 35,67 \text{ м/с.} \quad (2.25)$$

в) забезпеченість 4%: по табл. 9.2 [417] для  $P = 0.96$ ,  $K_p = 39,5$ . За формулою (9.6) [71]: при строку експлуатації  $T_{ef} = 100$  років за п. 2.3.10 [73] обчислюємо середній період повторюваності межового значення вітрового навантаження:  $T = T_{ef} \cdot K_p = 100 \cdot 39,5 = 3950$  (років). По табл. 9.1 [71] знаходимо  $\gamma_{fm} = 1.45$ . За формулою (9.1) [71] з урахуванням співвідношень (2.22–2.23) у припущенні  $C = 1$  за п. 9.7 [73] отримаємо:

$$V_{4\%} = \gamma_{fm} \cdot V_0 \cdot C = 1,45 \cdot 24,6 \cdot 1 = 35,67 \text{ м/с.} \quad (2.26)$$

Максимальна швидкість вітру 1%, 2%, 4% забезпеченості виявилась однаковою – 35,67 м/с. Виконані розрахунки свідчать про нечутливість наведеної у [73] методики обчислення максимальних вітрових навантажень для відповідальних споруд із достатньо тривалими термінами експлуатації.

За результатами оцінки точності розрахунків імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду можна зробити наступні висновки:

а) імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Вишгород, м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом;

б) імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Канів, м. Кременчук, м. Нова Каховка можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом.

#### **2.4 Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функцій розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними**

Відповідно до нормативних документів [73, 313–314], які регламентують основні підходи щодо проектування гідротехнічних споруд, що входять до складу гідровузлів, до навантажень і впливів входять: навантаження і впливи від рівних льодових полів максимальної товщини і міцності в розрахункову зиму [73] або від проривів заторів при зимових пропусках води в нижній б'єф для гребель або інших споруд, що беруть участь у створенні напірного фронту [73], тиск льоду, що визначається при його середній багаторічній товщині [314], тиск льоду, що визначається при його середній багаторічній товщині забезпеченістю 1% [314]. Вплив льоду слід урахувувати при проектуванні кріплень відкосів гребель із ґрунтових матеріалів [313]. Згідно з [312] на гідротехнічні споруди діють: навантаження від льодових полів [282], навантаження від суцільного льодяного покрову при його температурному розширенні [282], навантаження від заторних і зажорних мас льоду [282], навантаження від примерзлого до споруди льодяного покрову при змінненні рівня води [282].

Для виконання розрахунків щодо визначення надійності і безпеки гідротехнічних споруд на основі імовірносних методів [73] необхідно мати статистичні дані максимальної товщини льодового покрову водосховищ гідровузлів різної забезпеченості.

При проектуванні, будівництві та експлуатації гідровузлів, особливо в суворих кліматичних умовах, значна увага приділяється питанням зимового режиму річок і водосховищ, дослідженням льодових, заторних, зажорних явищ на річках і водосховищах, вивченню термічного режиму водосховищ. Подібні питання розглядаються для території колишнього СРСР у [100, 165, 233, 266, 268, 280, 283].

Рекомендовані як нормативні дані щодо льодових навантажень на гідротехнічні споруди на території колишнього СРСР наведено у [431]. Відповідно до [431] навантаження від льоду на гідротехнічні споруди повинні визначатись на підставі статистичних даних про фізико-механічні властивості льоду, про гідрометеорологічні і льодові умови у районі будівництва для періоду часу із найбільшим льодовим впливом. Розрахункова товщина рівного прісноводного льоду Європейської частини колишнього СРСР, розташованої південніше  $65^\circ$  північної широти, приймається 0.8 від максимальної за зимовий період товщини льоду 1% забезпеченості [312]. Найбільш вичерпні дані про максимальну товщину льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду містяться у [372–387].

Опрацювання довідкової літератури дозволило побудувати вибірки щорічних максимальних товщин льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду (табл. И.1–И.6).

За даними [99] як теоретичні розподіли у гідрометеорології найбільш часто застосовують такі: біекспоненціальний (Гумбеля), біномінальний, Пірсона III типу, Крицького-Менкеля, Джонсона, Дмитрієва, Грамма-Шарльє, нормальний, логарифмічно-нормальний,  $U$  – подібний, Гудріча. Для імовірносної оцінки щорічної максимальної товщини льоду в даній роботі застосовано трьохпараметричний гамма-розподіл, біекспоненціальний і логарифмічно-нормальний розподіли. Характеристики згаданих розподілів і способи їх застосування до опису кліматичних явищ наведено у [38, 52, 276].

Для імовірносної оцінки щорічної максимальної товщини льоду в даній роботі застосовано трьохпараметричний гамма-розподіл, біекспоненціальний і логарифмічно-нормальний розподіли [192].

Результати розрахунків імовірності неперевикнення  $p, \%$  щорічної максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см наведено на рис. К.1–К.6.

Для оцінки точності результатів розрахунків обчислені значення середньоквадратичного відхилення ймовірностей перевищення, визначених за аналітичною кривою забезпеченості, від ймовірностей, визначених за емпіричною кривою забезпеченості  $\sigma p, \%$  і значення середньоквадратичного відхилення щорічної максимальної товщини льоду, що визначена за аналітичною кривою забезпеченості, від зафіксованої швидкості вітру  $\sigma h_{max}, \%$ . Результати оцінки точності розрахунків неперевикнення  $p, \%$  щорічної максимальної товщини льоду за порівнянням параметрів  $\sigma p, \%$  та  $\sigma h_{max}, \%$  наведено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Результати оцінки точності розрахунків щорічної максимальної товщини льоду

№	Район спостережень	Трьох-параметричний гамма-розподіл		Біекспоненціальний розподіл		Логарифмічно-нормальний розподіл	
		$\sigma p, \%$	$\sigma h_{max}, \%$	$\sigma p, \%$	$\sigma h_{max}, \%$	$\sigma p, \%$	$\sigma h_{max}, \%$
1	м. Вишгород	9.46	6.8	10.23	6.8	-	-
2	м. Канів	7.95	3.4	-	-	7.64	3.6
3	м. Кременчук	5.39	2.7	5.6	2.2	-	-
4	м. Кам'янське	4.22	2.6	6.39	1.9	-	-
5	м. Запоріжжя	4.64	2.7	4.71	2.3	-	-
6	м. Нова Каховка	7.03	2.9	7.64	3.0	-	-

Найбільш впливовим з точки зору оцінки точності вважається параметр  $\sigma h_{max}$  [178], тому імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищах Київського, Канівського і Каховського гідровузлів можуть бути представлені трьохпараметричним гамма-розподілом, а у водосховищах Кременчуцького, Середньодніпровського і Дніпровського гідровузлів можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом. Параметри функцій розподілу імовірності неперевикнення  $p, \%$  щорічної максимальної товщини льоду наведено в таблицях



2.10–2.11. У якості параметрів трьохпараметричного гамма-розподілу наведено значення статистик  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , коефіцієнта варіації  $C_V$ , коефіцієнта асиметрії  $C_S$ . Для біекспоненціального розподілу наведено значення коефіцієнтів  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ .

Таблиця 2.10

Параметри функцій розподілу імовірності щорічної максимальної товщини льоду

№	Район спостережень	Трьохпараметричний гамма-розподіл			
		$\lambda_2$	$\lambda_3$	$C_V$	$C_S$
1	м. Вишгород	0,05444	0,0464	0,45337	0,41487
2	м. Канів	0,0192	0,01947	0,30716	1,05795
3	м. Нова Каховка	0,03475	0,03281	0,39167	0,72112

Таблиця 2.11

Параметри функцій розподілу імовірності щорічної максимальної товщини льоду

№	Район спостережень	Біекспоненціальний розподіл		
		$a_0$	$a_1$	$a_2$
1	м. Кременчук	1,04456	-1,1152	1,00035
2	м. Кам'янське	1,96774	-2,04187	0,6296
3	м. Запоріжжя	0,84476	-0,85903	0,73457

За результатами оцінки точності розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду можна зробити наступні висновки:

а) імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах Київського, Канівського і Каховського гідровузлів можуть бути представлені трьохпараметричним гамма-розподілом;

б) імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах Кременчуцького, Середньодніпровського і Дніпровського гідровузлів можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом.

## 2.5 Висновки за розділом 2

1. Здійснено збір і аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України, яка спричинена сейсмічною активністю району Карпатських гір, району Вранча, району Криму, зафіксованих у період з 1578 р. по 2009 р. Отримано залежності між макросейсмічною бальністю  $I_0$ , енергетичним класом землетрусу  $K$  і магнітудою  $M$  для вказаних районів. Оцінено вплив глибини гіпоцентру землетрусу на вказані характеристики землетрусу. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу бальності землетрусів шляхом порівняння параметрів оцінки точності підбрано функції розподілів та обчислено їх параметри. За оцінкою точності результатів розрахунків встановлено, що найбільш повно відображає характеристики мінливості сейсмічної активності логарифмічно-нормальний розподіл. Отримано параметри логарифмічно-нормального розподілу сейсмічної активності Карпатських гір, району Вранча, Криму в період з 1578 р. по 2009 р.

2. Здійснено збір і аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду за період спостережень з 1812 р. по 2010 р. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимально амплітуди середньомісячних температур шляхом порівняння параметрів оцінки точності підбрано функції розподілів та обчислено їх параметри. Встановлено, що імовірності щорічних максимально низьких середньомісячних температур у м. Вишгород, м. Кам'янське, м. Запоріжжя, м. Нова Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом, імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Канів може бути представлена біекспоненціальним розподілом, імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Кременчук може бути представлена біекспоненціальним або нормальним розподілами, імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Вишгород, м. Кам'янське, м. Нова Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом, імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у

м. Канів, м. Кременчук, м. Запоріжжя можуть бути представлені логарифмічно-нормальним або нормальним розподілами.

3. Здійснено збір і аналіз статистичних даних щорічних максимальних швидкостей вітру у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень 1936 р. по 1960 р. Для згладжування та екстраполяції емпіричних кривих розподілу щорічних максимальних швидкостей вітру шляхом порівняння параметрів оцінки точності підбрано функції розподілів та обчислено їх параметри. Встановлено, що імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Вишгород, м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом; імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Канів, м. Кременчук, м. Нова Каховка можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом.

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

## РОЗДІЛ 3

### ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ЩОДО ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

#### 3.1 Особливості гідрологічного режиму і регулювання витрат каскаду гідроелектростанцій

Надійність каскадів гідровузлів комплексного призначення визначається надійністю споруд гідровузлів, які входять до складу каскаду. Згідно з існуючими методами оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема [38, 314], найбільш несприятливим і небезпечним моментом під час експлуатації гідротехнічних споруд в Україні слід вважати проходження весняного паводку.

При проектуванні водосховищ каскадів гідровузлів визначають їх характеристики: рівень мертвого об'єму (РМО), нормальний підпірний рівень (НПР), форсований підпірний рівень (ФПР). Мж горизонтами рівнів води у водосховищі і зарегульованими витратами існує певна залежність, наведена в табл. 2.5 [73], яка обумовлена класом відповідальності споруди. Щорічні імовірності  $p$ , % перевищення розрахункових максимальних витрат води для основного розрахункового випадку гідротехнічних споруд класу СС1 – 5%, СС2-1 – 1%, СС2-2 – 3%, СС3 – 0.1%; для перевірного розрахункового випадку гідротехнічних споруд класу СС1 – 1%, СС2-1 – 0.1%, СС2-2 – 0.5%, СС3 – 0.01%. Витрати основного розрахункового випадку відповідають горизонту води при НПР, а перевірного розрахункового випадку – при ФПР. Розрахункові максимальні витрати відсоток імовірності яких менший, ніж при ФПР, вважаються катастрофічними паводковими (видатними) витратами. За існуючою класифікацією за видом регулювання розрізняють наступні види регулювання: добове регулювання, тижневе регулювання, короткочасне неперіодичне регулювання, сезонне регулювання, річне регулювання, багаторічне регулювання, змішане регулювання [52, 157–158, 172, 253].

Проектування водосховищ полягає у визначенні величин корисного і мертвого об'ємів на основі протиставлення графіків припливу і графіку споживання (скидні витрати) [52, 157–158, 172, 253].

Вихідними даними слугуватимуть: імовірнісні залежності максимальних витрат води  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро у створах Київської, Канівської, Кременчуцької, Середньодніпровської, Дніпровської, Каховської гідроелектростанцій [38, 197]; залежності об'ємів водосховищ  $V$ , км<sup>3</sup> від позначок рівнів води у водосховищах, м [254]; диспетчерські графіки роботи водосховищ; зведений диспетчерський графік роботи водосховищ Дніпровського каскаду; паводковий і річний гідрографи трансформованих (зарегульованих) витрат різної забезпеченості у створах водосховищ; графіки фактичного спрацювання водосховищ за характерні за водністю роки [254]; пропускна спроможність водоскидних споруд гідровузлів каскаду в залежності від напору.

Основною передумовою проектування водосховищ являється розрахунок пропускної здатності водопропускних споруд гідровузла під час проходження розрахункового паводка. Вважається, що на початок розрахункового паводка водосховище заповнене до рівня НПР [157, 253]. Витрати через споруди, не призначені для пропуску паводкових витрат, не ураховуються. Затвори водоскидних споруд повністю відкриті. В даній роботі передбачається, що пропуск паводкових витрат можливо здійснювати через водоводи гідроелектростанцій і шлюзи. Якщо корисний об'єм водосховища  $V$  незначний у порівнянні із об'ємами паводкового припливу води, то водосховище не буде мати суттєвого регулюючого впливу. У такому випадку максимальні скидні витрати  $q_m$  практично дорівнюватимуть максимальним витратам паводка  $Q_m$ . Якщо об'єм водосховища  $V$  між позначками НПР і ФПР значний у порівнянні із об'ємами паводкового припливу води, то водосховище буде мати суттєвий регулюючий вплив за рахунок затримання або трансформації певної частини паводка. Суміщений графік паводкових і скидних витрат наведено на рис. 3.1.

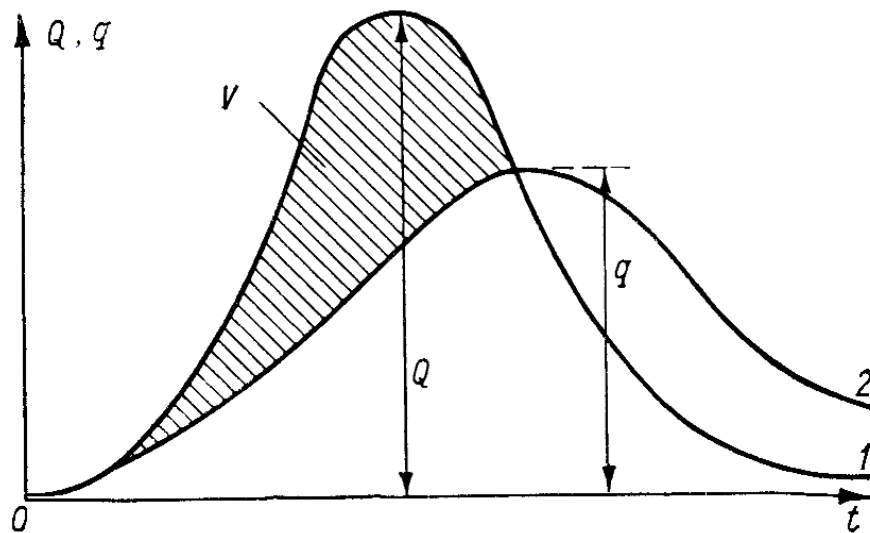


Рис. 3.1. Суміщений графік паводкових і скидних витрат: 1 – природній приплив води, 2 – зарегульовані або скидні витрати

Окремо слід розглянути питання щодо розрахункового паводкового гідрографа. В літературі [157–158, 172, 253] зазначено, що розрахунковим є гідрограф, який відповідає розрахунковій максимальній витраті та об'ємові. Розрахунковий паводковий гідрограф також характеризується загальною тривалістю, тривалістю підйому і спуску (рис. 3.2–3.3).

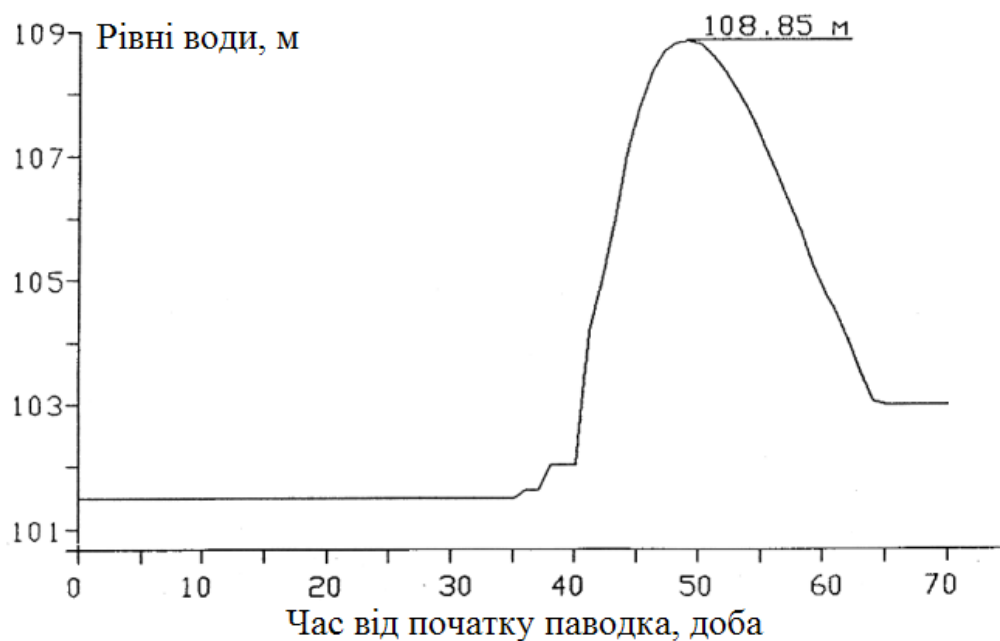


Рис. 3.2. Трансформація паводка 0.01% забезпеченості у Київському водосховищі

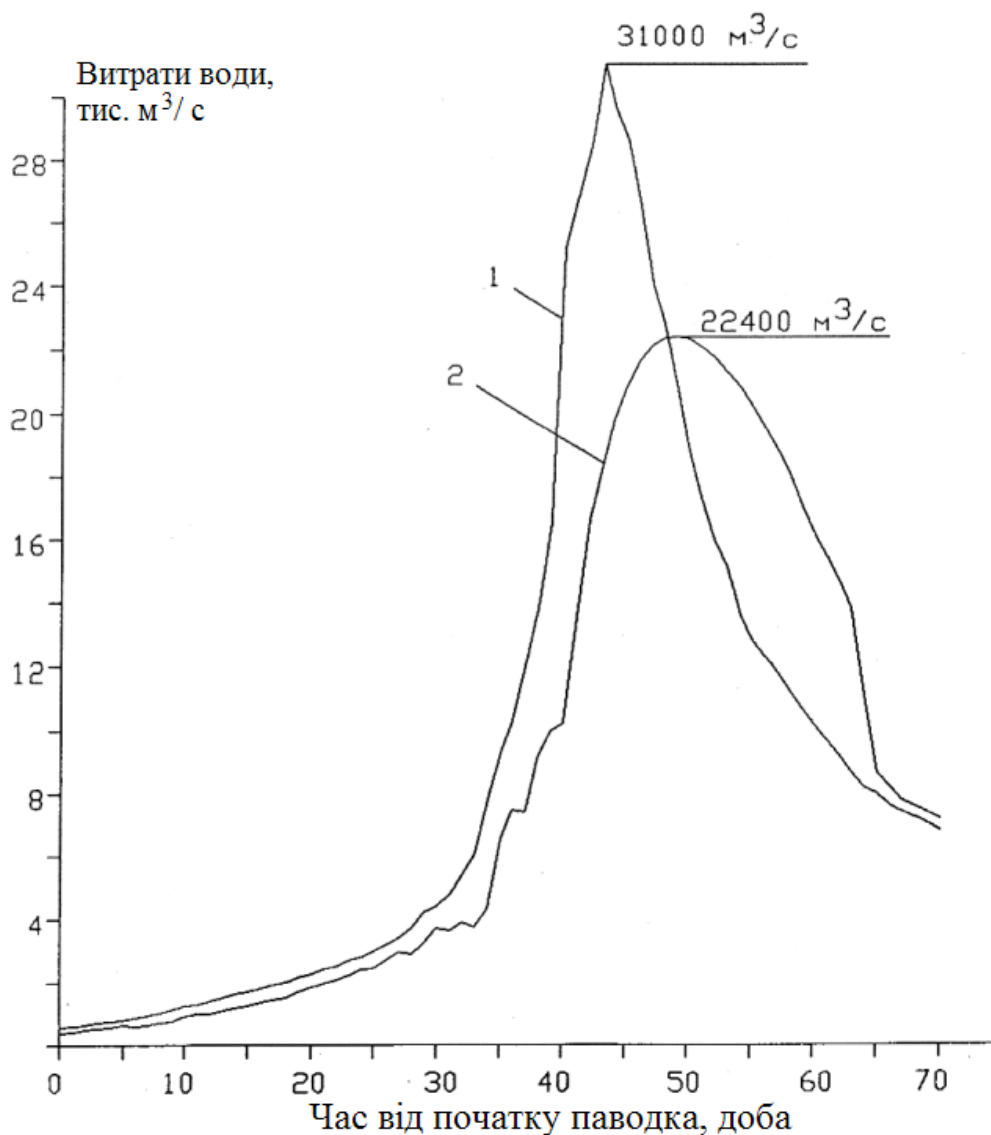


Рис. 3.3. Трансформація паводка 0.01% забезпеченості у Київському водосховищі:  
1 – природній приплив води, 2 – зарегульовані або скидні витрати

На рис. 3.2–3.3 представлені хронологічні графіки трансформації паводка 0,01% забезпеченості у Київському водосховищі. Для рішення поставленої задачі також знадобляться хронологічні графіки трансформації паводків у інших водосховищах Дніпровського каскаду. Розподіл стоку за джерелами живлення для р. Дніпро становить [183]: снігове 52%, дощове 18%, ґрунтове 30%.

За видом регулювання Київське, Кременчуцьке, Каховське водосховища мають сезонне та річне регулювання витоків, а Канівське, Кам'янське, Дніпровське водосховища – тижневе і добове регулювання витоків. Детально характеристика водосховищ Дніпровського каскаду, а також зв'язок між гідрологічними

характеристиками водосховищ із встановленням кореляційної залежності наведено у [197].

Рівняння балансу води у водосховищі має вигляд [253]:

$$\Omega \frac{dh}{dt} = Q - q, \quad (3.1)$$

або

$$\Omega(h) \cdot \frac{dh}{dt} = Q(t) - q(h), \quad (3.2)$$

де  $\Omega(h)$  – функція, яка визначається площею дзеркала водосховища;  $Q(t)$  – функція, яка визначається природнім припливом води або графіком паводкового припливу;  $q(h)$  – функція, яка визначається зарегульованими або скидними витратами;  $t$  – час від початку паводка,  $h$  – рівень води між порогом водозливу і рівнем води у водосховищі або рівень води між віссю водоспуску і рівнем води у водосховищі.

Рівняння (3.2) є диференціальним рівнянням зв'язку між  $h$  і  $t$ . Для подальшої розробки методики керування ризиком втрати надійності існуючого каскаду гідровузлів передбачається:

- інтегрування диференціального рівняння (3.2) і отримання функції  $h=F(t)$  – хронологічного графіку змінення напору для усіх гідровузлів каскаду;
- урахуваючи кореляційний зв'язок між гідрологічними характеристиками водосховищ знаходження функції  $q=f(t)$  – шуканого хронологічного графіку скидних витрат водоскидних або водоспускових споруд гідровузлів каскаду;
- оцінка надійності гідровузлів каскаду при проходженні паводків різної забезпеченості;
- розробка заходів і рекомендацій по унеможливленню втрати надійності каскаду гідровузлів при проходженні катастрофічних паводків на гідровузлах Дніпровського каскаду.



### **3.2 Дослідження кореляційних залежностей максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Одним із факторів, що впливають на надійність гідротехнічних споруд на всіх стадіях їх будівництва та експлуатації, являється гідрологічний режим річки [73]. Особливу небезпеку для гідротехнічних споруд в Україні представляють весняні паводки. Тому щорічно в Україні створюється протипаводкова комісія із представників відповідних міністерств. Завданням цієї комісії є оперативне реагування і вживання заходів щодо мінімізації шкоди народному господарству. Тому завдання прогнозування та регулювання гідрологічного режиму річок є актуальними не лише з точки зору гідротехнічного будівництва, а й народного господарства в цілому.

Питання гідрологічного режиму р. Дніпро розглядаються у контексті експлуатаційної надійності водосховищ гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Водні ресурси р. Дніпро становлять приблизно 80% водних ресурсів України. У басейні Дніпра сконцентровано 70% аграрного й промислового потенціалу держави. Середньобагаторічний об'єм витoku у гирлі становить 53 млрд. м<sup>3</sup>. У межах України формується виток з об'ємом 19.7 млрд. м<sup>3</sup> (у багатоводні роки), 12 млрд. м<sup>3</sup> (у маловодні роки) [254].

Водосховища Дніпровського каскаду – комплексного використання, тому вони задовольняють вимоги багатьох секторів народного господарства, а саме: комунального господарства, промисловості, гідроенергетики, іригації, сільського господарства, транспортного водокористування, рибного господарства і слугують рекреаційними зонами відпочинку. Головними функціями водосховищ Дніпровського каскаду [254] являється боротьба з повеннями та паводками, мінімізація збитків населення та народного господарства. Комплексне використання водних ресурсів р. Дніпро здійснюється каскадом гідровузлів: Київський, Канівський, Кременчуцький, Середньодніпровський, Дніпровський, Каховський. Водосховища цих гідровузлів регулюють виток Дніпра від гирла р. Прип'ять до

Чорного моря. За даними [254] водосховища Дніпровського каскаду мають наведені нижче характеристики.

Київське водосховище. Рік уведення в експлуатацію 1964 р. Рівні води: ФПР = 104.0 м; НПР = 103.0 м; РМО = 101.5 м; середньобагаторічний рівень 102.2 м. Повний об'єм 3.7 км<sup>3</sup>, робочий об'єм 1.2 км<sup>3</sup>. Площа поверхні 900 км<sup>2</sup>.

Канівське водосховище. Рік уведення в експлуатацію 1972 р. Рівні води: ФПР = 92.7 м; НПР = 91.5 м; РМО = 91.0 м; середньобагаторічний рівень 91.1 м. Повний об'єм 2.48 км<sup>3</sup>, робочий об'єм 0.3 км<sup>3</sup>. Площа поверхні 570 км<sup>2</sup>.

Кременчуцьке водосховище. Рік уведення в експлуатацію 1959 р. Рівні води: ФПР = 82.4 м; НПР = 81.0 м; РМО = 75.75 м; середньобагаторічний рівень 79.8 м. Повний об'єм 13.5 км<sup>3</sup>, робочий об'єм 9.07 км<sup>3</sup>. Площа поверхні 2000 км<sup>2</sup>.

Кам'янське водосховище. Рік уведення в експлуатацію 1963 р. Рівні води: ФПР = 66.0 м; НПР = 64.0 м; РМО = 63.5 м; середньобагаторічний рівень 63.9 м. Повний об'єм 2.5 км<sup>3</sup>, робочий об'єм 0.5 км<sup>3</sup>. Площа поверхні 550 км<sup>2</sup>.

Дніпровське водосховище. Рік уведення в експлуатацію 1932 р., 1947 р. Рівні води: ФПР = 51.4 м; НПР = 51.4 м; РМО = 48.5 м; середньобагаторічний рівень 51.0 м. Повний об'єм 3.3 км<sup>3</sup>, робочий об'єм 0.83 км<sup>3</sup>. Площа поверхні 360 км<sup>2</sup>.

Каховське водосховище. Рік уведення в експлуатацію 1955 р. Рівні води: ФПР = 18.0 м; НПР = 16.0 м; РМО = 12.7 м; середньобагаторічний рівень 15.6 м. Повний об'єм 18.2 км<sup>3</sup>, робочий об'єм 6.8 км<sup>3</sup>. Площа поверхні 2140 км<sup>2</sup>.

Для вивчення гідрологічного режиму водосховищ гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій опрацьовано багаторічні максимальні витрати р. Дніпро за період спостережень з 1787 по 1999 рр. Статистичні дані багаторічних максимальних витрат за вказаний період наведено у [37] і представлено в табл. Л1. Подібні дані опубліковано в гідрологічних щорічниках колишнього СРСР. Статистичні дані максимальних і мінімальних повеневих витрат р. Дніпро за період спостережень з 1787 по 1999 рр. наведено у табл. 3.1–3.2.

За результатами опрацювання статистичних даних максимальних витрат р. Дніпро за період спостережень з 1787 по 1999 рр. отримані статистичні

характеристики гідрологічних рядів по пунктах спостереження (табл. 3.3) та результати кореляційного аналізу статистичних вибірок максимальних витрат пар створів гідровузлів (табл. 3.4).

Таблиця 3.1

Статистичні дані максимальних витрат р. Дніпро за період спостережень з 1787 по 1999 рр. [37]

Роки спостереження	Пункт спостереження			
	м. Вишгород	м. Київ	м. Кременчук	смт. Лоцмано – Кам'янка
	Витрати, м <sup>3</sup> /с			
1787	10400	14200	14600	15400
1789	11050	15200	15200	16400
1797	10380	14200	15200	15400
1820	10240	14300	13700	15200
1845	13600	20600	20900	22500
1849	11190	16200	16300	16600
1877	12270	15800	17800	18200
1917	10840	18800	19000	20700
1931	15300	23100	23900	25100
1956	11090	12100	11100	11170
1958	11140	12300	12300	12600
1970	12300	19700	19100	19500

За результатами кореляційного аналізу статистичних вибірок максимальних витрат р. Дніпро за період спостережень з 1787 по 1999 рр. отримано рівняння лінійної регресії (рис. М.1–М.6):

$$y(x) = b_0 + b_1 x, \quad (3.3)$$

де  $y(x)$  – регресія статистичної вибірки максимальних витрат р. Дніпро по осі  $x$  на статистичну вибірку максимальних витрат по осі  $y$ ;  $x$  – статистична вибірка максимальних витрат р. Дніпро по осі  $x$ ;  $b_0, b_1$  – емпіричні коефіцієнти (табл. 3.4).

Таблиця 3.2

Статистичні дані мінімальних витрат р. Дніпро за період  
спостережень з 1787 по 1999 рр. [37]

Роки спостере- ження	Пункт спостереження			
	м. Вишгород	м. Київ	м. Кременчук	смт. Лоцмано – Кам'янка
	Витрати, м <sup>3</sup> /с			
1842	1420	2060	2040	2110
1863	1330	1645	1670	1830
1864	1520	2030	2180	2250
1921	1570	2220	2270	2600
1925	1090	1480	1560	1670
1974	1350	1870	1900	2010
1997	1470	1980	2040	2150

Таблиця 3.3

Результати статистичної обробки максимальних витрат р. Дніпро за період  
спостережень з 1787 по 1999 рр.

Пункт спостереження, роки спостереження	Вибіркове середнє, м <sup>3</sup> /с	Вибіркова медіана, м <sup>3</sup> /с	Середньо- квадратичне відхилення	Вибіркова дисперсія
м. Вишгород	$4.692 \cdot 10^3$	$3.92 \cdot 10^3$	$2.632 \cdot 10^3$	$6.925 \cdot 10^6$
м. Київ	$6.408 \cdot 10^3$	$5.3 \cdot 10^3$	$3.784 \cdot 10^3$	$1.432 \cdot 10^7$
м. Кременчук	$6.573 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^3$	$3.901 \cdot 10^3$	$1.522 \cdot 10^7$
смт. Лоцмано – Кам'янка	$6.924 \cdot 10^3$	$5.7 \cdot 10^3$	$4.155 \cdot 10^3$	$1.727 \cdot 10^7$

Також обчислено коефіцієнти кореляції вибірок, коваріації вибірок, стандартні похибки (табл. 3.4).

Результати кореляційного аналізу статистичних вибірок максимальних витрат р. Дніпро за період спостережень з 1787 по 1999 рр.

Пункт спостереження, роки спостереження	Вільний член $b_0$	Коефіцієнт $b_1$	Коефіцієнт кореляції двох вибірок	Коваріація двох вибірок	Стандарт-на похибка
м. Вишгород – м. Київ	-148.163	1.397	0.9717	$9.631 \cdot 10^6$	895.2
м. Вишгород – м. Кременчук	-171.226	1.437	0.9697	$9.909 \cdot 10^6$	954.6
м. Вишгород – смт. Лоцмано – Кам'янка	-264.379	1.532	0.9702	$1.056 \cdot 10^7$	1009.1
м. Київ – м. Кременчук	7.17	1.025	0.994	$1.46 \cdot 10^7$	427.5
м. Київ – смт. Лоцмано – Кам'янка	-58.823	1.09	0.9923	$1.553 \cdot 10^7$	515.4
м. Кременчук – смт. Лоцмано – Кам'янка	-59.388	1.062	0.9973	$1.609 \cdot 10^7$	306.4

На основі опрацювання статистичних даних отримано кореляційні залежності між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду, обчислено функції лінійної регресії для максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень з 1787 по 1999 рр. Отримані дані свідчать про тісну, практично функціональну залежність між максимальними витратами р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

### **3.3 Дослідження кореляційних залежностей між максимальною товщиною льоду за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Одним із факторів, що впливають на надійність гідротехнічних споруд на всіх стадіях їх будівництва та експлуатації, являється льодовий режим річки. Згідно

з нормативними документами [73, 312–314], які регламентують підходи щодо проектування гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів, до льодових навантажень входять: тиск льоду, що визначається при його середній багаторічній товщині [314]; навантаження і впливи від рівних льодових полів максимальної товщини і міцності в розрахункову зиму [73]; навантаження від проривів заторів при зимових пропусках води у нижній б'єф для гребель або інших споруд, що беруть участь у створенні напірного фронту [73]; тиск льоду, що визначається при його середній багаторічній товщині забезпеченістю 1% [314].

Вплив льоду слід урахувувати при проектуванні кріплень укосів гребель із ґрунтових матеріалів [313]. Згідно з [312] на гідротехнічні споруди діють: навантаження від льодових полів, навантаження від суцільного льодяного покриву при його температурному розширенні, навантаження від заторних і зажорних мас льоду, навантаження від примерзлого до споруди льодяного покриву при зміні рівня води.

Для виконання розрахунків щодо визначення надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідровузлів на основі імовірнісних методів [73] необхідно мати статистичні дані максимальної товщини льодового покриву водосховищ гідровузлів різної забезпеченості, а також урахувувати кореляційну залежність між природними факторами [197], у тому числі і між льодовими явищами [192].

Гідрологічний і льодовий режими пов'язані із забезпеченням надійності гідровузлів і їх каскадів, а також недопущенням виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах, моделювання ризиків повеней, оцінка економічних ризиків, обґрунтування допустимих гідрологічних і льодових ризиків розглянуто в закордонних роботах [409, 429, 433, 446, 470, 482, 488–489, 491]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд. Питання імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів з урахуванням мінливості природних факторів, статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на

території України, аналіз чинників аварійності гідротехнічних споруд розглянуто в роботах [190, 194, 200, 221, 233, 283].

При проектуванні, будівництві та експлуатації гідровузлів значна увага приділяється питанням зимового режиму річок і водосховищ, дослідженням льодових, заторних, зажорних явищ на річках і водосховищах, вивченню термічного режиму водосховищ [100, 165, 266, 268, 280].

Навантаження від льоду на гідротехнічні споруди повинні визначатись на підставі статистичних даних про фізико-механічні властивості льоду, гідрометеорологічні і льодові умови у районі будівництва для періоду часу із найбільшим льодовим впливом [312].

Дослідження кореляційної залежності між максимальною товщиною льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і обчислення статистичних характеристик рівнянь лінійної регресії, визначення коефіцієнтів кореляції здійснено методами регресійного і кореляційного аналізів в програмному комплексі MathCad.

Кореляційний зв'язок між щорічною максимальною товщиною льоду  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду досліджено за період спостережень з 1956 по 1966 рр. Статистичні дані щорічної максимальної товщини льоду  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за вказаний період наведено у табл. И.1–И.6. Отримані статистичні характеристики рівнянь лінійної регресії по пунктах спостереження та результати кореляційного аналізу статистичних вибірок максимальної товщини льоду пар створів гідровузлів (табл. 3.5–3.6, рис. Н.1–Н.3).

Рівняння лінійної регресії прийнято у вигляді (3.3), де  $y(x)$  – регресія статистичної вибірки щорічної максимальної товщини льоду у створах гідровузлів Дніпровського каскаду по осі  $x$  на статистичну вибірку щорічної максимальної товщини льоду по осі  $y$ ;  $x$  – статистична вибірка щорічної максимальної товщини льоду по осі  $x$ ;  $b_0$ ,  $b_1$  – емпіричні коефіцієнти (табл. 3.6). Обчислено коефіцієнти кореляції вибірок, коваріації вибірок, стандартні похибки (табл. 3.5–3.6).

Таблиця 3.5

Результати статистичної обробки щорічної максимальної товщини льоду р. Дніпро за період спостережень з 1956 по 1966 рр.

Пункт спостереження (водосховище)	Вибіркове середнє, см	Вибіркова медіана, см	Середньо-квадратичне відхилення	Вибіркова дисперсія
Київське	54.3	54	16.1	259.8
Канівське	44.9	43	10.8	117.1
Кременчуцьке	41.3	40	11.8	139.6
Кам'янське	37.5	37	12.5	156.7
Дніпровське	34.1	35	14.3	204.5
Каховське	28.5	28	10.1	102.7

Таблиця 3.6

Результати кореляційного аналізу статистичних вибірок щорічної максимальної товщини льоду р. Дніпро за період спостережень з 1956 по 1979 рр.

Пункт спостереження (створ гідровузла, водосховище)	Вільний член $b_0$	Коефіцієнт $b_1$	Коефіцієнт кореляції двох вибірок	Коваріація двох вибірок	Стандартна похибка
1	2	3	4	5	6
Київське–Канівське	17.184	0.511	0.761	120.6	7.4
Київське–Кременчуцьке	18.103	0.427	0.582	100.8	10.1
Київське–Кам'янське	12.646	0.457	0.589	108.0	10.7
Київське–Дніпровське	13.876	0.372	0.420	88.0	13.7
Київське–Каховське	18.018	0.192	0.306	45.4	10.2
Канівське – Кременчуцьке	-4.609	1.022	0.936	108.8	4.4
Канівське – Кам'янське	-7.552	1.002	0.866	106.7	6.6



1	2	3	4	5	6
Канівське – Дніпровське	-11.784	1.022	0.773	108.7	9.6
Канівське – Каховське	-0.789	0.651	0.695	69.3	7.7
Кременчуцьке – Кам'янське	-1.26	0.938	0.886	119.1	6.1
Кременчуцьке – Дніпровське	-8.528	1.033	0.853	131.1	7.9
Кременчуцьке – Каховське	-0.239	0.695	0.811	88.2	6.3
Кам'янське – Дніпровське	-7.567	1.112	0.974	158.4	3.5
Кам'янське – Каховське	0.706	0.741	0.915	105.5	4.3
Дніпровське – Каховське	5.273	0.68	0.960	126.4	3.0

Отримані дані свідчать про тісну залежність (наприклад – коефіцієнт кореляції вибірок товщини льоду Канівського – Каховського водосховищ дорівнює 0.695), а іноді, практично функціональну залежність (наприклад – коефіцієнт кореляції вибірок товщини льоду Дніпровського – Каховського водосховищ дорівнює 0,960) між щорічною максимальною товщиною льоду р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

#### **3.4 Дослідження кореляційних залежностей між максимальними низькими середньомісячними температурами, між максимальними амплітудами середньомісячних температур за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Одним із факторів, що впливають на надійність гідротехнічних споруд на всіх стадіях їх будівництва та експлуатації, являється температурний режим зовнішнього повітря. Відповідно до нормативних документів [79, 314], які регламентують основні підходи щодо проектування гідротехнічних споруд, що входять до складу гідровузлів,

до навантажень і впливів входять: температурні впливи будівельного та експлуатаційного періодів, що визначені для року із середньою амплітудою коливання середньомісячних температур зовнішнього повітря [79]; температурні впливи будівельного та експлуатаційного періодів, що визначені для року з найбільшою амплітудою коливання середньомісячних температур зовнішнього повітря [79]; температурні впливи при розрахунках бетонних гребель на особливі сполучення навантажень і впливів, що визначені для року з максимально низькою середньомісячною температурою зовнішнього повітря [314].

Для виконання імовірнісних розрахунків надійності гідротехнічних споруд [73] на температурні впливи необхідно мати статистичні дані температурних впливів різної забезпеченості, параметри функцій розподілів щорічної максимально низької середньомісячної температури і щорічної максимально амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря, які для гідровузлів Дніпровського каскаду опрацьовано в роботі [193], а також урахувувати кореляційні залежності між зазначеними температурними впливами.

Імовірнісні підходи щодо оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд з урахуванням мінливості природно-кліматичних впливів, гідрологічних, сейсмічних впливів, а також недопущенням виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах розглянуто в закордонних роботах [409, 427, 429, 431–435, 443–444, 448–450, 502]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд.

Питання імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів з урахуванням мінливості природних факторів, статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на території України, аналіз чинників аварійності гідротехнічних споруд розглянуто в роботах [38, 190, 192, 194, 197, 200–221, 279, 406, 411, 416, 452, 457, 468, 469, 472, 479, 498, 503].

Опрацювання довідкової літератури дозволило побудувати вибірки щорічних максимально низьких середньомісячних температур і щорічних максимальних

амплітуд середньомісячних температур у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду, а саме: у м. Вишгород; м. Канів, м. Кременчук, м. Кам'янське, м. Запоріжжя, м. Нова Каховка за період спостережень 1966-2008 рр. (табл. Г1–Г8).

Досліджено кореляційний зв'язок щорічних максимально низьких середньомісячних температур і кореляційний зв'язок щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 по 2008 рр. За результатами опрацювання статистичних даних отримані статистичні характеристики рівнянь лінійної регресії по пунктах спостереження (табл. 3.7–3.8) та результати кореляційного аналізу статистичних вибірок щорічних максимально низьких середньомісячних температур і щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур пар створів гідровузлів (табл. 3.9–3.10, рис. П.1–П.6).

Рівняння лінійної регресії прийнято у вигляді (3.3): де  $y(x)$  – регресія статистичної вибірки щорічної максимально низької середньомісячної температури (або щорічної максимально амплітуди середньомісячних температур) у створах гідровузлів Дніпровського каскаду по осі  $x$  на статистичну вибірку щорічної максимально низької середньомісячної температури (або щорічної максимально амплітуди середньомісячних температур);  $x$  – статистична вибірка щорічної максимально низької середньомісячної температури (або щорічної максимально амплітуди середньомісячних температур) по осі  $x$ ;  $b_0$ ,  $b_1$  – емпіричні коефіцієнти (табл. 3.9–3.10). Обчислено коефіцієнти кореляції вибірок, коваріації вибірок, стандартні похибки (табл. 3.9–3.10).

Дослідження кореляційних залежностей між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами і кореляційних залежностей між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду і обчислення статистичних характеристик рівнянь лінійної регресії, визначення коефіцієнтів кореляції здійснено методами регресійного і кореляційного аналізів в програмному комплексі MathCad.

Таблиця 3.7

Результати статистичної обробки щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря, °С у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 по 2008 рр.

Пункт спостереження	Вибіркове середнє, °С	Вибіркова медіана, °С	Середньо-квадратичне відхилення	Вибіркова дисперсія
Київське водосховище	-5,8	-5,6	2,6	6,7
Канівське водосховище	-4,7	-4,4	3,5	12,5
Кременчуцьке водосховище	-4,6	-4,1	3,5	12,0
Кам'янське водосховище	-4,9	-4,9	3,6	12,9
Дніпровське водосховище	-4,4	-4,4	3,6	13,0
Каховське водосховище	-2,4	-2,1	3,1	9,4

Таблиця 3.8

Результати статистичної обробки щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря, °С у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 по 2008 рр.

Пункт спостереження	Вибіркове середнє, °С	Вибіркова медіана, °С	Середньо-квадратичне відхилення	Вибіркова дисперсія
Київське водосховище	25,7	25,8	2,7	7,3
Канівське водосховище	24,7	23,9	3,3	11,2
Кременчуцьке водосховище	25,5	25,2	3,4	11,5
Кам'янське водосховище	26,2	25,4	3,6	12,9
Дніпровське водосховище	26,0	25,7	3,4	11,6
Каховське водосховище	25,0	25,0	3,1	9,3

Таблиця 3.9

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

Пункт спостереження (створ гідровузла, водосховище)	Вільний член $b_0$	Коефіцієнт $b_1$	Коефіцієнт кореляції двох вибірок	Коваріація двох вибірок	Стандартна похибка
Київське-Канівське	1.791	1.131	0.826	7.3	2.0
Київське-Кременчуцьке	1.873	1.113	0.833	7.1	2.0
Київське-Кам'янське	1.508	1.114	0.804	7.2	2.2
Київське-Дніпровське	1.573	1.029	0.738	6.6	2.5
Київське-Каховське	2.985	0.938	0.791	6.0	1.9
Канівське - Кременчуцьке	-0.026	0.956	0.979	11.5	0.7
Канівське - Кам'янське	-0.487	0.937	0.924	11.3	1.4
Канівське – Дніпровське	-0.079	0.906	0.889	10.9	1.7
Канівське – Каховське	1.196	0.766	0.884	9.2	1.5
Кременчуцьке - Кам'янське	-0.462	0.98	0.945	11.2	1.2
Кременчуцьке – Дніпровське	-0.021	0.955	0.916	11.0	1.5
Кременчуцьке – Каховське	1.312	0.822	0.927	9.4	1.2
Кам'янське – Дніпровське	0.515	0.992	0.987	12.2	0.6
Кам'янське – Каховське	1.670	0.833	0.974	10.3	0.7
Дніпровське – Каховське	1.167	0.823	0.969	10.3	0.8

Таблиця 3.10

Результати кореляційного аналізу статистичних вибірок максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря, °С у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1966 по 2008 рр.

Пункт спостереження (створ гідровузла, водосховище)	Вільний член $b_0$	Коефіцієнт $b_1$	Коефіцієнт кореляції двох вибірок	Коваріація двох вибірок	Стандартна похибка
Київське-Канівське	0.412	0.946	0.761	6.6	2.2
Київське-Кременчуцьке	-0.995	1.029	0.815	7.1	2.0
Київське-Кам'янське	1.051	0.978	0.734	6.8	2.5
Київське-Дніпровське	4.645	0.830	0.657	5.8	2.6
Київське-Каховське	1.671	0.909	0.801	6.3	1.9
Канівське - Кременчуцьке	3.583	0.884	0.871	9.5	1.7
Канівське - Кам'янське	5.214	0.848	0.791	9.1	2.2
Канівське – Дніпровське	6.133	0.802	0.789	8.6	2.1
Канівське – Каховське	6.291	0.758	0.831	8.1	1.7
Кременчуцьке - Кам'янське	1.026	0.989	0.936	10.9	1.3
Кременчуцьке – Дніпровське	3.185	0.895	0.895	9.9	1.6
Кременчуцьке – Каховське	3.711	0.838	0.933	9.3	1.1
Кам'янське – Дніпровське	2.034	0.914	0.964	11.3	0.9
Кам'янське – Каховське	3.644	0.817	0.960	10.1	0.9
Дніпровське – Каховське	2.897	0.853	0.950	9.4	1.0

Отримано кореляційні залежності між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами і кореляційні залежності між щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду, обчислено функції лінійної регресії і коефіцієнти кореляції пар створів гідровузлів за статистичними даними спостережень з 1966 по 2008 рр. Отримані дані свідчать про тісну залежність (наприклад – коефіцієнт кореляції вибірок щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря Київського – Каховського гідровузлів дорівнює 0.791), а іноді, практично функціональну залежність (наприклад – коефіцієнт кореляції вибірок максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря Середньодніпровського – Дніпровського гідровузлів дорівнює 0.964) між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами, а також щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

### **3.5 Висновки за розділом 3**

1. На основі опрацювання статистичних даних щорічних максимальних паводкових витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1787 р. по 1999 р. отримано кореляційні залежності щорічних максимальних паводкових витрат; обчислено функції лінійної регресії для щорічних максимальних витрат; обчислено коефіцієнти кореляції двох вибірок для пар гідровузлів, коваріацію двох вибірок, оцінено стандартну похибку. Отримані дані свідчать про тісну, практично функціональну залежність між максимальними витратами р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

2. На основі опрацювання статистичних даних щорічної максимальної товщини льоду р. Дніпро у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду за період спостережень з 1956 р. по 1966 р. отримано кореляційні залежності щорічної максимальної товщини льоду, обчислено функції лінійної регресії для щорічної максимальної товщини льоду, обчислено коефіцієнти кореляції двох вибірок для пар

гідровузлів, коваріацію двох вибірок, оцінено стандартну похибку. Отримані дані свідчать про тісну залежність, а іноді, практично функціональну залежність між максимальною товщиною льоду р. Дніпро у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду.

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



## РОЗДІЛ 4

### ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ЗАГАЛЬНИХ ВОДОПІДПІРНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

#### 4.1 Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм переливу води через гребінь греблі

Проектування і розрахунок гідротехнічних споруд потребують оцінки їх надійності і безпеки на основі імовірнісних методів [73]. Одним з найбільш поширених типів споруд водопідпільного фронту гідровузлів енергетичного призначення являються греблі із ґрунтових матеріалів. Загальні підходи щодо імовірнісних методів оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів наведено у [38], детерміністична методика за методом граничних станів відображена у [312].

Результати розрахунків за умовою недопущення переливу води через гребінь за детерміністичною методикою [312] для першого і другого розрахункових випадків наведені у табл. Р.1–Р.10 і свідчать про те, що надійність гребель із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду за детерміністичною методикою забезпечена.

Алгоритм імовірнісної оцінки надійності греблі із ґрунтових матеріалів за критерієм переливу води через гребінь греблі в рамках параметричної теорії надійності передбачає наступне.

1. Задається випадкова імовірність швидкості вітру  $pV$ , розподілена від 0 до 1.
2. За значенням  $pV$  визначається квантиль – швидкість вітру  $V$ , м/с.
3. Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів.
4. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів
5. В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів.

6. В залежності від середньої глибини води у водосховищі  $H$ , м визначається довжина розгону хвилі  $L$ , м за топографічними характеристиками водосховища.

7. В залежності 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 за відомою формулою [282]:

$$dh = (0,3 + 0,09 \times V) \times 10^{-6} \frac{V^2 \times L}{g \times H_c} \times \cos(\alpha_w), \quad (4.1)$$

де  $0.3$  та  $0.09$  – емпіричні коефіцієнти;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha_w$  – кут між поздовжньою віссю водосховища і напрямком вітру.

8. В залежності від довжини розгону хвилі  $L$ , м, глибини води у водосховищі  $H$ , м і швидкості вітру  $V$ , м/с визначається середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м за відомою формулою [490]:

$$h_{cp} = 0,16 \frac{V^2}{g} \left[ 1 - \left[ 1 + 0,006 \sqrt{g \frac{L}{V^2}} \right]^{-2} \right] \times th \left[ \frac{0,625 \left[ g \frac{H}{V^2} \right]^{0,8}}{1 - \left[ 1 + 0,006 \sqrt{g \frac{L}{V^2}} \right]^{-2}} \right], \quad (4.2)$$

де  $0.006$ ,  $0.16$ ,  $0.625$  – емпіричні коефіцієнти.

9. В залежності від середньої висоти хвилі  $h_{cp}$ , м і швидкості вітру  $V$ , м/с визначається середній період хвилі  $T_{cp}$ , с за формулою [282]:

$$T_{cp} = 3,1 \times 2\pi \frac{V}{g} \left[ g \frac{h_{cp}}{V^2} \right]^{0,625}, \quad (4.3)$$

де  $0.625$ ,  $3.1$  – емпіричні коефіцієнти.

10. В залежності від середнього періоду хвилі  $T_{cp}$ , с визначається середня довжина хвилі  $\lambda_{cp}$ , м за формулою [282]:

$$\lambda_{cp} = \frac{g \times T_{cp}^2}{2\pi}. \quad (4.4)$$

11. В залежності 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  $h1\%$ , м за формулою [282]:

$$h_{1\%} = h_{cp} \frac{(-\ln(0,01)) \times 0,001 \left[ \sqrt{g \frac{L}{V^2} + 390} \right]}{\Gamma \left[ 0,001 \left[ \sqrt{g \frac{L}{V^2} + 390} \right] + 1 \right]}, \quad (4.5)$$

де  $0,001$ ,  $1$ ,  $390$  – емпіричні коефіцієнти;  $0,01$  – забезпеченість висоти хвилі;  $\Gamma$  – позначення гамма-функції.

12. В залежності від висоти хвилі  $1\%$  забезпеченості у системі хвиль  $h_{1\%}$ , м визначається висота нахату хвилі на укіс  $h_{run1\%}$ , м за формулою [247]:

$$h_{run1\%} = k_r \times k_p \times k_{sp} \times k_{run} \times h_{1\%}, \quad (4.6)$$

де  $k_r$  – коефіцієнт шорсткості кріплення укусу;  $k_p$  – коефіцієнт проникності кріплення укусу;  $k_{sp}$  – коефіцієнт, який залежить від швидкості вітру і закладення укусу;  $k_{run}$  – коефіцієнт, який визначається за формулою [247]:

$$k_{run} = 1,2 \times \cos \alpha \times \sqrt{\frac{\lambda}{h_{1\%} \times (1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi)}}, \quad (4.7)$$

де  $\alpha$  – кут між променем хвилі нормаллю до урізу води;  $\varphi$  – кут нахилу укусу до горизонту.

13. Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до джерел [70, 190, 447]. Задається випадкова щорічна імовірність сейсмічного впливу  $pJ_r$ , розподілена від 0 до 1. За значенням  $pJ_r$  визначається квантиль – бальність землетрусу  $J_r$ , бали. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування греблі (тип основи). Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби.

14. Визначається висота гравітаційної хвилі  $\Delta h$ , м [70] за формулою:

$$\Delta h = 0,4 + 0,76 \cdot (J - 6), \quad (4.8)$$

де  $0,4$ ,  $0,76$ ,  $6$  – емпіричні коефіцієнти.

15. В залежності від позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м, висоти нахату хвилі на укіс  $h_{run1\%}$ , м і висоти вітрового нагону  $dh$ , м визначається позначка рівня води перед греблею  $Z_f$ , м за формулою:

$$Z_f = Z + h_{run1\%} + dh + \Delta h, \quad (4.9)$$

16. Перевіряється виконання умови:

$$Z_f < Z_{ГГ}. \quad (4.10)$$

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

Згідно із програмою чисельного експерименту проводиться запланована кількість статистичних випробовувань. Кількість статистичних випробовувань, при яких умова (4.10) не виконується, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає імовірність ризику переливу води через гребінь греблі.

Необхідна кількість статистичних випробовувань повинна знаходитись у межах довірчого інтервалу:  $P_{ut}$  – верхня межа інтервалу,  $P_{ub}$  – нижня межа інтервалу. Межі інтервалу обчислюються за формулами [44]:

$$P_{ut} = P_u + \beta \sqrt{\frac{P_u(1-P_u)}{N}}, \quad (4.11)$$

$$P_{ub} = P_u - \beta \sqrt{\frac{P_u(1-P_u)}{N}}, \quad (4.12)$$

де  $P_u$  – величина ризику настання граничного стану;  $\beta$  – аргумент функції нормального розподілу, значення якого відповідає імовірності  $0.5 \cdot (1 + \alpha)$ . При  $\alpha=0.95$ ,  $\beta=1.96$ ;  $N$  – кількість статистичних випробовувань.

Київський гідровузол. Довжина фронту напірних ділянок земляної греблі складає 42.5 км, а безнапірних 13.2 км. До складу земляної греблі входять наступні ділянки: правобережна; ділянка, що спрягає судноплавний шлюз із будівлею ГЕС; острівна і руслова, що примикають до лівобережного устою будівлі ГЕС; лівобережна пойменна і терасна. Усі ділянки земляної греблі зведені способом наміву піщаних ґрунтів. Перевищення гребня греблі (окрім правобережної ділянки) над нормальним підпірним рівнем (НПР) складає 4.5 м. По гребеню греблі і низовому укосу проходить дорога з шириною проїзної частини 3.5 – 5 м з бетонним

покриттям. Верховий укіс греблі закріплений монолітними залізобетонними плитами товщиною 0.25–0.4 м, по шару щебеня товщиною 0.15 – 0.25 м. Низ кріплення закінчується упорним бетонним зубом і кам'яним накиданням по шару щебеня. Нижче упорного зуба укіс не закріплюється, а сположується до ухилу 1:45 за рахунок примикання піщаного ґрунту. Верх кріплення закінчується збірним залізобетонним парапетом заввишки 1 м. На ділянці від ПК 198+00 до кінця греблі улаштовано біологічне кріплення верхового укусу. Низовий укіс закріплено посівом трав. Дренування греблі здійснюється за допомогою трубчастого дренажа і глибокої дрени, каналу-кар'єру довжиною 68 км, шириною 20 – 60 м, глибиною 6 – 8 м. Напірний укіс від позначки 105.0 м до позначки 99.50 м у межах акваторії і до позначки 98.0 за межами акваторії має закладання 1:4 і закріплений залізобетонними плитами товщиною 0.25 м на одношаровому щебеновому фільтрі товщиною 0.15 м. В основі укусу із закладанням 1:4 влаштована берма шириною 6.0 м, закріплена бетонною упорною плитою і кам'яним накиданням. Нижче берми укіс має закладання 1:6 і закріплений щебеновою відсипкою. Верх кріплення закінчується залізобетонним парапетом. По гребеню насипу влаштовані автодорога і тротуар. Кріплення правого берега спрягається з кріпленням на ділянці гідроакумулюючої електростанції.

Канівський гідровузол. Довжина напірного фронту, що утворює земляна гребля складає 16.14 км. Гребля складається із наступних ділянок: лівобережна довжиною 4.6 км, вставка між шлюзом і ГЕС – 0.46 км, руслова – від стояна ГЕС до лівого берега – 1.84 км, лівобережна пойменна 2 – 2.34 км і терасна – 6.9 км. На всіх ділянках, окрім вставки між шлюзом і будівлею ГЕС, гребля зведена наживом піщаних ґрунтів. Позначка гребеня на всіх ділянках 97.0 м. Ширина гребеня правобережної ділянки 11.0 м. По гребеню проходить дорога шириною 4.5 м. Ширина гребеня пойменної ділянки 27.5 м. По гребеню улаштована одноколійна залізнична дорога і автодорога шириною 7.5 м. Ширина гребеня лівобережної терасної ділянки 16.0 м. По гребеню проходить автомобільна дорога шириною 7.5 м. На верховому укосі правобережної руслової і пойменної ділянки на позначці 86.50 м улаштована берма шириною 6.0 м, а на русловій ділянці до позначки 81.00 м укіс із

закладенням 1:5 закріплений кам'яним накіданням товщиною 0.7 м. Верхові укоси із закладанням 1:3.9 закріплені монолітними залізобетонними плитами. Розмір плит у плані 16.0·16.0 м, товщина плит 0.25–0.4 м. Плити укладені на одношарову щебенеу підготовку товщиною 0.15 м. Верх кріплення закінчується обмежувачем скатування хвиль на позначці 97.20 м. На верховому укосі лівобережної терасної ділянки через 100–200 м улаштовані кам'яні буни висотою 0.8 – 2.2 м. Сухі ділянки низового і верхового укосів і окремі ділянки гребеня закріплені посівом трав.

Кременчуцький гідровузол. Земляна гребля складає 10.7 км напірного фронту. Вона розділяється на правобережну греблю – насипну і лівобережну – намивну. До складу правобережної входять: ділянка греблі між Табурищенським мисом і шлюзом і земляна вставка між шлюзом і будівлею ГЕС. Правобережна гребля довжиною 874 м відсипана із дрібнозернистих піщаних ґрунтів. В основі правобережної греблі залягають піски із прошарками суглинків і супісків які підстилаються гранітами. Ділянка правобережної греблі між Табурищенським мисом і шлюзом складається із напірної верхової призми шириною по верху 10 м і позначкою гребеня 83.5 м, до якої примикає майданчик, що не затоплюється, шириною від 230 до 360 м з позначками 82–83 м і низової призми шириною по гребеню 40–90 м на позначці 85 м, яка використовується для автомобільної і залізничної доріг. Земляна вставка між шлюзом і будівлею ГЕС має ширину по верху 96 м і позначку гребеня 85 м. Висота змінюється від 8 м до 12 м. Верховий укіс вставки із закладанням 1:4 закріплений залізобетонними плитами товщиною 0.25 – 0.45 м по фільтровій підготовці. На гребені встановлено бетонний парапет висотою 1 м для захисту від хвиль. Низовий укіс із закладанням 1:2.25 і гребінь закріплені посівом трав. На позначці 74.0 – 74.5 закладений трубчастий дренаж діаметром 0.4 м. Уздовж верхньої лінії бетонного кріплення встановлений хвилезахисний парапет висотою 1.0м і улаштовані дорога і тротуар шириною 4.5 м.

Середньодніпровський гідровузол. Земляна гребля утворює близько 7 км напірного фронту. Правобережна гребля довжиною 2.18 км побудована на поймі від корінного схилу до нижньої голови шлюзу, лівобережна складається із двох ділянок – руслової довжиною – 1.49 км і пойменної – 3.32 км, яка далі переходить в

Орельську захисну дамбу. Максимальна висота греблі у руслі дорівнює 21.0 м, на поймі – 16.0 м. Усі земляні греблі намиті із місцевих дрібнозернистих пісків. Кріплення верхньої частини напірних укосів з ухилом 1:4 виконано монолітними залізобетонними плитами по фільтровій підготовці, нижньої частини з ухилом 1:5 – кам'яним накиданням. Низові укоси з ухилом 1:4 закріплені посівом трав. Дренаж на всіх греблях, окрім руслової ділянки, наслонний із захисним шаром із кам'яного накидання або крупного щебення. На русловій ділянці дренажи двох типів – закритий трубчастий і наслонний. На низовому укосі руслової ділянки улаштовано банкет із місцевої гірської маси. Ширина гребеня правобережної греблі – 36 м, лівобережної – 25 м. Перевищення гребеня руслової і лівобережної гребель над НПР дорівнює 4 м, правобережної – 5 м. Позначка гребеня правобережної греблі 69.0 м, лівобережної 68.0 м. На лівобережній греблі улаштовано парапет висотою 1 м, правобережна гребля – без парапету. В основі земляних гребель залягають дрібнозернисті піски

Каховський гідровузол. Земляна гребля довжиною 3.211 км перекриває основне русло Дніпра, лівобережну пойму і надпойменну терасу. Гребля складається із ділянок: руслової, ділянки між шлюзом і будівлею ГЕС, лівобережної пойменної і надпойменної. По гребеню проходить залізнична колія. Автодорога проходить по бермі з боку нижнього б'єфа на позначці +17.00 м. Руслова гребля має довжину 1206 м, найбільшу висоту 30 м, ширину по гребеню 75 м. Закладення укосів від 1:4 до 1:7. Гребля виконана із дрібнозернистого піску і має розпластаний профіль. Основа греблі складена алювіальними дрібнозернистими пісками потужністю від 0.5 до 8.0 м. Верховий укіс закріплений армобетонними плитами товщиною 0.5 м. Низовий укіс греблі до позначки + 9.00 м закріплено кам'яним мощенням на двошаровому фільтрі. Дренаж здійснюється кам'яним банкетом із двошаровим фільтром і відводящими дренами. По всій довжині греблі для забезпечення стійкості низового укосу за банкетом улаштовано піщане привантаження із майданчиком шириною 80 м на позначці +1.50 м і укосом 1:7. Гребінь греблі і низовий укіс до верху наслонного дренажа вкриті шаром щебеня товщиною 10 см. Земляна гребля між шлюзом і будівлею ГЕС має довжину 240 м і

зведена способом сухої відсипки. Максимальна висота греблі 22.0 м. Верховий укіс від позначки +10.0 м до +20.0 м закріплений армобетонними плитами товщиною 0.4 м. Низовий укіс від підшови до позначки +9.0 м закріплено кам'яним мощенням. Пойменна гребля довжиною 440 м розташована на піщано-ілистих ґрунтах і має профіль аналогічний до руслової греблі. Ширина по гребеню становить 75 м, позначка гребеня +20.0 м. Надпойменна гребля довжиною 1325 м розташована на піщаних ґрунтах і виконана з укосами 1:3 та 1:4. Ширина по гребеню становить від 20 м до 75 м. Відвід дренажних вод здійснюється за допомогою кювета.

Визначення імовірності переливу води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла в рамках параметричної теорії надійності виконано за наведеним нижче алгоритмом.

1. Задається випадкова імовірність швидкості вітру  $pV$ , розподілена від 0 до 1 (рис. 4.1). За даними [191] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Київ, м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом, у м. Канів, м. Кременчук, м. Каховка – логарифмічно-нормальним розподілом.

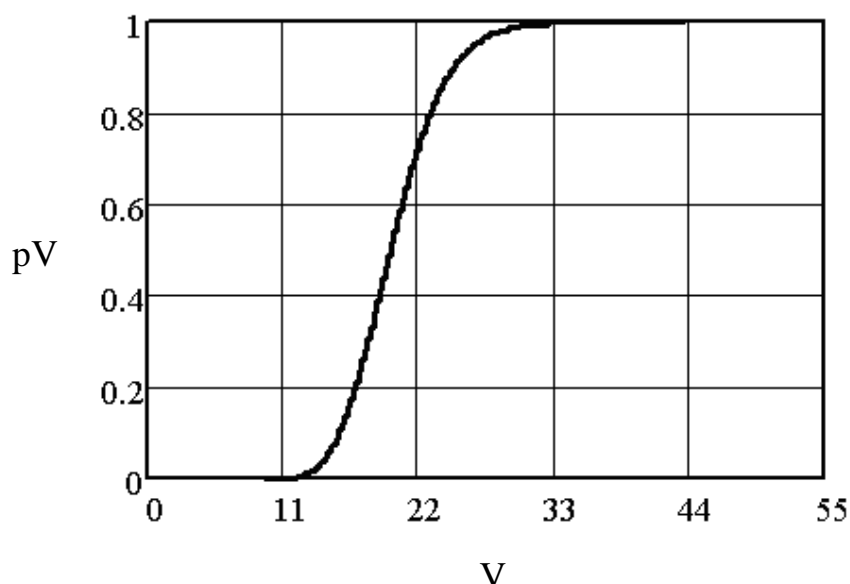


Рис. 4.1. Імовірнісна крива розподілу максимальної швидкості вітру  $V$ , м/с у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла



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

3. Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів (рис. 4.2).

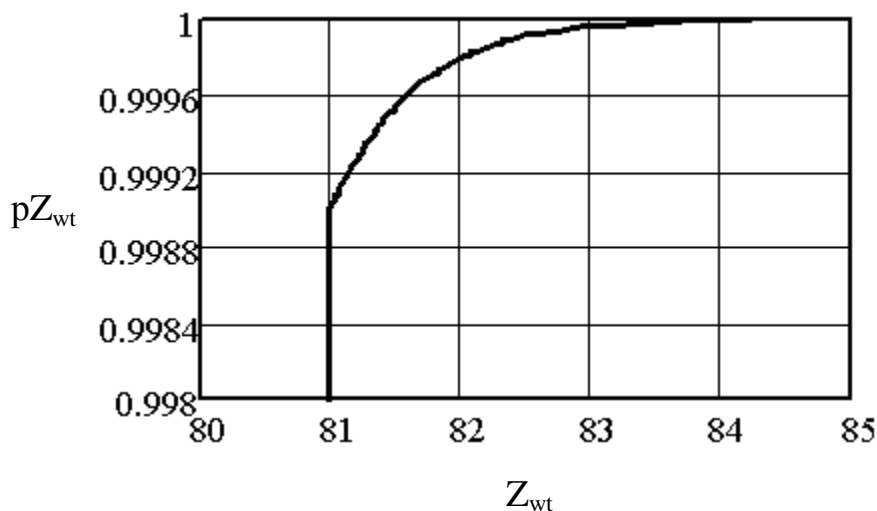


Рис. 4.2. Імовірнісна крива розподілу статичного рівня води перед греблею із ґрунтових матеріалів  $Z_{wt}$ , м Кременчуцького гідровузла

Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [38, 190].

4. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів

5. В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [254].

6. В залежності від середньої глибини води у водосховищі  $H$ , м визначається довжина розгону хвилі  $L$ , м за відомою методикою, наведеною у [282], а також топографічними характеристиками водосховища.

7. В залежності 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. 4.3) за формулою (4.1).

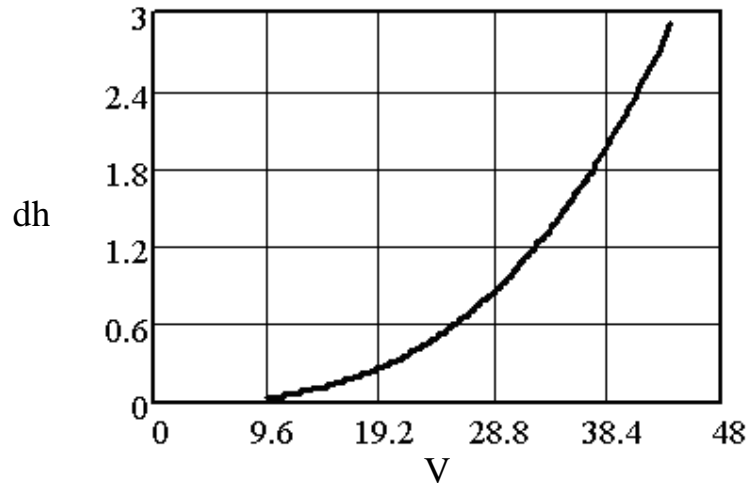


Рис. 4.3. Залежність висоти вітрового нагону  $dh$ , м у Кременчуцькому водосховищі від швидкості вітру  $V$ , м/с

8. В залежності від довжини розгону хвилі  $L$ , м, глибини води у водосховищі  $H$ , м і швидкості вітру  $V$ , м/с визначається середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м (рис. 4.4) за формулою (4.2).

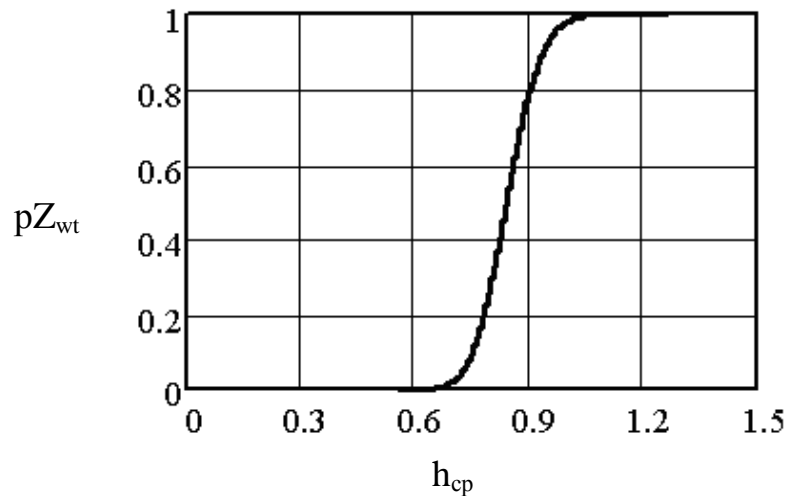


Рис. 4.4. Залежність середньої висоти хвилі  $h_{cp}$ , м у Кременчуцькому водосховищі від позначки статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м

9. В залежності від середньої висоти хвилі  $h_{cp}$ , м і швидкості вітру  $V$ , м/с визначається середній період хвилі  $T_{cp}$ , с за формулою (4.3).

10. В залежності від середнього періоду хвилі  $T_{cp}$ , с визначається середня довжина хвилі  $\lambda_{cp}$ , м за формулою (4.4).

11. В залежності 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  $h1\%$ , м (рис. 4.5) за формулою (4.5).

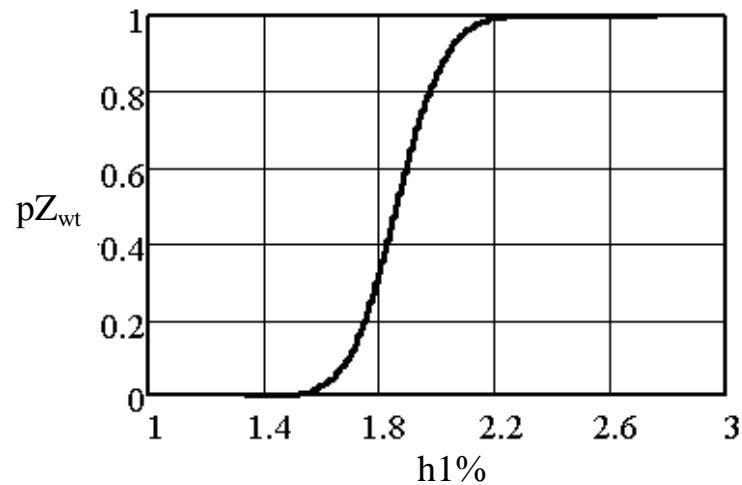


Рис. 4.5. Залежність хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h1\%$ , м у Кременчуцькому водосховищі від позначки статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м

12. В залежності від висоти хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h1\%$ , м визначається висота нахату хвилі на відкос  $h_{run1\%}$ , м за формулами (4.6–4.7).

13. Задається випадкова щорічна імовірність сейсмічного впливу  $pJ_r$ , розподілена від 0 до 1. За значенням  $pJ_r$  визначається квантиль – бальність землетрусу  $J_r$ , бали [70, 190, 447]. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування греблі за типом основи. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби.

14. Визначається висота гравітаційної хвилі  $\Delta h$ , м [70] за формулою (4.8).

15. В залежності від позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м, висоти нахату хвилі на відкос  $h_{run1\%}$ , м і висоти вітрового нагону  $dh$ , м визначається позначка рівня води перед греблею  $Z_f$ , м за формулою (4.9).

16. Перевіряється виконання умови:  $Z_f < Z_{ГГ}$ .

За програмою чисельного експерименту проведено заплановану кількість статистичних випробовувань. Кількість статистичних випробовувань, при яких умова (4.10) не виконується, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає імовірність ризику переливу води через гребінь греблі. Визначена необхідна кількість статистичних випробовувань і межі довірчого інтервалу за формулами (4.11–4.12).

Таблиця 4.1

Результати імовірнісних розрахунків гребель із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду за критерієм переливу води через гребінь

Клас споруди	Кількість статистичних випробовувань	Розрахункове значення імовірності переливу води через гребінь, рік <sup>-1</sup>	Довірчий інтервал, рік <sup>-1</sup>	Допустиме значення імовірності переливу води через гребінь, рік <sup>-1</sup>
Гребля із ґрунтових матеріалів Київського гідровузла				
СС2-1	$1 \cdot 10^7$	$1.58 \cdot 10^{-4}$	$1.50 \cdot 10^{-4} - 1.66 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Гребля із ґрунтових матеріалів Канівського гідровузла				
СС2-1	$1.5 \cdot 10^7$	$8.55 \cdot 10^{-5}$	$8.13 \cdot 10^{-5} - 8.98 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Гребля із ґрунтових матеріалів Кременчукського гідровузла				
СС3	$6 \cdot 10^7$	$2.25 \cdot 10^{-5}$	$2.14 \cdot 10^{-5} - 2.37 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла				
СС2-1	$5 \cdot 10^6$	$4.46 \cdot 10^{-4}$	$4.24 \cdot 10^{-4} - 4.68 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Гребля із ґрунтових матеріалів Каховського гідровузла				
СС3	$5 \cdot 10^7$	$3.19 \cdot 10^{-5}$	$3.03 \cdot 10^{-5} - 3.35 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Аналіз отриманих результатів свідчить що надійність гребель гідровузлів Дніпровського каскаду за умовою недопущення переливу води через гребінь за імовірнісною методикою забезпечена.

## 4.2 Метод розв'язку задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи

Розрахунок і проектування сучасних гідротехнічних споруд потребують оцінки їх надійності і безпеки на основі імовірнісних методів [72–73]. На сьогодні одним із сучасних методів чисельної оцінки надійності складних технічних систем вважається метод статистичних випробовувань (Монте-Карло). Застосування імовірнісних методів вимагає розв'язку задач статистичної динаміки в рамках оцінки надійності складних технічних систем. Під час використання методу статистичних випробовувань для оцінки надійності складної технічної системи необхідно виконувати значну кількість статистичних випробовувань. При кожному статистичному випробовуванні стає необхідним визначення внутрішніх параметрів системи. Саме це викликає певні технічні ускладнення під час розв'язку задач статистичної динаміки.

Пропонуються підходи щодо визначення внутрішніх параметрів складної технічної системи при їх обмеженій кількості із подальшою оцінкою надійності системи методом статистичних випробовувань.

Сучасні методи оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану, розробка критеріїв їх надійності розглянуто у роботах [38, 195, 197, 201–203, 210, 214, 222, 407, 416, 469, 472].

Існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд не ураховують певні кореляційні залежності [197], які існують між природними факторами, котрі є визначальними при оцінці їх надійності [200–221].

Досліджується складна технічна система, стан якої визначається декількома параметрами. Запропонований метод розглянуто на прикладі бетонної гравітаційної греблі Дніпровського гідровузла (див. рис. 4.6).

У якості вихідних даних прийнято випадкові величини: позначку рівня води у верхньому б'єфі –  $H$ , м, а також тангенс кута внутрішнього тертя скельової основи  $tg\varphi$ .

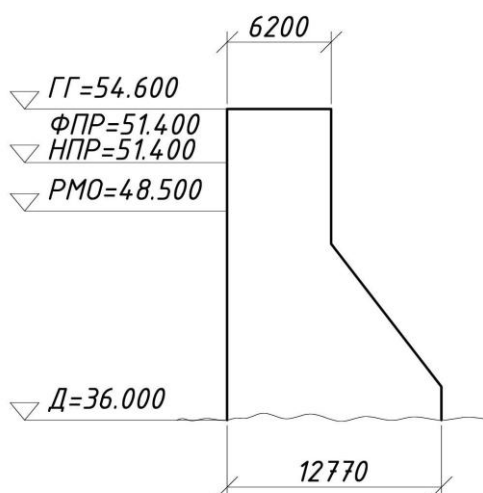


Рис. 4.6. Бетонна гребля Дніпровського гідровузла:  $\nabla$ ГГ – позначка гребеня греблі;  $\nabla$ ФПР – позначка форсованого підпірного рівня;  $\nabla$ НПР – позначка нормального підпірного рівня;  $\nabla$ РМО – позначка рівня мертвого об'єму;  $\nabla$ Д – позначка дна

Спосіб 1. Припустимо, що стійкість бетонної греблі проти зсуву – тобто, коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву  $k$  залежить від зазначених вище випадкових величин. Крім того, при розрахунку також ураховуються навантаження і впливи: власна вага греблі, сила фільтраційного протитиску, сила тиску наносів, та ін. Коефіцієнти запасу стійкості проти зсуву  $k$  бетонної греблі обчислюються для різних комбінацій величин  $H$ ,  $m$ , і  $tg\varphi$ . Результати розрахунку зведено в табл. 4.2.

Важливим є те, що кроки зовнішніх параметрів повинні бути рівними. Тангенс кута внутрішнього тертя скельової основи  $tg\varphi$  прийнятий із рівним кроком забезпеченості. Введемо наступні позначення  $X_i=H_i$ ,  $Y_i= tg\varphi_i$ , ( $i = 1 \dots n$ ),  $K_{i,j}= k_{i,j}$  ( $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n$ ),  $n = 3$ .

У випадку, коли задаються фіксовані значення зовнішніх параметрів  $X_i$ ,  $Y_i$ , ( $i = 1 \dots n$ ), наприклад при  $n = 3$ , а також фіксовані значення внутрішніх параметрів системи  $K_{i,j}$  ( $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n$ ), які залежать від зовнішніх параметрів  $X_i$ ,  $Y_i$ , почергово розв'язуються три системи рівнянь з трьома невідомими коефіцієнтами  $x_j$ ,  $y_j, z_j$  ( $j = 1 \dots n$ ) кожна.

$$x_j + y_j \cdot e^{z_j \cdot Y_i} = K_{i,j}, \quad (i=1..n, j=1), \quad (4.13)$$

$$x_j + y_j \cdot e^{z_j \cdot Y_i} = K_{i,j}, \quad (i=1..n, j=2), \quad (4.14)$$

$$x_j + y_j \cdot e^{z_j \cdot Y_i} = K_{i,j}, \quad (i=1..n, j=3). \quad (4.15)$$

Таблиця 4.2

## Вихідні дані

№ комбінації	Зовнішні параметри системи			Внутрішній параметр системи
	Позначка рівня води у верхньому б'єфі $H$ , м,	Тангенс кута внутрішнього тертя скельової основи $tg\varphi$ .		Коефіцієнт запасу стійкості греблі проти зсуву $k$
		значення	забезпеченість	
1	15.4	0.7	95%	1.67
2	15.4	0.875	50%	1.825
3	15.4	1.05	5%	1.98
4	17.0	0.7	95%	1.48
5	17.0	0.875	50%	1.613
6	17.0	1.05	5%	1.745
7	18.6	0.7	95%	1.31
8	18.6	0.875	50%	1.423
9	18.6	1.05	5%	1.534

Отримані коефіцієнти  $x_j, y_j, z_j$  ( $j = 1..n$ ) підставляються в систему трьох рівнянь з трьома невідомими коефіцієнтами  $l, m, r$ .

$$l + m \cdot e^{r \cdot X_i} = x_j + y_j \cdot e^{z_j \cdot Y}, \quad (i=1..n, j=1..n), \quad (4.16)$$

де  $Y$  – випадкова величина зовнішнього параметру, визначена у відповідності до випадкової імовірності  $pY$ , яка розподілена від 0 до 1.

Після визначення коефіцієнтів  $l, m, r$  внутрішній випадковий параметр системи  $K^*$  визначається за допомогою рівняння:

$$K^* = l + m \cdot e^{r \cdot X}, \quad (4.17)$$

де  $X$  – випадкова величина зовнішнього параметру, визначена у відповідності до випадкової імовірності  $pX$ , яка розподілена від 0 до 1.

Представлений спосіб надає змогу отримати у замкненому вигляді необхідну кількість значень внутрішнього випадкового параметра системи  $K^*$  в залежності від фіксованих значень зовнішніх параметрів  $X, Y$  (рис. 4.7) для використання методу статистичних випробовувань (метод Монте-Карло).

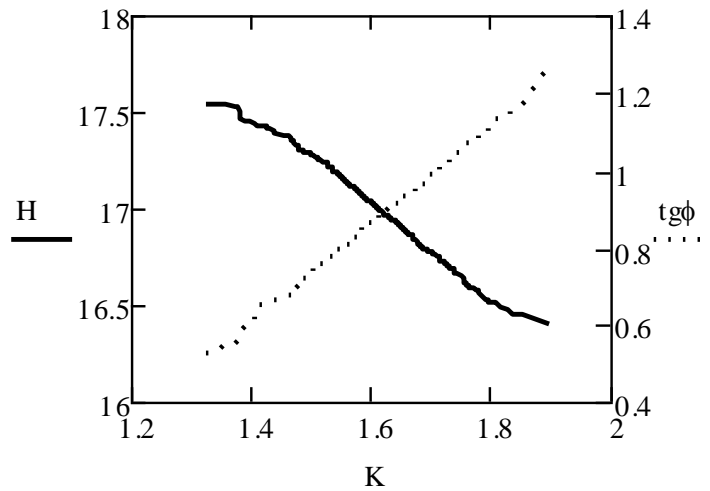


Рис. 4.7. Графік залежності коефіцієнту стійкості  $K$  бетонної греблі проти зсуву від позначки рівня води у верхньому б'єфі  $H$ , м і тангенса кута внутрішнього тертя скельової основи  $tg\phi$

Спосіб 2. Іншим варіантом розв'язання поставленої задачі є використання вбудованого в програмний комплекс Mathcad модуля інтерполяції функцій. Цей модуль надає змогу будувати функціональні залежності при використанні емпіричних даних. Фіксовані значення внутрішніх параметрів системи  $K_{i,j}$  ( $i = 1 \dots n$ ,  $j = 1 \dots n$ ) визначені у вузлових точках із координатами, представленими фіксованими значеннями зовнішніх параметрів  $X_i, Y_i$ .

Під час процедури інтерполяції будується функціональна залежність, значення якої у вузлових точках співпадатимуть із значеннями фіксованих внутрішніх параметрів системи  $K_{i,j}$  (рис. 4.8). Інтерполяція здійснена сплайнами функцій декількох змінних, а саме поліноміальною залежністю. Додатково на інтерполяційну функцію накладається вимога безперервності функції і її похідних у вузлових точках.



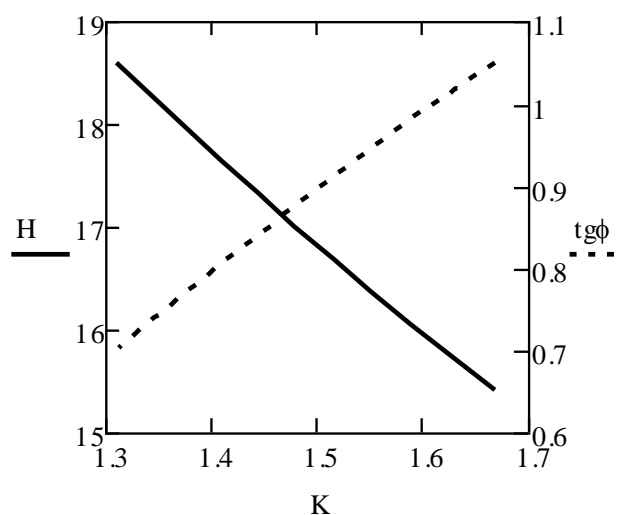


Рис. 4.8. Графік залежності коефіцієнту стійкості  $K$  бетонної греблі проти зсуву від позначки рівня води у верхньому б'єфі –  $H$ , м і тангенса кута внутрішнього тертя скельової основи  $tg\varphi$

Після отримання за двома способами відповідних залежностей коефіцієнту стійкості  $K$  бетонної греблі проти зсуву від позначки рівня води у верхньому б'єфі –  $H$ , м і тангенса кута внутрішнього тертя скельової основи  $tg\varphi$  виконано оцінку імовірності втрати стійкості проти зсуву бетонної гравітаційної греблі Дніпровського гідровузла. Результати розрахунку зведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Результати оцінки імовірності втрати стійкості бетонної гравітаційної греблі  
Дніпровського гідровузла Дніпровського каскаду

Клас споруди	Кількість статистичних випробувань	Довірчий інтервал, рік <sup>-1</sup>	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
Спосіб 1				
СС-3	$1.1 \cdot 10^7$	$1.37 \cdot 10^{-6} - 1.52 \cdot 10^{-6}$	$1.512 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Спосіб 2				
СС-3	$1.1 \cdot 10^7$	$1.37 \cdot 10^{-6} - 1.52 \cdot 10^{-6}$	$1.512 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу обчисленого за формулами (4.11–4.12).

Спосіб визначення внутрішніх параметрів системи складних технічних систем дає можливість отримувати розв'язки задач статистичної динаміки, урахує кореляційні залежності, які існують між природними факторами.

#### **4.3 Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм втрати стійкості верхового і низового укосів**

Під час проектування гребель із ґрунтових матеріалів [313] здійснюють перевірку їх надійності за наступними критеріями настання граничного стану: перелив води через гребінь греблі, втрата стійкості верхового або низового укосів, втрата фільтраційної міцності тіла греблі чи основи.

Під час імовірнісної оцінки надійності і безпеки гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм втрати стійкості верхового або низового укосів в рамках параметричної теорії надійності відсутній стійкий алгоритм, який дозволив би при використанні методу статистичних випробовувань (Монте–Карло) виконувати значну кількість статистичних випробовувань. При кожному статистичному випробовуванні стає необхідним визначення внутрішніх параметрів системи – тобто визначення коефіцієнтів запасу стійкості укосів греблі.

Підходи щодо імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд з урахуванням природно-кліматичних, гідрологічних, сейсмічних впливів, а також недопущенням виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах розглянуто в закордонних роботах [409, 427, 429, 433, 435, 443–444, 448–450, 478]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд.

Питання імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів з урахуванням мінливості природних факторів, статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на території України, аналіз чинників аварійності гідротехнічних споруд розглянуто в роботах [190, 192, 194, 219, 221,

279, 406, 411, 416, 457, 468–469, 472, 479, 498, 503].

Методи оцінки імовірнісної надійності стійкості укосів гребель із ґрунтових матеріалів, ґрунтових схилів, а також стійкість ґрунтових масивів наведені в закордонних роботах [417, 419, 437, 456, 466, 480, 485, 499–500].

Запропонований алгоритм передбачає розв’язок наступних задач: отримати чисельне значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхового і низового укосів гребель гідровузлів Дніпровського каскаду; побудувати функціональні залежності між значеннями коефіцієнтів запасу стійкості укосів греблі і позначками рівнів води у верхньому і нижньому б’єфах; реалізувати алгоритм оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів методом статистичних випробовувань (Монте-Карло). Чисельну апробацію запропонованого алгоритму здійснити на греблях із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду.

Значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхового і низового укосів гребель гідровузлів Дніпровського каскаду отримано із залученням сучасного чисельного методу скінчених елементів, реалізований у програмному комплексі Midas GTS NX із застосуванням методу зниження міцності (або редукції сил). Функціональні залежності між значеннями коефіцієнтів запасу стійкості укосів греблі і позначками рівнів води у верхньому і нижньому б’єфах побудовані із використанням модуля інтерполяції функцій вбудованого в програмний комплекс Mathcad. Алгоритм оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів побудовано за методом статистичних випробовувань (метод Монте-Карло) в програмному комплексі Mathcad. Чисельну реалізацію запропонованого алгоритму здійснено на греблях із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду.

Перевірка надійності укосів за детерміністичною методикою виконуються для основного (рівень води у верхньому б’єфі відповідає нормальному підпірному рівню) і особливого (рівень води у верхньому б’єфі відповідає форсованому підпірному рівню) сполучень навантажень згідно з умовою [73] :

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot F \leq \gamma_c \cdot R, \quad (4.18)$$

де  $F$  – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнту надійності за навантаженням  $\gamma_f$ ;  $R$  – узагальнена несуча здатність споруди чи основи;  $\gamma_{lc}$  – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень  $\gamma_{lc}=1.0$ , для особливого сполучення навантажень  $\gamma_{lc}=0.9$ ;  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи приймається  $\gamma_c = 1.1$ ;  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності, приймається  $\gamma_n = 1.25$  для споруд класу наслідків СС3,  $\gamma_n = 1.2$  для споруд класу наслідків СС2-1.

Для оцінки ризику втрати стійкості укосів за методом граничних станів формулу (4.18) доцільно представити у вигляді:

$$k = \frac{R}{F} \geq k_n = \frac{\gamma_n \cdot \gamma_c}{\gamma_{lc}}, \quad (4.19)$$

де  $k$  – розрахункове значення коефіцієнту запасу стійкості;  $k_n$  – нормативне значення коефіцієнту запасу стійкості.

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: укоси гребель Кременчуцького, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.14$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ ; укоси гребель Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.09$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ .

Згідно з [153] значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: укоси гребель Кременчуцького, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.32$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.18$ ; укоси гребель Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.26$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.14$ .

За детерміністичною методикою для кругло циліндричних поверхонь ковзання за методом нахилених сил взаємодії, рекомендованих [72] отримано такі значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: гребля Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень мінімальний коефіцієнт запасу стійкості  $k_c = 1.32$ ; гребля Канівського гідровузла:

для основного і особливого сполучень навантажень мінімальний коефіцієнт запасу стійкості  $k_c = 1.37$ ; гребля Кременчуцького гідровузла: для особливого сполучення навантажень мінімальний коефіцієнт запасу стійкості  $k_c = 1.59$ ; гребля Середньодніпровського гідровузла: для особливого сполучення навантажень мінімальний коефіцієнт запасу стійкості  $k_c = 1.24$ ; гребля Каховського гідровузла: для основного і особливого сполучень навантажень мінімальний коефіцієнт запасу стійкості  $k_c = 1.32$ .

Розрахункові коефіцієнти запасу стійкості на зсув не перевищують нормативних, тому отримані результати свідчать, що за детерміністичною методикою стійкість укосів гребель гідровузлів Дніпровського каскаду забезпечена.

Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критеріями стійкості верхового та низового укосів в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову залежності між позначками рівнів верхнього і нижнього б'єсів, значеннями розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхових і низових укосів гребель. Для визначення коефіцієнтів запасу стійкості укосів при різних позначках рівнів води використано чисельний метод скінчених елементів, реалізований у програмному комплексі Midas GTS NX. Даний програмний комплекс для оцінки стійкості укосів використовує метод зниження міцності (або метод редукції сил). Суттєвою перевагою цього методу на відміну від традиційних (наприклад методикою для кругло циліндричних поверхонь ковзання за методом нахилених сил взаємодії – метод Можевітінова, метод Терцагі, метод Крея, метод вагового тиску, метод Феленіуса, метод Спенсера, метод Американського інженерного корпусу та інші) є те, що процес руйнування укосу визначається без попереднього припущення відносно площин руйнування. Метод зниження міцності є прямим методом, який передбачає поступове зниження значень параметрів зсуву ( $\varphi$ ,  $c$ ) ґрунту укосів до настання руйнування.

Вихідними даними слугують: щільність ґрунту, у тому числі і у взваженому стані, коефіцієнт пористості, коефіцієнт внутрішнього тертя, питоме зчеплення, модуль деформації, коефіцієнт Пуасона.

У результаті виконання систематичних розрахунків отримано значення

розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхового і низового укосів в залежності від рівнів води у верхньому і нижньому б'єсах і кута внутрішнього тертя ґрунтів тіла гребель і основи, які є суттєво неоднорідними (табл. 4.4), ізополя максимальних пластичних деформацій (рис. 4.9–4.13).

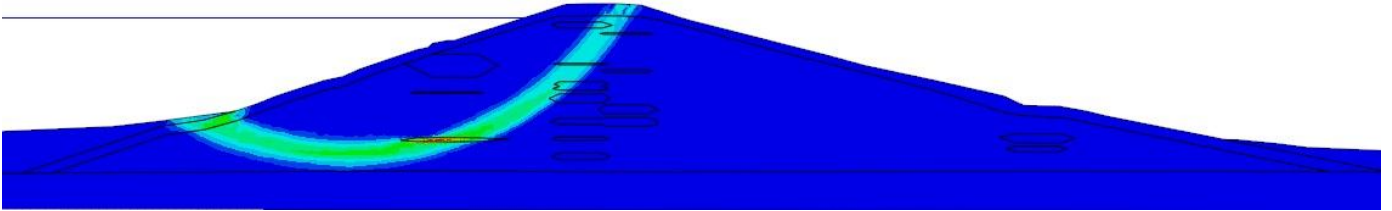


Рис. 4.9. Ізополя максимальних пластичних деформацій  $\varepsilon_{max}$  греблі із ґрунтових матеріалів Київського гідровузла

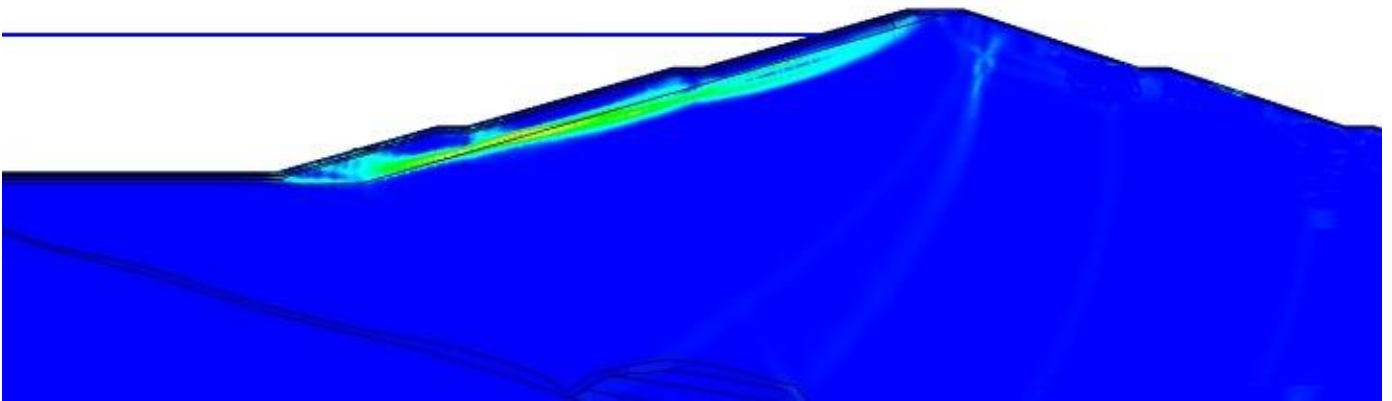


Рис. 4.10. Ізополя максимальних пластичних деформацій  $\varepsilon_{max}$  греблі із ґрунтових матеріалів Канівського гідровузла

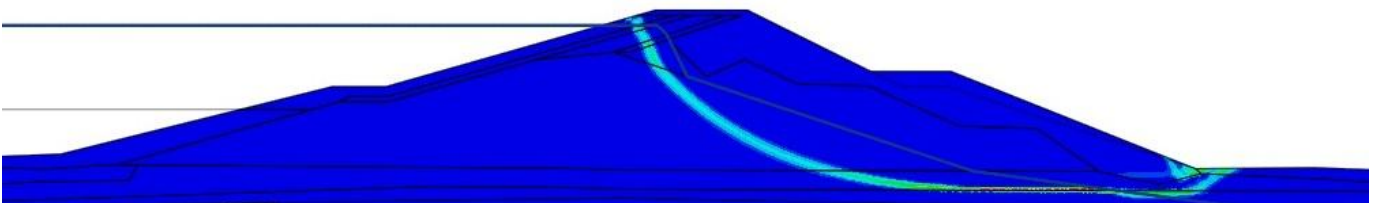


Рис. 4.11. Ізополя максимальних пластичних деформацій  $\varepsilon_{max}$  греблі із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла

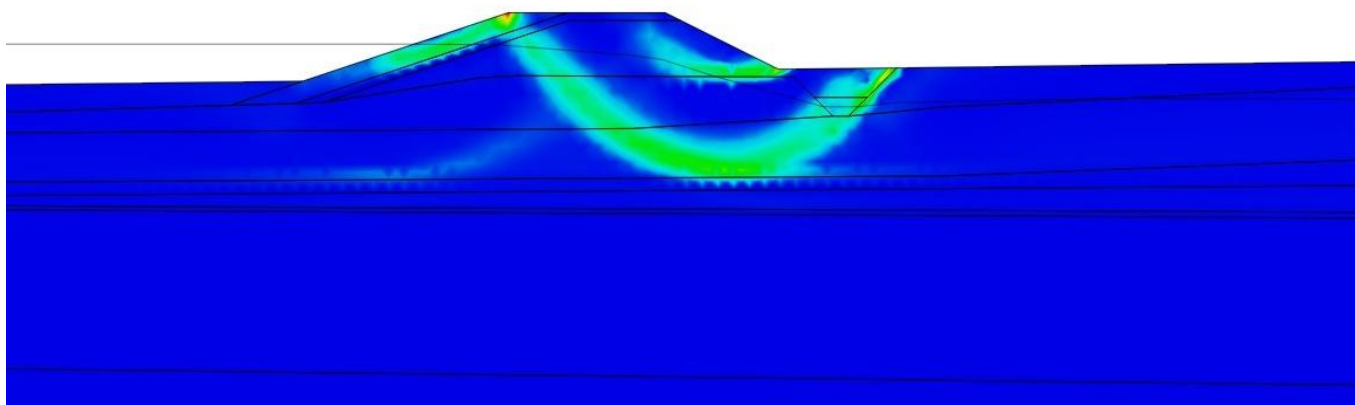


Рис. 4.12. Ізополя максимальних пластичних деформацій  $\varepsilon_{max}$  греблі із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла

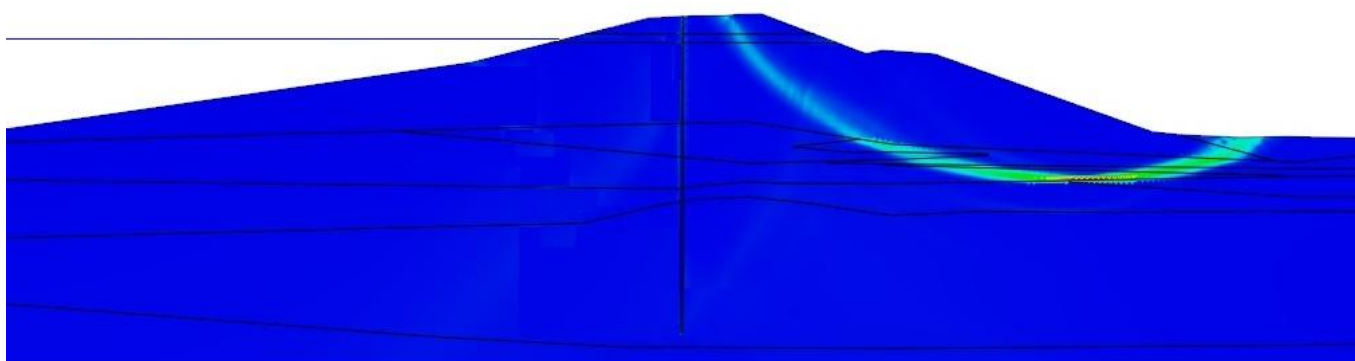


Рис. 4.13. Ізополя максимальних пластичних деформацій  $\varepsilon_{max}$  греблі із ґрунтових матеріалів Каховського гідровузла

Отримано узагальнюючі розрахункові коефіцієнти запасу стійкості укосів, які склали: гребля Київського гідровузла  $k_c = 1.54$ ; гребля Канівського гідровузла  $k_c = 1.94$ ; гребля Кременчуцького гідровузла  $k_c = 1.29$ ; гребля Середньодніпровського гідровузла  $k_c = 2.27$ ; гребля Каховського гідровузла  $k_c = 2.49$ .

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

Таблиця 4.4

Залежності між позначками рівнів верхніх б'єфів, м, кутів внутрішнього тертя ґрунтів тіла гребель, основи і значеннями розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхових і низових укосів гребель гідровузлів Дніпровського каскаду

Найменування	Позначка рівня верхнього б'єфа, м	Забезпеченість розрахункового значення кута внутрішнього тертя матеріалу гребель $\text{tg}\varphi$	Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості верхового укосу	Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості низового укосу
1	2	3	4	5
Гребля Київського гідровузла	104.4	0.95%	1.60	1.67
		0.5%	2.0	2.09
		0.05%	2.4	2.5
	103.7	0.95%	1.56	1.604
		0.5%	1.95	2.0
		0.05%	2.34	2.4
	103.0	0.95%	1.503	1.50
		0.5%	1.88	1.88
		0.05%	2.26	2.25
Гребля Канівського гідровузла	92.7	0.95%	2.105	1.413
		0.5%	2.63	1.77
		0.05%	3.16	2.12
	92.1	0.95%	2.049	1.362
		0.5%	2.56	1.7
		0.05%	3.07	2.04
	91.5	0.95%	2.0	1.303
		0.5%	2.5	1.63
		0.05%	3.0	1.955



Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4	5
Гребля Кременчу- цького гідровузла	82.4	0.95%	2.48	1.98
		0.5%	3.1	2.48
		0.05%	3.72	2.97
	81.7	0.95%	2.394	1.861
		0.5%	2.99	2.33
		0.05%	3.59	2.79
	81.0	0.95%	2.32	1.77
		0.5%	2.9	2.21
		0.05%	3.48	2.66
Гребля Середньо- дніпровсь- кого гідровузла	66.0	0.95%	1.377	1.42
		0.5%	1.72	1.775
		0.05%	2.07	2.13
	65.0	0.95%	1.386	1.393
		0.5%	1.73	1.74
		0.05%	2.08	2.09
	64.0	0.95%	1.402	1.365
		0.5%	1.75	1.71
		0.05%	2.1	2.05
Гребля Каховського гідровузла	18.0	0.95%	2.55	1.945
		0.5%	3.19	2.43
		0.05%	3.83	2.92
	17.0	0.95%	2.496	1.83
		0.5%	3.12	2.29
		0.05%	3.744	2.745
	16.0	0.95%	2.405	1.72
		0.5%	3.01	2.15
		0.05%	3.61	2.58

Під час інтерполяції будується функціональна залежність, значення якої у вузлових точках співпадатимуть із значеннями фіксованих внутрішніх параметрів системи  $K_{i,j}$ . Інтерполяція здійснена сплайнами функцій декількох змінних, а саме поліноміальною залежністю. Додатково на інтерполяційну функцію накладається вимога безперервності функції і її похідних у вузлових точках [219].

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

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

При кожному випробовуванні гребля вважається ненадійною при досягненні хоча б одного граничного стану – втрата стійкості верхового або низового укосів. Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань  $N$  разів. Кількість випробовувань при яких гребля вважається ненадійною, віднесена до загальної кількості випробовувань  $N$  визначає величину ризику настання граничного стану греблі із ґрунтових матеріалів за весь строк експлуатації і здійснюється її перерахунок у щорічну величину ризику.

Результати імовірнісної оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів гідровузлів Дніпровського каскаду в рамках параметричної теорії надійності свідчать про наступне: розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану гребель із ґрунтових матеріалів: Київського гідровузла  $1.43 \times 10^{-6}$  рік<sup>-1</sup>, Канівського гідровузла  $2.76 \times 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup>, Середньодніпровського гідровузла  $1.26 \times 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup>, що не перевищує допустимого значення імовірності настання граничного стану  $5 \times 10^{-4}$  рік<sup>-1</sup> для споруд класу відповідальності СС2–1; Кременчуцького гідровузла  $1.88 \times 10^{-6}$  рік<sup>-1</sup>, Каховського гідровузла  $4.7 \times 10^{-7}$  рік<sup>-1</sup>, що не перевищує допустимого значення імовірності настання граничного стану  $5 \times 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup> для споруд класу відповідальності СС3. Певною мірою результати імовірнісних розрахунків надійності гребель корелюються із результатами, отриманими за детерміністичною методикою. Необхідна кількість статистичних випробовувань і межі довірчого інтервалу обчислені за формулами (4.11–4.12).

#### 4.4 Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критеріями втрати фільтраційної міцності тіла греблі і основи

У відповідності до норм проектування і основних положень щодо розрахунку гребель із ґрунтових матеріалів класів наслідків СС3 та СС2-1 необхідно виконувати розрахунки загальної фільтраційної міцності тіла гребель та основ [311, 313].

Для забезпечення фільтраційної міцності тіла греблі із ґрунтових матеріалів і не скельової основи необхідне виконання умови (4.20):

$$I_{est,m} \leq \frac{I_{cr,m}}{\gamma_n}, \quad (4.20)$$

де  $I_{est,m}$  – діючий середній градієнт напору в розрахунковій області фільтрації;  $I_{cr,m}$  – критичний середній градієнт напору;  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності по ступеню відповідальності споруди, для споруд класу наслідків СС3  $\gamma_n=1.25$ , для споруд класу наслідків СС2-1  $\gamma_n=1.20$ , для споруд класу наслідків СС2-2  $\gamma_n=1.15$ , для споруд класу наслідків СС1  $\gamma_n=1.10$  [73].

За рекомендаціями [313] критичний середній градієнт напору  $I_{cr,m}$  для тіла греблі при відсутності необхідних досліджень або при попередніх розрахунках можуть прийматись за аналогами або даними, наведеними в [313]. Так для тіла греблі із суглинку  $I_{cr,m} = 4-1.5$ , із супіску  $I_{cr,m} = 2-1$ , із середніх пісків  $I_{cr,m} = 1$ , із дрібних пісків  $I_{cr,m} = 0.75$ .

За рекомендаціями [311] значення  $I_{est,m}$  для основ споруд класу наслідків СС3 і СС2-1 слід визначати за методом подовженої контурної лінії, а в окремих випадках – іншими наближеними методами, а розрахункові значення осередненого критичного градієнта напору в основі споруди допускається приймати [311]: для дрібних пісків  $I_{cr,m} = 0.32$ , для пісків середньої крупності  $I_{cr,m} = 0.42$ , для крупних пісків  $I_{cr,m} = 0.48$ .

За детерміністичною методикою за методом граничних станів із використанням методу, запропонованому Р. Р. Чугаєвим [395], згідно із яким уся область фільтрації умовно розділяється на основу, але при цьому гребля вважається водонепроникною, а також тіло греблі, при цьому основа вважається

водонепроникною, отримано значення розрахункових середніх градієнтів напору для основного і перевірного розрахункових випадків, які для гребель із ґрунтових матеріалів і основ гідровузлів Дніпровського каскаду представлені в таблиці 4.5.

Результати розрахунків свідчать, що значення розрахункових середніх градієнтів напору  $I_{est,m}$  тіла гребель і основ для основного і перевірного розрахункових випадків не перевищують значень осереднених критичних градієнтів напору  $I_{cr,m}$ , тому надійність гребель із ґрунтових матеріалів і основ гідровузлів Дніпровського каскаду за детерміністичною методикою забезпечена.

Таблиця 4.5

Розрахункові середні градієнти напору  $I_{est,m}$  і осереднені критичні градієнти напору  $I_{cr,m}$  гребель із ґрунтових матеріалів і основ гідровузлів Дніпровського каскаду

Назва споруди	Розрахунковий середній градієнт напору тіла греблі $I_{est,m}$		Осереднений критичний градієнт напору тіла греблі $I_{cr,m} / \gamma_n$	Розрахунковий середній градієнт напору основи $I_{est,m}$		Осереднений критичний градієнт напору в основі $I_{cr,m} / \gamma_n$
	основний розрахунковий випадок	перевірний розрахунковий випадок		основний розрахунковий випадок	перевірний розрахунковий випадок	
гребля Київського гідровузла	0.046	0.056	0.625	0.015	0.020	0.267
гребля Канівського гідровузла	0.030	0.038	0.625	0.014	0.018	0.267
гребля Кременчуцького гідровузла	0.107	0.139	0.8	0.038	0.043	0.336
гребля Середньодніпровського гідровузла	0.162	0.186	0.625	0.072	0.084	0.267
гребля Каховського гідровузла	0.039	0.047	0.6	0.018	0.022	0.256

При виконанні імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності використані детерміністичні і випадкові величини. Детерміністичними величинами прийнято: геометричні розміри гребель, розміри елементів підземного контуру.

Імовірнісні величини визначаються в наступній послідовності.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів. При цьому, статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [38, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею.

В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед греблею. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [254].

Задається залежність між рівнем верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначається випадкова величина інтенсивності фільтраційного протитиску  $A_f$ , кПа і випадкові величини значень розрахункових середніх градієнтів напору  $I_{est,m}$  тіла гребель і основ.

Задаються випадкові, розподілені від 0 до 1, імовірності  $pI_{cr,m}$  значень осереднених критичних градієнтів напору тіла гребель і основи. Для перерахунку осереднених критичних градієнтів напору за весь строк експлуатації у щорічні виконано зведення у степень  $T$  значень імовірностей  $pI_{cr,m}$  осереднених критичних градієнтів напору тіла гребель і основи. За значенням  $pI_{cr,m}$  визначаються квантили – осереднені критичні градієнти напору  $I_{cr,m}$  тіла гребель і основи.

Випадкові величини  $I_{cr,m}$  задані за нормальним законом розподілу із коефіцієнтами варіації  $C_v = 0.122$  (для споруд класу СС3),  $C_v = 0.102$  (для споруд класу СС2-1) із математичними очікуваннями: для тіла греблі: із середніх пісків  $m_{Icr,m} = 1$ , із дрібних пісків  $m_{Icr,m} = 0.75$ ; для основ гребель: для дрібних пісків  $m_{Icr,m} = 0.32$ , для пісків середньої крупності  $m_{Icr,m} = 0.42$ .

Отримані вище величини підставляються у рівняння зв'язку:

$$\frac{I_{cr,m}}{I_{est,m}} \geq 1, \quad (4.21)$$

Розрахунки виконуються методом статистичних випробувань. Підсумовується кількість випробувань, при яких відбувається настання граничного стану. Зазначена кількість випробувань віднесена до загальної кількості випробувань і визначає щорічну величину ризику втрати фільтраційної міцності тіла гребель із ґрунтових матеріалів та основ.

Виконується порівняння ризику втрати надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критеріями втрати фільтраційної міцності тіла греблі і основи із допустимою величиною. Результати наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Результати оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати фільтраційної міцності тіла греблі і основи

№	Назва споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм		Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			фільтраційна міцність тіла греблі	фільтраційна міцність основи	
1	Гребля Київського гідровузла	СС2-1	$1.22 \cdot 10^{-9}$	$9.27 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-4}$
2	Гребля Канівського гідровузла	СС2-1	$7.67 \cdot 10^{-10}$	$8.39 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-4}$
3	Гребля Кременчуцького гідровузла	СС3	$4.29 \cdot 10^{-9}$	$2.64 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$
4	Гребля Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$7.63 \cdot 10^{-9}$	$5.32 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$
5	Гребля Каховського гідровузла	СС3	$9.35 \cdot 10^{-10}$	$1.15 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничного стану гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати фільтраційної міцності тіла греблі і основи не перевищує допустимих значень, тому надійність гребель із ґрунтових матеріалів і основ гідровузлів Дніпровського каскаду забезпечена.

#### **4.5 Імовірнісна оцінка надійності кріплення укосів гребель із ґрунтових матеріалів**

Кріплення укосів гребель із ґрунтових матеріалів захищають укоси від рунівного впливу хвиль і льодових впливів, тому являються відповідальними конструктивними елементами гребель. Рекомендації по улаштуванню кріплень укосів гребель регламентовано нормами [313]. Навантаження і впливи на кріплення укосів від хвиль і льоду розглядаються у нормативному документі [312].

На Дніпровському каскаді гідроелектростанцій кріплення укосів з боку верхніх б'єфів гребель із ґрунтових матеріалів виконано залізобетонними плитами. Товщина плит кріплення руслових ділянок гребель: Київського гідровузла 0.4м (плити монолітні), Канівського гідровузла 0.3м (плити монолітні); Кременецького гідровузла 0.45м (плити збірні); Середньодніпровського гідровузла 0.35м (плити збірні); Каховського гідровузла 0.5м (плити збірні).

За статистичними даними максимальної товщини льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій [38], опрацьованими у розділі 2.4, щорічна максимальна товщина льоду зменшується з півночі на південь, наприклад: щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Київського гідровузла у два рази перевищує щорічну максимальну товщину льоду у водосховищі Каховського гідровузла.

Руйнування кріплення укосів гребель із ґрунтових матеріалів може відбуватись унаслідок дії впливу вітрових хвиль, впливу рухомих льодових полів, впливу суцільного льодового покриву при його температурному розширенні, впливу

від заторних і зажорних мас льоду, від впливу примерзлого до укусу льоду при зміні рівня води у водосховищі. За результатами детерміністичних розрахунків встановлено, що найбільший ризик руйнування кріплення укусів з боку верхніх б'єсів гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм виривання плити під впливом примерзлого льоду при зміні рівня води у водосховищі.

Методика визначення навантажень на плити кріплення укусів від примерзлого льоду при зміні рівня води у водосховищі наведена у [192], згідно з якою вертикальне лінійне навантаження  $f_d$ , МН/м на 1 п.м. довжини по фронту споруди при зміні рівня води визначають за формулою:

$$f_d = 0.2 \cdot h_0 \cdot \sqrt[4]{h_{\max}^3}, \quad (4.22)$$

де  $h_0$  – зміна рівня води, м, при цьому  $h_0 \leq h_{\max}$ ;  $h_{\max}$  – максимальна товщина льоду, м забезпеченістю 1%.

Момент сили  $M_l$ , МН·м/м що сприймає 1 п.м. довжини по фронту споруди при зміні рівня води визначають за формулою:

$$M_l = 2.6 \cdot h_0 \cdot \sqrt{h_{\max}^3}. \quad (4.23)$$

Перевірка стійкості плит кріплення укусів при вириваючій дії примерзлого льоду детально розібрана у [396] і здійснюється за умовою:

$$\frac{M_r}{M_l} \geq 1, \quad (4.24)$$

де  $M_r$  – момент утримуючих сил відносно вертикального перерізу;  $M_l$  – крутний момент, вириваючий кріплення відносно вертикального перерізу.

Момент утримуючих сил відносно вертикального перерізу визначається за формулою:

$$M_r = M_{Gb} + M_{Gl} + M_{Ggr} + M_{Nc}, \quad (4.25)$$

де  $M_{Gb}$  – момент сил від власної ваги плит кріплення;  $M_{Gl}$  – момент сил від власна ваги примерзлого льоду;  $M_{Ggr}$  – момент сил від власної ваги примерзлого до плит кріплення ґрунту;  $M_{Nc}$  – момент від реактивних сил  $N_c$  у зв'язках сусідніх елементів кріплення.



При виконанні імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності використані детерміністичні і випадкові величини. Детерміністичними величинами прийнято: геометричні розміри плит кріплення, коефіцієнт закладання верхового укосу греблі, власна вага плит кріплення, власна вага примерзлого льоду, власна вага примерзлого до плит кріплення ґрунту, реактивні сили  $N_c$  у зв'язках сусідніх елементів кріплення.

Імовірнісні величини визначаються в наступній послідовності.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $ph_{max}$  щорічної максимальної товщини льоду  $h_{max}$  у водосховищі. За значенням  $ph_{max}$  визначається квантиль – щорічна максимальна товщина льоду  $h_{max}$  у водосховищі.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею із ґрунтових матеріалів. При цьому, статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [38, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль - позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею. Спрацювання або наповнення водосховища, що спричиняє опускання або підйом льоду, відбувається на величину яка не перевищує максимальну товщину льоду у водосховищі. Якщо рівень води у водосховищі  $Z_{wt}$ , м вище середини висоти плити кріплення, то задається підйом рівня води і відповідно льоду. Якщо рівень води  $Z_{wt}$ , м у водосховищі нижче середини висоти плити кріплення, то задається зниження рівня води і відповідно льоду. Зазначений підхід обумовлює найбільш несприятливий розрахунковий випадок щодо забезпечення стійкості плит кріплення укосів при вириваючій дії примерзлого льоду.

Визначається момент сили  $M_l$  що сприймає плита кріплення по фронту споруди при зміні рівня води. Визначається момент утримуючих сил  $M_r$  відносно вертикального перерізу. Отримані вище величини підставляються у рівняння зв'язку (4.24). Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких відбувається настання граничного стану. Зазначена кількість випробовувань віднесена до загальної

кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати стійкості плит кріплення укосів при вириваючій дії примерзлого льоду і виконується порівняння із допустимою величиною. Результати наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Результати оцінки надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критеріями втрати стійкості плит кріплення укосів при вириваючій дії примерзлого льоду

№	Назва споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм втрати стійкості плит кріплення укосів	Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
1	Гребля Київського гідровузла	СС2-1	$4.75 \cdot 10^{-22}$	$5 \cdot 10^{-4}$
2	Гребля Канівського гідровузла	СС2-1	$5.12 \cdot 10^{-24}$	$5 \cdot 10^{-4}$
3	Гребля Кременчуцького гідровузла	СС3	$4.01 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^{-5}$
4	Гребля Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$6.13 \cdot 10^{-18}$	$5 \cdot 10^{-4}$
5	Гребля Каховського гідровузла	СС3	$2.34 \cdot 10^{-20}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничного стану гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду за критерієм втрати стійкості плит кріплення укосів при вириваючій дії примерзлого льоду не перевищує допустимих значень.

#### **4.6 Імовірнісна оцінка надійності бетонних гребель на скельовій основі за критерієм втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності тіла греблі, механічної міцності основи, відмови затвору водозливу**

Детерміністична оцінка надійності бетонних гребель на скельовій основі за методом граничних станів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності тіла греблі, механічної міцності основи, відмови затвору

водозливу. Під час розрахунків загальної і місцевої міцності, стійкості бетонних гребель повинна виконуватись одна із умов [314]:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot F \leq \gamma_{cd} \cdot R, \quad (4.26)$$

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot \sigma_d \leq \gamma_{cd} \cdot \Phi(R_s, R_c), \quad (4.27)$$

де  $F$  – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнту надійності за навантаженням  $\gamma_f$ ;  $R$  – узагальнена несуча здатність споруди чи основи;  $\gamma_{lc}$  – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень  $\gamma_{lc}=1.0$ ; для особливого сполучення навантажень  $\gamma_{lc}=0.9$ ; для сполучення навантажень у період будівництва  $\gamma_{lc}=0.95$ ;  $\gamma_{cd}$  – коефіцієнт умов роботи (приймається при розрахунках стійкості бетонних гравітаційних гребель на скельовій основі: для поверхонь зсуву, які проходять по тріщинах у масиві основи – 1; для поверхонь зсуву, які проходять по контакту бетон – скеля – 0.9) [476];  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності, приймається за [73];  $\sigma_d$  – розрахункове значення напруження;  $\Phi$  – функція, вигляд якої залежить від характеру напружено-деформованого стану греблі;  $R_s, R_b$  – розрахункові значення опору арматури і бетону.

1. Умова стійкості греблі проти зсуву у відповідності до (4.26) має вигляд:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot F_c \leq \gamma_{cdc} \cdot R_c, \quad (4.28)$$

де  $F_c$  – розрахункове значення узагальненого сили зсуву;  $R_c$  – розрахункове значення межового опору зсуву;  $\gamma_{cdc}$  – коефіцієнт умов роботи, приймається  $\gamma_{cdc} = 0.95$ .

2. Умова міцності бетону при стисканні, у відповідності з якою в усіх точках греблі повинна виконуватись нерівність:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot |\sigma_3| \leq \gamma_{cdb} \cdot R_b, \quad (4.29)$$

де  $|\sigma_3|$  – максимальне по абсолютному значенню стискаюче напруження;  $R_b$  – розрахунковий опір бетону при стисканні;  $\gamma_{cdb}$  – коефіцієнт умов роботи, приймається  $\gamma_{cdb} = 0.9$ .

В припущенні лінійного розподілу нормальних напружень в тілі греблі на горизонтальних майданчиках їх обчислюють за формулою позацентрового розтягання-стискання, регламентованою [314]:

$$\sigma_y = -\frac{N}{A} + \frac{M}{I_x \cdot x}, \quad (4.30)$$

де  $A$  – площа перерізу;  $N$  – вертикальна поздовжня сила;  $M$  – згинальний момент;  $I_x$  – момент інерції перерізу греблі;  $x$  – координата.

При цьому нормальні напруження  $\sigma_x$  у вертикальних перерізах греблі мають апроксимацію за кубічною параболою, а дотичні напруження  $\tau$  – за параболою другого ступеня. Чисельні приклади практичних розрахунків свідчать, що розподіл напружень  $\sigma_x$  буде близький до лінійної залежності [277] і може бути апроксимований:

$$\sigma_x = a_1 + d_1 \cdot x, \quad (4.31)$$

де  $a_1, d_1$  – коефіцієнти.

Дотичні напруження можуть бути апроксимовані поліномом:

$$\tau = a_3 + d_3 \cdot x + c_3 \cdot x^2, \quad (4.32)$$

де  $c_3$  – коефіцієнт.

Значення коефіцієнта  $a_1$  та  $d_1$  визначаються за формулами:

$$a_1 = \sigma_x^u, \quad (4.33)$$

$$b_1 = \frac{(\sigma_x^t - \sigma_x^u)}{b}, \quad (4.34)$$

де  $\sigma_x^u$  – нормальні напруження на напірній грані греблі;  $\sigma_x^t$  – нормальні напруження на низовій грані греблі;  $b$  – ширина перерізу греблі.

Коефіцієнти  $a_3$  та  $c_3$  визначаються за формулами:

$$a_3 = \tau, \quad (4.35)$$

$$c_3 = \frac{6}{b^3} \left[ \frac{(\tau^t - \tau^u)}{2} - q \right], \quad (4.36)$$

$$q = a_3 \cdot b + \frac{d_3 \cdot b^2}{2} + \frac{c_3 \cdot b^3}{3}, \quad (4.37)$$

де  $q$  – перерізуюча сила у перерізі що розглядається;  $\tau^u$  – дотичні напруження на напірній грані;  $\tau^t$  – дотичні напруження на низовій грані.

Головні напруження визначаються за формулами:

$$\sigma_{1,3} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau^2}}{2}. \quad (4.38)$$

Напрямки головних напружень визначаються кутами:

$$\operatorname{tg} \theta_{1,3} = \frac{-(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau^2}}{2 \cdot \tau}. \quad (4.39)$$

Дотичні напруження з боку верхнього б'єфа розраховуються за формулою:

$$\tau^u = (\gamma_w H_d^u + \sigma_y^u) m_u, \quad (4.40)$$

де  $\gamma_w$  – питома вага води;  $H_d^u$  – напір над розрахунковим перерізом з боку верхнього б'єфа;  $m_u$  – нахил верхової грані на рівні розрахункового перерізу.

Дотичні напруження з боку нижнього б'єфа розраховуються за формулою:

$$\tau^t = -(\gamma_w H_d^t + \sigma_y^t) m_t, \quad (4.41)$$

де  $H_d^t$  – напір над розрахунковим перерізом з боку нижнього б'єфа;  $m_t$  – нахил низової грані на рівні розрахункового перерізу.

Поява розтягуючих напружень виключає із роботи бетон розтягнутої зони. Це приводить до необхідності перерахунку робочої площі перерізу, моменту, ексцентриситету. Майданчики дії головних нормальних напружень розташовані таким чином, що одна знаходиться у площині грані, а друга – нормально до неї. При цьому, у площинах граней профілю дотичні напруження дорівнюють нулю, тому на цих майданчиках діє одне з головних напружень.

Головне напруження  $\sigma_3^u$ , яке діє нормально до напірної грані, дорівнює гідростатичному тиску:

$$\sigma_3^u = -\gamma_w H_d^u. \quad (4.42)$$

Друге головне нормальне напруження  $\sigma_1^u$  визначається за формулою:

$$\sigma_1^u = \sigma_y^u (1 + m_u^2) + \gamma_w H_d^u m_u^2. \quad (4.43)$$

Для низової грані греблі головні напруження визначаються за формулами:

$$\sigma_3^t = -\gamma_w H_d^t, \quad (4.44)$$

$$\sigma_1^t = \sigma_y^t (1 + m_t^2) + \gamma_w H_d^t m_t^2. \quad (4.45)$$

3. Умова не перевищення відносної глибини зони розтягання у горизонтальних перерізах тіла греблі  $\xi_{td}$ . Відносна глибина зони розтягання дорівнює відношенню горизонтального перерізу тіла греблі у верховій грані, яка підпадає під вплив розтягуючих напружень, до ширини розрахункового горизонтального перерізу. Відносна глибина зони розтягання у горизонтальних перерізах регламентується [314] і для основних сполучень навантажень дорівнює  $\xi_{td0} = 0.133$ , а для особливих сполучень навантажень без урахування сейсмічних впливів складає  $\xi_{td1} = 0.167$ , для особливих сполучень навантажень з урахуванням сейсмічних впливів на рівні максимального розрахункового землетрусу становить  $\xi_{td3} = 0.286$ .

Для основного сполучення навантажень повинна виконуватись умова:

$$d_t \leq 0.133 \cdot b_d, \quad (4.46)$$

де  $d_t$  – глибина зони розтягнення у горизонтальних перерізах тіла греблі та контактному перерізі, яка визначена у припущенні роботи бетону у верховій грані греблі на розтягання;  $b_d$  – ширина розрахункового горизонтального перерізу.

При визначенні глибини зони розтягання для особливого сполучення навантажень повинна виконуватись умова при навантаженнях без урахування сейсмічного впливу:

$$d_t \leq 0.167 \cdot b_d. \quad (4.47)$$

Для навантажень з урахуванням сейсмічного впливу:

$$d_t \leq 0.286 \cdot b_d. \quad (4.48)$$

Якщо умови, що обмежують глибину зони розтягання, не виконуються, норми проектування рекомендують оцінювати міцність греблі в цьому перерізі за формулою (4.30).

4. Умова, щодо обмеження глибини зони розтягання  $d_t$  в перерізі по контакту греблі з основою. Для основних сполучень навантажень відносна глибина зони розтягання в перерізі по контакту греблі з основою повинна виконуватись умова:

$$d_t = 0. \quad (4.49)$$

Для особливих сполучень навантажень, що не враховують сейсмічних впливів, відносна глибина зони розтягання в перерізі по контакту греблі з основою повинна виконуватись умова:

$$d_t \leq 0.083 \cdot b, \quad (4.50)$$

де  $b$  – ширина греблі по основі, м.

Для особливих сполучень навантажень, що ураховують сейсмічні впливи на рівні максимального розрахункового землетрусу, у перерізі по контакту греблі з основою повинна виконуватись умова:

$$d_t \leq 0.200 \cdot b. \quad (4.51)$$

У контактному перерізі спостерігається перерозподіл напружень, який позначається на суміжних перерізах тіла греблі на нижній чверті за висотою, розподіл яких поступово переходить до лінійного закону [277].

Для оцінки міцності гравітаційних гребель незначної висоти достатнім є визначення напружень на гранях греблі [314], де вони є найбільшими.

Застосування формули (4.28) дозволяє визначити відносний ексцентриситет:

$$e_0 = \frac{M}{N}, \quad (4.52)$$

де  $e_0$  – відстань від точки прикладання сили до центру перерізу.

При значенні ексцентриситету  $e_0 \leq \frac{b_d}{6}$ , нормальні напруження визначаються:

$$\sigma_y = -\frac{N}{b_d} + \frac{6 \cdot M}{b_d^2}, \quad (4.53)$$

де  $b_d$  – ширина розрахункового горизонтального перерізу,

а глибина зони розтягання у горизонтальному перерізу тіла греблі та контактному перерізі  $d_t$  визначається:

$$d_t = 3 \cdot e_0 - \frac{b_d}{2}. \quad (4.54)$$

При значенні ексцентриситету  $\frac{b_d}{6} \leq e_0 < \frac{b_d}{2}$ , нормальні напруження визначаються:

$$\sigma_y = \frac{4}{3} \cdot \frac{N}{b_d - 2 \cdot e_0}. \quad (4.55)$$

При значенні ексцентриситету  $e_0 \geq \frac{b_d}{2}$ , нормальні напруження дорівнюють:

$$\sigma_y = \infty. \quad (4.56)$$

Головні стискаючі напруження  $\sigma_3$  розраховуються за формулою:

$$\sigma_3^u = (1 + m_u^2) \cdot \sigma_y^u, \quad (4.57)$$

$$\sigma_3^t = (1 + m_t^2) \frac{(\sigma_y^u + \sigma_y^t)^2}{2\sigma_y^u + \sigma_y^t}, \quad (4.58)$$

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

5. Умова стійкості греблі проти перекидання за нормативною методикою потребує розрахунку основ за несучою здатністю за уммовою:

$$\gamma_{lc} \cdot M_t \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot M_r \quad (4.59)$$

де  $M_t$  – підсумок моментів сил, які намагаються перекинути греблю, відносно осі  $O_c$ , що розташована посередині майданчика зминання  $BC$  (рис. 4.14);  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи, приймається рівним 1;  $M_r$  – підсумок моментів сил, які намагаються утримати греблю, відносно осі  $O_c$ , що розташована посередині майданчика зминання  $BC$ .

Положення осі  $O_c$  знаходиться за формулами:

$$a_c = \frac{P_e}{2bR_{cs,m}}, \quad (4.60)$$

$$d_c = \sqrt{(0,5h - a_c \cos \omega)^2 + a_c(l - a_c) - (0,5h - a_c \cos \omega)}, \quad (4.61)$$

де  $P_e$  – результуюча утримуючих сил;  $h$  – плече сили  $T$  відносно ребра низової грані  $B$ , яку визначають як результуючу перекидальних сил;  $\omega$  – кут між відрізками



прямих  $a_c$  та  $d_c$  які орієнтовані нормально до сили  $P_e$  та  $T$ ;  $R_{cs,m}$  – розрахункове значення характеристики міцності скельової основи на зминання.

Міцність скельової основи на зминання визначають за результатами натурних вимірювань, які виконують методом навантаження штампів, які прибетоновано до скельової основи, за формулою:

$$R_{cs,m} = \frac{\sigma^2 + \tau_{lim}^2}{l \sigma - h \tau_{lim}} \cdot \frac{b}{2}, \quad (4.62)$$

де  $\sigma = \frac{P_e}{A_{pl}}$  – середнє нормальне напруження по підшві бетонного штампу при

досягненні ним граничної рівноваги;  $\tau_{lim} = \frac{T_{lim}}{A_{pl}}$  – граничне дотичне напруження по

підшві бетонного штампу при досягненні ним граничної рівноваги;  $A_{pl}$  – площа підшви штампу;  $l$  – плече сили  $P_e$  відносно низового краю підшви штампу;  $h$  – плече сили  $T_{lim}$  відносно низового краю підшви штампу;  $b$  – ширина штампу у напрямку зсуву.

Рівень верхнього б'єфа

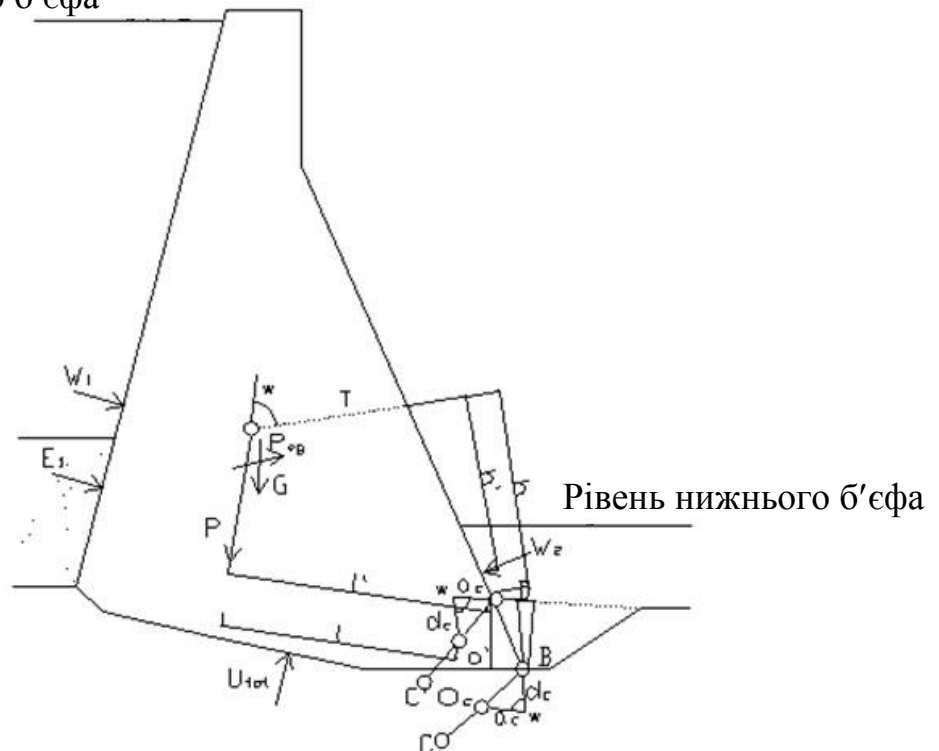


Рис. 4.14. Схема до розрахунку стійкості греблі за схемою граничного повороту:

$O_c$  – середина майданчика зминання  $BC$ ;  $G$  – вага греблі;  $U_{tot}$  – протитиск;

$O_c$  – середина майданчика зминання  $DC$  при наявності упору;  $W_2$  – тиск води з нижньої грані греблі;  $E_1$  – тиск наносів;  $W_1$  – тиск води з верхньої грані греблі;  $P_{eq}$  – сейсмічні сили.

У відповідності до норм проектування і основних положень щодо розрахунку бетонних гребель на скельовій основі за методом граничних станів необхідно виконувати розрахунки загальної фільтраційної міцності основ [311, 314].

6. Умова забезпечення місцевої фільтраційної міцності скельової основи передбачає виконання умови:

$$I_{est} \leq \frac{I_{cr,j}}{\gamma_n}, \quad (4.63)$$

де  $I_{est}$  – місцевий середній градієнт напору в розрахунковій області фільтрації;  $I_{cr,j}$  – місцевий критичний градієнт напору;  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності по ступеню відповідальності споруди, для споруд класу наслідків СС3  $\gamma_n=1.25$ , для споруд класу наслідків СС2-1  $\gamma_n=1.20$  [73].

Крім того, повинна виконуватись умова:

$$v_{est,j} = \frac{v_{est,m}}{n_j} \leq \frac{v_{cr,j}}{\gamma_n}, \quad (4.64)$$

де  $v_{est,j}$  – середня швидкість руху води у тріщинах масиву основи;  $v_{est,m}$  – швидкість фільтрації води в масиві у напрямку простирання виділеної системи тріщин;  $n_j$  – розрахункова пустотність масиву, яка визначається наявністю порожнистих тріщин тієї ж системи при довірчій імовірності їх розкриття 0.95;  $v_{cr,j}$  – критична швидкість руху води у тріщинах.

При виконанні розрахунків міцності і стійкості масивних бетонних гравітаційних гребель усіх класів висотою до 70 м, а також гребель I та II класів завишки більш 70 м [314], відповідно класу СС3 і підкласу СС2-1 [277, 314] на попередніх етапах проектування розглядаються такі навантаження і впливи [314].

Постійні навантаження:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місцерозташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води при нормальному підпірному рівні (НПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв: тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується.

Тимчасові тривалі навантаження:

3. Тиск наносів, які відкладаються перед греблею.

Короткочасні навантаження:

4. Силовий вплив води при рівнях у верхньому і нижньому б'єфах, які відповідають пропуску витрат води основного розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п.2): тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

5. Тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині.

6. Тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру.

7. Навантаження від підйомних, перевантажувальних і транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів (мостових і підвісних кранів).

Особливі навантаження:

8. Силовий вплив води при форсованому підпірному рівні (ФПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску витрат води перевірною розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

9. Силовий вплив води, обумовлене порушенням одного із дренажних або одного із протифільтраційних пристроїв, при НПР у верхньому б'єфі і рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується.

10. Тиск льоду, який визначається при його максимальній багаторічній товщині забезпеченістю 1 % (замість п. 5).

11. Тиск вітрової хвилі, який визначається при максимальній багаторічній швидкості вітру забезпеченістю 2% – для споруд класу СС3 і підкласу СС2-1 і 4% для споруд підкласу СС2-2 і класу СС1 [277, 314] (замість п. 6).

12. Сейсмічні впливи.

Перераховані навантаження і впливи приймаються або в основному, або в особливому сполученнях. При розрахунках міцності і стійкості бетонних гребель на основне сполучення навантажень і впливів ураховуються постійні, тимчасові тривалі і короткочасні навантаження. Розрахунок міцності і стійкості бетонних гребель на особливе сполучення навантажень і впливів виконується на дію навантажень основного сполучення і однієї з особливих. Навантаження і впливи повинні прийматись у найменш сприятливих можливих сполученнях окремо для експлуатаційного і будівельного періодів.

Можливі експлуатаційні розрахункові випадки, які повинні розглядатись при розрахунках міцності і стійкості бетонних гребель для основних сполучень навантажень і впливів наведені нижче:

1. Перший розрахунковий випадок (максимального напору на споруду) при урахуванні тиску льоду – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води, ураховується тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 2, 3, 5, 7.

2. Другий розрахунковий випадок (максимального напору на споруду) при урахуванні тиску вітрових хвиль – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води, ураховується тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 2, 3, 6, 7.

3. Третій розрахунковий випадок (паводковий) при урахуванні тиску льоду – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду витрат води основного розрахункового випадку, ураховується тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 3, 4, 5, 7.

4. Четвертий розрахунковий випадок (паводковий) при урахуванні тиску вітрових хвиль – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду витрат води основного розрахункового випадку, ураховується тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру. Навантаження: 1, 3, 4, 6, 7.

5. П'ятий розрахунковий випадок (паводковий при ФПР) при урахуванні тиску льоду – у верхньому б'єфі ФПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду витрат води перевірного розрахункового випадку, ураховується тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 3, 5, 7, 8.

6. Шостий розрахунковий випадок (паводковий при ФПР) при урахуванні тиску вітрових хвиль – у верхньому б'єфі ФПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду витрат води перевірного розрахункового випадку, ураховується тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 3, 6, 7, 8.

7. Сьомий розрахунковий випадок (максимального напору на споруду при порушенні нормальної роботи протифільтраційних і дренажних пристроїв) при урахуванні тиску льоду – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води, ураховується тиск льоду, який визначається при середній багаторічній товщині. Навантаження: 1, 3, 5, 7, 9.

8. Восьмий розрахунковий випадок (максимального напору на споруду при порушенні нормальної роботи протифільтраційних і дренажних пристроїв) при

урахуванні тиску вітрових хвиль – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води, ураховується тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру. Навантаження: 1, 3, 6, 7, 9.

9. Дев'ятий розрахунковий випадок (максимального напору на споруду) при урахуванні сейсмічних впливів і тиску льоду – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води, ураховується тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 2, 3, 5, 7, 12.

10. Десятий розрахунковий випадок (максимального напору на споруду) при урахуванні сейсмічних впливів і тиску вітрових хвиль – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води, ураховується тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 2, 3, 6, 7, 12.

11. Одинадцятий розрахунковий випадок (паводковий) при урахуванні сейсмічних впливів і тиску льоду – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду витрат води основного розрахункового випадку, ураховується тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 4, 3, 5, 7, 12.

12. Дванадцятий розрахунковий випадок (паводковий) при урахуванні сейсмічних впливів і тиску вітрових хвиль – у верхньому б'єфі НПР, у нижньому б'єфі рівень, який відповідає пропуску через споруду витрат води основного розрахункового випадку, ураховується тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру, протифільтраційні і дренажні пристрої працюють нормально. Навантаження: 1, 4, 3, 6, 7, 12.

Для детерміністичної оцінки ризику втрати стійкості проти зсуву за методом граничних станів формулу (4.27) доцільно представити у вигляді (4.19). Отримано такі значення розрахункових і нормативних коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву при різних розрахункових випадках (р.в.): водозливний прольот греблі Кременчуцького гідровузла: 1-й р. в.:  $k = 1.82$ ;  $k_n = 1.25$ ; 2-й р. в.:  $k = 2.2$ ;  $k_n = 1.25$ ; 3-й р. в.:  $k = 3.0$ ;  $k_n = 1.25$ ; 5-й р. в.:  $k = 2.76$ ;  $k_n = 1.125$ ; бик греблі Кременчуцького гідровузла: 1-й р. в.:  $k = 1.605$ ;  $k_n = 1.25$ ; 2-й р. в.:  $k = 1.64$ ;  $k_n = 1.25$ ; 3-й р. в.:  $k = 3.69$ ;  $k_n = 1.25$ ; 5-й р. в.:  $k = 3.27$ ;  $k_n = 1.125$ ; гребля Середньодніпровського гідровузла: 1-й р. в.:  $k = 1.842$ ;  $k_n = 1.2$ ; 2-й р. в.:  $k = 1.533$ ;  $k_n = 1.2$ ; 3-й р. в.:  $k = 1.246$ ;  $k_n = 1.08$ ; 4-й р. в.:  $k = 2.538$ ;  $k_n = 1.08$ ; водозливний прольот греблі Дніпровського гідровузла: 1-й р. в.:  $k = 1.72$ ;  $k_n = 1.316$ ; 2-й р. в.:  $k = 1.53$ ;  $k_n = 1.316$ ; 3-й р. в.:  $k = 1.52$ ;  $k_n = 1.316$ ; 4-й р. в.:  $k = 1.61$ ;  $k_n = 1.316$ ; 5-й р. в.:  $k = 1.74$ ;  $k_n = 1.125$ ; секція водозливної греблі Каховського гідровузла: 1-й р. в.:  $k = 1.44$ ;  $k_n = 1.25$ ; 2-й р. в.:  $k = 1.48$ ;  $k_n = 1.25$ ; 3-й р. в.:  $k = 1.29$ ;  $k_n = 1.13$ .

Таким чином, надійність гребель гідровузлів Дніпровського каскаду за критерієм стійкості проти зсуву за нормативною методикою забезпечена.

Алгоритм імовірнісної оцінки надійності бетонних гребель на скельовій основі за критеріями втрати механічної міцності тіла греблі, стійкості проти перекидання, механічної міцності основи, фільтраційної міцності основи полягає у наступному.

При виконанні імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності використані детерміністичні і випадкові величини. Детерміністичними величинами прийнято: геометричні розміри гребель, розміри елементів підземного контуру.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma b} = 0.02$ ; міцність бетону при стисканні за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rb} = 0.135$ ; міцність скельової основи при стисканні за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{v,Rc,m} = 0.3$ ; міцність бетону при стисканні за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації

$C_{v,Rcs,m} = 0.2$ ; щільності наносів у взаженому стані за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{v,\gamma ws} = 0.02$  (для глухих гребель).

Визначається випадкова величина – власна вага секції греблі  $G_b$ .

Задається випадкова щорічна імовірність швидкості вітру  $pV_{wind,r}$ , розподілена від 0 до 1. За даними [191] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом, у м. Кременчук – логарифмічно-нормальним розподілом. За значенням  $pV_{wind,r}$  визначається квантиль – швидкість вітру  $V_{wind,r}$ , м/с. У відповідності до імовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій, необхідне знання розподілів випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру  $V_{wind}$ , м/с за розрахунковий строк служби  $T$  у географічному місці розташування гідровузла за розрахунковий строк служби отримані зведенням у степінь  $T$  ординат розподілів щорічної швидкості вітру  $V_{wind,r}$ , м/с.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед бетонною греблею. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [38, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед бетонною греблею. В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед бетонною греблею. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [254].

Визначаються випадкові величини: довжина розгону хвилі  $L$ , м, висота вітрового нагону  $dh$ , м, середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м, середній період хвилі  $T_{cp}$ , с, середня довжина хвилі  $\lambda_{cp}$ , м, висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h1\%$ , м, хвильовий тиск при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження, підвищення вільної поверхні хвилі біля вертикальної стінки бетонної греблі  $\eta_{1\%}$ .



Будується епіюра хвильового тиску при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження  $p_{wave}$  на греблю. Визначається горизонтальне хвильове навантаження  $W_{wave}$ , кН.

Задається залежність між рівнем верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначається горизонтальна складова тиску наносів  $E_{ws}$ , а значення інтенсивності тиску наносів  $p_{ws}$  визначається як тиск у стані спокою.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності фільтраційного протитиску в основі бетонної гравітаційної греблі  $pA_f$ . За значенням імовірності визначається квантиль – величина фільтраційного протитиску  $A_f$ , кПа.

Визначаються випадкові величини: сила гідростатичного тиску з боку верхнього б'єфа  $W_{wt}$ , кН і нижнього б'єфа  $W_{wb}$ , кН, сила вертикального тиску ваги води на греблю  $G_w$ , кН, сила вертикального зважувального протитиску  $W_f$ , кН, сила протитиску  $W_{of}$  по підшві греблі, тиск наносів  $E_{ws}$  (для глухих гребель).

Визначаються навантаження на греблю від ваги затворів  $G_z$ , кН, ваги механізмів  $G_M$ , кН, ваги мосту  $G_{MT}$ , кН, корисного навантаження  $G_K$ , кН.

Коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом як випадкові корельовані величини, що підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Також визначено кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$ . За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Визначається підсумок спрямованих униз вертикальних сил  $V$  згідно із залежністю  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, G_b)$ . Визначається спрямована догори сила протитиску  $W_{of}$  по підшві греблі згідно із залежністю  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

Визначається підсумок горизонтальних сил зсуву  $F_c$ , які діють на греблю згідно із залежністю  $F_c = F_c(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{ws}, E_{psw}, E_{sws})$ . Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти зсуву  $k = ((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Визначається підсумок сил, які утворюють перекидальний момент  $M_{nep}$  згідно із залежністю  $M_{nep} = M_{nep}(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{ws}, E_{psw}, E_{sws}, W_{of})$ . Визначається підсумок сил, які утворюють утримуючий момент  $M_{ym}$  згідно із залежністю  $M_{ym} = M_{ym}(Z_{wt}, Z_{wb}, G_b)$ . Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти перекидання  $k = M_{ym} / M_{nep} \geq 1$ .

Визначаються внутрішні зусилля (згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$ ) у розрахунковому перерізі згідно із залежностями  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$  і значення ексцентриситету  $e = M / N$ . Визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у розрахунковому перерізі згідно із залежністю  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ . Визначається головне стискаюче напруження  $\sigma_3$  у розрахунковому перерізі згідно із залежністю  $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_{max})$ . Перевіряється умова міцності бетону тіла греблі при стисканні  $|\sigma_3| / R_b \leq 1$ .

Визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у контактному перерізі згідно із залежністю  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ , головні стискаючі напруження  $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_{max})$ . Перевіряється виконання умови міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ . Перевіряється виконання умови міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$ .

Відмова затвору водозливу прийнята як імовірність нерозкритої події  $p_{36} = 6,0 \times 10^{-6}$  1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд [42].

Розрахунки виконуються методом статистичних випробувань. Підсумовується кількість випробувань, при яких досягається хоча б один із граничних станів. Зазначена кількість випробувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, механічної міцності бетону гребель та основ за весь строк експлуатації.

Значення щорічної імовірності ризику втрати надійності за вказаними критеріями визначається за формулою:

$$p = 1 - (1 - pr)^{\frac{1}{T}}, \quad (4.65)$$

де  $p$  – щорічна імовірність ризику втрати стійкості;  $pr$  – імовірність ризику настання граничного стану за призначений строк служби;  $T$  – призначений строк служби, роки.

Виконується порівняння ризику втрати надійності бетонної греблі за критеріями втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, механічної міцності бетону гребель та основ із допустимою величиною для даного класу споруд.

Кременчуцький гідровузол. Бетонна водозливна гребля призначена для пропуску паводкових витрат. Гребля гравітаційного типу. З одного боку гребля безпосередньо примикає до будівлі ГЕС, з іншого – до острівної греблі із ґрунтових матеріалів. Спряжіння бетонної і земляної греблі здійснено лівобережним стояном довжиною 237.8 м. Загальна довжина греблі 191.5 м. Водозливний фронт утворюють 10 водозливних прольотів по 16.0 м кожен. До складу греблі входять: водозлив, бики, водобійний колодезь із гасієм. Водозлив греблі практичного профілю із криволінійною зливною гранню. Позначка гребня водозливу 67.0 м. У нижньому б'єфі водозлив закінчується прорізним порогом для гасіння енергії потоку. Прорізний поріг відокремлюється від водозливу конструктивним швом і закінчується зубом глибиною 3.0 м. Поріг розташовується на бетонній плиті товщиною від 2.0 м до 3.0 м. За прорізним порогом розташовується водобійний колодезь із позначкою дна 54.5 м. Водобійний колодезь виконаний у скельному ґрунті без облицювання. Довжина колодезя від 45 м до 75 м, глибина 3.5 м. Висота греблі від основи до гребеня водозливу 14.5 м. Висота від основи до верху биків 33.0 м. Бики греблі мають ширину 3.5 м, їх довжина по основі 40.6 м. Бики висунуті у верхній б'єф від напірної грані греблі на 18.7 м. У биках розміщені пази затворів. По них переміщується козловий кран, а також улаштовано залізничний і автомобільний мости. У якості робочих експлуатаційних затворів застосовані поверхневі плоскі,

колесні затвори із розмірами 16.0×14.05 м, які складаються із трьох секцій. Кількість робочих затворів – 10. Аварійно ремонтні затвори із розмірами 16.0×15.6 м складаються із трьох секцій із двобічною обшивкою. У тілі водозливної греблі на позначці 60.0 м улаштовано потерну для дренажних пристроїв і інспекційного огляду. Розміри потерни 3.0×3.5 м. Дренаж складається із одного ряду вертикальних свердловин, закладених у скельну основу на глибину 17.0 м із кроком від 2.5 м до 7.5 м. Із потерн виконана цементация основи на глибину 17.0 м із кроком свердловин 4.0 м. У зоні напірної грані виконана однорядна контактна цементация на глибину 4.0 м. За довжиною гребля розділена температурно-осадочними швами, які відрізають бики від водозливу. Ущільнення швів виконано бітумними шпонками і профільною гумою. Основою водозливної греблі є граніти.

Середньодніпровський гідровузол. Водозливна гребля призначена для скиду води при високих паводках. Гребля гравітаційна, розпластаного профіля із позначкою гребеня 49.0 м. В основі греблі виконано масивний армований зуб глибиною 3.5 м. По осі зуба проходить цементацияна завеса. Гребля має загальну довжину 191.5 м і розділена биками на 10 прольотів по 16.0 м кожен. Отвори перекриваються плоскими ковзними робочими затворами із розмірами 18.0×16.0 м, які складаються із двох секцій. Також, при експлуатації греблі використовують ремонтні і аварійно-ремонтні затвори. Температурно-осадочні шви виконані посередині водозливних прольотів і ущільнені шпонками із профільною гуми. Понурна частина не має кріплення, за винятком двох прольотів на довжині 25.0 м у місці, де скеля дуже зруйнована. Товщина кріплення 0.5 м, шар фільтру 0.5 м. Товщина водобійної плити 3.0 – 3.5 м, довжина водобою 57.0 – 98.0 м. Гасії висотою 6,0 м розташовані на відстані 29.25 м від низової грані водозливу. В основі греблі залягають граніти і гранітогнейси. Потужність вивітрилої зони нижче подошви греблі становить 1.0 – 5.0 м, під двома секціями глибина вивітрювання доходить до 28.0 м. Із будівлею ГЕС гребля спрягається за допомогою роздільного бика, а із земляною греблею за допомогою стояна.

Дніпровський гідровузол. Водозливна гравітаційна гребля виконана із бетону. Водозливний фронт довжиною 377 м складається із 29 прольотів шириною

по 13.0 м. Довжина водозливу 41.65 м. Гребля окреслена по дузі кола радіусом 600 м. Водозлив – практичного безвакуумного профілю. Спряжіння водозливу із дном нижнього б'єфа здійснено за допомогою носка, радіус окреслення якого становить 10.0 м. Напірна грань греблі – вертикальна. Водозливні прольоти розділені биками товщиною по 3.25 м. Верх биків на позначці 59.90 м слугує опорою для ферм підкранового мосту. Низові виступи биків на позначці 51.6 м призначені для розміщення на них прольотної будови шосейного мосту греблі. Найбільша ширина основи водозливної греблі – 40.0 м, ширина бика – 44.0 м. Найбільша висота бика над основою – 62.0 м. Температурні вертикальні шви розташовані у площинах примикання водозливних прольотів до биків і у середині кожного прольоту. В тілі греблі на позначках 29.90 м, 14.40 м розташовані дві спостережні галереї. Верхня галерея із розмірами 3.50×3.50м, нижня галерея із розмірами 1.50×2.20 м. Також галереї слугують для збору і відводу дренажних вод. Прольоти греблі перекриті плоскими металевими щитами на колесних теліжках. В биках улаштовані пази для шандорних щитів.

Глуха гребля лівого берега спряжує бик №47 зі шлюзом. Гребля представляє собою трапецієдальну стінку із вертикальною напірною гранню. Загальна довжина глухої греблі складає 51.50 м.

Щитова стінка ГЕС-І виділена у самостійний масив, який сприймає напір і є продовженням греблі. З напірної сторони щитова стінка має вертикальну грань до позначки 55.20 м. Ширина по верху становить 12.0 м. З безнапірної сторони щитова стінка вертикальна до позначки 42.40 м, а нижче йде нахилена грань, паралельна осям напірних трубопроводів. Ширина щитової стінки по основі становить 39.0 м. Щитова стінка по напірному фронту розрізана температурними швами на 9 основних блоків по 22.0 м кожен, водопровідний блок довжиною 7.0 м і блоку малої турбіни довжиною 10.5 м. У масиві щитового відділення розміщені напірні трубопроводи. Вхідний переріз напірних трубопроводів складається із двох отворів прямокутного перерізу із розмірами 6.5×9.5 м розділених проміжним биком. До берегового торця щитового відділення примикає ділянка глухої греблі довжиною 122.30 м, яка сприймає напір. Далі йде ділянка глибокої шпори довжиною 129.0 м

призначеної для запобігання фільтрації в обхід греблі. Поперечний переріз глухої греблі трапецеїдального профілю з вертикальною напірною і нахиленою безнапірною гранями. Верх греблі розташовано на позначці 54.60 м, ширина греблі по верху 6.40 м. Гребля розрізана на секції довжиною 6.0 м. З боку ріки до щитової стінки примикає спряжуючий стоян шириною 17.5 м у якому розташоване шандоросховище.

Щитова стінка ГЕС-II утворена із 16 прольотів водозливної греблі. На водозливні прольоти греблі укладені залізобетонні трубопроводи. Трубопроводи напірні, прямокутного перерізу шириною 7.50 м, висотою від 7.5 м на водозаборі до 9.4 м на вході у спіральну камеру. Трубопровід, який опирається на водозливну греблю, відокремлений температурно-деформаційним швом від приагрегатної частини трубопровода, який переходить у спіральну камеру. У биках щитового відділення улаштовано пази для встановлення колесних затворів, які виконують функцію аварійних затворів. В інші пази встановлюють сорозатримуючі решітки чи ремонтні затвори.

Визначення ризику втрати механічної міцності тіла греблі, стійкості проти перекидання, механічної міцності основи, фільтраційної міцності основи, відмови затвору водозливу на прикладі бетонної гравітаційної водозливної греблі Кременчуцького гідровузла в рамках параметричної теорії надійності здійснено за наступним алгоритмом. Схема водозливної гравітаційної греблі Кременчуцького гідровузла представлена на рис. 4.15.

Розрахунок виконується для однієї (типової) секції. Площа основи секції греблі  $A_n=526,4 \text{ м}^2$ . Довжина секції  $L_s=16,0 \text{ м}$ . Власна вага секції  $G_b=100,64 \text{ МН}$ .

Задається випадкова щорічна імовірність швидкості вітру  $pVr$ , розподілена від 0 до 1 (рис. 4.16). За даними [191] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Київ, м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом, у м. Канів, м. Кременчук, м. Каховка – логарифмічно-нормальним розподілом.

За значенням  $pVr$  визначається квантиль – швидкість вітру  $Vr$ , м/с. У відповідності до імовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних

конструкцій, необхідне знання розподілень випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Для бетонної гравітаційної греблі Кременчуцького гідровузла класу відповідальності СС3 розрахунковий строк служби становить  $T=100$  років. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру  $V$ , м/с за розрахунковий строк служби  $T$  у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла за розрахунковий строк служби отримані зведенням у степінь  $T$  ординат розподілів щорічної швидкості вітру  $V_r$ , м/с.

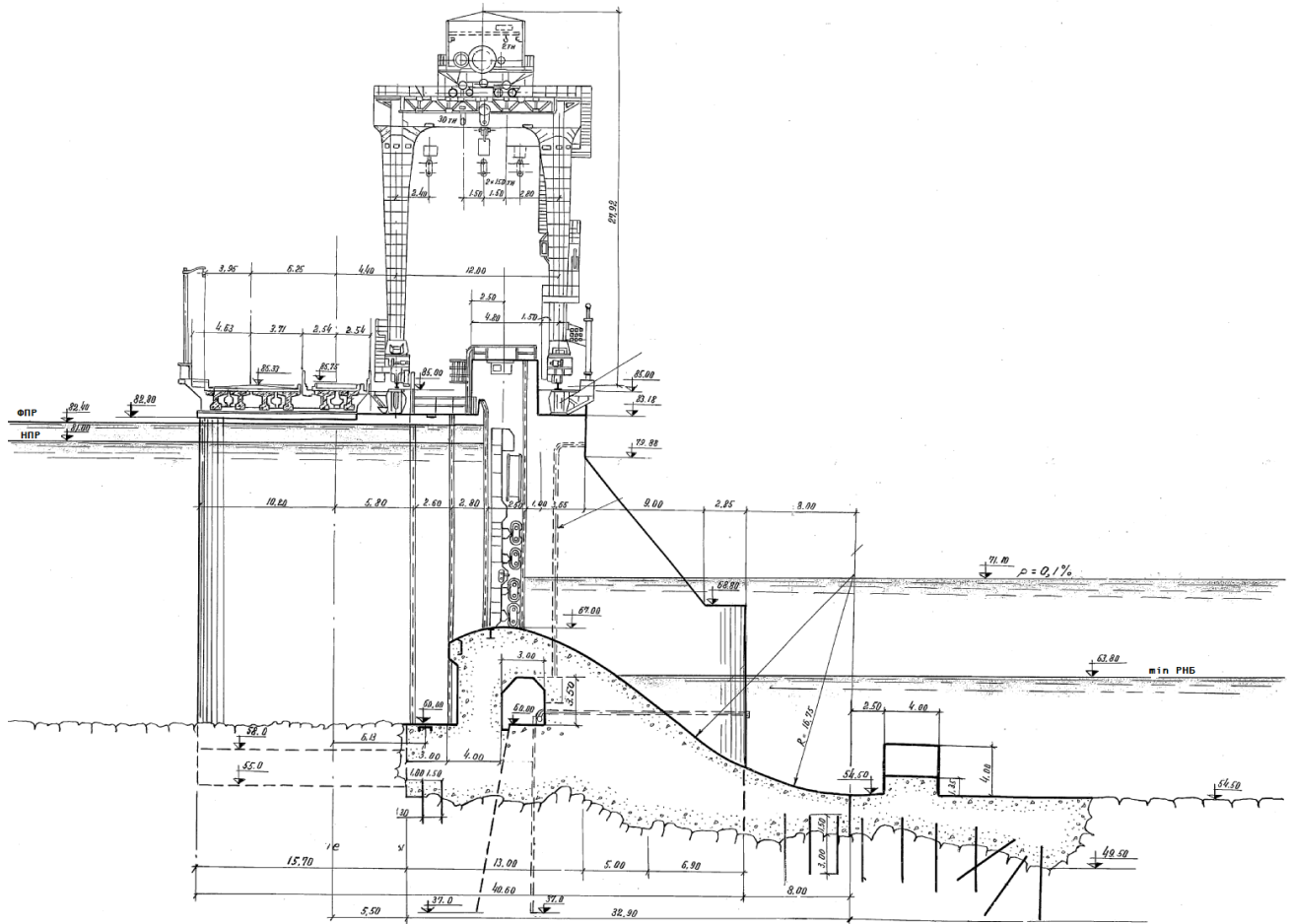


Рис. 4.15. Схема водозливної греблі Кременчуцького гідровузла

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед бетонною греблею (рис. 4.17).

При цьому, статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [38, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед

бетонною греблею. В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м (рис. 4.18) і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед бетонною греблею. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [254].

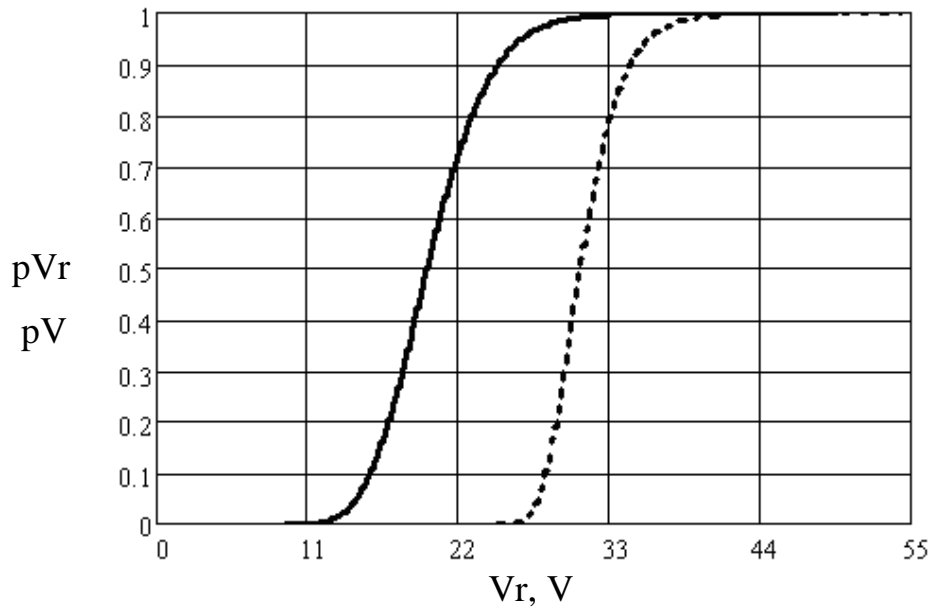


Рис. 4.16. Імовірнісні криві розподілів максимальної щорічної швидкості вітру  $V_r$ , м/с (-----) і швидкості вітру  $V$ , м/с за розрахунковий строк служби (- - - - -) у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла

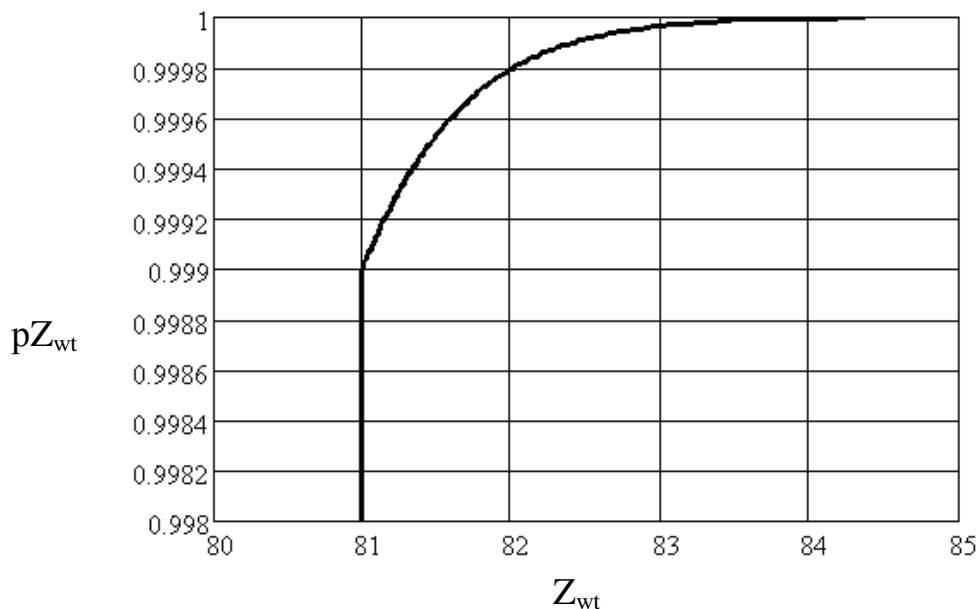


Рис. 4.17. Імовірнісна крива розподілу статичного рівня води перед греблею  $Z_{wt}$ , м Кременчуцького гідровузла



В залежності від середньої глибини води у водосховищі  $H$ , м визначається довжина розгону хвилі  $L$ , м за відомою методикою, наведеною у [282, 312], а також топографічними характеристиками водосховища. Визначається висота вітрового нагону  $dh$ , м (рис. 4.18) за формулою (4.1). Визначається середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м (рис. 4.19) за формулою (4.2).

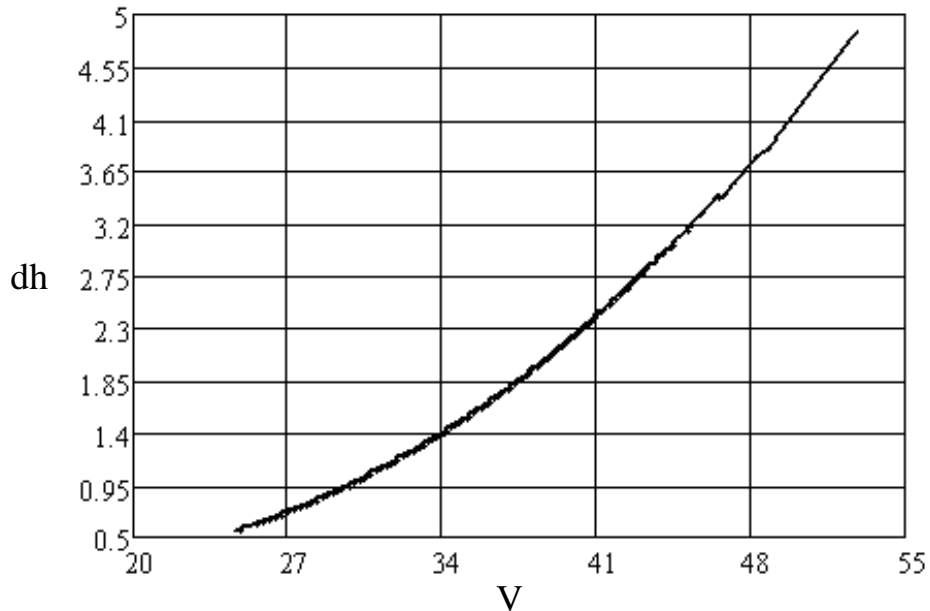


Рис. 4.18. Залежність висоти вітрового нагону  $dh$ , м у Кременчуцькому водосховищі від швидкості вітру  $V$ , м/с

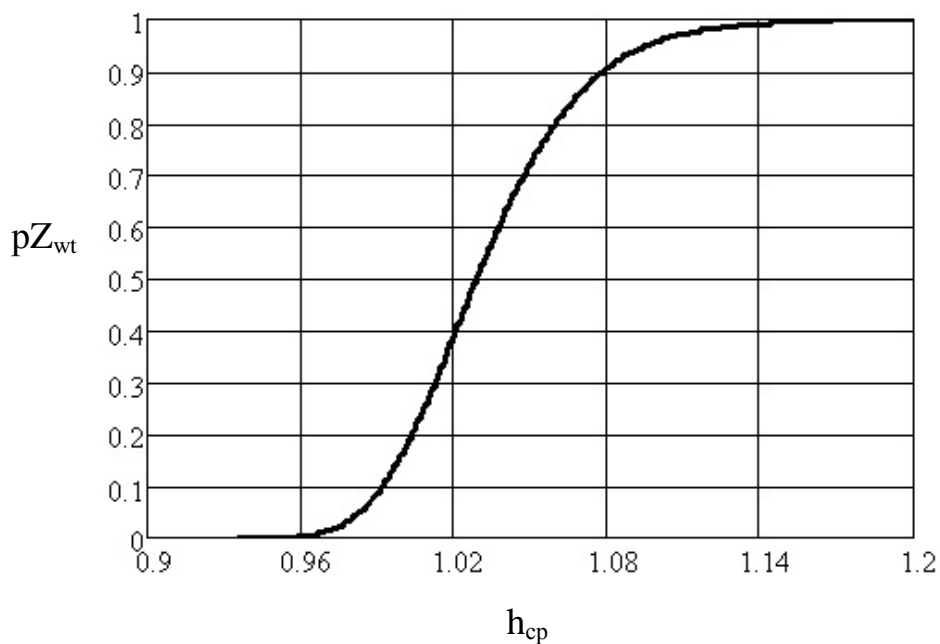


Рис. 4.19. Залежність середньої висоти хвилі  $h_{cp}$ , м у Кременчуцькому водосховищі від імовірності позначки статичного рівня води  $pZ_{wt}$  перед греблею

В залежності від середньої висоти хвилі  $h_{cp}$ , м і швидкості вітру  $V$ , м/с визначається середній період хвилі  $T_{cp}$ , с за формулою (4.3).

В залежності від середнього періоду хвилі  $T_{cp}$ , с визначається середня довжина хвилі  $\lambda_{cp}$ , м за формулою (4.4).

В залежності 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. 4.20) за формулою (4.6).

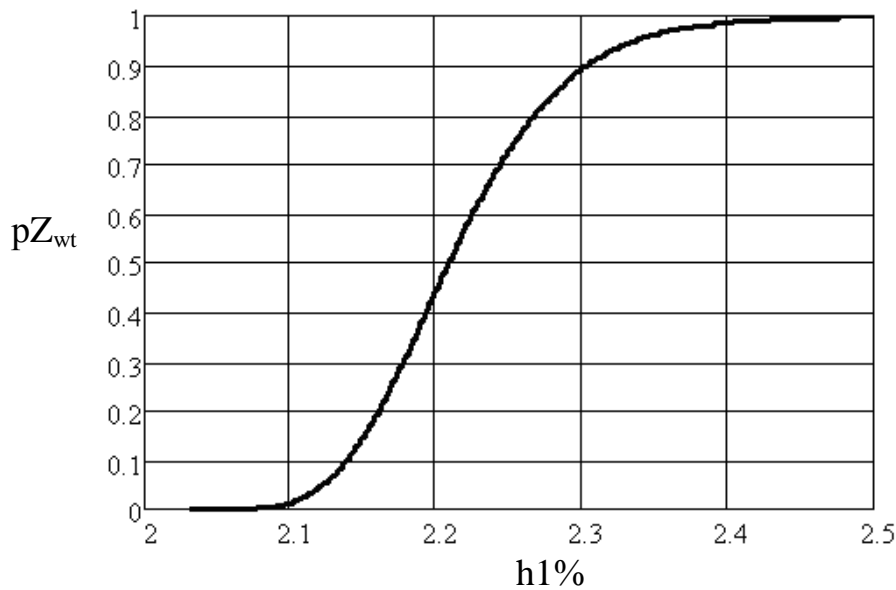


Рис. 4.20. Залежність хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h_{1\%}$ , м у Кременчуцькому водосховищі від імовірності позначки статичного рівня води  $pZ_{wt}$  перед греблею

Визначається хвильовий тиск при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження для розрахункового моменту часу  $t$ , якому відповідає величина  $\cos \omega t$ , яка дорівнює [312] (рис. 4.21):

$$\cos \omega t = \frac{\lambda_{cp}}{\pi \cdot h_{1\%} \cdot \left( 8 \cdot \pi \cdot \frac{H_c}{\lambda_{cp}} - 3 \right)}, \quad (4.66)$$

де  $\omega$  – колова частота хвилі.

Підвищення вільної поверхні хвилі біля вертикальної стінки бетонної греблі  $\eta_{1\%}$  визначається за формулою [312]:

$$\eta_{1\%} = h_{1\%} \cdot \cos \omega t + \frac{k \cdot h_{1\%}^2}{2} \cdot \cos^2 \omega t, \quad (4.67)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_{cp}}, \quad (4.68)$$

де  $k$  – хвильове число.

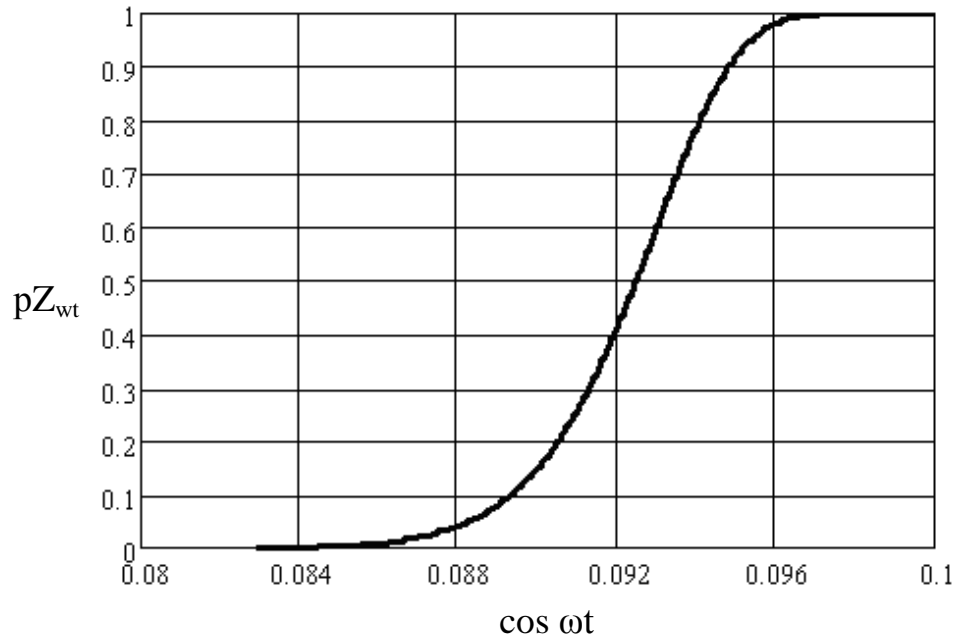


Рис. 4.21. Залежність величини  $\cos \omega t$  у Кременчуцькому водосховищі від імовірності позначки статичного рівня води  $pZ_{wt}$  перед греблею

Епюра хвильового тиску при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження на греблю прийнята трапецієдальною. Ордината епюри хвильового тиску  $p_w$ , кПа обчислюється за формулою:

$$p_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot g \cdot k \cdot h_{1\%}^2 \cdot (1 - 2 \cdot \cos^2 \omega t). \quad (4.69)$$

Значення горизонтального хвильового навантаження  $W_{wave}$ , кН у горизонтальному перерізі, зануреному на глибину  $h$ , дорівнює (рис. 4.22):

$$W_{wave} = p_{wave} \cdot \left( h + \frac{\eta_{1\%}}{2} \right) \quad (4.70)$$

Задається залежність між рівнем верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності фільтраційного протитиску в основі бетонної гравітаційної греблі  $pA_f$ . За значенням

імовірності визначається квантиль – величина інтенсивності фільтраційного протитиску  $A_f$ , кПа (рис. 4.23), а також сила вертикального протитиску  $W_f$ , кН.

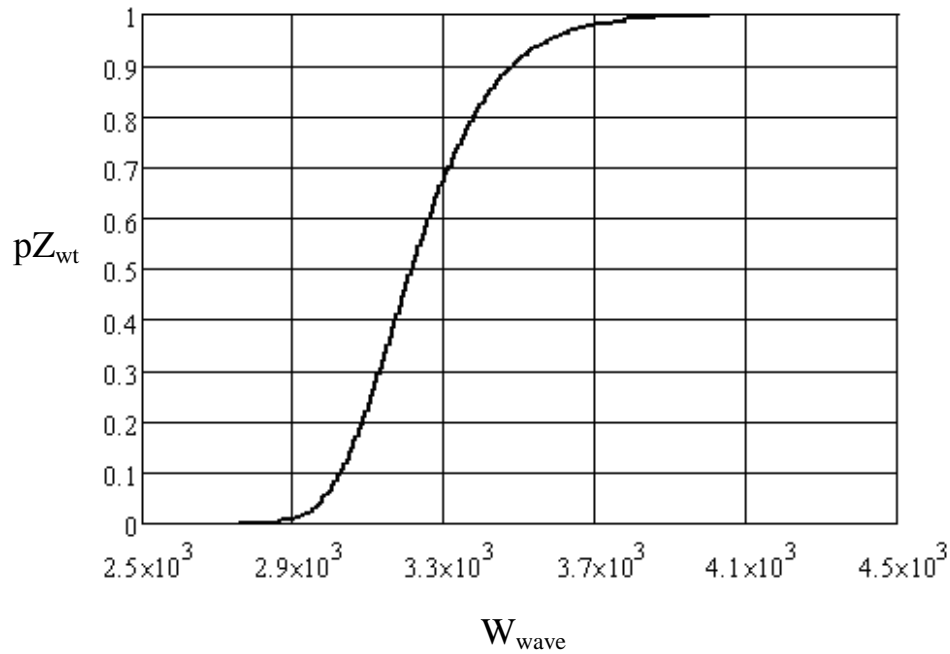


Рис. 4.22. Залежність горизонтального хвильового навантаження  $W_{wave}$ , кН у Кременчуцькому водосховищі від імовірності позначки статичного рівня води  $pZ_{wt}$  перед греблею

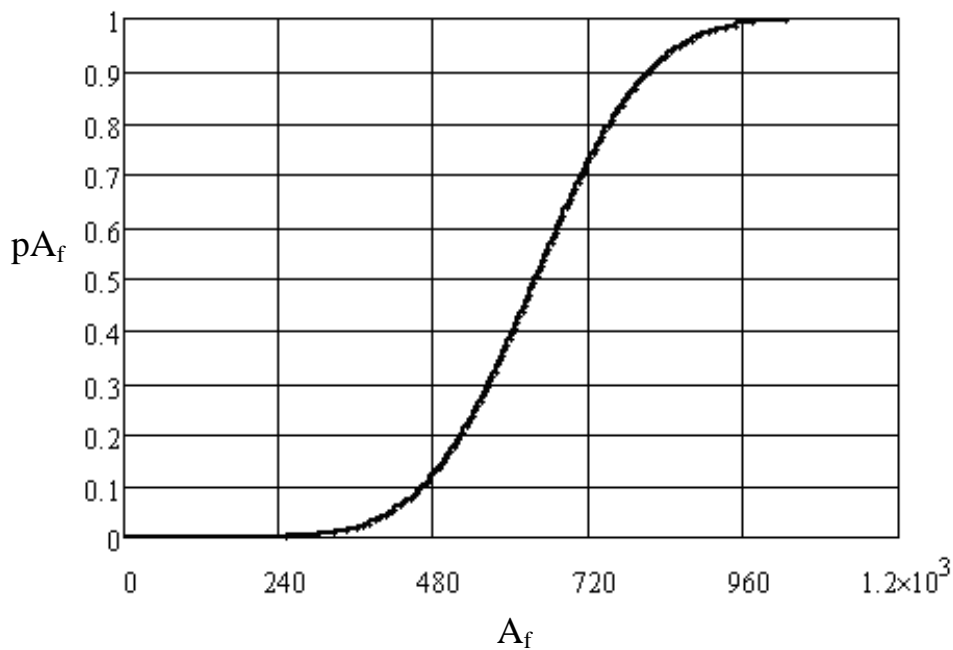


Рис. 4.23. Залежність інтенсивності фільтраційного протитиску  $A_f$ , кПа від імовірності фільтраційного протитиску в основі бетонної гравітаційної греблі  $pA_f$

Визначаються випадкові величини: сили гідростатичного тиску з боку верхнього  $W_{wt}$ , кН і нижнього  $W_{wb}$ , кН б'єсів, сила вертикального тиску ваги води на греблю  $G_w$ , кН, сила зважувального протитиску  $W_{of}$ , кН.

Визначається горизонтальна складова тиску наносів  $E_{ws}$ , а інтенсивність тиску наносів  $p_{ws}$  визначається як тиск спокою за формулою:

$$p_{ws} = (\rho_{ws} - \rho_w) \cdot g \cdot h_{ws} \cdot \frac{v_{ws}}{1 - v_{ws}}, \quad (4.71)$$

де  $\rho_{ws}$  – щільність наносів у зваженому стані;  $\rho_w$  – щільність води;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $v_{ws}$  – коефіцієнт Пуассона ґрунту наносів.

Сила тиску наносів  $E_{ws}$ , визначається за формулою:

$$E_{ws} = 0.5 p_{ws} h_{ws}, \quad (4.72)$$

Визначаються навантаження на греблю від ваги затворів  $G_z=1950$ кН, ваги механізмів  $G_M=1320$ кН, ваги мосту  $G_{MT}=1610$ кН, корисного навантаження  $G_K=1200$ кН/

Сейсмічний вплив на бетонну гравітаційну греблю задається у вигляді сукупностей таких навантажень: горизонтальне сейсмічне навантаження  $S$ , сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$ , сейсмічний тиск наносів  $E_{sws}$ , тиск від сейсмічних хвиль  $p_{wave,s}$ .

Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [70] та даних, наведених у [190].

Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою

$$\ddot{U}_0 = k_A g a_0, \quad (4.73)$$

де  $k_A$  – коефіцієнт, який ураховує імовірність сейсмічного впливу упродовж призначеного строку експлуатації споруди (для гребель класу СС3 і СС2-1 значення  $k_A = 1$ );  $g$  – прискорення вільного падіння;  $a_0$  – розрахункова амплітуда прискорення основи (в долях  $g$ ), значення якої приймається в залежності від сейсмічності майданчика будівництва ( $a_0 = 0.1$  при  $J = 7$  баллов,  $a_0 = 0.2$  при  $J = 8$  баллов,  $a_0 = 0.4$  при  $J = 9$  баллов).

Задається випадкова щорічна імовірність сейсмічного впливу  $pJ_r$ , розподілена від 0 до 1. За даними [190] імовірність щорічного максимального сейсмічного впливу у м. Кременчук може бути задана логарифмічно-нормальним розподілом. За значенням  $pJ_r$  визначається квантиль – бальність землетрусу  $J_r$ , бали. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місцезосташування греблі (тип основи). Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий строк служби (рис. 4.24).

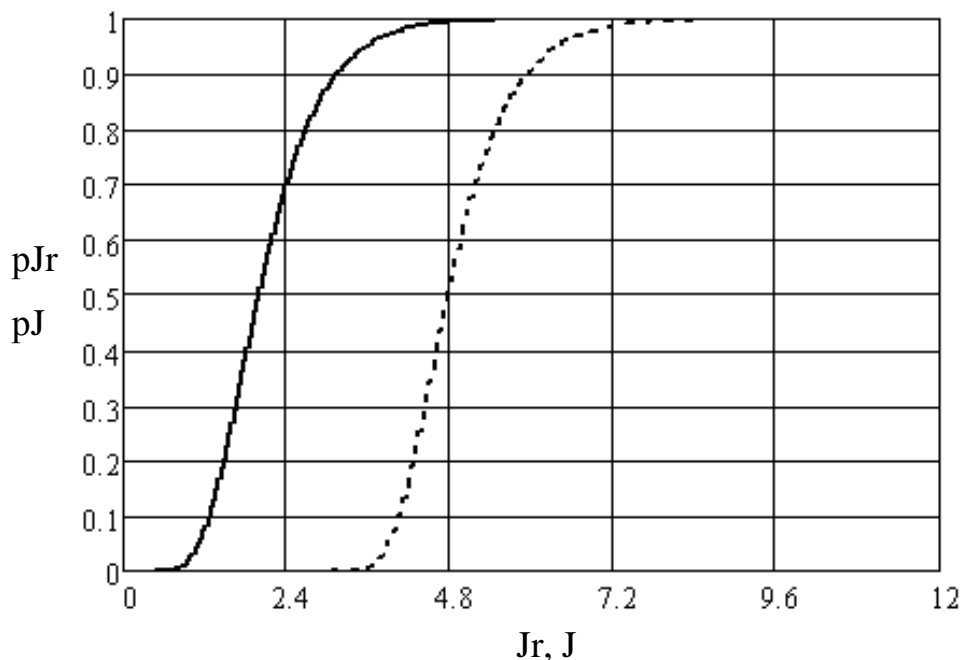


Рис. 4.24. Імовірнісні криві розподілів максимальної щорічної бальності землетрусів  $J_r$ , бали (-----) і максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали (- - - -) за розрахунковий строк служби у місці розташування Кременчуцького гідровузла

Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби (рис. 4.25).

Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначені лінійно-спектральним методом. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  греблі визначена за формулою:

$$S_k = k_f \cdot k_\psi \cdot m_k \cdot \ddot{U}_0 \cdot \beta_1 \cdot h_k, \quad (4.74)$$

де  $m_k$  – маса елемента споруди, віднесена до точки  $k$ ;  $k_f$  – коефіцієнт, який відображує ступінь неприпустимості у споруді пошкоджень, значення якого для усіх гідротехнічних споруд  $k_f = 0.45$ ;  $k_\psi$  – коефіцієнт, який урахує демпфіруючі властивості конструкції (для бетонних споруд  $k_\psi = 0.9$ );  $\beta_1$  – коефіцієнт динамічності, значення якого визначається за формулою:

$$\beta_1 = 1 / T_1; \quad (4.75)$$

(значення  $\beta_1$  приймається не менш 0.8 і не більше 3);  $T_1$  – значення періоду першого тону власних коливань греблі в секундах, визначене за формулою:

$$T_1 = \frac{3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot H_{mn}^2}{B_{mn}} \sqrt{\frac{3 \cdot \rho_b + 0.6 \cdot \rho_w \cdot \frac{H_{mn}}{B_{mn}}}{E_b}}, \quad (4.76)$$

де  $H_{mn}$  і  $B_{mn}$  – висота і ширина по основі розрахункового теоретичного профілю;  $\rho_b$  і  $\rho_w$  – щільності бетону тіла греблі і води;  $h_k$  – коефіцієнт, значення якого лінійно змінюється від 2 на гребені греблі до 0 біля основи.

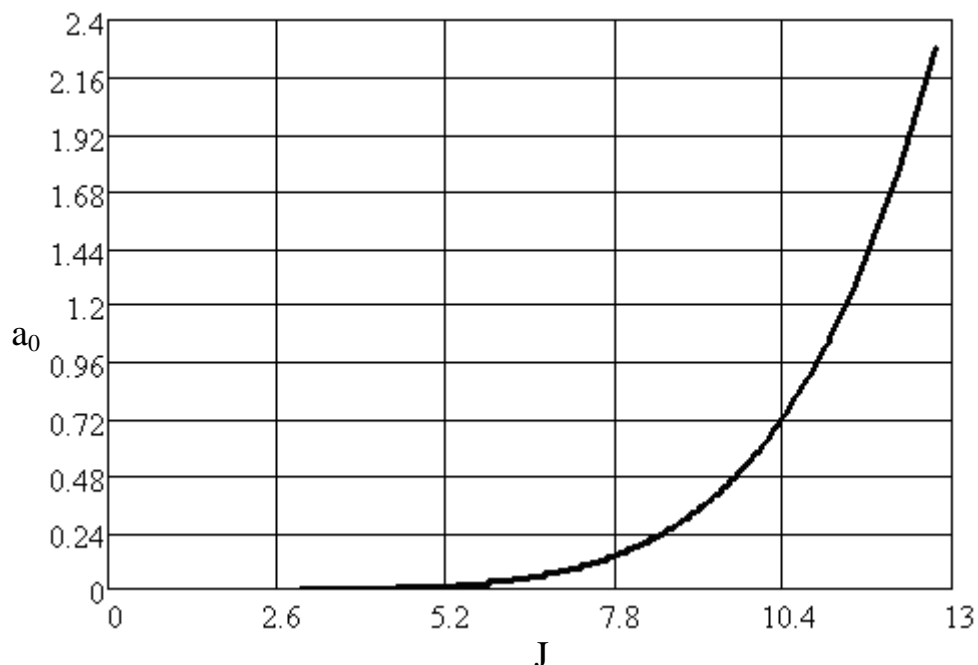


Рис. 4.25. Імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) бетонної гравітаційної греблі Кременчуцького гідровузла.

Сейсмічний гідродинамічний тиск води. Ордината епюри гідродинамічного тиску  $p_{sw}$ , віднесеного до одиниці площі поверхні споруди, у точці, зануреній на глибину у під рівень верхнього б'єфа, знайдена за формулою:

$$p_{sw} = \rho_w \cdot k_f \cdot k_\psi \cdot \ddot{U}_0 \cdot H_1 \cdot R_1, \quad (4.77)$$

де  $H_1$  – глибина води перед греблею;  $R_1$  – безрозмірний коефіцієнт, який приймається за [248] в залежності від заглиблення точки спостереження під рівень верхнього б'єфа у, м.

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води  $E_{psw}$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) бетонної гравітаційної греблі Кременчуцького гідровузла.

Інтенсивність сейсмічного тиску наносів  $p_{sws}$  (для глухих гребель) визначено за формулою:

$$p_{sws} = \left[ 1 + \frac{\ddot{U}_0}{g} \cdot k_f \cdot k_\psi \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi_{ws}}{2} \right) \right] \cdot p_{ws}, \quad (4.78)$$

де  $p_{ws}$  – статичний тиск наносів;  $\varphi_{ws}$  – умовне значення кута внутрішнього тертя наносів, яке визначене за формулою:

$$\varphi_{ws} = \arcsin (1 - 2 \cdot \nu_{ws}), \quad (4.79)$$

де  $\nu_{ws}$  – коефіцієнт Пуассона зважених наносів.

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної сили тиску наносів  $E_{sws}$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) глухої бетонної греблі.

У відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250] коефіцієнт внутрішнього тертя  $\operatorname{tg} \varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами, визначеними нижче: математичні очікування  $m_{\operatorname{tg} \varphi} = 0.7$ ,  $m_c = 100$  кПа,



середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi} = 0.0854$ ,  $\sigma_c = 12.2$  кПа, коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c} = 0.937$ , кореляційний момент  $K_{tg\varphi c} = 0,975$ . Коефіцієнт варіації  $C_v = 0,122$ .

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$  за формулами:

$$m_{tg\varphi c} = m_c + r_{tg\varphi c} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{tg\varphi}} \cdot (tg\varphi - m_{tg\varphi}), \quad (4.80)$$

$$\sigma_{tg\varphi c} = \sigma_c \cdot \sqrt{1 - r_{tg\varphi c}^2}. \quad (4.81)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$ . За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа (рис. 4.26).

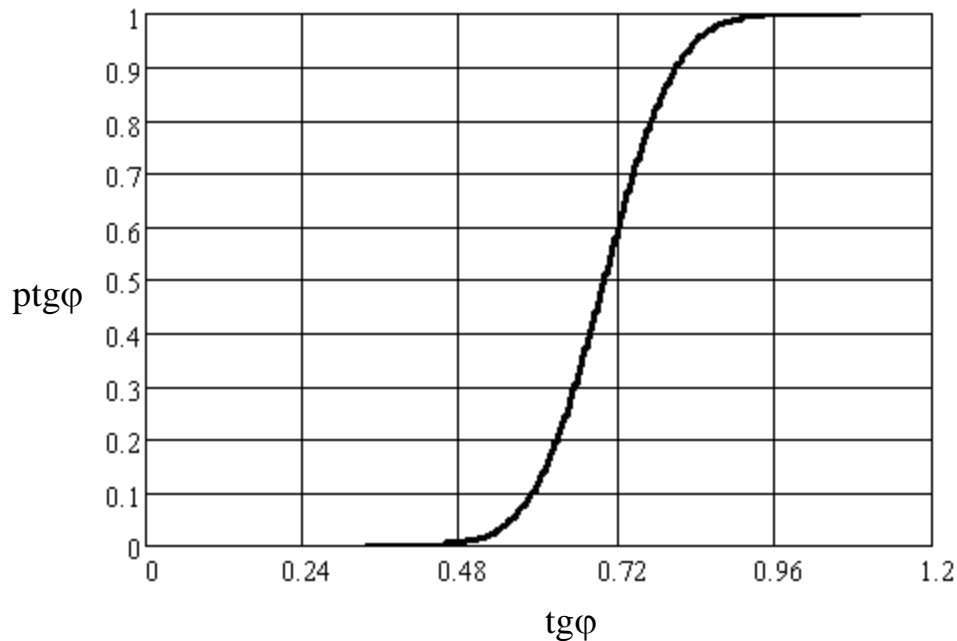


Рис. 4.26. Імовірнісна крива розподілу кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунту основи бетонної гравітаційної греблі Кременчуцького гідровузла

Визначається підсумок спрямованих униз вертикальних сил  $V$  згідно із залежністю  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, G_b)$ . Визначається спрямована догори сила протитиску  $W_{of}$  по підшві греблі згідно із залежністю  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

Визначається підсумок горизонтальних сил зсуву  $F_c$ , які діють на греблю згідно із залежністю  $F_c = F_c(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{ws}, E_{psw}, E_{sws})$ . Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти зсуву  $k = ((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Визначається підсумок сил, які утворюють перекидальний момент  $M_{nep}$  згідно із залежністю  $M_{nep} = M_{nep}(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{ws}, E_{psw}, E_{sws}, W_{of})$ . Визначається підсумок сил, які утворюють утримуючий момент  $M_{ym}$  згідно із залежністю  $M_{ym} = M_{ym}(Z_{wt}, Z_{wb}, G_b)$ . Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти перекидання  $k = M_{ym} / M_{nep} \geq 1$ .

Визначаються внутрішні зусилля (згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$ ) у розрахунковому перерізі згідно із залежностями  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, W_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$  і значення ексцентриситету  $e = M / N$ . Визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у розрахунковому перерізі згідно із залежністю  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ . Визначається головне стискаюче напруження  $\sigma_3$  у розрахунковому перерізі згідно із залежністю  $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_{max})$ . Перевіряється умова міцності бетону тіла греблі при стисканні  $|\sigma_3| / R_b \leq 1$ .

Визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у контактному перерізі згідно із залежністю  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ , головні стискаючі напруження  $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_{max})$ . Перевіряється виконання умови міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ . Перевіряється виконання умови міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$ .

Відмова затвору водозливу прийнята як імовірність нерозкритої події  $p_{36} = 6,0 \times 10^{-6}$  1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд [42].

Розрахунки виконуються методом статистичних випробувань. Підсумовується кількість випробувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, механічної міцності бетону гребель та основ за весь строк експлуатації.

За формулою (4.67) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану бетонної греблі і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Результати оцінки надійності бетонної водозливних гребель на скельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас наслідків споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм					Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність тіла греблі	стійкість проти зсуву	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	відмова затвору водозливу	
Бетонна водозливна гребля Кременчуцького гідровузла						
СС3	$6.48 \cdot 10^{-7}$	$8.82 \cdot 10^{-7}$	$8.12 \cdot 10^{-10}$	$2.65 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Бетонна водозливна гребля Середньодніпровського гідровузла						
СС2-1	$1.15 \cdot 10^{-8}$	$3.71 \cdot 10^{-7}$	$1.09 \cdot 10^{-9}$	$7.19 \cdot 10^{-10}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Бетонна щитова стінка ГЕС-1 Дніпровського гідровузла						
СС3	$1.02 \cdot 10^{-6}$	$1.51 \cdot 10^{-6}$	$2.44 \cdot 10^{-9}$	$5.69 \cdot 10^{-8}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Бетонна гравітаційна глуха гребля Дніпровського гідровузла						
СС3	$6.7 \cdot 10^{-7}$	$9.2 \cdot 10^{-7}$	$9.3 \cdot 10^{-10}$	$4.1 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Бетонний бик гравітаційної водозливної греблі Дніпровського гідровузла						
СС3	$7.7 \cdot 10^{-8}$	$9.5 \cdot 10^{-8}$	$4.8 \cdot 10^{-10}$	$5.21 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Бетонна щитова стінка ГЕС-2 Дніпровського гідровузла						
СС3	$7.4 \cdot 10^{-7}$	$6.3 \cdot 10^{-7}$	$4.1 \cdot 10^{-10}$	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризики втрати механічної міцності тіла греблі, стійкості проти перекидання, механічної міцності основи, фільтраційної міцності основи, відмови затвору водозливу бетонних гравітаційних гребель гідровузлів Дніпровського каскаду не перевищують допустимих значень, тому надійність бетонних гребель гідровузлів Дніпровського каскаду забезпечена.

#### **4.7. Імовірнісна оцінка надійності бетонних гребель на нескельовій основі за критеріями втрати механічної міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, фільтраційної міцності основи, відмови затвору водозливу**

Детерміністична оцінка надійності бетонних гребель на нескельовій основі за методом граничних станів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності тіла греблі, механічної міцності основи. У відповідності до [314] надійність греблі забезпечена при виконанні умови (4.27–4.28).

При обчисленні розрахункового значення узагальненого силового впливу  $F$  використовують розрахункові значення навантажень, які отримують помноженням значень нормативних навантажень на коефіцієнт надійності за навантаженням  $\gamma_f$  [73, 314].

При виконанні розрахунків міцності і стійкості масивних бетонних гравітаційних гребель усіх класів висотою до 70 м, а також гребель I та II класів заввишки більш 70 м [314], відповідно класу СС3 і підкласу СС2-1 [73, 314] на попередніх етапах проектування розглядаються такі навантаження і впливи [314].

Постійні навантаження:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місцерозташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води при нормальному підпірному рівні (НПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв: тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується.

Тимчасові тривалі навантаження:

3. Тиск наносів, які відкладаються перед греблею.

Короткочасні навантаження:

4. Силовий вплив води при рівнях у верхньому і нижньому б'єфах, які відповідають пропуску витрат води основного розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п.2): тиск води на

верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

5. Тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині.

6. Тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру.

7. Навантаження від підйомних, перевантажувальних і транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів (мостових і підвісних кранів).

Особливі навантаження:

8. Силовий вплив води при форсованому підпірному рівні (ФПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску витрат води перевірною розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

9. Силовий вплив води, обумовлене порушенням одного із дренажних або одного із протифільтраційних пристроїв, при НПР у верхньому б'єфі і рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані греблі; силовий вплив води що фільтрується.

10. Тиск льоду, який визначається при його максимальній багаторічній товщині забезпеченістю 1 % (замість п. 5).

11. Тиск вітрової хвилі, який визначається при максимальній багаторічній швидкості вітру забезпеченістю 2% – для споруд класу СС3 і підкласу СС2-1 [314, 316] і 4% для споруд підкласу СС2-2 і класу СС1 (замість п. 6).

12. Сейсмічні впливи.

Перераховані навантаження і впливи приймаються або в основному, або в особливому сполученнях. При розрахунках міцності і стійкості бетонних гребель на основне сполучення навантажень і впливів ураховуються постійні, тимчасові тривалі і короточасні навантаження. Розрахунок міцності і стійкості бетонних гребель на особливе сполучення навантажень і впливів виконується на дію навантажень основного сполучення і однієї з особливих. Навантаження і впливи

повинні прийматись у найменш сприятливих можливих сполученнях окремо для експлуатаційного і будівельного періодів.

1. Умова стійкості греблі на нескельовій основі проти зсуву визначається за виразом (4.29). Під час розрахунку стійкості гравітаційних споруд на нескельових основах розглядають можливість втрати по схемам плоского, змішаного і глибинного зсувів, при цьому вибір схеми зсуву залежить від виду споруди, класифікаційної характеристики основи, схеми навантаження [250, 311]. Можливий поступальний зсув і зсув із поворотом у плані.

Розрахунок по схемі поступального зсуву виконується для споруд на піщаних, крупноуламкових, пілувато-глинистих ґрунтах при виконанні умов:

$$N_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{b \cdot \gamma_1} \leq N_0, \quad (4.82)$$

а у випадку туго і м'яко-пластичних пілувато-глинистих ґрунтів, окрім умови (4.82) необхідно виконання умов:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \operatorname{tg} \varphi_1 + \frac{c_1}{\sigma_m} \geq 0,45, \quad (4.83)$$

$$c_v^0 = \frac{k(1+e)t_0}{a\gamma_w h_0^2} \geq 4, \quad (4.84)$$

$N_{\sigma}$  – число моделювання;  $\sigma_{\max}$  – максимальне нормальне напруження у кутовій точці під подошвою споруди з низової сторони;  $b$  – розмір сторони (ширини) прямокутної подошви споруди, паралельної до сили зсуву без урахування довжини анкерного понура;  $\gamma_1$  – питома вага ґрунту основи нижче рівня води з урахуванням її вважуючої дії;  $N_0$  – безрозмірне число, яке для щільних пісків дорівнює 1, для інших ґрунтів дорівнює 3;  $\operatorname{tg} \psi_1$  – розрахункове значення коефіцієнта зсуву;  $\operatorname{tg} \varphi_1$  – тангенс кута внутрішнього тертя;  $c_1$  – питома зчеплення;  $\sigma_m$  – середнє нормальне напруження по подошві споруди;  $c_v^0$  – коефіцієнт ступеня консолідації;  $k$  – коефіцієнт фільтрації;  $e$  – коефіцієнт пористості ґрунту в природному стані;  $t_0$  – час зведення споруди;  $a$  – коефіцієнт ущільнення;  $\gamma_w$  – питома вага води;  $h_0$  –

розрахункова товщина шару, що консолідується, яка залежить від глибини залягання водоупору.

При визначенні контактних напружень для бетонних гребель на нескельовій основі слід урахувувати показник гнучкості споруди  $t_{ft}$ , який при розрахунку споруди по схемі плоскої деформації у напрямі довжини споруди визначається за формулою [311]:

$$t_{ft} = \frac{(1 - \nu_1^2)\pi E b l^3}{32(1 - \nu^2)E_1 I_y}; \quad (4.85)$$

де  $\nu$ ,  $\nu_1$  – коефіцієнти Пуассона відповідно ґрунту основи і матеріалу споруди;  $E$ ,  $E_1$  – модулі відповідно деформації ґрунту основи і пружності матеріалу споруди;  $b$ ,  $l$  – ширина й довжина підошви споруди;  $I_y$  – момент інерції розрахункового перерізу.

У напрямі ширини споруди показник гнучкості споруди  $t_{ft}$  визначається за формулою:

$$t_{ft} = \frac{(1 - \nu_1^2)\pi E \delta \cdot b^3}{32(1 - \nu^2)E_1 I_x}; \quad (4.86)$$

де  $I_x$  – момент інерції розрахункового перерізу споруди;  $\delta$  – ширина розрахункового елемента за довжиною підошви споруди, яка приймається  $\delta = 1$  м.

У випадках, коли коефіцієнт гнучкості  $t_{ft1} < 1$ , контактні напруження слід визначати як для абсолютно жорсткої споруди. При  $t_{ft1} > 1$  ( $t_{ft2} < 4b/l$ ) контактні напруження визначають з урахуванням гнучкості споруди.

Для жорстких споруд класів відповідальності СС3 та СС2-1, які розраховуються по схемі плоскої деформації, нормальні контактні напруження слід визначати методами механіки суцільного середовища, а при відповідному обґрунтуванні допускається визначати методами позацентрового стискання, методом коефіцієнта постелі або методом експериментальних епюр.

2. Умова міцності тіла греблі на нескельовій основі. Ураховуючи, що при згинанні тіла греблі вздовж потоку під дією зовнішніх навантажень міцність небезпечного перерізу буде визначатися міцністю розтягнутої арматури.

У відповідності до норм проектування залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд [316] площа перерізу арматури визначається:

$$A_s \geq \frac{\gamma_b \cdot R_b \cdot b}{\gamma_s \cdot R_s} \cdot x, \quad (4.87)$$

$A_s$  – площа перерізу арматури;  $R_b$  – розрахунковий опір бетону при стисканні;  $R_s$  – розрахунковий опір арматури розтягання;  $b$  – ширина перерізу;  $\gamma_b$  – коефіцієнт умов роботи бетону, приймається  $\gamma_b = 1,1$ ;  $\gamma_s$  – коефіцієнт умов роботи арматури, приймається  $\gamma_s = 1,1$ ;  $x$  – висота стиснутої зони бетону, яка визначається:

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - 2 \cdot \frac{\gamma_{lc} \cdot \gamma_n}{\gamma_c \cdot \gamma_b} \cdot \frac{M}{R_b \cdot b}}, \quad (4.88)$$

$h_0$  – робоча висота перерізу елемента;  $\gamma_{lc}$  – коефіцієнт сполучення навантажень, значення якого приймається в залежності від розрахункового сполучення навантажень і впливів;  $\gamma_n$  – коефіцієнт надійності по ступеню відповідальності споруди, для споруд класу наслідків СС3  $\gamma_n = 1.25$ , для споруд класу наслідків СС2-1  $\gamma_n = 1.20$ , для споруд класу наслідків СС2-2  $\gamma_n = 1.15$ , для споруд класу наслідків СС1  $\gamma_n = 1.10$  [73];  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи, який ураховує тип споруди, конструкції чи основи та інші фактори;  $M$  – згинальний момент.

3. Умова стійкості греблі проти перекидання. Для забезпечення стійкості бетонної греблі на нескельовій основі проти перекидання необхідне виконання умови:

$$\gamma_{lc} \cdot M_t \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot M_r, \quad (4.89)$$

де  $M_t$  – підсумок моментів сил, які намагаються перекинути греблю відносно низового ребра;  $M_r$  – підсумок моментів сил, які намагаються утримати греблю відносно низового ребра.

4. Умова стійкості греблі проти спливання перевіряється за формулою:

$$\gamma_{lc} \cdot F_t \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot F_r, \quad (4.90)$$

де  $F_t$  – підсумок сил, які намагаються відірвати греблю від основи;  $F_r$  – підсумок сил, які намагаються утримати греблю від відриву.



5. Умова забезпечення фільтраційної міцності нескельової основи перевіряється за формулою (4.20).

Імовірнісний метод визначення ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, фільтраційної міцності основи, відмови затвору водозливу бетонних гребель на нескельовій основі в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірносних характеристик, а також визначення імовірності досягнення межового стану за зазначеними критеріями. Зазначені вище критерії настання граничного стану є статистично залежними, тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхньому і нижньому б'єфах.

Міцність бетону при стисканні підкоряється нормальному закону розподілу із математичним очікуванням  $m_{R_b}$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,R_b} = 0.135$ , значення якого для важких гідротехнічних бетонів усіх класів регламентується нормами проектування залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд [316]. Нормативний опір бетону стисканню  $R_{bn}$  приймається із забезпеченістю 95%, а значення розрахункового опору бетону стисканню  $R_b$  приймається із коефіцієнтом надійності по матеріалу  $\gamma_m = 1.3$ . Знання зазначених характеристик опору бетону стисканню надає змогу визначити параметри нормального закону розподілу міцності бетону при стисканні.

Міцність арматури при розтяганні  $R_s$  підкоряється нормальному закону розподілу із математичним очікуванням  $m_s$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,s}$ . Значення коефіцієнта варіації  $C_{v,s}$  і середньоквадратичного відхилення міцності арматури при розтяганні  $\sigma_s$  регламентовані стандартами [77]. За відомими значеннями коефіцієнта варіації  $C_{v,s}$  і середньоквадратичного відхилення  $\sigma_s$  можна знайти значення математичного очікування  $m_s$  міцності арматури при розтяганні за формулою:

$$m_s = \frac{\sigma_s}{C_{v,s}}, \quad (4.91)$$

Нормативний опір арматури при розтяганні  $R_{sn}$  приймається із забезпеченістю 95%, а значення розрахункового опору арматури при розтяганні  $R_s$  приймається із коефіцієнтом надійності по матеріалу  $\gamma_m = 1,05$ . Знання зазначених

характеристик опору арматури при розтяганні дає змогу визначити параметри нормального закону розподілу міцності арматури при розтяганні.

Для оцінки міцності тіла водозливної греблі використовується умова:

$$\frac{A_{s\phi}}{A_{sp}} \geq 1, \quad (4.92)$$

де  $A_{s\phi}$  – фактична площа перерізу робочої арматури;  $A_{sp}$  – розрахункова площа перерізу робочої арматури.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні рівняння зв'язку має вигляд:

$$\frac{(V - W) \cdot tg\varphi}{F_c} \geq 1, \quad (4.93)$$

де  $V$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;  $W$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;  $tg\varphi$  - коефіцієнт внутрішнього тертя;  $F_c$  – узагальнена сила зсуву.

При розрахунку на спливання використовується рівняння зв'язку:

$$\frac{F_r}{F_t} \geq 1. \quad (4.94)$$

При розрахунку на перекидання використовується рівняння зв'язку:

$$\frac{M_r}{M_t} \geq 1. \quad (4.95)$$

При оцінці фільтраційної міцності основи використовується рівняння зв'язку:

$$\frac{I_{cr,m}}{I_{est,m}} \geq 1. \quad (4.96)$$

Характеристика бетонної водозливної греблі Каховського гідровузла. Водозливна гребля призначена для скиду води при високих паводках (рис. 4.27).

Загальна довжина греблі складає 437.5 м. Гребля примикає до будівлі ГЕС. До складу споруд бетонної гравітаційної греблі входять: понур водозливу з биками, водобій і рисберма. В основі бетонної греблі залягають алювіальні дрібнозернисті піски. Загальна потужність пісків збільшується від лівого стояна до правого від 10 м до 16 м.

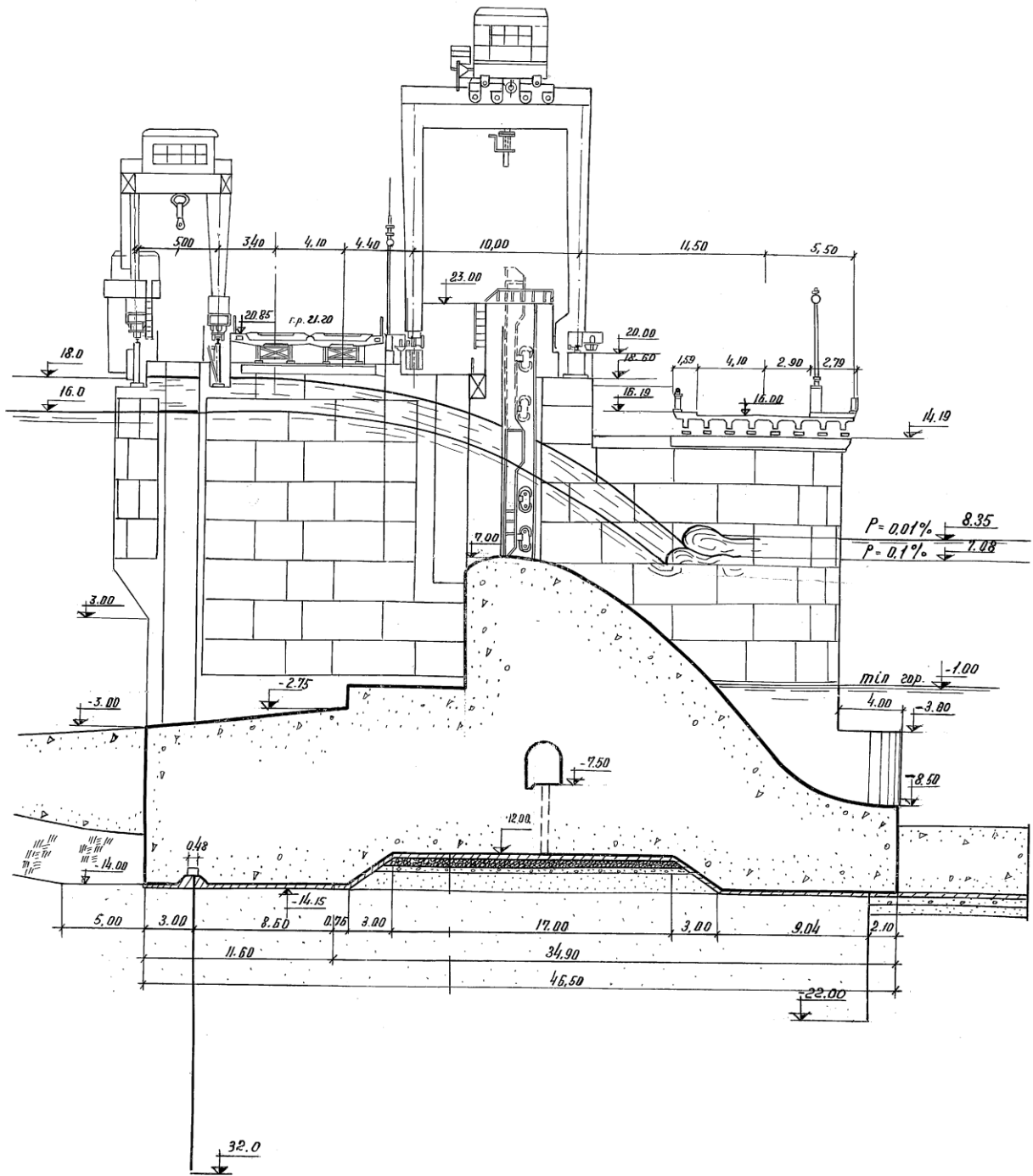


Рис. 4.27. Схема водозливної греблі Каховського гідровузла

Противільтраційний контур греблі утворено понуром і одним металевим шпунтовим рядом, розташованим на початку водозливу. Другий металевий шпунтовий ряд розташовано в кінці водозливу. Водозлив греблі складається із 28 водозливних отворів із розмірами  $12.0 \times 9.0$  м. Водозливні отвори перекриваються плоскими колесними робочими затворами. У якості аварійно-ремонтної загорожі використовують плоскі затвори. Водозлив утворений бетонними масивами, які

мають вертикальну напірну грань і криволінійну водозливну грань, окреслену по координатах Крігера-Офіцєрова. Позначка гребеня водозливу +7.0 м. За довжиною гребля розрізана конструктивними швами на 10 секцій. Кожна секція містить 3 водозливних отвори, за виключенням секції №10, яка містить один отвір. Товщина середніх биків складає 3.0 м, а биків, розділених конструктивними швами – 5.0 м. Для зменшення температурних напружень, масив водозливу у середньому прольоті кожної секції розрізаний біля биків швами. У тілі греблі на позначці -7.50 м улаштована спостережна галерея із розмірами 2.0×2.5 м. Також у галереї розміщена дренажна система трубопроводів. У кінці рисберми виконано кріплення нижче зуба із кам'яного накидання довжиною 40.0 м.

При розрахунку стійкості проти зсуву греблі за детерміністичною методикою отримано такі значення розрахункових  $k_p$  і нормативних  $k_n$  коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках (р.в.): секція водозливної греблі Каховського гідровузла: 1-й р. в.:  $k_p = 1.44$ ;  $k_n = 1.25$ ; 2-й р. в.:  $k_p = 1.48$ ;  $k_n = 1.25$ ; 3-й р. в.:  $k_p = 1.29$ ;  $k_n = 1.13$ . Таким чином, надійність греблі Каховського гідровузла за умовою стійкості проти зсуву за нормативною методикою забезпечена.

Алгоритм визначення імовірності настання граничного стану за критеріями втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання, спливання, бетонних гребель на нескельовій основі, а також фільтраційної міцності основи в рамках параметричної теорії надійності передбачає використання детерміністичних і випадкових величин. Детерміністичними величинами прийнято: геометричні розміри гребель, розміри елементів підземного контуру.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma b} = 0.02$ ; міцність бетону при стисканні за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rb} = 0.135$ ; міцність арматури при розтяганні за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rs} = 0.08$ .

Імовірнісні величини визначаються в наступній послідовності.

Задається випадкова щорічна імовірність швидкості вітру  $pVr$ , розподілена від 0 до 1. За даними [191] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Каховка можуть бути представлені логарифмічно-нормальним розподілом.

За значенням  $pVr$  визначається квантиль – швидкість вітру  $Vr$ , м/с. У відповідності до імовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій, необхідне знання розподілень випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Для бетонної гравітаційної греблі Кременчуцького гідровузла класу відповідальності ССЗ розрахунковий строк служби становить  $T=100$  років. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру  $V$ , м/с за розрахунковий строк служби  $T$  у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла за розрахунковий строк служби отримані зведенням у степінь  $T$  ординат розподілів щорічної швидкості вітру  $Vr$ , м/с.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею. При цьому, статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [197, 254]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед греблею.

В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед греблею. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [489].

Задається залежність між рівнем верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$ .

Визначається випадкова величина інтенсивності фільтраційного протитиску  $A_f$ , кПа і випадкові величини значень розрахункових середніх градієнтів напору  $I_{est,m}$  основи.

Визначаються випадкові величини: згинальний момент  $M$  в небезпечному перерізі греблі, висота стиснутої зони бетону  $x$ , необхідна (розрахункова) площа перерізу арматури  $A_{sp}$ , підсумок вертикальних сил, спрямованих униз  $V$ ; підсумок вертикальних сил, спрямованих догори  $W$ ; узагальнена сила зсуву  $F_c$ , коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  (як випадкові корельовані величини, які підкоряються умовному закону розподілу), момент утримуючих сил  $M_r$ , момент

сил перекидання  $M_t$ , підсумок утримуючих сил  $F_r$ , підсумок сил, що намагаються відірвати греблю від основи  $F_t$ .

Задаються випадкові, розподілені від 0 до 1, імовірності  $pI_{cr,m}$  значень осереднених критичних градієнтів напору основи. Для перерахунку осереднених критичних градієнтів напору основи за весь строк експлуатації у щорічні отримані зведенням у степінь  $T$  значень імовірностей  $pI_{cr,m}$  осереднених критичних градієнтів напору основи. За значенням  $pI_{cr,m}$  визначається квантилі – осереднені критичні градієнти напору  $I_{cr,m}$  основи.

Визначаються навантаження на греблю від ваги затворів  $G_z$ , ваги механізмів  $G_M$ , ваги мосту  $G_{MT}$ , корисного навантаження  $G_K$ .

Сейсмічний вплив на бетонну гравітаційну греблю задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води, тиск від сейсмічних хвиль. Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [70] та даних, наведених у [248]. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Задається випадкова щорічна імовірність сейсмічного впливу  $pJr$ , розподілена від 0 до 1. За даними [190] імовірність щорічного максимального сейсмічного впливу у м. Каховка може бути задана логарифмічно-нормальним розподілом. За значенням  $pJr$  визначається квантиль – бальність землетрусу  $Jr$ , бали. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування греблі з урахуванням типу основи. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначені лінійно-спектральним методом. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  греблі визначене за формулами (4.74 – 4.76).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) бетонної греблі Каховського гідровузла.

Сейсмічний гідродінамичний тиск води визначається за формулою (4.77).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамичної сили тиску води  $E_{psw}$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $a_0$ , (в долях  $g$ ) бетонної греблі Каховського гідровузла.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $ptg\varphi$  коефіцієнта внутрішнього тертя. По значенню  $ptg\varphi$  за нормальним законом розподілу із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi} = 0.72$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, tg\varphi} = 0,122$  визначається квантиль – коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунту основи.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонної конструкції тіла греблі  $A_{s\phi} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється умова стійкості греблі проти зсуву  $(V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості греблі проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Перевіряється умова стійкості греблі проти перекидання  $M_r / M_t \geq 1$ .

Перевіряється умова фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{cr,m} / I_{est,m} \geq 1$ .

Відмова затвору водозливу прийнята як імовірність нерозкритої події  $p_{36} = 6.0 \times 10^{-6}$  1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд [42].

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання і спливання бетонних гребель на нескельовій основі, а також фільтраційної міцності основи за весь строк експлуатації. За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану бетонної греблі і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань

знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків наведені в табл. 4.9.

Таблиця 4.9

Результати оцінки надійності бетонної водозливної греблі на нескельовій основі

Каховського гідровузла

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup> за критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність тіла греблі	стійкість проти зсуву	стійкість проти перекидання	стійкість проти спливання	фільтраційна міцність основи	відмова затвору водозливу	
Бетонна водозливна гребля Каховського гідровузла							
(СС3)	$4.65 \cdot 10^{-7}$	$4.58 \cdot 10^{-6}$	$4.87 \cdot 10^{-10}$	$4.46 \cdot 10^{-10}$	$2.52 \cdot 10^{-8}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризики досягнення граничних станів бетонної греблі на нескельовій основі Каховського гідровузла Дніпровського каскаду за критеріями втрати міцності, стійкості проти зсуву, перекидання і спливання бетонної греблі на нескельовій основі, а також фільтраційної міцності основи не перевищують допустимих значень, тому надійність бетонної греблі Каховського гідровузла забезпечена.

#### 4.8. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів за критерієм втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи

Гравітаційні стояни на скельовій і нескельовій основах є достатньо поширеними серед спеціальних типів споруд гідровузлів як в Україні, так і у світі. Надійність гравітаційних стоянів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому, тому постає проблема дослідження надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах, які входять до складу споруд водопідпільного фронту на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду.

Детерміністична методика оцінки надійності гравітаційних стоянів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності,



фільтраційної і механічної міцності основи передбачає розрахунки за методом граничних станів для основного і особливого сполучення навантажень згідно з умовою (4.27).

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи: власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації; силовий вплив води з боку верхнього або нижнього б'єсів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води; силовий вплив води що фільтрується; температурні впливи; вага, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів; власна вага і тиск ґрунту обернених засипок; сейсмічні впливи.

Для оцінки ризику втрати міцності, стійкості на зсув, перекидання, фільтраційної або механічної міцності основи за методом граничних станів формулу (4.27) доцільно представити у вигляді (4.19).

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: стояни Кременчуцького, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n=1.14$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n=1.02$ ; стояни Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n=1.09$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n=0.98$ .

1. Умова вичепання механічної міцності гравітаційних стоянів. Визначаються внутрішні зусилля – згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$  у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій, а також внутрішні зусилля в перерізі  $M_w, N_w$  з урахуванням протитиску води.

Зусилля протитиску води в перерізі елемента приймається рівним площі епюри напружень, яка визначається інтенсивністю гідростатичного тиску і коефіцієнтом ефективної площі протитиску в бетоні (табл. 2, [251]).

Для тріщиностійких елементів приймається лінійний закон змінення інтенсивності гідростатичного тиску води від тиску на напірній грані до тиску на низовій грані.

Для нетріщиностійких елементів у межах тріщин приймається рівномірний тиск, обумовлений заглибленням тріщини під рівень води, а у межах стиснутої зони перерізу – лінійний закон змінення інтенсивності гідростатичного тиску.

Висота стиснутої зони бетону визначається від дії усіх навантажень без урахування сили протитиску. У нетріщиностійких елементах робота розтягнутого бетону не ураховується і форма епюри напружень бетону в стиснутій зоні перерізу приймається трикутною.

Умова тріщиностійкості перерізу перевіряється за формулою:

$$\gamma_{lc} \cdot \left( \frac{M}{W_{red}} - \frac{N}{A_{red}} \right) \leq \gamma_c \cdot \gamma_l \cdot \gamma_r \cdot R_{bt, ser}, \quad (4.97)$$

$$\gamma_r = 1 + \frac{c + 2a}{h_t}, \quad (4.98)$$

де  $W_{red}$  – момент опору приведенного перерізу для розтягнутої грані;  $A_{red}$  – площа приведенного перерізу для розтягнутої грані;  $R_{bt, ser}$  – розрахунковий опір бетону для граничних станів другої групи;  $\gamma_r$  – коефіцієнт який урахує непружну роботу бетону розтягнутої зони перерізу, обчислюється за формулою (4.98);  $c$  – параметр [251];  $h_t$  – висота розтягнутої зони приведенного перерізу.

Якщо умова тріщиностійкості (4.97) не виконується внутрішні зусилля в перерізі  $M_w, N_w$  уточнюються, як для нетріщиностійкого перерізу [251].

При розрахунку механічної міцності залізобетонних конструкцій гравітаційних стоянів можливі наступні види напруженого стану елементів.

1.1 Якщо поздовжня сила стискаюча із великим ексцентриситетом, то використовується наступний алгоритм:

– визначаються внутрішні зусилля у розрахунковому перерізі  $M, N$  та  $M_w, N_w$  з урахуванням протитиску води.

– визначається фіктивна висота стиснутої зони  $x$  за формулами:

$$x_c = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \cdot \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot N \cdot e}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b}}, \quad (4.99)$$

$$h_0 = h - a, \quad (4.100)$$

$$e = e_0 \cdot \eta + \frac{h}{2} - a, \quad (4.101)$$

$$e_0 = \frac{M}{N}, \quad (4.102)$$

$$\eta = \frac{1}{\frac{e_0}{h} - \frac{N}{N_{cr}}}, \quad (4.103)$$

де  $h$  – висота перерізу;  $\gamma_b$  – коефіцієнт умов роботи бетону [251];  $a$  – відстань від грані елемента до центру ваги розтягнутої арматури;  $e_0$  – ексцентриситет, обчислюється за формулою (4.102);  $e$  – відносний ексцентриситет, обчислюється за формулою (4.101);  $\eta$  – коефіцієнт, обчислюється за формулою (4.103);  $N_{cr}$  – умовна критична сила, яка обчислюється за формулою [251].

– у випадку коли  $x < 2a'$  та  $\xi \leq \xi_R$  фіктивна площа перерізу арматури визначається за формулою:

$$A_s = \frac{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b \cdot x - \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot N}{\gamma_c \cdot \gamma_s \cdot R_s}, \quad (4.104)$$

$$\xi = \frac{x}{h_0}, \quad (4.105)$$

де  $a'$  – відстань від грані елемента до центру ваги стиснутої арматури;  $\xi$  – відносна висота стиснутої зони, обчислюється за формулою (4.105);  $\xi_R$  – граничне значення відносної висоти стиснутої зони [251];

– у випадку великого ексцентриситету висоту стиснутої зони бетону  $x_c$  позацентрово стиснутого елемента необхідно розв'язати кубічне рівняння за формулою (200, [251]), у результаті отримаємо:

$$x_c = \sqrt[3]{\frac{-q}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{-q}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}} - \left|\frac{M}{N}\right| + \frac{h}{2}, \quad (4.106)$$

$$p = \frac{3 \cdot \left( \frac{6 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot \left(\left|\frac{M}{N}\right| + \frac{h}{2} - a\right) \cdot A_s}{b} \right) - \left( 3 \cdot \left(\left|\frac{M}{N}\right| + \frac{h}{2} - a\right) - (h - a) \right)^2}{3}, \quad (4.107)$$

$$q = \frac{2 \cdot \left( 3 \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| + \frac{h}{2} - a \right) - (h-a) \right)^3 - 9 \cdot \left( 3 \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| + \frac{h}{2} - a \right) - (h-a) \right) \cdot \left( \frac{6 \cdot \left( \frac{E_s}{E_b} \right) \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| + \frac{h}{2} - a \right) \cdot A_s}{b} \right)}{27} + \left( \frac{6 \cdot \left( \frac{E_s}{E_b} \right) \cdot A_s \cdot (h-a)}{-b} \right), \quad (4.108)$$

де  $E_s$  – модуль пружності арматури [251];  $E_b$  – початковий модуль пружності бетону [251];

– визначається площа перерізу арматури за формулою:

$$A_s = \frac{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b \cdot \left( (h-a) - \sqrt{(h-a)^2 - \frac{2 \cdot \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |N_w| \cdot \left( \left| \frac{M_w}{N_w} \right| + \frac{h}{2} - a \right)}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b}} \right) - \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot N}{\gamma_c \cdot \gamma_s \cdot R_s}, \quad (4.109)$$

1.2 Якщо поздовжня сила стискаюча із малим ексцентриситетом, то використовується наступний алгоритм:

– визначаються внутрішні зусилля у розрахунковому перерізі  $M$ ,  $N$  та  $M_w$ ,  $N_w$  з урахуванням протитиску води, при цьому сила гідростатичного тиску води діє на довжині тріщини  $h-x$  [251].

– міцність перерізу вважається забезпеченою при виконанні умови:

$$0 < \frac{2 \cdot |N|}{3 \cdot \left( \frac{h}{2} - \left| \frac{M}{N} \right| \right)} \leq R_b, \quad \text{або} \quad 0 < \frac{2 \cdot |N_w|}{3 \cdot \left( \frac{h}{2} - \left| \frac{M_w}{N_w} \right| \right)} \leq R_b. \quad (4.110)$$

1.3. Якщо поздовжня сила дорівнює нулю, то використовується наступний алгоритм для зігнутого елемента:

– визначається площа перерізу арматури за формулою:

$$A_s = \frac{\gamma_b \cdot R_b \cdot b \cdot \left( (h-a) - \sqrt{(h-a)^2 - \frac{2 \cdot \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |M|}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b}} \right)}{\gamma_s \cdot R_s}. \quad (4.111)$$

– визначається висота стиснутої зони із розв'язанням квадратного рівняння [251]:

$$x_c = \frac{-\left(\frac{2 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot A_s}{b}\right) + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot A_s}{b}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{2 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot A_s \cdot (h-a)}{-b}\right)}}{2}. \quad (4.112)$$

1.4. Якщо поздовжня сила розтягуюча із великим ексцентриситетом, то використовується наступний алгоритм:

– визначається площа перерізу арматури за формулою:

$$A_s = \frac{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b \cdot \left( (h-a) - \sqrt{(h-a)^2 - \frac{2 \cdot \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |N| \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2} + a \right)}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b}} \right) + \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |N|}{\gamma_c \cdot \gamma_s \cdot R_s}. \quad (4.113)$$

– для визначення висоти стиснутої зони бетону  $x_c$  позацентрово розтягнутого елемента розв'язується кубічне рівняння за формулою [251], у результаті отримаємо:

$$x_c = \sqrt[3]{\frac{-q}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{-q}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2}} - \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2}, \quad (4.114)$$

$$p = \frac{3 \cdot \left( \frac{6 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2} + a \right) \cdot A_s}{-b} \right) - \left( -3 \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2} + a \right) + (h-a) \right)^2}{3}, \quad (4.115)$$

$$q = \frac{2 \cdot \left( -3 \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2} + a \right) + (h-a) \right)^3 - 9 \cdot \left( -3 \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2} + a \right) + (h-a) \right) \cdot \left( \frac{6 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot \left( \left| \frac{M}{N} \right| - \frac{h}{2} + a \right) \cdot A_s}{-b} \right)}{27} + \frac{6 \cdot \left(\frac{E_s}{E_b}\right) \cdot A_s \cdot (h-a)}{b}. \quad (4.116)$$

– визначається площа перерізу арматури з урахуванням протитиску за формулою:

$$A_s = \frac{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b \cdot \left[ (h-a) - \sqrt{(h-a)^2 - \frac{2 \cdot \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |N_w| \cdot \left( \frac{|M_w|}{N_w} - \frac{h}{2} + a \right)}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b \cdot b}} \right] + \gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |N_w|}{\gamma_c \cdot \gamma_s \cdot R_s}. \quad (4.117)$$

1.5. Якщо поздовжня сила розтягуюча із невеликим ексцентриситетом, то використовується наступний алгоритм:

– визначаються внутрішні зусилля у розрахунковому перерізі  $M_w$ ,  $N_w$  з урахуванням протитиску води [251].

– визначається площа перерізу арматури з урахуванням протитиску за формулою:

$$A_s = \frac{\gamma_{lc} \cdot \gamma_n \cdot |M_w|}{\gamma_c \cdot \gamma_s \cdot R_s \cdot (h - 2 \cdot a)}. \quad (4.118)$$

2. Умова стійкості гравітаційного стояна проти зсуву визначається за виразом (4.28).

3. Умова стійкості гравітаційного стояна на скельовій основі проти перекидання визначається за виразом (4.59). В умовних позначеннях:  $M_t$  – підсумок моментів сил, які намагаються перекинути стоян відносно низового ребра,  $M_r$  – підсумок моментів сил, які намагаються утримати стоян стоян відносно низового ребра.

4. Умова забезпечення фільтраційної міцності нескельової основи перевіряється за формулою (4.20).

5. Умова міцності скельової основи. Для перевірки надійності гравітаційних стоянів на скельовій основі визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у контактному перерізі згідно і головні стискаючі напруження  $\sigma_3$ .

Перевіряється виконання умови міцності скельової основи при стисканні:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot |\sigma_3| \leq \gamma_{cdrc} \cdot R_{c,m}, \quad (4.119)$$

де  $|\sigma_3|$  – головне максимальне стискаюче напруження;  $R_{c,m}$  – межа міцності масиву скельного ґрунту на стискання;  $\gamma_{cdrc}$  – коефіцієнт умов роботи, приймається  $\gamma_{cdrc} = 0.81$ .

Перевіряється виконання умови міцності скельової основи на зминання:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{lc} \cdot |\sigma_{\max}| \leq \gamma_{cdrc} \cdot R_{cs,m}, \quad (4.120)$$

де  $\sigma_{\max}$  – максимальне стискаюче напруження;  $R_{cs, m}$  – межа міцності масиву скельного ґрунту на зминання.

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: стоян Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_c = 1.48$  (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву), для особливого сполучення навантажень  $k_c = 1.55$ ; стоян Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_c = 1.44$ , для особливого сполучення навантажень  $k_c = 1.49$ ; стоян Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_c = 1.53$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_c = 1.41$ ; стоян Середньодніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_c = 1.56$ , для особливого сполучення навантажень  $k_c = 1.39$ ; стоян Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_c = 1.54$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_c = 1.47$ .

Розрахункові коефіцієнти запасу стійкості на зсув не перевищують нормативних, тому отримані результати свідчать, що за детерміністичною методикою стійкість стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду забезпечена.

Алгоритм імовірнісної оцінки надійності гравітаційних стоянів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик.

Критерії настання граничних станів гравітаційних стоянів на гідровузлах Дніпровського каскаду є статистично залежними, тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхніх б'єфах гідровузлів.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи стояна  $A_n$ , м<sup>2</sup>, інші геометричні розміри.

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

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед стояном. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між ними по гідровузлам Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро по гідровузлах каскаду наведено у роботі [197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед стояном. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду існує функціональна залежність [197], тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ_{wt}$  для стоянів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою. Будується залежність між рівнями верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$ .

Визначається тиск наносів  $E_{ws}$ .

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

По значенням рівнів  $Z_{wt}$ , м і  $Z_{wb}$ , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки  $W_{pw}$ , кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту оберненої засипки  $p\gamma_r$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_r$ .

Визначається тиск ґрунту оберненої засипки  $E_{tw}$  на стінку стояна і реактивний тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{r,tw}$ .

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності району Карпат, району Вранча і Криму. Для гідровузлів Дніпровського



каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [190]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно [447]. Під час виконання одного статистичного випробовування враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJr$ , розподілені від 0 до 1 у Карпатах, районі Вранча, Криму. За значенням  $pJr$  визначаються квантілі – бальність землетрусів  $Jr$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування стояна [70]. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи, (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на стоян задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначено лінійно-спектральним методом. Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [503] та даних, наведених у [468]. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) стояна. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  визначене за формулами (4.74 – 4.76). Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамічної сили тиску води від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) стояна. Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок  $E_{s,tw}$ .

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

У випадку не скельової основи задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $ptg\varphi$  коефіцієнта внутрішнього тертя. По значенню  $ptg\varphi$  за нормальним законом розподілу із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi} = 0.72$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, tg\varphi} = 0.122$  визначається квантиль – коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунту основи.

Для скельової основи характеристики ґрунту основи  $tg\varphi$  і  $c$  задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250, 311] за нормальним законом розподілу, як випадкові корельовані величини, які підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v=0.122$ . Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80 – 4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності гравітаційного стояна  $A_{sq\phi} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву для стоянів на нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$  і для стоянів на нескельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості стоянів на скельовій основі проти перекидання  $M_r / M_t \geq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs, m} \leq 1$ .

Перевіряється умова фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{cr, m} / I_{est, m} \geq 1$ .

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань.

Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати механічної міцності, стійкості проти зсуву, перекидання гравітаційних стоянів на скельовій основі, а також умова механічної і фільтраційної міцності основи за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану стоянів і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12).

Характеристика стоянів на скельовій та нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду наведена нижче.

Київський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу. Порожнини комірок засипані піском. Позначка підосви стояна +74.500 м, позначка верху стояна +106.000 м, ширина стояна по основі 22.20 м (рис. 4.28). Основа – дрібнозернисті піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Канівський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу зі шпунтовою діафрагмою в основі. Порожнини комірок засипані піском. Позначка підосви стояна +62.500 м, позначка верху стояна +88.800 м, ширина стояна по основі 21.40 м (рис. 4.29). Основою слугують піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Кременчуцький гідровузол. Стояни залізобетонні кутикового профілю. Пазухи стоянів засипані інертними матеріалами. Позначка підосви стояна +54.500 м, позначка верху стояна +85.000 м, ширина стояна по основі 20.00 м (рис. 4.30). Основою слугують граніти. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

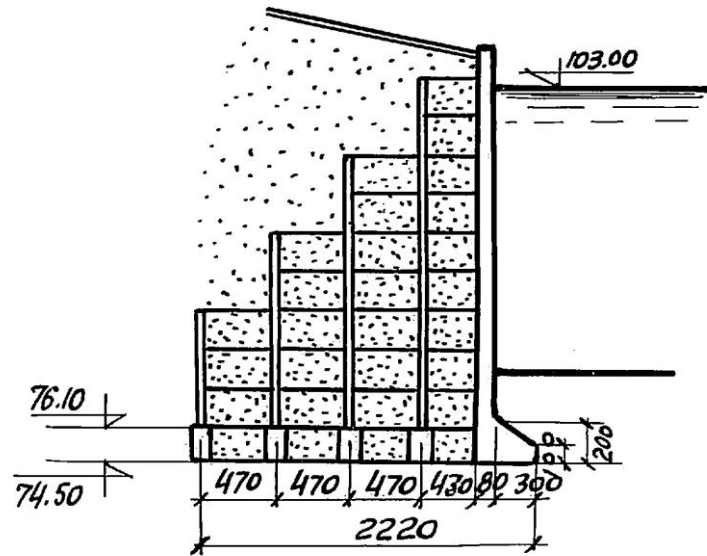


Рис. 4.28. Схема низового лівобережного стояна греблі із ґрунтових матеріалів Київського гідровузла (розміри у см.)

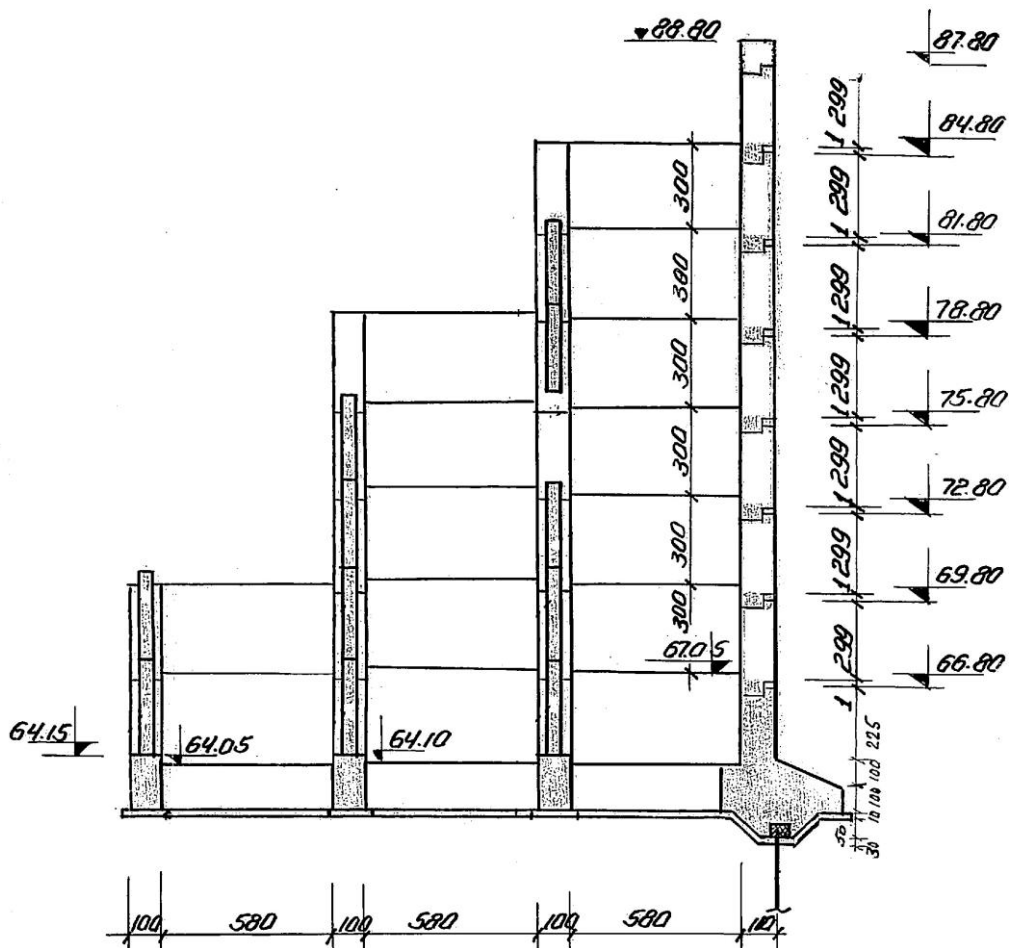


Рис. 4.29. Схема низового стояна що спряжує будівлі гідроелектричної станції Канівського гідровузла (розміри у см.)

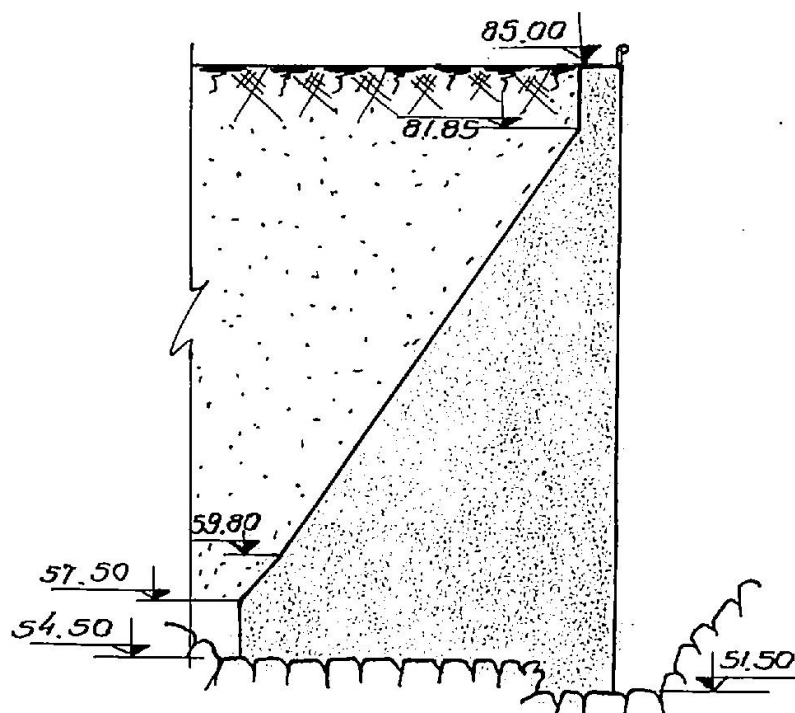


Рис. 4.30. Схема низового лівобережного стояна греблі із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла

Середньодніпровський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу. Порожнини комірок засипані інертними матеріалами. Позначка підшви стояна +37.500 м, позначка верху стояна +63.500 м, ширина стояна по основі 25.60 м. Основою слугують граніти. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Каховський гідровузол. Стояни залізобетонні кутикового профілю. Пазухи стоянів засипані інертними матеріалами. Позначка підшви стояна –16.050 м, позначка верху стояна +8.500 м, ширина стояна по основі 25.70 м. Основою слугують дрібнозернисті піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

За наведеним алгоритмом виконано імовірнісну оцінку надійності гравітаційних стоянів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи. Результати розрахунків наведені в табл. 4.10.

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12).

## Результати оцінки імовірності втрати стійкості проти зсуву стоянів

Кількість статистичних випробувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби T, рік	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
Стоян Київського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
$1.52 \cdot 10^5$	$9.98 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Стоян Канівського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
$2.92 \cdot 10^5$	$5.24 \cdot 10^{-3}$	$1.05 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Стоян Кременчуцького гідровузла (клас наслідків СС3)			
$2.26 \cdot 10^7$	$6.80 \cdot 10^{-5}$	$6.80 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Стоян Середньодніпровського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
$3.84 \cdot 10^7$	$4.01 \cdot 10^{-5}$	$8.00 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Стоян Каховського гідровузла (клас наслідків СС3)			
$5.57 \cdot 10^5$	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничних станів гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи не перевищують допустимих значень, тому надійність гравітаційних стоянів забезпечена.

#### 4.9. Висновки за розділом 4

1. На основі методу граничних станів здійснено детерміністичну оцінку надійності загальних водопідпирних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій.
2. Згідно із запропонованим алгоритмом в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності гребель із ґрунтових матеріалів на

нескельовій основі (Київського, Канівського, Кременчуцького, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: переливу води через гребінь греблі; втрати стійкості верхового укусу; втрати стійкості низового укусу; вичерпання фільтраційної міцності тіла греблі; вичерпання фільтраційної міцності основи; руйнування кріплення укусу.

3. В рамках параметричної теорії надійності за запропонованим алгоритмом виконано імовірнісну оцінку надійності бетонної водозливної греблі на нескельовій основі (Каховського гідровузла) за критеріями: вичерпання механічної міцності тіла греблі; вичерпання фільтраційної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти перекидання; втрати стійкості проти спливання; відмови затвору водозливу.

4. За запропонованим алгоритмом в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності бетонної водозливної греблі на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності тіла греблі; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти перекидання; відмови затвору водозливу.

5. Згідно із запропонованим алгоритмом в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності гравітаційних стоянів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву.

6. За запропонованим алгоритмом в рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності гравітаційних стоянів на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти перекидання.

## РОЗДІЛ 5

### ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СПЕЦІАЛЬНИХ ВОДОПІДПІРНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

#### **5.1 Імовірнісна оцінка надійності будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи**

Перевірка надійності будівель гідроелектростанцій за методом граничних станів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи виконується для основного і особливого сполучення навантажень. У відповідності до [249] надійність будівель гідроелектростанцій забезпечена при виконанні умови (4.26).

При виконанні розрахунків надійності будівель гідроелектростанцій розглядаються такі навантаження і впливи [249].

Постійні навантаження:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місцерозташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води при нормальному підпірному рівні (НПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв: гідростатичний тиск води; силовий вплив води що фільтрується.

Тимчасові тривалі навантаження:

3. Тиск наносів, які відкладаються перед спорудою.

Короткочасні навантаження:

4. Силовий вплив води при рівнях у верхньому і нижньому б'єфах, які відповідають пропуску витрат води основного розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п.2): тиск води на



верхову і низову грані споруди; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

5. Тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині.

6. Тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру.

7. Навантаження від підйомних, перевантажувальних і транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів (мостових і підвісних кранів).

Особливі навантаження:

8. Силовий вплив води при форсованому підпірному рівні (ФПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску витрат води перевірного розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані споруди; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

9. Силовий вплив води, обумовлений порушенням одного із дренажних або одного із протифільтраційних пристроїв, при НПР у верхньому б'єфі і рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані споруди; силовий вплив води що фільтрується.

10. Тиск льоду, який визначається при його максимальній багаторічній товщині забезпеченістю 1 % (замість п. 5).

11. Тиск вітрової хвилі, який визначається при максимальній багаторічній швидкості вітру забезпеченістю 2% – для споруд класу СС3 і підкласу СС2-1 [153, 476] і 4% для споруд підкласу СС2-2 і класу СС1 [72, 314] (замість п. 6).

12. Сейсмічні впливи.

Перераховані навантаження і впливи приймаються в основному або в особливому сполученнях. При розрахунках надійності будівель гідроелектростанцій на основне сполучення навантаження і впливів ураховуються постійні, тимчасові тривалі і короточасні навантаження. Розрахунок надійності будівель гідроелектростанцій на особливе сполучення навантаження і впливів виконується на

дію навантажень основного сполучення і однієї з особливих. Навантаження і впливи повинні прийматись у найменш сприятливих можливих сполученнях.

Детерміністична методика оцінки надійності будівель гідроелектростанцій за методом граничних станів передбачає розрахунки за наступними критеріями.

1. Умова вичепання механічної міцності залізобетонних конструкцій будівель гідроелектростанцій. Підходи щодо розрахунку залізобетонних конструкцій регламентовано у [251], розрахунки міцності і стійкості будівель гідроелектростанцій розглянуто у [249]. Методика оцінки надійності залізобетонних конструкцій наведена у розділі 4.8 за формулами (4.97–4.118), згідно з якою визначаються внутрішні зусилля – згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$  у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій, а також внутрішні зусилля в перерізі  $M_w$ ,  $N_w$  з урахуванням протитиску води із подальшим визначенням необхідної площі робочої арматури.

2. Умова стійкості будівель гідроелектростанцій проти зсуву визначається за виразом (4.28). При визначенні узагальненої сили зсуву крайніх секцій будівель гідроелектростанцій слід урахувувати бічний тиск з боку примикання гребель із ґрунтових матеріалів за методикою, наведеною у додатку 6 [249]. Зокрема, бічний тиск лівобережних гребель на крайні секції будівель гідроелектростанцій Київського та Канівського гідровузлів.

3. Умова стійкості будівель гідроелектростанцій проти спливання визначається за виразом (4.90).

4. Умова забезпечення фільтраційної міцності нескельової основи перевіряється за формулою (4.20).

5. Умова міцності скельової основи перевіряється за критерієм міцності скельової основи при стисканні (4.119) та міцності скельової основи на зминання (4.120).

Для оцінки ризику втрати стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (4.26) доцільно представити у вигляді (4.19).

Виконано оцінку надійності на зсув і спливання за нормативною методикою. Отримано такі значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_{p,u}$

і спливання  $k_{p,v}$ , а також нормативних коефіцієнтів запасу стійкості  $k_n$  при різних розрахункових випадках (р.в.):

– будівля гідроелектростанції Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.11$ ;  $k_{p,u} = 1.41$ ;  $k_{p,v} = 1.69$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ;  $k_{p,u} = 1.18$ ;  $k_{p,v} = 1.47$ ;

– будівля гідроелектростанції Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.11$ ;  $k_{p,u} = 1.62$ ;  $k_{p,v} = 2.09$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ;  $k_{p,u} = 0.99$ ;  $k_{p,v} = 1.67$ ;

– будівля гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.13$ ;  $k_{p,u} = 1.87$ ;  $k_{p,v} = 3.05$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ ;  $k_{p,u} = 1.37$ ;  $k_{p,v} = 1.62$ ;

– будівля гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.11$ ;  $k_{p,u} = 5.24$ ;  $k_{p,v} = 2.26$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ;  $k_{p,u} = 4.81$ ;  $k_{p,v} = 2.03$ ;

– будівля гідроелектростанції Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.13$ ;  $k_{p,u} = 1.46$ ;  $k_{p,v} = 2.91$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ ;  $k_{p,u} = 1.24$ ;  $k_{p,v} = 3.12$ .

Таким чином, надійність споруд будівель гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду за умовою стійкості проти зсуву і спливання за детерміністичною методикою за методом граничних станів забезпечена.

Алгоритм імовірнісної оцінки надійності будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати надійності будівель гідроелектростанцій за вказаними критеріями.

Критерії настання граничних станів будівель гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду є статистично залежним, тому що його виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхніх б'єфах гідровузлів.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи секції будівлі гідроелектростанції  $A_n$ ,  $m^2$ , інші геометричні розміри, вагу основного і допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma_b}=0.02$ ; щільність ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів, що примикає до крайньої секції будівлі гідроелектростанції, розподілена за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma_{gr}}=0.06$ .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед будівлею гідроелектростанції. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між ними по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро по гідровузлах каскаду наведено у роботі [37]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед стояном. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду існує функціональна залежність [197], тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ_{wt}$  для будівлі гідроелектростанції кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою. Будується залежність між рівнями верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$ .

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

По значенням рівнів  $Z_{wt}$ , м і  $Z_{wb}$ , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку греблі із ґрунтових матеріалів  $W_{pw}$ , кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $p\gamma_{gr}$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ . Визначається тиск ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $E_{tw}$  на крайню секцію будівлі гідроелектростанції і реактивний тиску ґрунту  $E_{r,tw}$ .

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності району Карпат, району Вранча і Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [190]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно [447].

Під час виконання одного статистичного випробовування враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJr$ , розподілені від 0 до 1 у районі Карпат, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJr$  визначаються квантілі – бальність землетрусів  $Jr$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування будівлі гідроелектростанції [70].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи, (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на будівлю гідроелектростанції задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначено лінійно-спектральним методом.

Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [70] та даних, наведених у [190]. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) будівлі гідроелектростанції. Горизонтальне інерційне сейсмічне

навантаження  $S$  в точці  $k$  визначене за формулами (4.74 – 4.76). Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамічної сили тиску води від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) стояна. Визначається сейсмічний тиск ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $E_{s,tw}$ .

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

У випадку нескельової основи задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $ptg\varphi$  коефіцієнта внутрішнього тертя. По значенню  $ptg\varphi$  за нормальним законом розподілу із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi} = 0.72$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, tg\varphi} = 0,122$  визначається квантиль – коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунту основи.

Для скельової основи характеристики ґрунту основи  $tg\varphi$  і  $c$  задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [249–250] за нормальним законом розподілу, як випадкові корельовані величини, які підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0.122$ . Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ .

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій будівель гідроелектростанцій  $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій на нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot \operatorname{tg} \varphi / F_c \geq 1$  і для будівель гідроелектростанцій на нескельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості будівель гідроелектростанцій проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умови міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{cr,m} / I_{est,m} \geq 1$ .

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання, механічної і фільтраційної міцності основи будівель гідроелектростанцій за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану будівель гідроелектростанцій і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12).

Будівля гідроелектростанції Київського гідровузла. Будівля ГЕС суміщена із водоскидом і розрізана температурно-осадочними швами на 5 секцій. З правого боку до будівлі ГЕС примикає монтажний майданчик закритого типу, з лівого – стоян, через який здійснюється примикання будівлі ГЕС до земляної греблі. Крайні секції мають розміри у плані 58.25×51.0 м, середні секції – 57.0×51.0 м. Висота будівлі ГЕС у верхньому б'єфі 38.39 м, у нижньому б'єфі 37.0 м, максимальна висота биків 33.0 м. Довжина будівлі ГЕС 317.58 м, у тому числі монтажного майданчика 29.93 м. У кожній секції розміщено 4 горизонтальних капсульних агрегата із поворотньо-лопатєвими турбінами потужністю 19.2 тис. кВт. і генератора 18.5 тис. кВт. Кількість агрегатів на ГЕС – 20. Над агрегатами кожної секції розташовано 4 поверхневих водоскиди із прольотами завширшки 12.0 м кожний. Позначка порога

водоскиду +95.500 м. Кількість прольотів – 20. Поріг водоскиду утворюється перекриттям приміщення виводів генераторів, приміщення мастилонапірних установок і зйомними кришками над генераторами. У фундаментній плиті будівлі ГЕС проходять наскрізні спостережна і зливна галереї. У пазах биків у кожному прольоті з боку верхнього б'єфа в биках улаштовані пази сорозатримуючої решітки, робочого і аварійно-ремонтного затворів поверхневого водоскиду і грейфера, з боку нижнього б'єфа – паз ремонтного затвору відсмоктувальної труби. Монтаж і демонтаж агрегатів, обслуговування трансформаторів, решіток і затворів з боку верхнього б'єфа здійснюється козовими кранами вантажопід'ємністю  $2 \times 140/160/50+10$  т та  $2 \times 125/2 \times 15$  т прольотом 27 м. Ремонтні затвори відсмоктувальних труб обслуговує козовий кран вантажопід'ємністю  $2 \times 30$  т. Фундаментна плита будівлі ГЕС виконана із монолітного залізобетону, а бики, стіни приміщень, перекриття відсмоктувальних труб – із збірних залізобетонних плит. Водобій і рисберма виконані із монолітного залізобетону. Довжина водобійної плити 35 м, довжина рисберми 83 м, товщина плит 2.5–1.5 м. Плити укладені на тришаровий обернений фільтр. Ковш за рисбермою заповнений камінням  $d = 200$ – $300$  мм. Товщина кам'яного накидання за довжиною ковша від 6.0 м до 2.0 м. Глинистий понур товщиною 1.5–2.0 м довжиною 24 м закріплений монолітними залізобетонними плитами товщиною 0.25 м. Передпонурне кріплення довжиною 45 м виконано із кам'яного накидання товщиною 2.0–3.6 м. В основі будівлі ГЕС улаштована протифільтраційна шпунтова діафрагма глибиною 7.5–15 м. Клас наслідків споруд СС2-1.

Будівля гідроелектростанції Канівського гідровузла. Будівля гідроелектростанції суміщена із водоскидом і розділене температурно-осадочними швами на 6 секцій. З правого берега до будівлі ГЕС примикає монтажний майданчик закритого типу, з лівого – стоян, за допомогою якого до будівлі ГЕС примикає земляна гребля. Розміри крайніх секцій  $55.22 \times 57.0$  м, середніх секцій –  $57.0 \times 57.0$  м. Довжина будівлі ГЕС 387.9 м (у тому числі монтажного майданчика 49.26 м). Максимальна висота будівлі ГЕС 39.5 м. У кожній секції розміщено 4 горизонтальних капсульних



агрегата із поворотньо-лопатевою турбіною потужністю 19.2 МВт і генератора – 18.5 МВт. На ГЕС розміщено 24 агрегата. Над агрегатами кожної секції розміщено 4 поверхневих водоскиди прольотом 12,0 м кожний і позначкою порога +82.30 м. Загальна кількість прольотів – 24. Машинної зали на ГЕС немає. Бики кожної секції виведені до позначки 101.0м у верхньому б'єфі і до позначки 92.15м у нижньому б'єфі. Бики являються опорами для підкранових балок кранів, мостових переходів, перекриття приміщень закритих розподільчих пристроїв. У фундаментній плиті будівлі ГЕС проходять зливна і спостережна галереї. У кожному прольоті з боку верхнього б'єфа передбачені пази сорозатримуючої решітки, затвору поверхневого водоскиду, аварійно-ремонтного затвору поверхневого водоскиду і грейфера. З боку нижнього б'єфа в биках кожного прольоту розміщено пази ремонтного затвору відсмоктувальної труби і ремонтного затвору. Монтаж і демонтаж агрегатів, обслуговування трансформаторів, затворів і решіток верхнього б'єфа забезпечується 2 козовими кранами вантажопід'ємністю  $2 \times 225/32 + 10$  т прольотом 27.0 м. Обслуговування ремонтних затворів відсмоктувальних труб і водоскидних отворів забезпечується козовими кранами вантажопід'ємністю  $2 \times 6/6$  т прольотом 7.90 м. Фундаментна плита будівлі ГЕС виконана із монолітного залізобетону, а бики, стіни окремих приміщень, перекриття відсмоктувальних труб — із збірних залізобетонних плит. Водобій і рисберма виконані зі збірних залізобетонних плит. Довжина водобійної плити 45.0м, довжина рисберми 83.2м. Ковш за рисбермою на довжині 102 м заповнений камінням  $d = 0.2-0.3$  м. Понур із суглинистого ґрунту на довжині 38.0 м закріплений залізобетонними плитами товщиною 0.25 м, укладеними на обернений фільтр. Довжина передпонурного кріплення 162 м. Воно закінчується ковшом глибиною 2.3 м, шириною 20 м, заповненим камінням. В основі будівлі ГЕС передбачена протифільтраційна шпунтова діафрагма глибиною 15–20 м. Клас наслідків споруд СС2-1.

Будівля гідроелектростанції Кременчукського гідровузла. Будівля гідроелектростанції розташована між правобережною земляною і бетонною водозливною греблями. Будівля ГЕС без машинної зали, гідроагрегати розташовано під зйомними сталевими ковпаками діаметром 18.0 м і вагою 36 т (рис. 5.1). На ГЕС

встановлено 12 вертикальних гідроагрегатів. Турбіни – поворотньо-лопатеві потужністю 53 МВт. Гідрогенератори – парасольчасті потужністю 57.2 МВт. Довжина будівлі ГЕС 305.0 м, висота від підшви фундаментальної плити до верху биків становить 38.3 м. Будівля станції розділена температурно-осадочними швами на 6 секцій. Розміри секцій у плані 50.0×63.80 м. У кожній секції розміщено по 2 агрегата. У щитовому відділенні верхнього б'єфа розташовано пази для основного затвора, сорозатримуючої решітки і ремонтного затвора, двох грейферів.

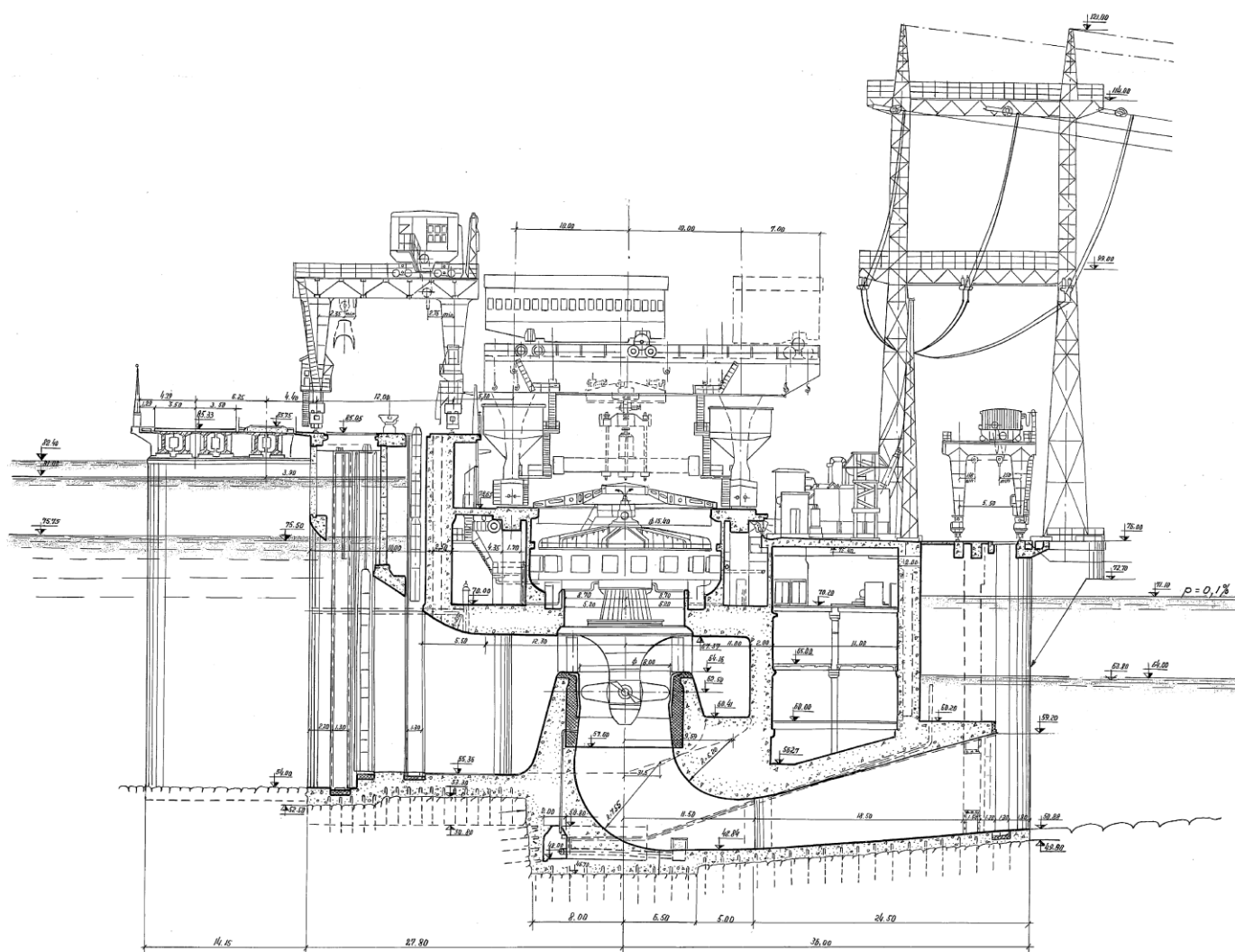


Рис. 5.1. Поперечний переріз будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла (розміри в м.)

Основний затвор турбіни плоский ковзний, складається із 4 секцій, перекриває отвір висотою 14.0 м.

Обслуговування затворів і решіток верхнього б'єфа забезпечується козловим краном вантажопід'ємністю  $2 \times 75/2 \times 30/3$  т прольотом 12.0 м. У щитовому приміщенні нижнього б'єфа розташовано пази ремонтних затворів. Обслуговування затворів нижнього б'єфа забезпечується козловим краном вантажопід'ємністю  $2 \times 25/3$  т. Монтаж і демонтаж агрегатів забезпечується козловим краном вантажопід'ємністю  $2 \times 250/100$  т прольотом 20.0 м і мостовим краном вантажопід'ємністю  $30/5$  т прольотом 18.50 м. Основою будівлі ГЕС слугують граніти. Для зниження фільтрації з боку верхнього б'єфа передбачена цементаційна завіса, яка складається із одного ряду свердловин глибиною 15.0–20.0 м через 4.0 м, а також контактна цементація. Будівля ГЕС спрягається із водозливною греблею роздільним биком шириною 6.50 м у верхньому б'єфі, 5.40 м – у нижньому б'єфі. Довжина бика 131.5 м, висота 31.70 м. Клас наслідків споруд СС3.

Будівля гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла. Будівля гідроелектростанції розташована між шлюзом і бетонною водозливною греблею. Будівля ГЕС обладнано 8 вертикальними поворотньо-лопатевими турбінами потужністю 45.7 МВт із діаметром робочого колеса 9.3 м. Гідрогенератори – парасольчасті потужністю 44.0 МВт. Будівля станції розділена температурно-осадочними швами на 8 секцій довжиною 28,5 м. Загальна довжина будівлі ГЕС 228,8 м. Будівля станції із відкритою машиною залом із встановленням агрегатів під сталевими ковпаками. Монтаж і демонтаж агрегатів забезпечується козовими кранами вантажопід'ємністю  $400/100/2 \times 10$  т прольотом 26.0 м і  $50/10$  т прольотом 26.0 м. У щитовому відділенні верхнього б'єфа розташовано пази для основного затвора, сорозатримуючої решітки і ремонтного затвора, двох грейферів. Обслуговування затворів і решіток верхнього б'єфа забезпечується козловим краном вантажопід'ємністю  $2 \times 50/2 \times 15/3$  т прольотом 12.0 м. Обслуговування затворів нижнього б'єфа забезпечується козловим краном вантажопід'ємністю  $2 \times 25/3/1$  т прольотом 5 м. Будівля ГЕС розташована на скельовій основі. Клас наслідків споруд СС2-1.

Будівля ГЕС Каховського гідровузла. Будівля гідроелектростанції розташована між бетонною водозливною і земляною греблями. Будівля ГЕС суміщена із водоскидом, обладнана 6 поворотньо-лопатевиими агрегатами потужністю 57.2 МВт із діаметром робочого колеса 8.0 м. Гідрогенератори – парасольчатого типу. У машинній залі встановлено два мостових крани вантажопід'ємністю 250 т. Щитове приміщення обладнано робочими затворами турбін і сорозатримуючими решітками. Робочі затвори водоскидів встановлені з боку нижнього б'єфа. Відсмоктувальні труби перекриваються шандорними затворами. Для маневрування затворами з боку нижнього б'єфа встановлено спарений мостовий кран вантажопід'ємністю 2×30/5 т. В основі будівлі станції залягають алювіальні дрібнозернисті піски, потужність шарів 7–8 м. Нижче залягають вапняки потужністю 1÷3.5 м, ще нижче – дрібнозернисті глинисті піски потужністю 26–28 м. Клас наслідків споруд СС3.

Алгоритм визначення ризику втрати стійкості проти зсуву в рамках параметричної теорії надійності реалізовано на прикладі секції будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла. При виконанні розрахунків використані основні нормативні і наукові джерела [72–73, 249]. Розглядається одна (типова) секція. Площа основи секції греблі  $A_n = 3190.0 \text{ м}^2$ . Довжина секції  $L_S = 50.0 \text{ м}$ . Власна вага секції  $G_b = 896.78 \text{ МН}$ .

Задається випадкова щорічна імовірність швидкості вітру  $pVr$ , розподілена від 0 до 1. За даними [191] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Дніпродзержинськ, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом, у м. Кременчук, м. Каховка – логарифмічно-нормальним розподілом.

За значенням  $pVr$  визначається квантиль – швидкість вітру  $Vr$ , м/с. У відповідності до імовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій, необхідне знання розподілів випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Для будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла класу відповідальності СС3 розрахунковий строк служби  $T = 100$  років. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру  $V$ ,

м/с за розрахунковий строк служби  $T$  у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла за розрахунковий строк служби отримані зведенням у степень  $T$  ординат розподілів щорічної швидкості вітру  $V_r$ , м/с (рис. 4.16).

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед будівлею гідроелектростанції. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [37, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z$ , м перед будівлею гідроелектростанції (рис. 4.17).

В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед будівлею гідроелектростанції. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [254].

В залежності від середньої глибини води у водосховищі  $H$ , м визначається довжина розгону хвилі  $L$ , м за відомою методикою, наведеною у [282, 312], а також топографічними характеристиками водосховища.

В залежності від довжини розгону хвилі  $L$ , м, глибини води у водосховищі  $H_c$ , м і швидкості вітру  $V$ , м/с визначаються: висота вітрового нагону  $dh$ , м, середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м, середній період хвилі  $T_{cp}$ , с, середня довжина хвилі  $\lambda_{cp}$ , м, висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h1\%$ , м за формулами (4.1–4.5).

Визначається хвильовий тиск при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження, максимальне значення якого визначається за формулою (4.66) для розрахункового моменту часу  $t$ , якому відповідає величина  $\cos \omega t$  [312].

Підвищення вільної поверхні хвилі  $\eta_{1\%}$ , м визначаються за формулами (4.67–4.68). Епюра хвильового тиску при максимальному значенні горизонтального хвильового тиску прийнята трапецієдалною, з ординатами  $p_6$ , кПа, обчисленими за формулою (4.69). Значення горизонтального хвильового навантаження  $W_6$ , кН у горизонтальному перерізі, зануреному під рівень верхнього б'єфа на глибину  $h$ , обчислене за формулою (4.70). Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$ .

Задається залежність між рівнем верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності фільтраційного протитиску в основі будівлі гідроелектростанції греблі  $pA_f$ . За значенням імовірності визначається квантиль – величина інтенсивності фільтраційного протитиску  $A_f$ , кПа, а також сила вертикального протитиску  $W_f$ , кН.

Визначаються випадкові величини: сила гідростатичного тиску з боку верхнього б'єфа  $W_{wt}$ , кН, сила гідростатичного тиску з боку нижнього б'єфа  $W_{wb}$ , кН, сила вертикального тиску ваги води у проточному тракті  $G_W = 315.28$  МН, сила зважувального протитиску  $W_{of} = 298.92$  МН.

Визначаються навантаження на будівлю гідроелектростанції від ваги: затворів  $G_z = 15$  МН, механізмів  $G_m = 2$  МН, мосту  $G_{mm} = 2.85$  МН, корисного навантаження  $G_k = 4$  МН.

Сейсмічний вплив на будівлю гідроелектростанції задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води, тиск від сейсмічних хвиль. Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [70] та даних, наведених у [190]. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Задається випадкова щорічна імовірність сейсмічного впливу  $pJr$ , розподілена від 0 до 1. За даними [190] імовірність щорічного максимального сейсмічного впливу у м. Кременчук може бути задана логарифмічно-нормальним розподілом. За значенням  $pJr$  визначається квантиль – бальність землетрусу  $Jr$ , бали. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування будівлі гідроелектростанції в залежності від типу основи. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий строк служби (рис. 4.24). Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$ , (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби (рис. 4.25).

Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначені лінійно-спектральним методом. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  у точці  $k$  визначається за формулами (4.74–4.76).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$ , (у долях  $g$ ).

Визначається сейсмічний гідродінамичний тиск води. Ордината епюри гідродінамичного тиску  $p_{sw}$ , віднесеного до одиниці площі поверхні споруди, у точці, зануреній на глибину  $y$ , м під рівень верхнього б'єфа, знаходиться за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамичної сили тиску води  $E_{psg}$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$ , (у долях  $g$ ) будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $p_{\gamma_{gr}}$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ . Визначається тиск ґрунту греблі  $E_{tw}$  на секцію будівлі гідроелектростанції і реактивний тиску ґрунту  $E_{r,tw}$ . Визначається сейсмічний тиск ґрунту греблі  $E_{s,tw}$ .

У відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250] коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  скельової основи задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами, визначеними нижче: математичні очікування  $m_{tg\varphi} = 0.7$ ,  $m_c = 100$  кПа, середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi} = 0.0854$ ,  $\sigma_c = 12.2$  кПа, коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c} = 0.937$ , кореляційний момент  $K_{tg\varphi c} = 0.975$ . Коефіцієнт варіації  $C_v = 0.122$ .

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із

використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій будівлі гідроелектростанції  $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву будівлі гідроелектростанції на нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot \operatorname{tg} \varphi / F_c \geq 1$  і для будівель гідроелектростанції на скельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Перевіряється умова стійкості будівель гідроелектростанції проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{cr,m} / I_{est,m} \geq 1$ .

Розрахунки виконано методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання, механічної і фільтраційної міцності основи будівлі гідроелектростанції за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану будівлі гідроелектростанції і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків ризику настання граничних станів будівель гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в табл. 5.1–5.2.

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничних станів будівель гідроелектростанцій на скельовій та нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи не перевищують допустимих значень, тому надійність будівель гідроелектростанцій забезпечена.



Таблиця 5.1

Результати оцінки надійності будівель гідроелектростанцій на нескельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	фільтраційна міцність основи	
Будівля гідроелектростанції Київського гідровузла					
СС2-1	$4.80 \cdot 10^{-5}$	$2.11 \cdot 10^{-6}$	$8.45 \cdot 10^{-9}$	$3.02 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Будівля гідроелектростанції Канівського гідровузла					
СС2-1	$5.04 \cdot 10^{-5}$	$1.73 \cdot 10^{-5}$	$4.76 \cdot 10^{-9}$	$4.59 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Будівля гідроелектростанції Каховського гідровузла					
СС3	$9.12 \cdot 10^{-6}$	$2.76 \cdot 10^{-5}$	$6.88 \cdot 10^{-9}$	$7.22 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 5.2

Результати оцінки надійності будівель гідроелектростанцій на скельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	механічна міцність основи	
Будівля гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла					
СС3	$2.97 \cdot 10^{-5}$	$1.22 \cdot 10^{-7}$	$7.31 \cdot 10^{-9}$	$2.12 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Будівля гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла					
СС2-1	$5.21 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$6.22 \cdot 10^{-9}$	$5.44 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Будівля гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла					
СС3	$3.49 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	$5 \cdot 10^{-5}$
Будівля гідроелектростанції II Дніпровського гідровузла					
СС3	$4.87 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	$5 \cdot 10^{-5}$

## **5.2 Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи**

Перевірка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи виконується за методом граничних станів для основного і особливого сполучення навантажень у відповідності до [249, 311] забезпечена при виконанні умови (4.26).

При виконанні розрахунків надійності монтажних майданчиків розглядаються такі навантаження і впливи [249].

Постійні навантаження:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місцезорозташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води при нормальному підпірному рівні (НПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв: гідростатичний тиск води; силовий вплив води що фільтрується.

Тимчасові тривалі навантаження:

3. Тиск наносів, які відкладаються перед спорудою.

Короткочасні навантаження:

4. Силовий вплив води при рівнях у верхньому і нижньому б'єфах, які відповідають пропуску витрат води основного розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п.2): тиск води на верхову і низову грані споруди; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

5. Тиск льоду, який визначається при його середній багаторічній товщині.

6. Тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру.

7. Навантаження від підйомних, перевантажувальних і транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів (мостових і підвісних кранів).

Особливі навантаження:

8. Силовий вплив води при форсованому підпірному рівні (ФПР) верхнього б'єфу, рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску витрат води перевірною розрахункового випадку і нормальній роботі дренажних і протифільтраційних пристроїв (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані споруди; силовий вплив води що фільтрується; динамічні навантаження.

9. Силовий вплив води, обумовлений порушенням одного із дренажних або одного із протифільтраційних пристроїв, при НПР у верхньому б'єфі і рівні нижнього б'єфу, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними і екологічними вимогами витрат води (замість п. 2, 4): тиск води на верхову і низову грані споруди; силовий вплив води що фільтрується.

10. Тиск льоду, який визначається при його максимальній багаторічній товщині забезпеченістю 1 % (замість п. 5).

11. Тиск вітрової хвилі, який визначається при максимальній багаторічній швидкості вітру забезпеченістю 2% – для споруд класу СС3 і підкласу СС2-1 [249] і 4% для споруд підкласу СС2-2 і класу СС1 [249] (замість п. 6).

12. Сейсмічні впливи.

Перераховані навантаження і впливи приймаються в основному або в особливому сполученнях. При розрахунках надійності монтажних майданчиків на основне сполучення навантаження і впливів ураховуються постійні, тимчасові тривалі і короткочасні навантаження. Розрахунок надійності монтажних майданчиків на особливе сполучення навантаження і впливів виконується на дію навантажень основного сполучення і однієї з особливих. Навантаження і впливи повинні прийматись у найменш сприятливих можливих сполученнях.

Детерміністична методика оцінки надійності монтажних майданчиків за методом граничних станів здійснюється за наступними критеріями.

1. Умова вичепання механічної міцності залізобетонних конструкцій монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій. Підходи щодо розрахунку

залізобетонних конструкцій регламентовано у [251], розрахунки міцності і стійкості будівель гідроелектростанцій розглянуто у [249]. Методика оцінки надійності залізобетонних конструкцій наведена у розділі 4.8 за формулами (4.97–4.118), згідно з якою визначаються внутрішні зусилля – згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$  у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій, а також внутрішні зусилля в перерізі  $M_w$ ,  $N_w$  з урахуванням протитиску води із подальшим визначенням необхідної площі робочої арматури.

2. Умова стійкості монтажних майданчиків проти зсуву визначається за виразом (4.28). При визначенні узагальненої сили зсуву монтажних майданчиків слід урахувувати бічний тиск з боку примикання гребель із ґрунтових матеріалів за методикою, наведеною у додатку 6 [249]. Зокрема, бічний тиск правобережних гребель на монтажні майданчики Київського, Канівського, Кременчуцького гідровузлів і лівобережної греблі на монтажний майданчик Каховського гідровузла.

3. Умова стійкості монтажних майданчиків проти спливання визначається за виразом (4.90).

4. Умова забезпечення фільтраційної міцності нескельової основи перевіряється за формулою (4.20).

5. Умова міцності скельової основи перевіряється за критерієм міцності скельової основи при стисканні (4.119) та міцності скельової основи на зминання (4.120).

Для оцінки ризику втрати стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (4.26) доцільно представити у вигляді (4.19).

Виконано оцінку надійності монтажних майданчиків на зсув і спливання за нормативною методикою. Отримано такі значення розрахункових і нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках (р.в.):

Виконано оцінку надійності монтажних майданчиків на зсув і спливання за нормативною методикою. Отримано такі значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_{p,u}$  і спливання  $k_{p,v}$ , а також нормативних коефіцієнтів запасу стійкості  $k_n$  при різних розрахункових випадках (р.в.):

– монтажний майданчик будівлі гідроелектростанції Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.11$ ;  $k_{p,u} = 1.34$ ;  $k_{p,v} = 1.67$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ;  $k_{p,u} = 1.12$ ;  $k_{p,v} = 1.44$ ;

– монтажний майданчик будівлі гідроелектростанції Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.11$ ;  $k_{p,u} = 1.51$ ;  $k_{p,v} = 2.32$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ;  $k_{p,u} = 0.981$ ;  $k_{p,v} = 1.58$ ;

– монтажний майданчик будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.13$ ;  $k_{p,u} = 1.83$ ;  $k_{p,v} = 3.16$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ ;  $k_{p,u} = 1.29$ ;  $k_{p,v} = 1.54$ ;

– монтажний майданчик будівлі гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.11$ ;  $k_{p,u} = 6.63$ ;  $k_{p,v} = 3.49$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ;  $k_{p,u} = 5.79$ ;  $k_{p,v} = 1.71$ ;

– монтажний майданчик будівлі гідроелектростанції Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.13$ ;  $k_{p,u} = 1.35$ ;  $k_{p,v} = 3.18$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ ;  $k_{p,u} = 1.17$ ;  $k_{p,v} = 2.98$ .

Таким чином, надійність монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду за умовою стійкості проти зсуву і спливання за нормативною методикою забезпечена.

Алгоритм імовірнісної оцінки надійності монтажних майданчиків за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик.

Критерії настання граничних станів монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду є статистично залежними, тому що його виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхніх б'єсах гідровузлів.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи монтажних майданчиків  $A_n$ ,  $m^2$ , інші геометричні розміри, вагу основного і допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\rho b}=0.02$ ; щільність ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів, що примикає до монтажного майданчика, розподілена за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\rho gr}=0.06$ .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед монтажним майданчиком. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між ними по гідровузлам Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро по гідровузлах каскаду наведено у роботі [37, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед монтажним майданчиком. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду існує функціональна залежність [197], тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ_{wt}$  для монтажного майданчика кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою. Будується залежність між рівнями верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$ .

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

По значенням рівнів  $Z_{wt}$ , м і  $Z_{wb}$ , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку греблі із ґрунтових матеріалів  $W_{pw}$ , кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $p\gamma_{gr}$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ . Визначається тиск ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $E_{tw}$  на монтажний майданчик і реактивний тиску ґрунту  $E_{r,tw}$ .

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності району Карпат, району Вранча і Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані

про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [190]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно [447].

Під час виконання одного статистичного випробовування враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJ_r$ , розподілені від 0 до 1 у районі Карпат, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJ_r$  визначаються квантилі – бальність землетрусів  $J_r$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування монтажного майданчика [70].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи, (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на монтажний майданчик задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначено лінійно-спектральним методом.

Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [70] та даних, наведених у [190]. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ). Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  визначене за формулами (4.74 – 4.76). Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамічної сили тиску води від розрахункової амплітуди

прискорення основи (у долях  $g$ ). Визначається сейсмічний тиск ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $E_{s,tw}$ .

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

У випадку нескельової основи задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $ptg\varphi$  коефіцієнта внутрішнього тертя. По значенню  $ptg\varphi$  за нормальним законом розподілу із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi}$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, tg\varphi}$  визначається квантиль – коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунту основи.

Для скельової основи характеристики ґрунту основи  $tg\varphi$  і  $c$  задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250, 311] за нормальним законом розподілу, як випадкові корельовані величини, які підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v=0.122$ . Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій монтажних майданчиків  $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву монтажних майданчиків на нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$  і для монтажних майданчиків на скельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості монтажних майданчиків проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .



Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3|/R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}|/R_{cs,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{cr,m}/I_{est,m} \geq 1$ .

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань.

Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання, механічної і фільтраційної міцності основи монтажних майданчиків за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану монтажних майданчиків і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12).

Монтажний майданчик Київського гідровузла. Монтажний майданчик закритого типу із розмірами у плані 50.6×29.93 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки +82.40 м до позначки +107.00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити з боку верхнього б'єфа 4.7 м, з боку нижнього б'єфа 2.6 м. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 2.3 м, 2.0 м. Стіни надземної частини – із ребристих залізобетонних плит із заповнювачем. Монтажний майданчик розрахований на монтаж одного агрегата і обслуговується мостовим краном в. п. 75 т. На позначці +112.70 м по верху зовнішніх стін улаштовані колії колового крану в. п. 2×140/160/50+10 т. Основою монтажного майданчика слугують алювіальні дрібнозернисті піски потужністю 10–20 м. Клас наслідків споруд СС2-1.

Монтажний майданчик Канівського гідровузла. Монтажний майданчик закритого типу із розмірами у плані 52.4×50.7 м. Навкруги будівлі монтажного

майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки +73.40 м до позначки +98.00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити 3.0 м. З боку верхнього і нижнього б'єфів плита має консольні виступи довжиною 4.5 м. Стіни будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 2.3 м. Монтажний майданчик розрахований на монтаж одного агрегата і обслуговується мостовим краном в. п. 100/20 т. На позначці +100.72 м по верху зовнішніх стін улаштовані колії колового крану. Основою монтажного майданчика слугують піски різної крупності із прошарками супісків і суглинків. Клас наслідків споруд СС2-1.

Монтажний майданчик Кременчуцького гідровузла. Монтажний майданчик закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 68.5×36.3 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу і верхнього б'єфа виконано обернені засипки від позначки +60.0 м до позначки +86.00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити, заанкерену в основу. Товщина плити 1.20 м. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 4.0 м, 3.80 м. Монтажний майданчик обслуговується мостовим краном в. п. 30/5 т і козловим краном в. п. 2×250/100 т. Основою монтажного майданчика слугують граніти. Клас наслідків споруд СС3.

Монтажний майданчик Середньодніпровського гідровузла. Монтажний майданчик закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 71.0×44.0 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу і верхнього б'єфа виконано обернені засипки від позначки +49.40 м до позначки +59.25 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент рамної конструкції виконаний із монолітного залізобетону. Порожнини у тілі фундаменту заповнені ущільненою піщаною засипкою. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 2.5 м, 1.50 м. Монтажний майданчик обслуговується мостовим краном в. п.

50/10 т і козловим краном в. п. 400/100/2×10 т. Основою монтажного майданчика слугують скельні породи.

Монтажний майданчик Каховського гідровузла. Монтажний майданчик закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 63.0×30.0 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки –12.50 м до позначок +21.20 м, +16.150 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити 3.150 м. Порожнини у підземній частині будівлі заповнені ущільненою піщаною засипкою. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 3.7 м, 2.85 м. Монтажний майданчик обслуговується мостовим краном в. п. 250/30 т і козловим краном в. п. 2×50/25 т. В основі монтажного майданчика залягають алювіальні дрібнозернисті піски, потужність шарів 7÷8 м. Нижче залягають вапняки потужністю 1÷3,5 м, ще нижче – дрібнозернисті глинисті піски потужністю 26–28 м. Клас наслідків споруд СС3.

Імовірнісна оцінка надійності монтажного майданчика будівлі гідроелектростанції за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи в рамках параметричної теорії надійності реалізована на прикладі Кременчуцького гідровузла. При виконанні розрахунків використані нормативні і наукові джерела [37, 72, 249]. Схема монтажного майданчика будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла представлена на рис. 5.2.

Площа основи монтажного майданчика  $A_n = 2351 \text{ м}^2$ , довжина 68.50 м, ширина 36.30 м. Власна вага секції  $G_b = 560.0 \text{ МН}$ .

Задається випадкова щорічна імовірність швидкості вітру  $pVr$ , розподілена від 0 до 1. За даними [191] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у м. Кам'янське, м. Запоріжжя можуть бути представлені нормальним розподілом, у м. Кременчук, м. Каховка – логарифмічно-нормальним розподілом.

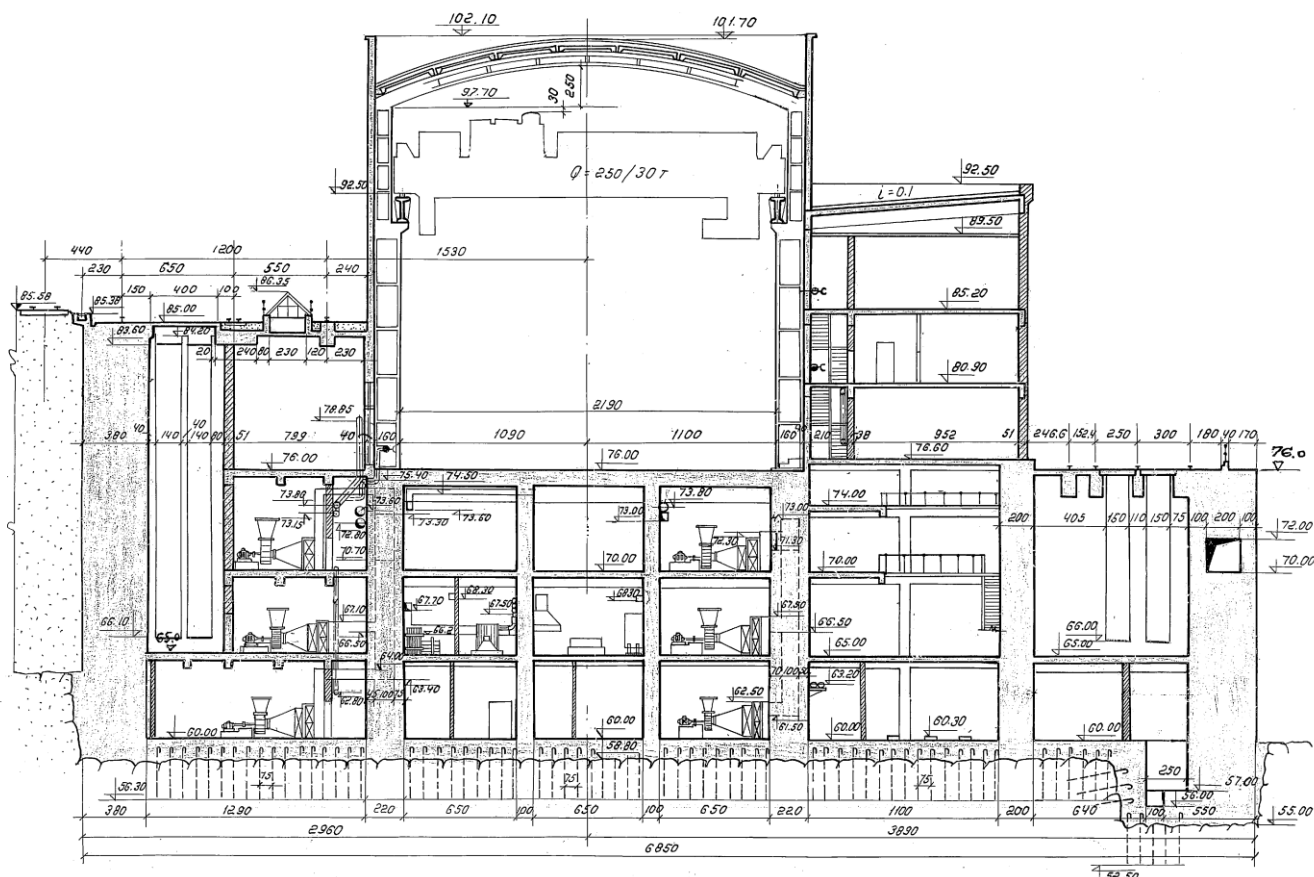


Рис. 5.2. Переріз будівлі монтажного майданчика Кременчуцького гідровузла

За значенням  $pV_r$  визначається квантиль – швидкість вітру  $V_r$ , м/с. У відповідності до імовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій, необхідне знання розподілів випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Для будівлі гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла класу відповідальності ССЗ розрахунковий строк служби становить  $T=100$  років. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру  $V$ , м/с за розрахунковий строк служби  $T$  у географічному місці розташування Кременчуцького гідровузла за розрахунковий строк служби отримані зведенням у степінь  $T$  ординат розподілів щорічної швидкості вітру  $V_r$ , м/с (рис. 4.16).

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у

створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [37, 197]. По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м (рис. 4.17).

В залежності від статичного рівня води  $Z_{wt}$ , м визначається середнє значення глибини води у водосховищі  $H$ , м і глибина води у водосховищі  $H_c$ , м перед монтажним майданчиком. Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [254]. Визначається довжина розгону хвилі  $L$ , м за відомою методикою, наведеною у [248, 312], а також топографічними характеристиками водосховища. Визначаються: висота вітрового нагону  $dh$ , м, середня висота хвилі  $h_{cp}$ , м, середній період хвилі  $T_{cp}$ , с, середня довжина хвилі  $\lambda_{cp}$ , м, висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль  $h1\%$ , м за формулами (4.1–4.5).

Визначається хвильовий тиск при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження. Максимальне значення горизонтального хвильового навантаження визначається за формулою (4.66) для розрахункового моменту часу  $t$ , якому відповідає величина  $\cos \omega t$  [312].

Підвищення вільної поверхні хвилі  $\eta_{1\%}$ , м визначаються за формулами (4.67–4.68). Епюра хвильового тиску при максимальному значенні горизонтального хвильового тиску на греблю прийнята трапецієдальною, з ординатами  $p_e$ , кПа, обчисленими за формулою (4.69). Значення горизонтального хвильового навантаження  $W_e$ , кН у горизонтальному перерізі, зануреному під рівень верхнього б'єфа на глибину  $h$ , обчислене за формулою (4.70). Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$ .

Задається залежність між рівнем верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

Визначаються випадкові величини: сила гідростатичного тиску з боку верхнього б'єфа  $W_{wt}$ , кН, сила гідростатичного тиску з боку нижнього б'єфа  $W_{wb}$ , кН, сила зважувального протитиску  $W_f$ , кН.

Визначаються сила тиску ґрунту засипки з боку з боку верхнього і нижнього б'єфів, з боку шлюзу як тиск ґрунту у стані спокою.

Визначаються навантаження від ваги механізмів, ваги мосту, корисного навантаження.

Сейсмічний вплив задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамичний тиск води, сейсмічний тиск наносів, тиск від сейсмічних хвиль. Задання сейсмічності району розташування гідровузла виконано у відповідності до основних положень [248] та даних, наведених у [190]. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Задається випадкова щорічна імовірність сейсмічного впливу  $pJr$ , розподілена від 0 до 1. За даними [190] імовірність щорічного максимального сейсмічного впливу у м. Кременчук може бути задана логарифмічно-нормальним розподілом. За значенням  $pJr$  визначається квантиль – бальність землетрусу  $Jr$ , бали. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування в залежності від типу основи. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за розрахунковий строк служби (рис. 4.24). Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$ , (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за розрахунковий строк служби (рис. 4.25). Інерційні сейсмічні навантаження згідно [248] визначені лінійно-спектральним методом. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  у точці  $k$  визначається за формулами (4.74–4.76). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$ , (у долях  $g$ ).

Визначається сейсмічний гідродінамичний тиск води. Ордината епюри гідродінамичного тиску  $p_{sw}$ , віднесеного до одиниці площі поверхні споруди, у точці, зануреній на глибину  $y$ , м під рівень верхнього б'єфа, знаходиться за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамичної сили тиску води  $E_{psg}$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи  $\alpha_0$ , (у долях  $g$ ).

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту греблі із ґрунтових матеріалів  $p_{\gamma gr}$ , по якій визначається квантиль –

значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ . Визначається тиск ґрунту греблі  $E_{tw}$  на монтажний майданчик і реактивний тиску ґрунту  $E_{r,tw}$ . Визначається сейсмічний тиск ґрунту греблі  $E_{s,tw}$ .

У відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250] коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питома зчеплення  $c$  скельової основи задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами, визначеними нижче: математичні очікування  $m_{tg\varphi} = 0.7$ ,  $m_c = 100$  кПа, середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi} = 0.0854$ ,  $\sigma_c = 12.2$  кПа, коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c} = 0.937$ , кореляційний момент  $K_{tg\varphi c} = 0.975$ . Коефіцієнт варіації  $C_v = 0.122$ .

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій монтажного майданчика  $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву монтажного майданчика на нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$  і для монтажного майданчика на нескельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості монтажного майданчика проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{cr,m} / I_{est,m} \geq 1$ .

Розрахунки виконано методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена

кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання, механічної і фільтраційної міцності основи монтажних майданчиків за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану монтажних майданчиків і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків наведені в таблицях 5.3–5.4.

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничних станів монтажних майданчиків на скельовій та нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, фільтраційної і механічної міцності основи не перевищують допустимих значень, тому надійність монтажних майданчиків забезпечена.

Таблиця 5.3

Результати оцінки надійності монтажних майданчиків на нескельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	фільтраційна міцність основи	
Монтажний майданчик гідроелектростанції Київського гідровузла					
СС2-1	$5.09 \cdot 10^{-6}$	$4.83 \cdot 10^{-5}$	$1.14 \cdot 10^{-8}$	$5.27 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Монтажний майданчик гідроелектростанції Канівського гідровузла					
СС2-1	$3.48 \cdot 10^{-6}$	$2.52 \cdot 10^{-6}$	$1.01 \cdot 10^{-8}$	$2.38 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Монтажний майданчик гідроелектростанції Каховського гідровузла					
СС3	$7.64 \cdot 10^{-6}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$6.28 \cdot 10^{-10}$	$1.36 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-5}$



Результати оцінки надійності монтажних майданчиків на скельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	механічна міцність основи	
Монтажний майданчик гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла					
СС3	$5.10 \cdot 10^{-5}$	$2.65 \cdot 10^{-5}$	$4.38 \cdot 10^{-9}$	$6.11 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Монтажний майданчик гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла					
СС2-1	$3.29 \cdot 10^{-5}$	$4.84 \cdot 10^{-5}$	$8.29 \cdot 10^{-10}$	$8.22 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Монтажний майданчик гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла					
СС3	$5.11 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	$5 \cdot 10^{-5}$
Монтажний майданчик гідроелектростанції II Дніпровського гідровузла					
СС3	$1.57 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	$5 \cdot 10^{-5}$

**5.3 Імовірнісна оцінка надійності камер шлюзів на нескельовій основі за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, руйнування нижніх воріт**

Розрахунки за детерміністичною методикою за методом граничних станів виконуються для основного і особливого сполучення навантажень за умовою (4.27).

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силевий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води в камері шлюзу; силевий вплив води що фільтрується.

3. Температурні впливи.

4. Вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів.

5. Власна вага і тиск ґрунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

Для оцінки надійності камер шлюзів на нескельовій основі за критеріями вичерпання міцності, втрати стійкості проти зсуву, спливання за методом граничних станів формулу (4.27) доцільно представити у вигляді (4.19).

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу при різних розрахункових випадках: камери шлюзів Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.09$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 0.98$ ; камера шлюзу Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.14$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ .

Детерміністична методика оцінки надійності камер шлюзів на нескельовій основі за методом граничних станів здійснюється за наступними критеріями.

1. Умова вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій камер шлюзів. Підходи щодо розрахунку залізобетонних конструкцій регламентовано у [100]. Методика оцінки надійності залізобетонних конструкцій наведена у розділі 4.8 за формулами (4.97–4.118), згідно з якою визначаються внутрішні зусилля – згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$  у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій, а також внутрішні зусилля в перерізі  $M_w, N_w$  з урахуванням протитиску води із подальшим визначенням необхідної площі робочої арматури.

2. Умова стійкості камер шлюзів на нескельовій основі проти зсуву визначається за виразом (4.28).

3. Умова стійкості камер шлюзів на нескельовій основі проти спливання визначається за виразом (4.90).

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_z$  і спливання  $k_c$  при різних розрахункових випадках: шлюз Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_z = 1.43$  (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву),  $k_c = 3.04$

(коефіцієнт запасу стійкості проти спливання); для особливого сполучення навантажень  $k_3 = 1.59$ ,  $k_c = 3.03$ ; шлюз Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_3 = 1.39$ ,  $k_c = 2.98$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_3 = 1.44$ ,  $k_c = 2.95$ ; шлюз Середньодніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_3 = 1.59$ ,  $k_c = 2.68$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_3 = 1.35$ ,  $k_c = 2.54$ ; шлюз Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_c = 2.90$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_c = 2.85$ .

Шлюзи Київського і Канівського гідровузлів. Голови шлюзів докової конструкції із нерозрізним днищем. Камери із розрізним днищем по осі (рис. 5.3). Стіни камер кутового профілю із консолями. Шлюз розташований у верхньому б'єфі в обсіпках. Наповнення камери головне – із під воріт верхньої голови. Опорожнення камери через обхідні водопровідні галереї нижньої голови у низовий підхід. Ґрунти – нескельові. Клас наслідків споруд гідровузла СС2-1.

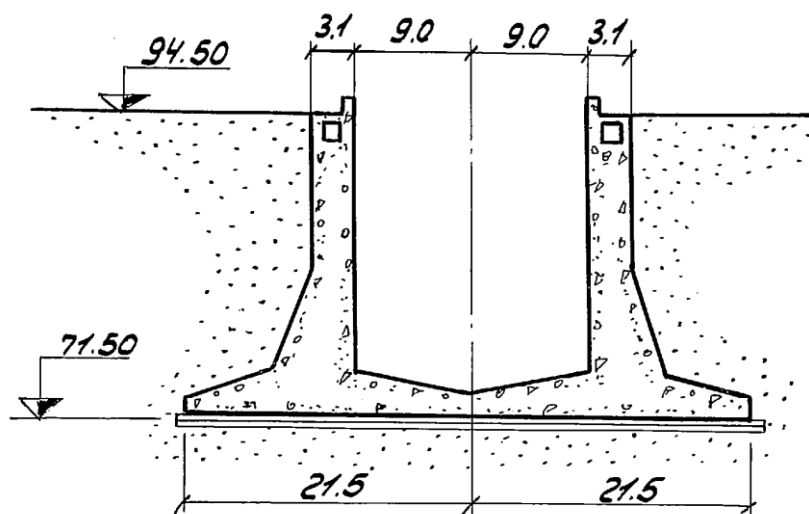


Рис. 5.3. Камера Канівського шлюзу (розміри у м.)

Шлюз Середньодніпровського гідровузла. Шлюз розташований у верхньому б'єфі з підводною частковою обсіпкою. Система живлення – головна - з під робочих воріт через камеру гасіння. Опорожнення – через обхідні галереї, розташовані у стоянах нижньої голови. Стіни камери – у вигляді двохконсольних упорних стін.

Верхня голова – із нерозрізним залізобетонним днищем. Нижня голова – із стоянів із розрізним армобетонним днищем. Клас наслідків споруд гідровузла СС2-1.

Шлюз Каховського гідровузла. Розташований у верхньому б'єфі між будівлею ГЕС і лівим берегом. Система живлення розподільча – за допомогою поздовжніх галерей, розташованих у днищі камери. Опорожнення камери здійснюється донними водоводами, які розташовані у стоянах нижньої голови. Шлюз використовується для пропуску паводку. Верхня голова – нерозрізна конструкція із розмірами у плані 43.0×30.0 м. Товщина днища 9.5 м. Голова обладнана плоскими робочими і аварійно-ремонтними затворами. Нижня голова має розмір у плані 98.5×35.64 м (зі стоянами). Товщина днища 10.0 м. Голова обладнана двохстворчатими робочими і ремонтними затворами. Камера шлюзу докового типу із армованого бетону з попередньо напруженим армуванням елементів днища (рис. 5.4). Голова і камера з боку водосховища і рейду обсіпані земляними дамбами із шириною майданчиків по верху 30.0 м. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

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

Розглядається типова камера шлюзу. Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи камери шлюзу  $A_n$ , м<sup>2</sup>, інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma b} = 0.02$ ; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma gr} = 0.06$ ; міцність бетону на стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rb} = 0.135$ ; міцність арматури на розтягання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rs} = 0.08$ .

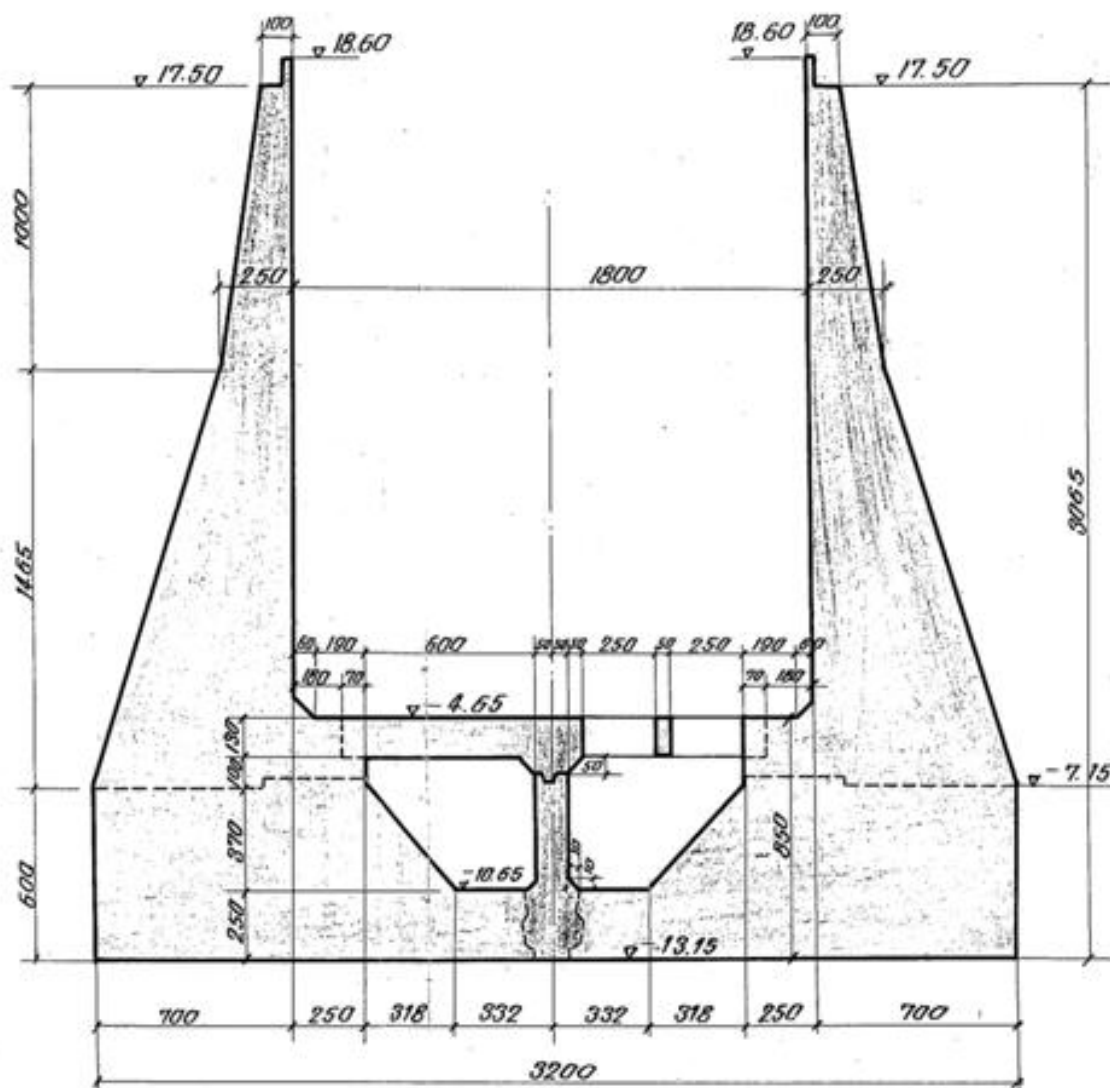


Рис. 5.4. Камера Каховського шлюзу (розміри у см.)

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед шлюзом. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлам Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [37, 197].

По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль - позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед шлюзом. Між максимальними паводковими витратами  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів каскаду згідно з [197] існує функціональна залежність. Тому при

виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ_{wt}$  для шлюзів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою.

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

По значенням рівнів верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки  $W_{pw}$ , кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту обернених засипок  $p\gamma_{gr}$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ .

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

По значенням  $\gamma_{gr}$  і  $tg\phi_g$  визначається сила бічного тиск ґрунту обернених засипок  $E_{tw}$  на стінки камер шлюзу.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур за нормальним розподілом, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря за нормальним розподілом у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск ґрунту  $E_{r,tw}$  оберненої засипки [252].

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

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності району Карпат, району Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [190]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно [447]. Під час виконання одного статистичного випробовування враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJr$ , розподілені від 0 до 1 у районі Карпат, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJr$

визначаються квантилі – бальність землетрусів  $J_r$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [70]. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи, (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на шлюз задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначено лінійно-спектральним методом. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) камери шлюзу. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  визначене за формулами (4.74–4.76). Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамічної сили тиску води від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ). Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок  $E_{s,tw}$ .

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

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250, 311]. Коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами:

математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0,122$ .

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль - значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $p_c$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій камер шлюзу  $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву камер шлюзу на нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$ .

Перевіряється умова стійкості камер шлюзу проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Відмова нижніх воріт шлюзу прийнята як імовірність нерозкритої події  $p_{не} = 2,0 \times 10^{-6}$  1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд [42].

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання камер шлюзу за весь строк експлуатації. За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану камер шлюзу і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків ризику настання граничних станів камер шлюзів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці 5.5.



Результати комплексної оцінки імовірності вичерпання міцності, втрати стійкості проти зсуву, спливання камер шлюзів на нескельовій основі гідровузлів

Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	руйнування нижніх воріт	
Камера шлюзу Київського гідровузла					
СС2-1	$1,81 \times 10^{-5}$	$1,829 \times 10^{-4}$	–	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Камера шлюзу Канівського гідровузла					
СС2-1	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,909 \times 10^{-4}$	–	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Камера шлюзу Середньодніпровського гідровузла					
СС2-1	$5,327 \times 10^{-5}$	$5,143 \times 10^{-5}$	$6,15 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Камера шлюзу Каховського гідровузла					
СС3	$1,33 \times 10^{-7}$	$2,487 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничних станів камер шлюзів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, руйнування нижніх воріт не перевищують допустимих значень, тому надійність камер шлюзів на нескельовій основі забезпечена.

#### **5.4 Імовірнісна оцінка надійності камер шлюзів на скельовій основі за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, перекидання, механічної міцності, механічної міцності основи, руйнування нижніх воріт**

Розрахунки за детерміністичною методикою за методом граничних станів виконуються для основного і особливого сполучення навантажень за умовою (4.27).

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води в камері шлюзу; силовий вплив води що фільтрується.

3. Температурні впливи.

4. Вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів.

5. Власна вага і тиск ґрунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

Для оцінки надійності камер шлюзів на скельовій основі за критеріями вичерпання міцності, втрати стійкості проти зсуву, спливання за методом граничних станів формулу (4.27) доцільно представити у вигляді (4.19).

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках для камер шлюзів Кременчуцького і Дніпровського гідровузлів: для основного сполучення навантажень  $k_n = 1.14$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_n = 1.02$ .

Детерміністична методика передбачає оцінку надійності камер шлюзів на нескельовій основі за методом граничних станів за наступними критеріями.

1. Умова вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій камер шлюзів. Підходи щодо розрахунку залізобетонних конструкцій регламентовано у [251]. Методика оцінки надійності залізобетонних конструкцій наведена у розділі 4.8 за формулами (4.97–4.118), згідно з якою визначаються внутрішні зусилля – згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$  у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій, а також внутрішні зусилля в перерізі  $M_w, N_w$  з урахуванням протитиску води із подальшим визначенням необхідної площі робочої арматури.

2. Умова стійкості камер шлюзів на скельовій основі проти зсуву визначається за виразом (4.28).

3. Умова стійкості камер шлюзів на скельовій основі проти спливання визначається за виразом (4.90).

3. Умова стійкості камер шлюзів на скельовій основі проти перекидання визначається за виразом (4.59). В умовних позначеннях:  $M_t$  – підсумок моментів сил,

які намагаються перекинути камеру шлюзу відносно низового ребра,  $M_r$  – підсумок моментів сил, які намагаються утримати камеру шлюзу відносно низового ребра.

5. Умова міцності скельової основи перевіряється за критерієм міцності скельової основи при стисканні за виразом (4.119) та міцності скельової основи на зминання за виразом (4.120).

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_z$ , проти перекидання  $k_{пер}$ , проти спливання  $k_c$  при різних розрахункових випадках: однокамерний шлюз Дніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_z = 1.54$ ,  $k_{пер} = 2.26$ ,  $k_c = 3.12$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_z = 1.47$ ,  $k_{пер} = 2.18$ ,  $k_c = 3.05$ ; трикамерний шлюз Дніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_z = 1.45$ ,  $k_{пер} = 2.21$ ,  $k_c = 3.11$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_z = 1.39$ ,  $k_{пер} = 2.07$ ,  $k_c = 2.95$ ; шлюз Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень  $k_z = 1.49$ ,  $k_{пер} = 2.24$ ,  $k_c = 3.24$ ; для особливого сполучення навантажень  $k_z = 1.42$ ,  $k_{пер} = 2.09$ ,  $k_c = 3.14$ .

Трикамерний шлюз Дніпровського гідровузла. Верхня голова шлюзу примикає до глухих прольотів водозливної греблі. Камери шлюзу врізані в скельну основу, верхні третини стінок за висотою знаходяться у відсіпках з гірської маси. Висота стінок першої камери 20.8 м, другої камери – 20.3 м, третьої камери – 18.8 м. Дно камер шлюзу врізане в скелю. Стіни камер - прямокутного профілю із консолями, а також – трапецієвидного профілю (рис. 5.5). Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

Однокамерний шлюз Дніпровського гідровузла. Ширина камери 18 м, довжина – 283 м, висота – 44.9 м. В основі залягають слабкотрищівуваті граніти. Стіни камери виконані у вигляді тонких бетонних облицювань, заанкерених у скельний масив, у вигляді масивних бетонних облицювань і кутикових залізобетонних підпірних стінок (рис. 5.6). Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

Шлюз Кременчуцького гідровузла. Шлюз розташовано у верхньому б'єфі, обсипано ґрунтом до позн. +82.35 м і спряжено із будівлею гідроелектростанції за допомогою земляної вставки. Корисні габарити камери шлюзу 269.10×18 м.

Мінімальна глибина в камері – 3.65 м. Споруди шлюзу врізані у скельний масив на глибину від 11 м до 21 м. Стіни камери у межах скелі виконані у вигляді бетонних облицювань, а вище – у вигляді залізобетонних стін кутикового профілю (рис. 5.7). Дно камери шлюзу рамної конструкції. Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

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

Розглядається типова камера шлюзу (рис. 5.5.). Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи камери шлюзу  $A_n$ , м<sup>2</sup>, інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma b} = 0.02$ ; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma gr} = 0.06$ ; міцність бетону на стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rb} = 0.135$ ; міцність арматури на розтягання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rs} = 0.08$ .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед шлюзом. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлам Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [37, 197].

По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль - позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед шлюзом. Між максимальними паводковими витратами  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів каскаду згідно з [197] існує функціональна залежність. Тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ_{wt}$  для шлюзів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою.

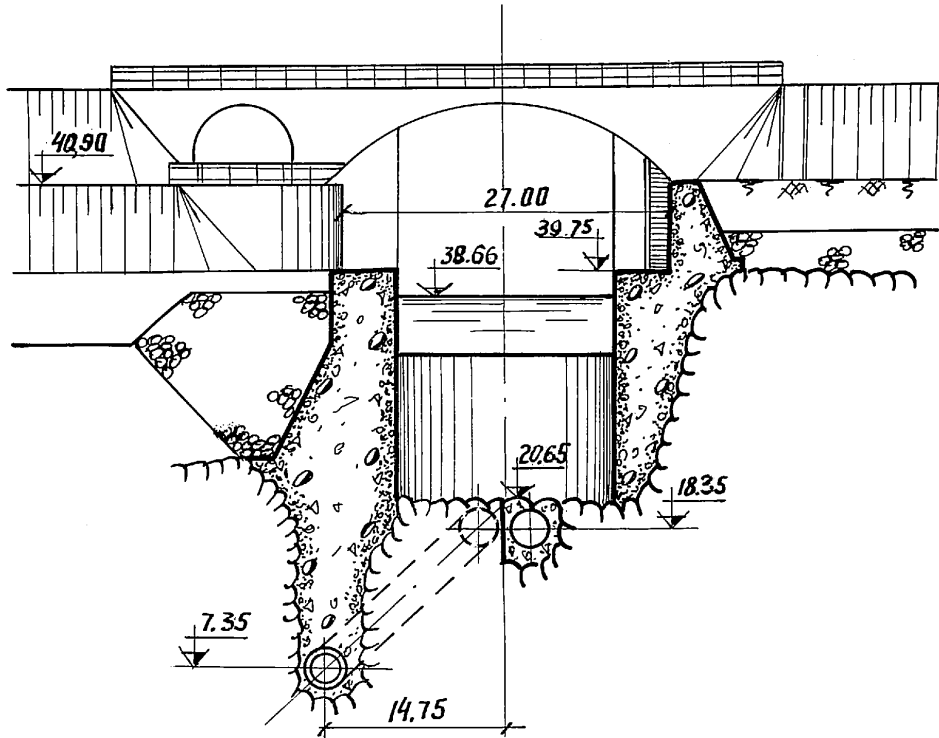


Рис. 5.5. Друга камера трикамерного Дніпровського шлюзу (розміри у м.)

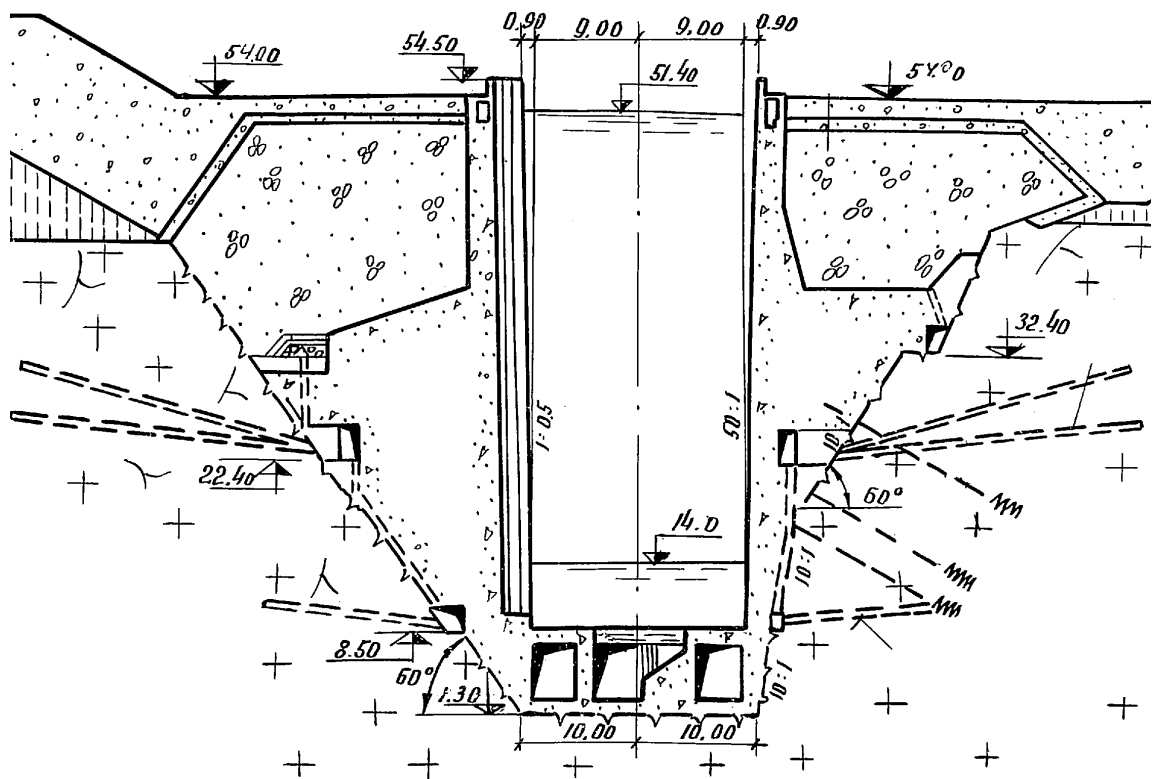


Рис. 5.6. Камера однокамерного Дніпровського шлюзу (розміри у м.)

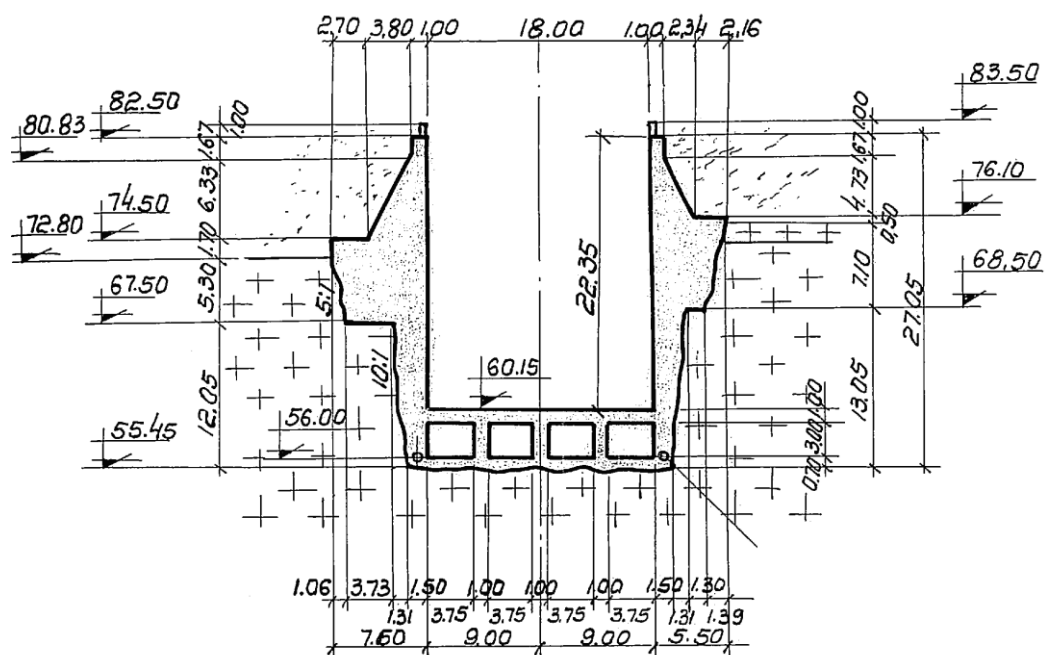


Рис. 5.7. Камера Кременчуцького шлюзу (розміри у м.)

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

По значенням рівнів верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки  $W_{pw}$ , кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту обернених засипок  $p_{\gamma_{gr}}$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ .

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

По значенням  $\gamma_{gr}$  і  $tg\phi_g$  визначається сила бічного тиск ґрунту обернених засипок  $E_{tw}$  на стінки камер шлюзу.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур за нормальним розподілом, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря за нормальним розподілом у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск ґрунту  $E_{r,tw}$  оберненої засипки [252].

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

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів [190]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно [447]. Під час виконання одного статистичного випробовування враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJ_r$ , розподілені від 0 до 1 у районі Карпат, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJ_r$  визначаються квантилі – бальність землетрусів  $J_r$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [70]. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи, (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на шлюз задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначено лінійно-спектральним методом. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) камери шлюзу. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  визначене за формулами (4.74–4.76).

Визначається сейсмічний гідродінамичний тиск води  $E_{psw}$  за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамичної сили тиску води від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ). Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засинок  $E_{s,tw}$ .

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

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250, 311]. Коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0.122$ .

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль - значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль - значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій камер шлюзу  $A_{sf} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву камер шлюзу на скельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$ .

Перевіряється умова стійкості камер шлюзу проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості камер шлюзу на скельовій основі проти перекидання  $M_r / M_t \geq 1$ .



Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3|/R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}|/R_{cs,m} \leq 1$ .

Відмова нижніх воріт шлюзу прийнята як імовірність нерозкритої події  $p_{не} = 2,0 \times 10^{-6}$  1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд [42].

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання камер шлюзу за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану камер шлюзу і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків ризику настання граничних станів камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

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

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	руйнування нижніх воріт	
Камера шлюзу Кременчуцького гідровузла							
ССЗ	$5,04 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-6}$	$6,74 \times 10^{-8}$	$1,78 \times 10^{-5}$	$6,14 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Камера трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла							
ССЗ	$7,14 \times 10^{-6}$	$2,11 \times 10^{-5}$	$6,28 \times 10^{-7}$	$5,10 \times 10^{-7}$	$5,08 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Камера однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла							
ССЗ	$3,39 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-5}$	$9,60 \times 10^{-7}$	$4,42 \times 10^{-6}$	$2,23 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничних станів камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, руйнування нижніх воріт не перевищують допустимих значень, тому надійність камер шлюзів на скельовій основі забезпечена.

### **5.5 Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах за за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, перекидання, механічної міцності, механічної міцності основи, руйнування нижніх воріт**

Розрахунки за детерміністичною методикою за методом граничних станів виконуються для основного і особливого сполучення навантажень за умовою (4.27).

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи [521]:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силевий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води з боку камери шлюзу; силевий вплив води що фільтрується.

3. Температурні впливи.

4. Вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів.

5. Власна вага і тиск ґрунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

Для оцінки надійності голів шлюзів на нескельовій основі за критеріями вичерпання міцності, втрати стійкості проти зсуву, спливання і голів шлюзів на скельовій основі за критеріями вичерпання міцності, втрати стійкості проти зсуву, спливання, перекидання, механічної міцності основи за методом граничних станів формулу (4.27) доцільно представити у вигляді (4.19).

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу при різних розрахункових випадках: голови шлюзів Кременчуцького, Дніпровського, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень (осн. с. н.)  $k_n = 1,14$ ; для особливого сполучення навантажень (особ. с. н.)  $k_n = 1,02$ ; голови шлюзів Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для осн. с. н.  $k_n = 1,09$ ; для особ. с. н.  $k_n = 0,98$ .

Детерміністична методика за методом граничних станів передбачає оцінку надійності голів шлюзів на нескельовій і скельовій основах за наступними критеріями.

1. Умова вичепання механічної міцності залізобетонних конструкцій голів шлюзів на нескельовій і скельовій основах. Підходи щодо розрахунку залізобетонних конструкцій регламентовано у [251, 316]. Методика оцінки надійності залізобетонних конструкцій наведена у розділі 4.8 за формулами (4.97–4.118), згідно з якою визначаються внутрішні зусилля – згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$  у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій, а також внутрішні зусилля в перерізі  $M_w$ ,  $N_w$  з урахуванням протитиску води із подальшим визначенням необхідної площі робочої арматури.

2. Умова стійкості голів шлюзів на нескельовій і скельовій основах проти зсуву визначається за виразом (4.28).

3. Умова стійкості голів шлюзів на нескельовій і скельовій основах проти спливання визначається за виразом (4.90).

4. Умова стійкості голів шлюзів на скельовій основі проти перекидання визначається за виразом (4.59). В умовних позначеннях:  $M_t$  – підсумок моментів сил, які намагаються перекинути голову шлюзу відносно низового ребра,  $M_r$  – підсумок моментів сил, які намагаються утримати голову шлюзу відносно низового ребра.

5. Умова міцності скельової основи перевіряється за критерієм міцності скельової основи при стисканні за виразом (4.119) та міцності скельової основи на зминання за виразом (4.120).

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_3$  і

стійкості проти перекидання  $k_{пер}$  при різних розрахункових випадках: верхня голова шлюзу Київського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.64$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.53$ ; нижня голова шлюзу Київського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.41$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.27$ ; верхня голова шлюзу Канівського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.47$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.34$ ; нижня голова шлюзу Канівського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.36$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.25$ ; верхня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 2.63$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 2.50$ ; нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 2.89$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 2.72$ ; верхня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 2.59$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 2.45$ ; нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 2.92$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 2.83$ ; перша (верхня) голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.64$ ,  $k_{пер} = 2.02$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.55$ ,  $k_{пер} = 1.93$ ; четверта (нижня) голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 2.27$ ,  $k_{пер} = 2.34$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 2.14$ ,  $k_{пер} = 2.26$ ; верхня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 2.12$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 2.03$ ; нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.48$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.38$ ; верхня голова шлюзу Каховського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.46$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.36$ ; нижня голова шлюзу Каховського гідровузла: для осн. с. н.  $k_3 = 1.57$ ; для особ. с. н.  $k_3 = 1.47$ .

Голови шлюзів Київського і Канівського гідровузлів. Верхні і нижні голови шлюзів докової конструкції із нерозрізним днищем. Голови шлюзів розташовані у верхніх б'єфах в обсіпках. Ширина голів 38 м, 44 м, висота голів 24 м, 35 м (рис. 5.8–5.9). Грунти – нескельові. Клас наслідків споруд гідровузла СС2-1.

Голови шлюзу Кременчуцького гідровузла. Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі, обсіпані ґрунтом і спряжені із будівлею гідроелектростанції за допомогою земляної вставки. Ширина голів 44 м, 52.4 м. Голови шлюзу врізані у скельний масив на глибину до 30 м (рис. 5.10–5.11). Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

Голови шлюзу Середньодніпровського гідровузла. Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі з підводною частковою обсіпкою. Верхня

голова – із нерозрізним залізобетонним днищем. Нижня голова – із стоянів із розрізним армобетонним днищем. Ширина голів 36 м, 50 м, висота голів ~28 м (рис. 5.12–5.13). Клас наслідків споруд гідровузла СС2-1.

Голови трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла. Верхня (перша) голова шлюзу примикає до глухих прольотів водозливної греблі. Верхня і нижня (четверта) голови шлюзу врізані в скельну основу на глибину до 20 м. Ширина голів ~40 м (рис. 5.14–5.15). Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

Голови однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла. Верхня і нижня голови шлюзу врізані в скельну основу на глибину до 54 м. Ширина голів 43 м, 52 м. В основі залягають слабкотрищівуваті граніти. Клас наслідків споруд СС3.

Голови шлюзу Каховського гідровузла. Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі між будівлею ГЕС і лівим берегом. Верхня голова – нерозрізна конструкція із розмірами у плані 43.0×30.0 м. Товщина днища 9.5 м. Висота підземної частини 32 м. Голова обладнана плоскими робочими і аварійно-ремонтними затворами. Нижня голова має розмір у плані 98.5×35.64 м (зі стоянами). Товщина днища 10.0 м. Голова обладнана двохстворчатими робочими і ремонтними затворами. Верхня голова з боку водосховища і рейду обсіпана земляними дамбами із шириною майданчиків по верху 30 м. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

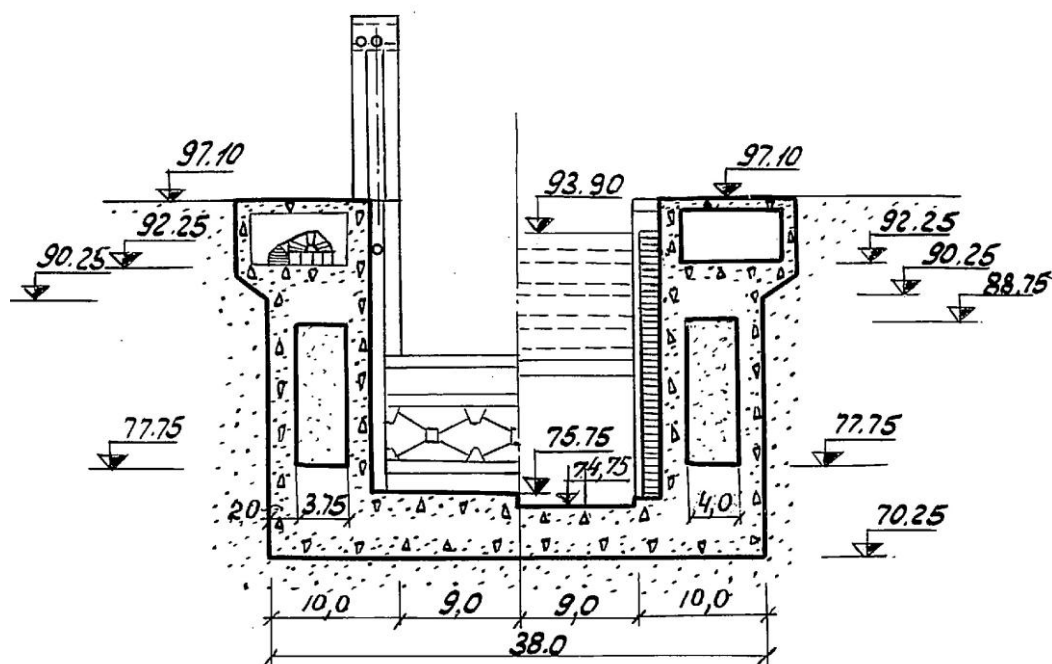


Рис. 5.8. Верхня голова шлюзу Канівського гідровузла (розміри у м.)

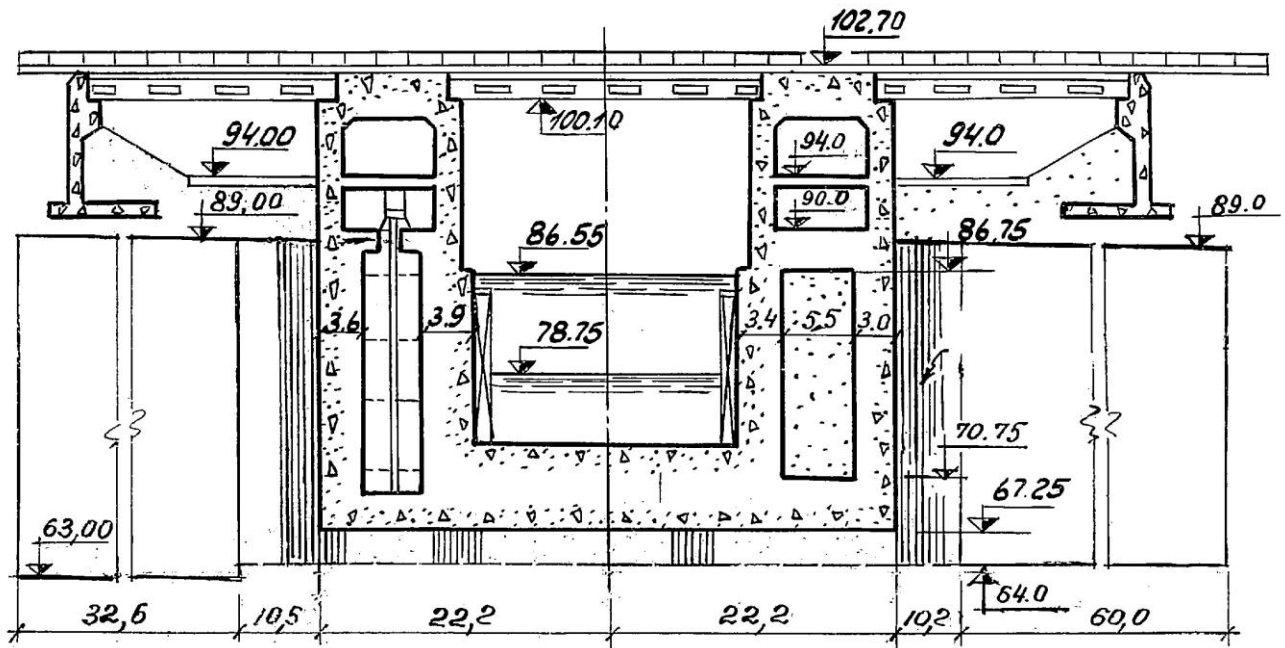


Рис. 5.9. Нижня голова шлюзу Канівського гідровузла (розміри у м.)

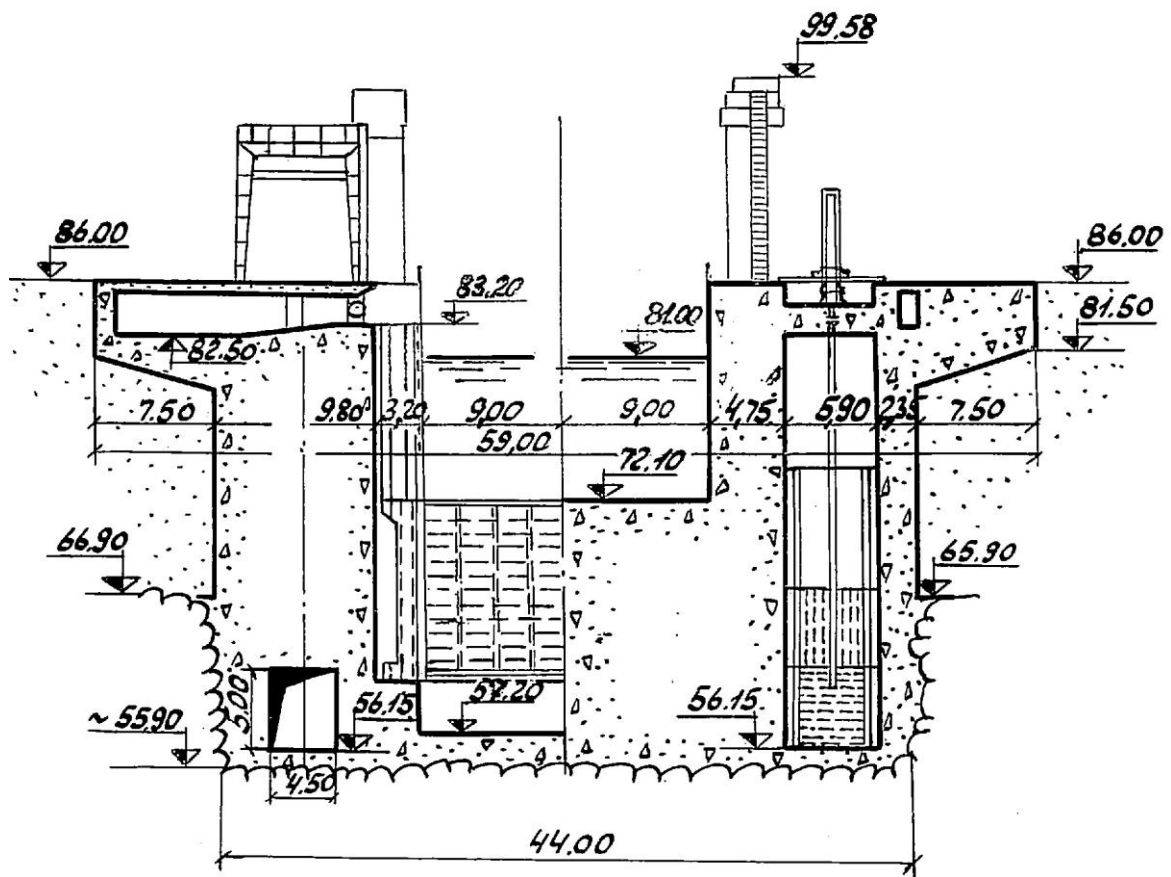


Рис. 5.10. Верхня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла (розміри у м.)

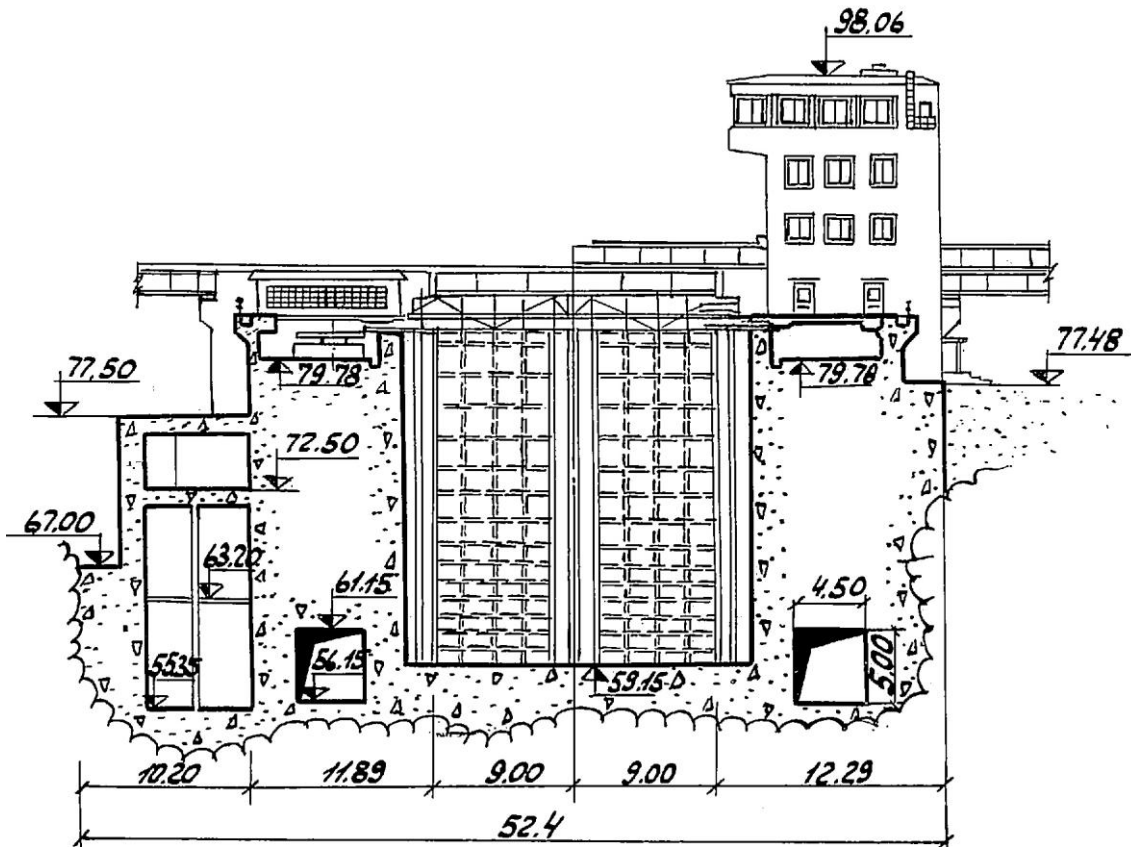


Рис. 5.11. Нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла (розміри у м.)

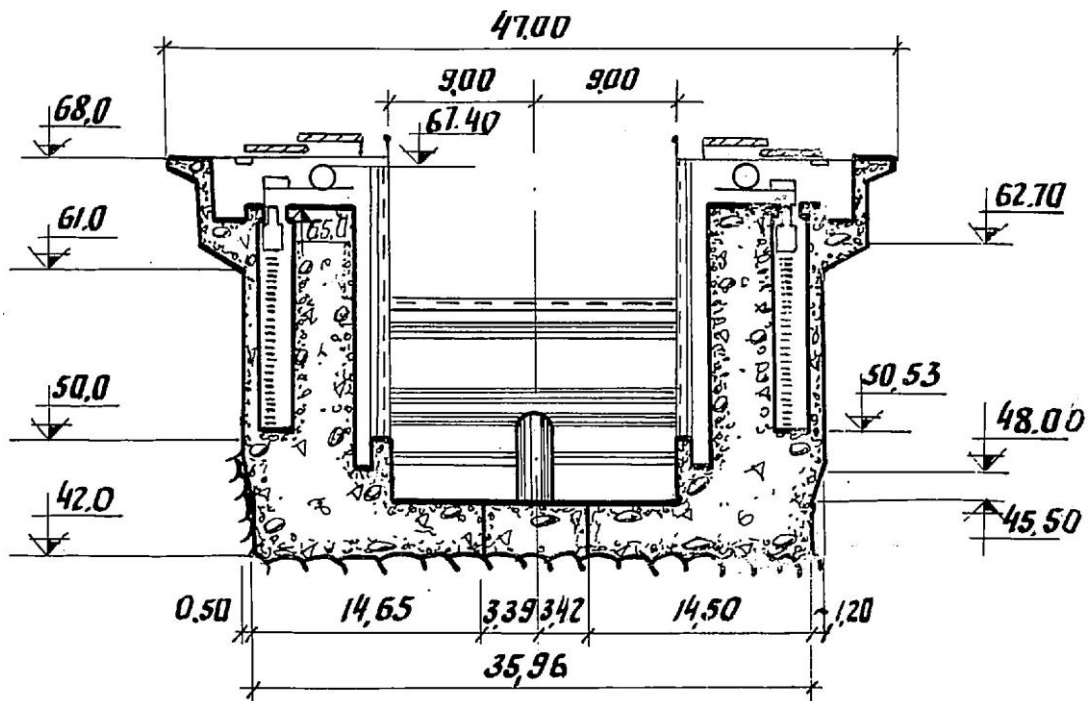


Рис. 5.12. Верхня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла (розміри у м.)

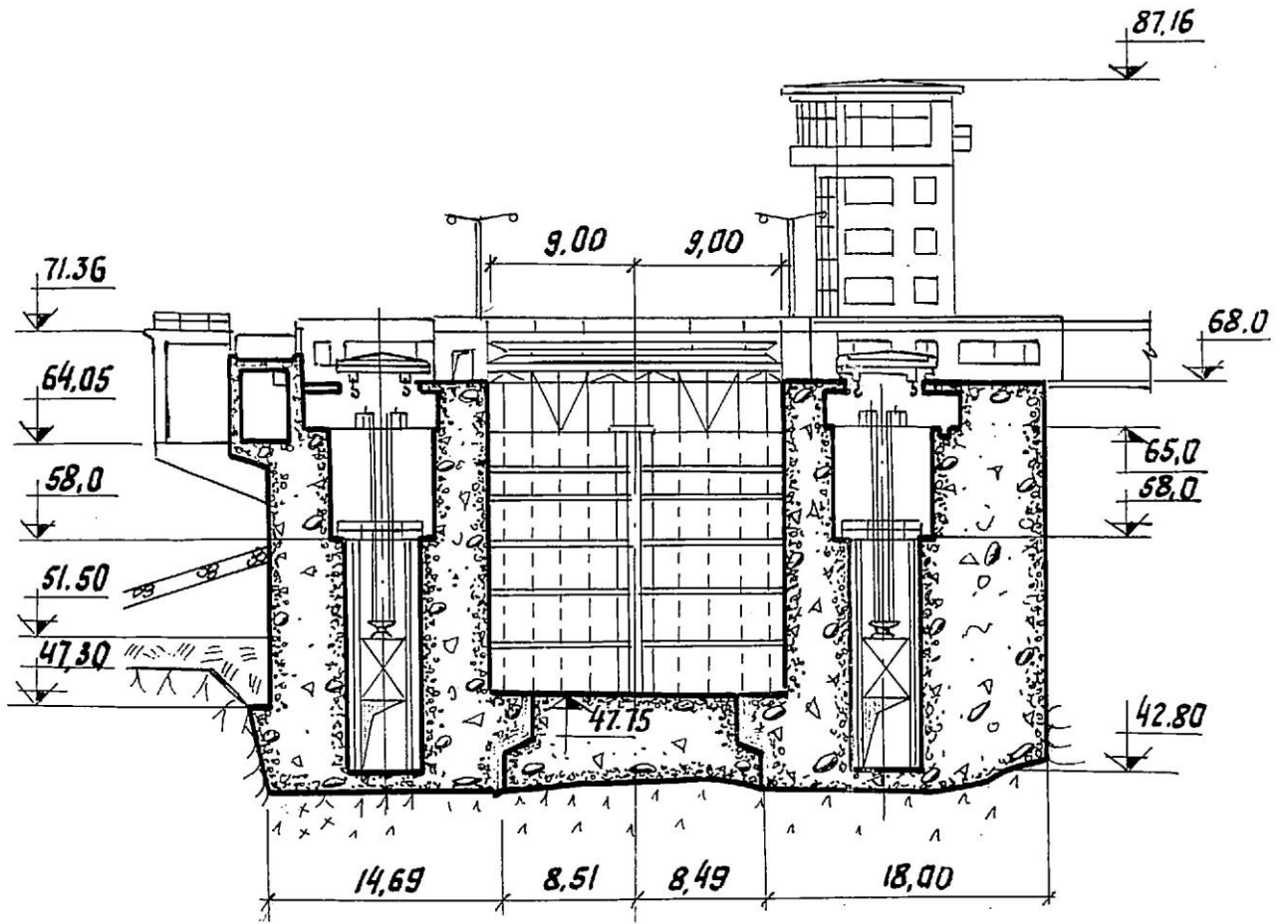


Рис. 5.13. Нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла (розміри у м.)

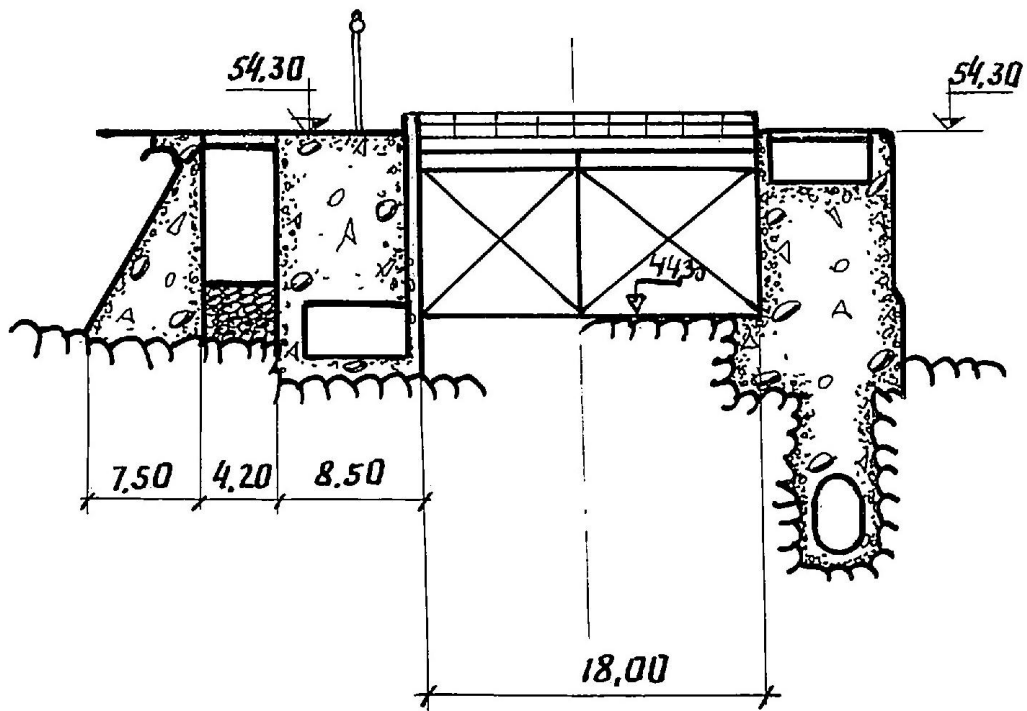


Рис. 5.14. Перша голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (розміри у м.)



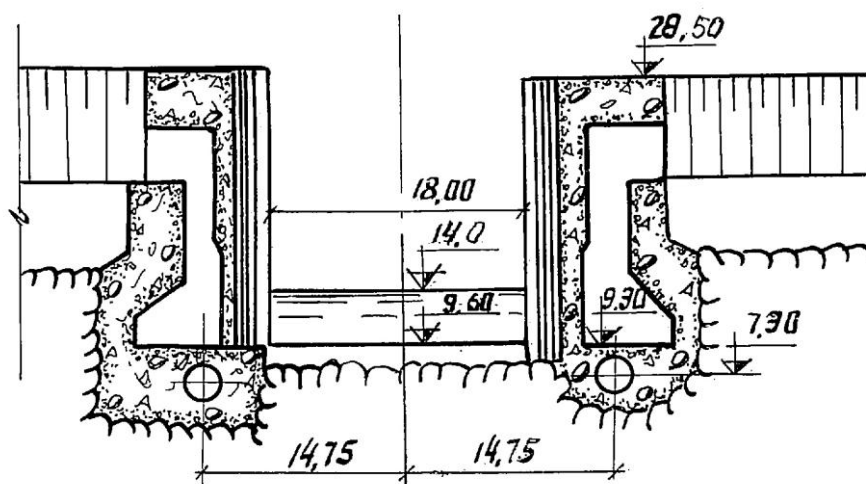


Рис. 5.15. Четверта голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла  
(розміри у м.)

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання голів шлюзу в рамках параметричної теорії надійності передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірносних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання голови шлюзу. Зазначені критерії настання граничних станів є статистично залежними, тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхньому б'єфі.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи голови шлюзу  $A_n$ , м<sup>2</sup>, інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma b} = 0.02$ ; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma gr} = 0.06$ ; міцність бетону на стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rb} = 0.135$ ; міцність арматури на розтягання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{Rs} = 0.08$ .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ_{wt}$  позначки рівня води  $Z_{wt}$ , м перед шлюзом. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [37, 197, 254].

По значенню  $pZ_{wt}$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z_{wt}$ , м перед шлюзом. Між максимальними паводковими витратами  $p$ . Дніпро у створах гідровузлів каскаду згідно з [197] існує функціональна залежність. Тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ_{wt}$  для шлюзів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою.

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

По значенням рівнів верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки  $W_{pw}$ , кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність питомої ваги ґрунту обернених засипок  $p\gamma_{gr}$ , по якій визначається квантиль – значення питомої ваги ґрунту  $\gamma_{gr}$ .

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

По значенням  $\gamma_{gr}$  і  $tg\phi_g$  визначається сила бічного тиск ґрунту обернених засипок  $E_{tw}$  на стінки голови шлюзу.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур за нормальним розподілом, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря за нормальним розподілом у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск ґрунту  $E_{r,tw}$  оберненої засипки [315, 521].

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

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [190]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування

гідровузла за аналітичними виразами згідно [447]. Під час виконання одного статистичного випробовування враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJr$ , розподілені від 0 до 1 у районі Карпат, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJr$  визначаються квантилі – бальність землетрусів  $Jr$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [70]. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $Jr$  у криву розподілу максимального сейсмічного впливу  $J$  за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) від максимальної бальності землетрусів  $J$ , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на голову шлюзу задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродінамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [248] визначено лінійно-спектральним методом. Кожному балу відповідає значення максимального сейсмічного прискорення  $\ddot{U}_0$ , модуль якого визначається за формулою (4.73).

Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ) голови шлюзу. Горизонтальне інерційне сейсмічне навантаження  $S$  в точці  $k$  визначене за формулами (4.74–4.76). Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  за формулою (4.77). Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродінамічної сили тиску води від розрахункової амплітуди прискорення основи (у долях  $g$ ). Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок  $E_{s,tw}$ .

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

У випадку нескельової основи задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $ptg\varphi$  коефіцієнта внутрішнього тертя. По значенню  $ptg\varphi$  за нормальним законом розподілу із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi}$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, tg\varphi}$  визначається квантиль – коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунту основи.

Характеристики скельової основи задані випадковими величинами у відповідності до норм проектування основ гідротехнічних споруд [250, 311]. Коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини, які підкоряються нормальному закону із п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0.122$ .

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя  $tg\varphi$ . Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi c}$ ,  $\sigma_{tg\varphi c}$  за формулами (4.80–4.81). За відомою імовірністю величини питомого зчеплення  $pc$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення  $c$ , кПа.

Перевіряється виконання умови вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій голів шлюзу  $A_{sq} / A_{sp} \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості проти зсуву голів шлюзів на скельовій основі  $((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$  і нескельовій основі  $(V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$ .

Перевіряється умова стійкості голів шлюзів проти спливання  $F_r / F_t \geq 1$ .

Перевіряється виконання умови стійкості голів шлюзів на скельовій основі проти перекидання  $M_r / M_t \geq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3| / R_{c,m} \leq 1$ .

Перевіряється умова міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}| / R_{cs,m} \leq 1$ .

Відмова нижніх воріт шлюзу прийнята як імовірність нерозкритої події  $p_{не} = 2,0 \times 10^{-6}$  1/рік згідно із дослідженнями надійності гідромеханічного обладнання гідротехнічних споруд [42].

Розрахунки виконуються методом статистичних випробовувань. Підсумовується кількість випробовувань, при яких досягається кожен граничний стан. Зазначена кількість випробовувань, при яких були досягнуті граничні стани, віднесена до загальної кількості випробовувань визначає щорічну величину ризику втрати міцності, стійкості проти зсуву, спливання голови шлюзу за весь строк експлуатації.

За формулою (4.65) визначається значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану голови шлюзу і виконується порівняння із допустимою величиною. Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу, які обчислюються за формулами (4.11–4.12). Результати розрахунків наведені в таблицях 5.7–5.8.

Таблиця 5.7

Результати розрахунків ризику настання граничних станів голів шлюзів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного
	механічна міцність	стану, рік <sup>-1</sup> стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	руйнування нижніх воріт	
1	2	3	4	5	6
Верхня голова шлюзу Київського гідровузла					
СС2-1	$2,44 \times 10^{-5}$	$8,47 \times 10^{-5}$	$5,48 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Нижня голова шлюзу Київського гідровузла					
СС2-1	$3,41 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$2,32 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня голова шлюзу Канівського гідровузла					
СС3	$5,21 \times 10^{-5}$	$1,13 \times 10^{-4}$	$7,53 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Нижня голова шлюзу Канівського гідровузла					
СС2-1	$1,98 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-4}$	$6,62 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$

Продовження таблиці 5.7

1	2	3	4	5	6
Верхня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла					
СС2-1	$3,47 \times 10^{-5}$	$2,01 \times 10^{-7}$	$7,18 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла					
СС2-1	$5,02 \times 10^{-5}$	$6,03 \times 10^{-8}$	$5,15 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня голова шлюзу Каховського гідровузла					
СС3	$4,78 \times 10^{-5}$	$7,73 \times 10^{-6}$	$6,44 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Нижня голова шлюзу Каховського гідровузла					
СС3	$3,13 \times 10^{-5}$	$2,38 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця 5.8

Результати розрахунків ризику настання граничних станів голів шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
	механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	руйнування нижніх воріт	
Верхня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла							
СС3	$4,29 \times 10^{-5}$	$1,91 \times 10^{-7}$	$4,25 \times 10^{-8}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$5,23 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла							
СС3	$1,07 \times 10^{-6}$	$7,08 \times 10^{-8}$	$6,15 \times 10^{-7}$	$5,81 \times 10^{-9}$	$4,07 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла							
СС3	$8,23 \times 10^{-6}$	$5,44 \times 10^{-9}$	$4,82 \times 10^{-9}$	$1,85 \times 10^{-6}$	$2,12 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Нижня голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла							
СС3	$4,72 \times 10^{-5}$	$6,35 \times 10^{-9}$	$6,87 \times 10^{-9}$	$9,72 \times 10^{-7}$	$7,35 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла							
СС3	$6,94 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-8}$	$4,21 \times 10^{-7}$	$6,64 \times 10^{-9}$	$1,03 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла							
СС3	$3,95 \times 10^{-5}$	$5,53 \times 10^{-6}$	$3,07 \times 10^{-8}$	$5,77 \times 10^{-9}$	$4,48 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Результати імовірнісних розрахунків в рамках параметричної теорії надійності свідчать, що ризик досягнення граничних станів голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати стійкості проти зсуву, спливання, механічної міцності, руйнування нижніх воріт не перевищують допустимих значень, тому надійність голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах забезпечена.

## **5.6 Висновки за розділом 5**

1. На основі методу граничних станів здійснено детерміністичну оцінку надійності спеціальних водопідпирних гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій.
2. В рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків гідроелектростанцій на нескельовій основі (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання фільтраційної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання.
3. В рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків гідроелектростанцій на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання.
4. В рамках параметричної теорії надійності здійснено імовірнісну оцінку надійності камер і голів шлюзів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; руйнування нижніх воріт.
5. В рамках параметричної теорії надійності виконано імовірнісну оцінку надійності камер і голів шлюзів на скельовій основі (Кременчуцького, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання; втрати стійкості проти перекидання; руйнування нижніх воріт.

## РОЗДІЛ 6

# УЗАГАЛЬНЕНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

### **6.1 Постановка задачі і короткі відомості про особливості компоновочних і конструктивних рішень гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Важко переоцінити роль гідровузлів Дніпровського каскаду у забезпеченні надійної роботи об'єднаної енергетичної системи України. Підсумкова потужність гідроелектростанцій каскаду складає 3,67 млн. кВт, при цьому виробіток електроенергії становить до 90% виробітку усіх ГЕС України [162]. Слід зазначити, що водосховища Дніпровського каскаду забезпечують комунально-побутові, промислові і сільськогосподарські потреби більш 50% території України. Тому питання надійної і безпечної експлуатації гідровузлів Дніпровського каскаду, а також розробка і удосконалення методів оцінки їх надійності являються актуальними. Більш детально питання впливу каскадів гідровузлів на розвиток економіки держави розглянуто у матеріалах [221, 254, 279, 389].

На підставі усебічного аналізу компоновочних і конструктивних рішень, технічних характеристик гідровузлів Дніпровського каскаду необхідно розробити дерева відмов і пошкоджень основних гідротехнічних споруд гідровузлів, які призводять до виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі, або гіпотетичного сценарію розвитку подій на гідровузлі, які призводять до виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі з метою подальшої оцінки ризику виникнення аварій на гідровузлах Дніпровського каскаду.

Дніпро являється крупнішою річкою України і третьою за величиною у Європі. Площа водозбору Дніпра становить 482 тис. км<sup>2</sup>. Дніпровський каскад гідровузлів складається із шести ступенів: Київський, Канівський, Кременчуцький, Середньодніпровський, Дніпровський (ДніпроГЕС 1 і ДніпроГЕС 2), Каховський



гідровузли. Схема Дніпровського каскаду гідровузлів наведена на рис. 6.1. Інформація про водосховища Дніпровського каскаду наведена у [254].



Рис. 6.1. Схема Дніпровського каскаду гідроелектростанцій

Київський гідровузол. Створ гідровузла розташовано у 7 км заввишки гирла р. Десни біля м. Вишгород. Постійна експлуатація ГЕС здійснюється з 1964 року. Склад споруд гідровузла: будівля ГЕС – руслова, суміщеного типу із поверхневими водоскидами і спрягаючими стоянами, земляна наливна гребля і лівобережна дамба, судноплавний однокамерний шлюз. Характеристика гідротехнічних споруд і обладнання. Клас наслідків споруд СС2-1. ГЕС: кількість агрегатів – 20 шт, тип турбін – ПЛ 15/984-ГК-600, встановлена потужність – 361 МВт. Водозливна гребля: кількість отворів водоскиду – 20 шт, ширина отворів – 12.0 м, позначка порога водоскиду +95.50 м. Глуха гребля: тип – земляна наливна, довжина по гребню – 42 км, ширина по гребню – 7.0–18.0 м, позначка гребеня +106.50–107.50 м. Захисні огорожувальні дамби: тип – земляна наливна, довжина по гребню – 13.2 км, ширина по гребню – 7.0 м, позначка гребеня +107.50 м. Судноплавний шлюз: кількість ниток – 1 шт, кількість камер – 1 шт, позначка порога на королі верхньої голови +97.70 м, нижньої голови +87.50 м. Геологічні умови: корінні породи в основі усіх споруд гідровузла представлені дрібнозернистими бучакськими пісками, які підстилаються мергелями. Безпосередньо під будівлею ГЕС залягають алювіальні середньозернисті піски потужністю 10 – 20 м.

Канівський гідровузол. Створ гідровузла розташовано біля північної окраїни м. Каніва на відстані 810 км від гирла р. Дніпро. Постійна експлуатація ГЕС здійснюється з 1979 року. Склад споруд гідровузла: будівля ГЕС – руслова, суміщеного типу із поверхневими водоскидами, земляна наливна гребля, судноплавний однокамерний шлюз. Характеристика гідротехнічних споруд і обладнання. Клас наслідків споруд СС2-1. ГЕС: кількість агрегатів – 24 шт, тип турбін – ПЛ 15/984-ГК-600, ПЛ 15/3251-ГК-600, встановлена потужність – 451 МВт. Водозливна гребля: кількість отворів водоскиду – 24 шт, ширина отворів – 12.0 м, позначка порога водоскиду +82.30 м. Глуха гребля: тип – земляна наливна, довжина по гребню – 16.14 км, ширина по гребню – 11.0 м, позначка гребеня +97.00 м. Судноплавний шлюз: кількість ниток – 1 шт, кількість камер – 1 шт, позначка порога на королі верхньої голови +86.50 м., нижньої голови +74.75 м. Геологічні

умови: в основі усіх споруд гідровузла залягають піщані ґрунти різної крупності. У товщі пісків зустрічаються прошарки старичних супісків і суглінків.

Кременчуцький гідровузол. Створ гідровузла розташовано в 14 км вверх за течією від м. Кременчук на відстані 619 км від гирла р. Дніпро. Постійна експлуатація ГЕС здійснюється з 1963 року. Склад споруд гідровузла: руслова будівля ГЕС, водозливна гребля, земляні греблі, судноплавний однокамерний шлюз. Характеристика гідротехнічних споруд і обладнання. Клас наслідків споруд СС3. ГЕС: кількість агрегатів – 12 шт, тип турбін – ПЛ 661, ВБ-800, встановлена потужність – 625 МВт. Водозливна гребля: кількість отворів водоскиду – 10 шт, ширина отворів – 16.0 м, позначка гребня водозливу +67.00 м. Глуха гребля: тип – земляна наливна, насипна, довжина по гребеню – 10.7 км, ширина по гребеню – 96.0 – 98.0 м, позначка гребня +85.00 м. Безнапірна дамба: тип – земляна наливна, насипна, довжина по гребеню – 1.235 км, ширина по гребеню – 3.0 м, позначка гребня +85.00 м. Судноплавний шлюз: кількість ниток – 1 шт, кількість камер – 1 шт, позначка порога на королі верхньої голови +75.00 м, нижньої голови +59.30 м. Геологічні умови: в основі бетонних споруд гідровузла залягають граніти, земляні греблі розташовані на алювіальних піщаних відкладеннях з прошарками супісків і суглинків, які підстилаються гранітами.

Середньодніпровський гідровузол. Створ гідровузла розташовано на північно-західній окраїні м. Кам'янське Січеславської обл. на відстані 454 км. від гирла р. Дніпро. Постійна експлуатація ГЕС здійснюється з 1966 року. Склад споруд гідровузла: руслова будівля ГЕС, водозливна гребля, земляні греблі, захисна дамба, судноплавний однокамерний шлюз. Характеристика гідротехнічних споруд і обладнання. Клас наслідків споруд СС2-1. ГЕС: кількість агрегатів – 8 шт, тип турбін – ПЛ 661-В-930, ПЛ 20-В-930, встановлена потужність – 360.8 МВт. Водозливна гребля: кількість отворів водоскиду – 10 шт, ширина отворів – 16.0 м, позначка порога +49.00 м. Глуха гребля: тип – земляна наливна, довжина по гребеню – 6.65 км, ширина по гребеню – 13.0 – 26.5 м., позначка гребня +68.00 – +69.00 м. Захисна дамба: тип – земляна наливна, довжина по гребеню – 28.5 км, ширина по гребеню – 10.0 м, позначка гребня +68.00 м. Судноплавний шлюз:

кількість ниток – 1 шт, кількість камер – 1 шт, позначка порога на королі верхньої голови +59.15 м, нижньої голови +47.45 м. Геологічні умови: в основі бетонних споруд гідровузла залягають граніти і граніто-гнейси, земляні греблі розташовані на дрібнозернистих пісках.

Дніпровський гідровузол. Створ гідровузла розташовано у м. Запоріжжя на відстані 341 км від гирла р. Дніпро. Експлуатація ГЕС-I здійснюється з 1934 року. У 1944–1950 рр. споруди гідровузла були відбудовані після руйнувань під час Великої Вітчизняної війни. ГЕС II і судноплавний однокамерний шлюз експлуатуються з 1981 року. Склад споруд гідровузла: пригребельні будівлі ГЕС I і ГЕС II, щитові стінки ГЕС I і ГЕС II, водозливна гребля, спрягаючі споруди, глухі греблі лівого і правого берегів, судноплавні однокамерний і трьохкамерний шлюзи, відкритий розподільчий пристрій. Характеристика гідротехнічних споруд і обладнання. Клас наслідків споруд ССЗ. ГЕС I: кількість агрегатів – 9 шт, тип турбін – РО 45/3267-В-545, РО 123-ВМ-545, ГЕС II: кількість агрегатів – 8 шт, тип турбін – ПР 40-В-680, ПЛ 40-В-680, встановлена потужність ГЕС I і ГЕС II – 1503.6 МВт. Водозливна гребля: кількість отворів водозливу – 29 шт, ширина отворів – 13.0 м, позначка порога +41.650 м. Однокамерний судноплавний шлюз: кількість ниток – 1 шт, кількість камер – 1 шт, позначка порога на королі верхньої голови +45.10 м, нижньої голови +9.10 м. Геологічні умови: в основі споруд гідровузла залягають граніти середньо-крупнозернисті.

Каховський гідровузол. Створ гідровузла розташовано за 10 км нижче м. Нова Каховка Херсонської обл. Постійна експлуатація ГЕС здійснюється з 1959 року. Склад споруд гідровузла: будівля ГЕС суміщеного типу з донними водоскидами, водозливна гребля, земляна гребля, судноплавний однокамерний шлюз, водозабірні споруди Північно-Кримського зрошувального каналу. Характеристика гідротехнічних споруд і обладнання. Клас наслідків споруд ССЗ. ГЕС (до реконструкції): кількість агрегатів – 6 шт, тип турбін – ПЛ 548-ВБ-800, встановлена потужність – 300 МВт. Водозливна гребля: кількість отворів водозливу – 28 шт, ширина отворів – 12.0 м, позначка гребеня водозливу 7.00 м. Глуха гребля: тип – земляна наливна, довжина по гребеню – 2.995 км, ширина по гребню – від 20

м до 75 м, позначка гребеня 20.00 м; 20.60 м. Судноплавний шлюз: кількість ниток – 1 шт, кількість камер – 1 шт, позначка порога на королі верхньої голови +10.35 м, нижньої голови –4.65 м. Геологічні умови: в основі споруд гідровузла залягають дрібнозернисті піски.

Фрагменти планів гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій представлено на рис. С.1–С.6.

## **6.2 Основні положення побудови дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Діючі норми проектування гідротехнічних споруд та інші літературні джерела [37, 72–73, 279, 361], регламентують безпеку і надійність гідровузла або каскаду гідровузлів забезпеченою, у випадку, якщо забезпечена надійність і безпека кожної гідротехнічної споруди, що входить до складу гідровузлів каскаду. При цьому, оцінка надійності і безпеки кожної гідротехнічної споруди виконується із застосуванням імовірнісних методів на основі сучасної теорії надійності складних технічних об'єктів. У якості показника рівня надійності і безпеки каскаду гідроелектростанцій доцільно використовувати значення ризику (імовірності) виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідроелектростанцій. За надзвичайну ситуацію слід вважати виникнення аварії на будь якій споруді, що може привести до прориву напірного фронту гідровузла і до втрати надійності каскаду.

На сьогодні для оцінки ризику виникнення аварії на гідровузлі використовується метод дерев відмов [37]. Дерево відмов представляє графоаналітичну модель надійності каскаду гідровузлів, яка розроблена на основі аналізу складу гідротехнічних споруд гідровузлів і характеру імовірнісних зв'язків між ними. Під час побудови дерева відмов спочатку визначають вихідні відмови гідровузлів, які спричиняються відмовами гідротехнічних споруд, настання яких може привести до виникнення результуючої події (випадку) – виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідровузлів. Ієрархічно дерева відмов складаються із головної події (надзвичайна ситуація на каскаді гідровузлів, пов'язана із проривом

напірного фронту будь якого гідровузла), події першого рівня, які безпосередньо ініціюють головну подію (наприклад – руйнування будь-якої споруди гідровузла), події другого рівня, які приводять до спричинення подій першого рівня (наприклад – руйнування будь-якого конструктивного елемента гідротехнічної споруди), базові події. Базові події – найпростіші події, які ініціюють події попереднього рівня. Також дерево відмов містить логічні оператори – чинниково-наслідкові зв'язки між подіями різних рівнів.

Основні передумови на яких побудовано алгоритм визначення ризику виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідровузлів наступні:

- сукупність гідровузлів, що входять до складу каскаду гідроелектростанцій, розглядається як вихідна складна технічна система, яка складається із ряду підсистем, кожна із яких моделює один гідровузол, руйнування якого може привести до виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідроелектростанцій;

- сукупність споруд, що входять до складу напірного фронту гідровузла, розглядається як вихідна складна технічна система, яка складається із ряду підсистем, кожна із яких моделює одну гідротехнічну споруду або її секцію, чи конструктивний елемент, руйнування якого може привести до виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі;

- кожна підсистема складається з одного чи декількох елементів різних типів, причому кожен з елементів підсистеми відповідає за опір споруди виникненню будь-якого граничного стану;

- урахувавши логічну схему зв'язків між елементами, які моделюють напірний фронт, вихідна система може відповідати змішаній (послідовно-паралельній) схемі з'єднання елементів;

- слід урахувати, що деякі елементи, що входять в систему, є однотипними (наприклад елементи, які відповідають за стійкість проти зсуву секцій будівлі гідроелектростанції або бетонної водозливної греблі).

Блок-схеми підсистем вихідних систем, що моделюють напірні фронти гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій наведено на рис. 6.2–6.7.

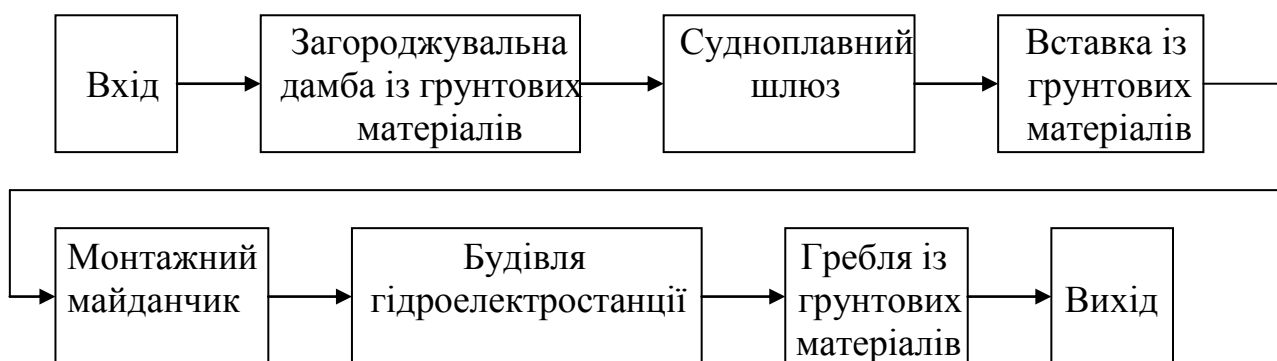


Рис. 6.2. Блок-схема підсистем вихідної системи, що моделює напірний фронт Київського гідровузла

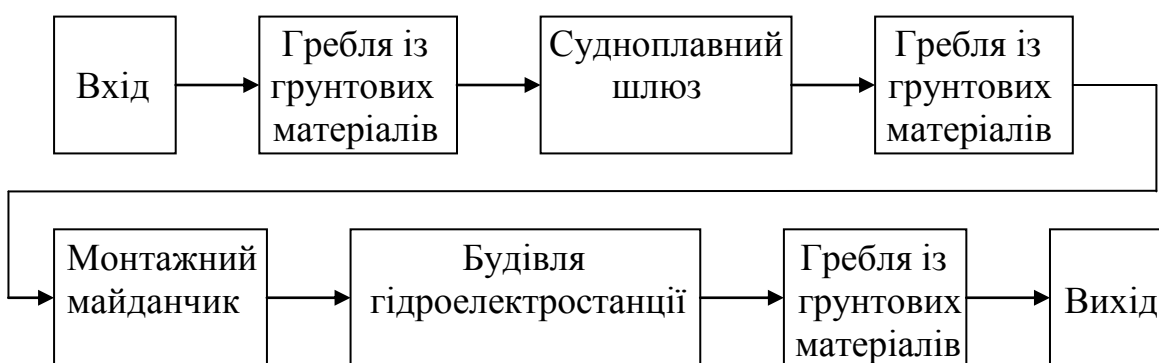


Рис. 6.3. Блок-схема підсистем вихідної системи, що моделює напірний фронт Канівського гідровузла

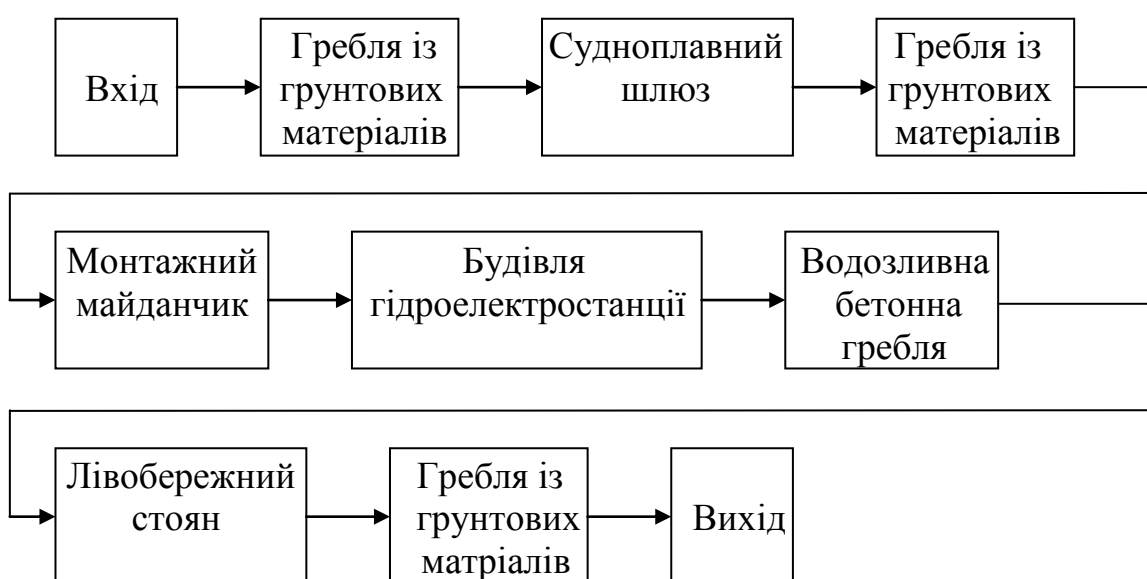


Рис. 6.4. Блок-схема підсистем вихідної системи, що моделює напірний фронт Кременчуцького гідровузла

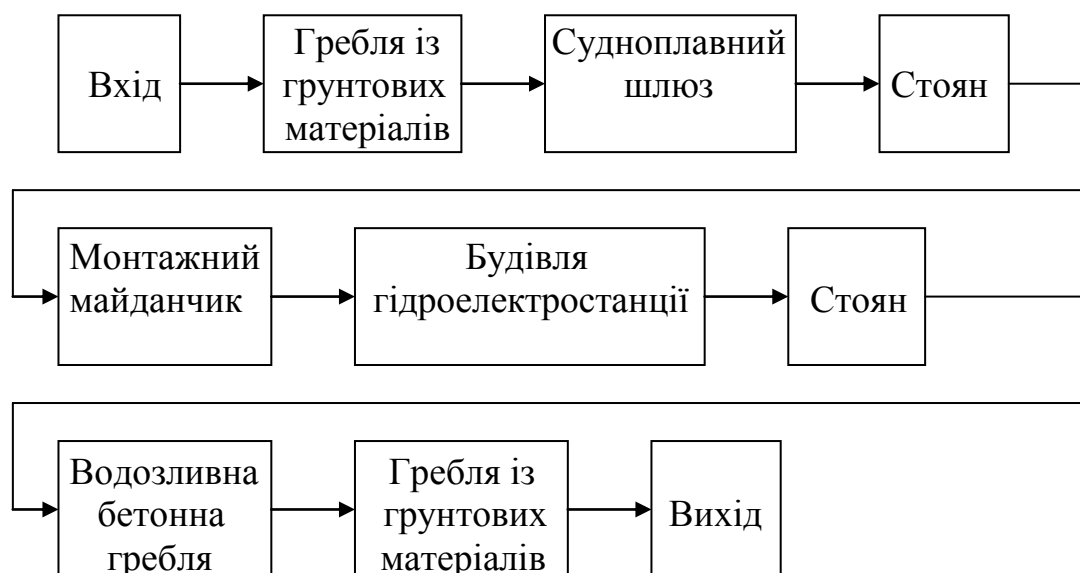


Рис. 6.5. Блок-схема підсистем вихідної системи, що моделює напірний фронт Середньодніпровського гідровузла

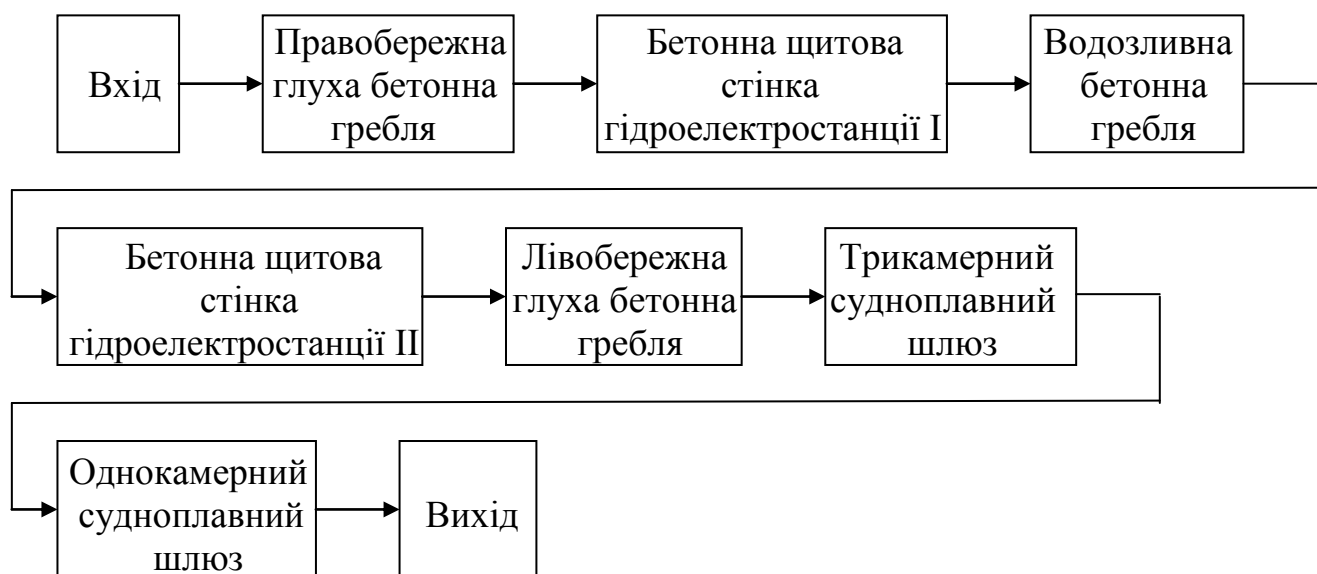


Рис. 6.6. Блок-схема підсистем вихідної системи, що моделює напірний фронт Дніпровського гідровузла

Дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайних ситуацій на гідровузлах Дніпровського каскаду гідроелектростанцій наведено на рис. Т.1–Т.85.

Практичні методики оцінки ризику (імовірності) виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах наведено в роботах [195, 198, 201–205, 222].



Методика оцінки ризику (імовірності) виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі наведено в роботі [37].

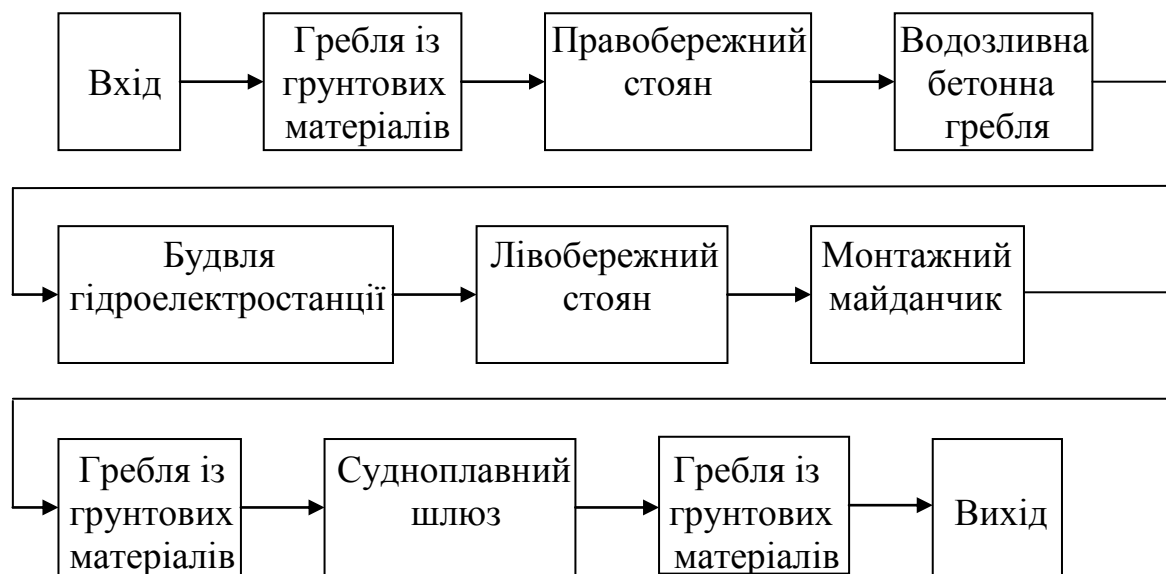


Рис. 6.7. Блок-схема підсистем вихідної системи, що моделює напірний фронт Каховського гідровузла

Під час розробки алгоритму оцінки надійності каскаду гідровузлів необхідно урахувати існування кореляційних зв'язків між природними факторами [197–199], а саме: кореляційні залежності між паводковими витратами водотоку; кореляційні залежності між товщиною льоду у водосховищах каскаду гідровузлів; кореляційні залежності між температурними впливами по гідровузлах каскаду.

### 6.3 Побудова умовних законів розподілів між максимальними витратами Дніпровського каскаду гідроелектростанцій

Забезпеченість максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду, наведених за даними [37], представляє систему випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями [197].

При оцінці надійності гідротехнічних споруд каскаду гідровузлів на основі імовірнісних методів постає необхідність застосування системи випадкових величин забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро. Для опису максимальних

паводкових витрат застосовано трьохпараметричні гамма-розподіли [37]. Але використання системи випадкових величин потребує представлення рядів статистичних даних законом нормального розподілу [44].

При невиконанні гіпотези про нормальність розподілу вихідного статистичного ряду за допомогою існуючих методів [171] вдається таким чином перетворити вихідні дані, що їх розподіл буде підкорятися нормальному закону. Для перетворення вихідного статистичного ряду застосовують підстановки типу  $x_{ym} = \lg x$ ,  $x_{ym} = 1/x$ ,  $x_{ym} = 1/x^{1/2}$  або інші, де  $x$  – відповідні члени вихідного статистичного ряду,  $x_{ym}$  – відповідні члени перетвореного статистичного ряду. В даній роботі застосовано підстановку:

$$Q_{ym,i} = a \times \text{mean}(Q) \left( \frac{Q_i}{\text{mean}(Q)} \right)^b, \quad i = 1 \dots n, \quad (6.1)$$

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

Для максимальних паводкових витрат р. Дніпро по пунктах спостережень отримано параметри виразу (6.1), які наведено в табл. 6.1 і на рис. У.1–У.4.

Умовний закон розподілу максимальних паводкових витрат згідно з [91] відповідає нормальному закону, якщо значення виразу (6.2) знаходиться в межах довірчого інтервалу:

$$\frac{\max(Q_{ym,i}) - \min(Q_{ym,i})}{\sigma(Q_{ym,i})}, \quad (6.2)$$

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

При кількості членів статистичного ряду  $n = 213$  і рівні значущості  $p = 10\%$  нижня межа інтервалу 4.93, верхня межа інтервалу 6.18. Чисельні значення виразу (6.2) для створів гідровузлів наведено в табл. 6.1, які підтверджують гіпотезу про нормальність перетворених розподілів.

Таблиця 6.1

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

Найменування	$mean(Q),$ $m^3/c$	$a$	$b$	$(max(Q_{ум, i}) - min(Q_{ум, i}))/$ $\sigma(Q_{ум, i})$
Створ Київського гідровузла (м. Вишгород)	$4,69202 \times 10^3$	1,027232	0,25	$4,93 < \mathbf{4,94} < 6,18$
Створ Канівського гідровузла (м. Київ)	$6,40782 \times 10^3$	1,0234015	0,19	$4,93 < \mathbf{5,10} < 6,18$
Створ Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук)	$6,57347 \times 10^3$	1,021603	0,17	$4,93 < \mathbf{5,06} < 6,18$
Створ Дніпровського гідровузла (п.г.т. Лоцманська Кам'янка)	$6,69404 \times 10^3$	1,018925	0,14	$4,93 < \mathbf{4,95} < 6,18$

Якщо  $Q_{1ум}$  і  $Q_{2ум}$  – щорічні максимальні паводкові витрати у створах двох гідровузлів, які задані за нормальним законом розподілу як випадкові корельовані величини, то такі корельовані величини підкоряються нормальному закону [492], який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{Q_{1ум}}$ ,  $m_{Q_{2ум}}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{Q_{1ум}}$ ,  $\sigma_{Q_{2ум}}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$ . Крім того визначається кореляційний момент  $K_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Задається випадкова імовірність максимальних паводкових витрат  $p(Q_{1ум})$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{Q_{1ум}}$ ,  $\sigma_{Q_{1ум}}$  визначається квантиль - значення максимальних витрат  $Q_{1ум}$  за формулами:

$$m_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = m_{Q_{2ум}} + r_{Q_{1ум}Q_{2ум}} \cdot \frac{\sigma_{Q_{2ум}}}{\sigma_{Q_{1ум}}} \cdot (Q_{1ум} - m_{Q_{1ум}}), \quad (6.3)$$

$$\sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = \sigma_{Q_{2ум}} \cdot \sqrt{1 - r_{Q_{1ум}Q_{2ум}}^2}. \quad (6.4)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$ ,  $\sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$ . За відомою імовірністю величини максимальних паводкових витрат  $p(Q_{2ум})$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль - значення величини максимальних паводкових витрат  $Q_{2ум}$ . Здійснюється перерахунок величини максимальних паводкових витрат  $Q_{1ум}$ ,  $Q_{2ум}$ , представлених умовним законом розподілу із підстановкою за формулою (6.1), у дійсні витрати  $Q_1$ ,  $Q_2$  у створах гідровузлів.

Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду існує кореляційний зв'язок [197]. Ураховуючи значення коефіцієнтів кореляції близьких до 1 можна стверджувати про функціональну залежність, тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності рівня води перед гідротехнічною спорудою  $pZ(Q)$  кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою. Це дозволяє побудувати залежність між рівнями верхнього  $Z_{wt}$ , м і нижнього б'єфів  $Z_{wb}$ , м.

#### **6.4 Побудова умовних законів розподілів між максимальною товщиною льоду у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Аналіз статистичних даних максимальної товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду, а також визначення параметрів функцій розподілу максимальної товщини льоду [192] за статистичними даними дозволили встановити, що імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах Київського, Канівського і Каховського гідровузлів можуть бути представлені трьохпараметричним гамма-розподілом, імовірності щорічної максимальної товщини льоду на водосховищах Кременчуцького,

Середньодніпровського і Дніпровського гідровузлів можуть бути представлені біекспоненціальним розподілом.

Дослідження кореляційних залежностей між максимальною товщиною льоду за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, здійснене в роботі [198], свідчить про тісну залежність, або практично функціональну залежність між щорічною максимальною товщиною льоду р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

Забезпеченість щорічної максимальної товщини льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду, наведених за даними [198], можна представити системою випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями [44]. Але використання системи випадкових величин потребує представлення рядів статистичних даних законом нормального розподілу. При невиконанні гіпотези про нормальність розподілу вихідного статистичного ряду за допомогою існуючих методів [171] вдається таким чином перетворити вихідні дані, що їх розподіл буде підкорятися нормальному закону. Для перетворення вихідного статистичного ряду застосовують підстановки типу  $x_{ум} = \lg x$ ,  $x_{ум} = 1/x$ ,  $x_{ум} = 1/x^{1/2}$  або інші, де  $x$  – відповідні члени вихідного статистичного ряду,  $x_{ум}$  – відповідні члени перетвореного статистичного ряду. В даній роботі застосовано підстановку:

$$h_{\max,ум,i} = a \times \text{mean}(h_{\max}) \left( \frac{h_{\max,i}}{\text{mean}(h_{\max})} \right)^b, \quad i = 1 \dots n, \quad (6.5)$$

де  $\text{mean}(h_{\max})$  – середнє значення щорічної максимальної товщини льоду вихідного статистичного ряду;  $a$ ,  $b$  – емпіричні коефіцієнти.

Для щорічної максимальної товщини льоду по пунктах спостережень отримано параметри виразу (6.5), які наведено в табл. 6.2 і на рис. Ф.1–Ф.6.

Умовний закон розподілу максимальної товщини льоду згідно з [91] відповідає нормальному закону, якщо значення виразу (6.6) знаходиться в межах довірчого інтервалу:

$$\frac{\max(h_{\max,ум,i}) - \min(h_{\max,ум,i})}{\sigma(h_{\max,ум,i})}, \quad (6.6)$$

де  $\max(h_{\max, ym, i})$  – максимальне значення товщини льоду перетвореного нормального розподілу;  $\min(h_{\max, ym, i})$  – мінімальне значення товщини льоду перетвореного нормального розподілу;  $\sigma(h_{\max, ym, i})$  – середньоквадратичне відхилення значення товщини льоду перетвореного нормального розподілу.

При кількості членів статистичного ряду  $n = 11$  і рівні значущості  $p = 10\%$  нижня межа інтервалу 2.84, верхня межа інтервалу 3.86.

Таблиця 6.2

Параметри перетворення законів розподілу максимальної товщини льоду в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$mean(h_{\max}),$ см	$a$	$b$	$(\max(h_{\max, ym, i}) - \min(h_{\max, ym, i})) /$ $\sigma(h_{\max, ym, i})$
Створ Київського гідровузла (м. Вишгород)	54,273	1,03	0,4	2,84 < <b>2,88</b> < 3,86
Створ Канівського гідровузла (м. Канів)	44,910	1,01	0,53	2,84 < <b>2,92</b> < 3,86
Створ Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук)	41,273	1,04	0,52	2,84 < <b>2,96</b> < 3,86
Створ Середньодніпровського гідровузла (м. Кам'янське)	37,455	1,06	0,51	2,84 < <b>3,50</b> < 3,86
Створ Дніпровського гідровузла (м. Запоріжжя)	34,091	1,02	0,54	2,84 < <b>3,67</b> < 3,86
Створ Каховського гідровузла (м. Каховка)	28,455	1,09	0,64	2,84 < <b>3,79</b> < 3,86

Якщо  $h_{max,1ум}$  і  $h_{max,2ум}$  – максимальна товщина льоду у водосховищах двох гідровузлів, які задані за нормальним законом розподілу як випадкові корельовані величини, то такі корельовані величини підкоряються нормальному закону [492], який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{h_{max,1ум}}$ ,  $m_{h_{max,2ум}}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{h_{max,1ум}}$ ,  $\sigma_{h_{max,2ум}}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}}$ . Крім того визначається кореляційний момент  $K_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Задається випадкова імовірність максимальної товщини льоду  $p(h_{max,1ум})$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{h_{max,1ум}}$ ,  $\sigma_{h_{max,1ум}}$  визначається квантиль – значення максимальної товщини льоду  $h_{max,1ум}$  за формулами:

$$m_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}} = m_{h_{max,2ум}} + r_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}} \cdot \frac{\sigma_{h_{max,2ум}}}{\sigma_{h_{max,1ум}}} \cdot (h_{max,1ум} - m_{h_{max,1ум}}), \quad (6.7)$$

$$\sigma_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}} = \sigma_{h_{max,2ум}} \cdot \sqrt{1 - r_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}}^2}. \quad (6.8)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}}$ ,  $\sigma_{h_{max,1ум},h_{max,2ум}}$ . За відомою імовірністю величини максимальної товщини льоду  $p(h_{max,2ум})$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини максимальної товщини льоду  $h_{max,2ум}$ . Здійснюється перерахунок величини максимальної товщини льоду  $h_{max,1ум}$ ,  $h_{max,2ум}$ , представлених умовним законом розподілу із підстановкою за формулою (6.5), у дійсну максимальну товщину льоду  $h_{max1}$ ,  $h_{max2}$  у водосховищах гідровузлів.

### **6.5 Побудова умовних законів розподілів між максимально низькими середньомісячними температурами і між максимальними амплітудами середньомісячних температур Дніпровського каскаду гідроелектростанцій**

Аналіз статистичних даних максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду, а також визначення параметрів функцій розподілу максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд

середньомісячних температур [193] за статистичними даними дозволили встановити, що імовірності щорічних максимально низьких середньомісячних температур у м. Київ, м. Кам'янське, м. Запоріжжя, м. Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом; імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Канів може бути представлена біекспоненціальним розподілом; імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Кременчук може бути представлена біекспоненціальним або нормальним розподілами; імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Київ, м. Кам'янське, м. Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом; імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Канів, м. Кременчук, м. Запоріжжя можуть бути представлені логарифмічно-нормальним розподілом.

Дослідження кореляційних залежностей між максимальними низькими середньомісячними температурами і між максимальними амплітудами середньомісячних температур за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій, здійснене в роботі [199], свідчить про тісну залежність, а іноді, практично функціональну залежність між щорічними максимально низькими середньомісячними температурами і щорічними максимальними амплітудами середньомісячних температур у створах гідровузлів Дніпровського каскаду.

Забезпеченість щорічних максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду, наведених за даними [199], можна представити системою випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями [44]. Однак, використання системи випадкових величин потребує представлення рядів статистичних даних законом нормального розподілу. При невиконанні гіпотези про нормальність розподілу вихідного статистичного ряду за допомогою існуючих методів [171] вдається таким чином перетворити вихідні дані, що їх розподіл буде підкорятися нормальному закону. Для перетворення вихідного статистичного ряду застосовують підстановки типу  $x_{ум} = \lg x$ ,  $x_{ум} = 1/x$ ,  $x_{ум} = 1/x^{1/2}$  або інші, де  $x$  – відповідні



члени вихідного статистичного ряду,  $x_{ym}$  – відповідні члени перетвореного статистичного ряду. В даній роботі застосовано підстановки:

$$t_{\min,ym,i} = a \times \text{mean}(t_{\min}) \left( \frac{t_{\min,i}}{\text{mean}(t_{\min})} \right)^b, \quad i = 1 \dots n, \quad (6.9)$$

$$\Delta t_{ym,i} = a \times \text{mean}(\Delta t) \left( \frac{\Delta t_i}{\text{mean}(\Delta t)} \right)^b, \quad i = 1 \dots n, \quad (6.10)$$

де  $\text{mean}(t_{\min})$  – середнє значення щорічної максимально низької середньомісячної температури вихідного статистичного ряду;  $\text{mean}(\Delta t)$  – середнє значення щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур вихідного статистичного ряду;  $a, b$  – емпіричні коефіцієнти.

Для щорічних максимально низьких середньомісячних температур і щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду отримано параметри виразів (6.9–6.10), які наведено в табл. 6.3–6.4 і на рис. X.1–X.5.

Умовні закони розподілів максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур згідно з [91] відповідає нормальному закону, якщо значення виразів (6.11–6.12) знаходяться в межах довірчого інтервалу:

$$\frac{\max(t_{\min,ym,i}) - \min(t_{\min,ym,i})}{\sigma(t_{\min,ym,i})}, \quad (6.11)$$

$$\frac{\max(\Delta t_{ym,i}) - \min(\Delta t_{ym,i})}{\sigma(\Delta t_{ym,i})}, \quad (6.12)$$

де  $\max(t_{\min,ym,i})$ ,  $\max(\Delta t_{ym,i})$  – максимальні значення максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур перетвореного нормального розподілу;  $\min(t_{\min,ym,i})$ ,  $\min(\Delta t_{ym,i})$  – мінімальні значення максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур перетвореного нормального розподілу;  $\sigma(t_{\min,ym,i})$ ,  $\sigma(\Delta t_{ym,i})$  – середньоквадратичні відхилення значень

максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур перетвореного нормального розподілу,

При кількості членів статистичного ряду  $n = 24$  і рівні значущості  $p = 10\%$  нижня межа інтервалу 3.41, верхня межа інтервалу 4.52.

Таблиця 6.3

Параметри перетворення законів розподілу щорічної максимально низької середньомісячної температури  $t_{min}$ , °C у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$mean(t_{min})$ , °C	$a$	$b$	$(max(t_{min, ум, i}) - min(t_{min, ум, i})) /$ $\sigma(t_{min, ум, i})$
Створ Канівського гідровузла (м. Канів)	15,267 (-20)	1,2	0,3	3,41 < <b>3,92</b> < 4,52
Створ Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук)	15,45 (-20)	1,25	0,25	3,41 < <b>4,22</b> < 4,52

Таблиця 6.4

Параметри перетворення законів розподілу щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур  $\Delta t$ , °C у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$mean(\Delta t)$ , °C	$a$	$b$	$(max(\Delta t_{ум, i}) - min(\Delta t_{ум, i})) /$ $\sigma(\Delta t_{ум, i})$
Створ Канівського гідровузла (м. Канів)	24,733	1,05	0,15	3,41 < <b>4,20</b> < 4,52
Створ Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук)	25,458	1,01	0,25	3,41 < <b>4,40</b> < 4,52
Створ Дніпровського гідровузла (м. Запоріжжя)	25,975	1,04	0,24	3,41 < <b>4,21</b> < 4,52

Якщо  $t_{min,1ум}$  і  $t_{min,2ум}$  – значення щорічних максимально низьких середньомісячних температур у створах двох гідровузлів, які задані за нормальним законом розподілу як випадкові корельовані величини, то такі корельовані величини підкоряються нормальному закону [44], який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tmin,1ум}$ ,  $m_{tmin,2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tmin,1ум}$ ,  $\sigma_{tmin,2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tmin,1ум,tmin,2ум}$ . Крім того визначається кореляційний момент  $K_{tmin,1ум,tmin,2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Задається випадкова імовірність максимально низьких середньомісячних температур  $p(t_{min,1ум})$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{tmin,1ум}$ ,  $\sigma_{tmin,1ум}$  визначається квантиль – значення максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,1ум}$  за формулами:

$$m_{t_{min,1ум},t_{min,2ум}} = m_{t_{min,2ум}} + r_{t_{min,1ум},t_{min,2ум}} \cdot \frac{\sigma_{t_{min,2ум}}}{\sigma_{t_{min,1ум}}} \cdot (t_{min,1ум} - m_{t_{min,1ум}}), \quad (6.13)$$

$$\sigma_{t_{min,1ум},t_{min,2ум}} = \sigma_{t_{min,2ум}} \cdot \sqrt{1 - r_{t_{min,1ум},t_{min,2ум}}^2}. \quad (6.14)$$

Для щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{1ум}$  і  $\Delta t_{2ум}$  у створах двох гідровузлів, які задані за нормальним законом розподілу як випадкові корельовані величини, із відповідними параметрами: математичні очікування  $m_{\Delta t,1ум}$ ,  $m_{\Delta t,2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{\Delta t,1ум}$ ,  $\sigma_{\Delta t,2ум}$ , коефіцієнтом кореляції  $r_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}$ , кореляційним моментом  $K_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}$ , коефіцієнтом варіації  $C_v$ , задається випадкова імовірність щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $p(\Delta t_{1ум})$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами  $m_{\Delta t,1ум}$ ,  $\sigma_{\Delta t,1ум}$  визначається квантиль - значення щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{1ум}$  за формулами:

$$m_{\Delta t_{1ум},\Delta t_{2ум}} = m_{\Delta t_{2ум}} + r_{\Delta t_{1ум},\Delta t_{2ум}} \cdot \frac{\sigma_{\Delta t_{2ум}}}{\sigma_{\Delta t_{1ум}}} \cdot (\Delta t_{1ум} - m_{\Delta t_{1ум}}), \quad (6.15)$$

$$\sigma_{\Delta t_{1ум},\Delta t_{2ум}} = \sigma_{\Delta t_{2ум}} \cdot \sqrt{1 - r_{\Delta t_{1ум},\Delta t_{2ум}}^2}. \quad (6.16)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{t_{min,1ум},t_{min,2ум}}$   $\sigma_{t_{min,1ум},t_{min,2ум}}$ . За відомою імовірністю величини максимально низьких середньомісячних температур  $p(t_{min,2ум})$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,2ум}$ . Здійснюється перерахунок величини максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,1ум}$ ,  $t_{min,2ум}$ , представлених умовним законом розподілу із підстановкою за формулою (6.9), у дійсні максимально низькі середньомісячні температури  $t_{min,1}$ ,  $t_{min,2}$  у створах гідровузлів.

Визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{\Delta t_{1ум},\Delta t_{2ум}}$   $\sigma_{\Delta t_{1ум},\Delta t_{2ум}}$ . За відомою імовірністю величини щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $p(\Delta t_{2ум})$ , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль - значення величини щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{2ум}$ . Здійснюється перерахунок величини щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{1ум}$ ,  $\Delta t_{2ум}$ , представлених умовним законом розподілу із підстановкою за формулою (6.10), у дійсні щорічні максимальні амплітуди середньомісячних температур  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  у створах гідровузлів.

## **6.6 Оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій**

Для імовірнісної оцінки надійності складних технічних систем доцільно застосовувати принцип слабкої ланки [37]. Принцип слабкої ланки для імовірнісної оцінки надійності Дніпровського каскаду гідроелектростанцій реалізується у наступних положеннях:

1. Для усіх гідротехнічних споруд гідровузлів каскаду розглядається надійність споруд за усіма можливими умовами настання граничних станів, при досягненні яких можливе виникнення надзвичайного стану на гідровузлі, пов'язана із проривом напірного фронту гідровузла і виникненням гідродінамічної аварії. Для гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій

ризика настання граничних станів, обчислені в рамках параметричної теорії надійності, наведено в табл. Ц.1–Ц.9.

2. Ризики настання граничних станів гідротехнічних споруд розглядаються в залежності від типу споруди, конструкції споруди, типу основи. Для гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій розглядаються такі групи гідротехнічних споруд і види граничних станів:

- греблі із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Кременчуцького, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: переливу води через гребінь греблі; втрати стійкості верхового укосу; втрати стійкості низового укосу; вичерпання фільтраційної міцності тіла греблі; вичерпання фільтраційної міцності основи; руйнування кріплення укосу;

- бетонна водозливна гребля на нескельовій основі (Каховського гідровузла) за критеріями: вичерпання механічної міцності тіла греблі; вичерпання фільтраційної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти перекидання; втрати стійкості проти спливання; відмови затвору водозливу;

- бетонна водозливна гребля на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності тіла греблі; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти перекидання; відмови затвору водозливу;

- будівлі гідроелектростанцій на нескельовій основі (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання фільтраційної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання;

- будівлі монтажних майданчиків гідроелектростанцій на нескельовій основі (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання фільтраційної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання;

- будівлі гідроелектростанцій на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання

механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання;

- будівлі монтажних майданчиків гідроелектростанцій на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання;

- голови шлюзів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; руйнування нижніх воріт;

- камери шлюзів на нескельовій основі (Київського, Канівського, Середньодніпровського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву;

- голови шлюзів на скельовій основі (Кременчуцького, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання; втрати стійкості проти перекидання; руйнування нижніх воріт;

- камери шлюзів на скельовій основі (Кременчуцького, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти спливання; втрати стійкості проти перекидання;

- гравітаційні стояни на нескельовій основі (Київського, Канівського, Каховського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву;

- гравітаційні стояни на скельовій основі (Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського гідровузлів) за критеріями: вичерпання механічної міцності; вичерпання механічної міцності основи; втрати стійкості проти зсуву; втрати стійкості проти перекидання.

3. Із перерахованих у п.2 критеріїв настання граничних станів гідротехнічних споруд розглядаються граничні стани:

- для гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі;
- для бетонних споруд на нескельовій основі;
- для бетонних споруд на скельовій основі;
- для залізобетонних споруд на нескельовій основі;
- для залізобетонних споруд на скельовій основі.

Із усіх критеріїв настання граничного стану (по одному із кожного типу критеріїв) обрано гідротехнічні споруди із максимальним ризиком настання граничного стану за зазначеним критерієм.

4. При побудові дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій ураховуються по одному граничному стану із максимальним ризиком його настання для кожного типу споруд і основ, наведених у п. 3. Дані представлено на рис. 6.8 і у Додатку Ц.

**Надзвичайна ситуація на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій**



**Надзвичайна ситуація на Київському гідровузлі:**

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



**Надзвичайна ситуація на Канівському гідровузлі:**

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



**Надзвичайна ситуація на Кременчуцькому гідровузлі:**

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





#### Надзвичайна ситуація на Середньодніпровському гідровузлі:

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



#### Надзвичайна ситуація на Дніпровському гідровузлі:

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



#### Надзвичайна ситуація на Каховському гідровузлі:

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

Рис. 6.8. Блок-схема підсистем розрахункового дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій



При виконанні розрахунків по визначенню узагальненого ризику виникнення надзвичайного ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій необхідно використовувати наступні вихідні дані.

1. Загальні дані, отримані при проектуванні Київського, Канівського, Кременчуцького, Середньодніпровського, Дніпровського, Каховського гідровузлів.

1.1. Функції розподілів максимальних витрат  $Q$  ріки Дніпро у створах водосховищ гідровузлів Дніпровського каскаду з урахуванням трансформації паводків у водосховищах  $P_Q = \Phi_Q(Q)$ , а також відповідні до них обернені функції витрат  $Q = \arg \Phi_Q(P_Q)$ .

1.2. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $Q_{1ум}$  і  $Q_{2ум}$  – щорічних максимальних паводкових витрат у створах двох гідровузлів. Параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{Q_{1ум}}$ ,  $m_{Q_{2ум}}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{Q_{1ум}}$ ,  $\sigma_{Q_{2ум}}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$ , а також кореляційний момент  $K_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Функції розподілів  $P_{Q_{1ум}} = \Phi_{Q_{1ум}}(Q_{1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних витрат  $Q_{1ум} = \arg \Phi_{Q_{1ум}}(P_{Q_{1ум}})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}(Q_{1ум})$ ,  $\sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = \sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}}(Q_{1ум})$ , функції розподілів  $P_{Q_{2ум}} = \Phi_{Q_{2ум}}(m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}, \sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних витрат  $Q_{2ум} = \arg \Phi_{Q_{2ум}}(P_{Q_{2ум}})$ , дійсні витрати  $Q_1 = Q_1(Q_{1ум})$ ,  $Q_2 = Q_2(Q_{2ум})$  у створах гідровузлів.

1.3. Залежності статичних рівнів води у водосховищах  $Z_{wt}$  від витрат води  $Z_{wt} = Z_{wt}(Q_1)$ , ...,  $Z_{wt} = Z_{wt}(Q_n)$ , де  $n$  – кількість водосховищ гідровузлів у каскаді гідроелектростанцій.

1.4. Залежності рівнів води у нижніх б'єфах водосховищ  $Z_{wb}$  від витрат води  $Z_{wb} = Z_{wb}(Q_1)$ , ...,  $Z_{wb} = Z_{wb}(Q_n)$ .

1.5. Залежності середніх глибин води у водосховищах  $H$  від статичних рівнів води у водосховищах  $H = H(Z_{wt})$ .

1.6. Функції розподілів максимальних швидкостей вітру  $V_{wind}$  для місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду  $P_V = \Phi_V(V_{wind})$  і відповідні до них обернені функції  $V_{wind} = \arg \Phi_V(V_{wind})$ .

1.7. Залежності довжини розгону хвиль у водосховищах  $L$  від статичних рівнів води у водосховищах  $L = L(Z_{wt})$ .

1.8. Нормативні залежності параметрів хвиль у водосховищах (висота хвилі  $h$ , довжина хвилі  $\lambda$ ) від швидкостей вітру  $V_{wind}$ , середніх глибин води у водосховищах  $H$  і довжини розгону хвиль у водосховищах  $L$ , тобто  $h = h(V_{wind}, H, L)$ ,  $\lambda = \lambda(V_{wind}, H, L)$ .

1.9. Функції розподілів щорічних максимальних товщин льоду  $h_{max}$  ріки Дніпро у створах водосховищ гідровузлів Дніпровського каскаду  $P_{hmax} = \Phi_{hmax}(h_{max})$ , а також відповідні до них обернені функції щорічних максимальних товщин льоду  $h_{max} = \arg \Phi_{hmax}(P_{hmax})$ .

1.10. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $h_{max,1ум}$  і  $h_{max,2ум}$  – щорічних максимальних товщин льоду у створах двох гідровузлів. Параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{hmax,1ум}$ ,  $m_{hmax,2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{hmax,1ум}$ ,  $\sigma_{hmax,2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{hmax,1ум,hmax,2ум}$ , а також кореляційний момент  $K_{hmax,1ум,hmax,2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Функції розподілів  $P_{hmax,1ум} = \Phi_{hmax,1ум}(h_{max,1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимальних товщин льоду  $h_{max,1ум} = \arg \Phi_{hmax,1ум}(P_{hmax,1ум})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{hmax,1ум,hmax,2ум} = m_{hmax,1ум,hmax,2ум}(h_{max,1ум})$ ,  $\sigma_{hmax,1ум,hmax,2ум} = \sigma_{hmax,1ум,hmax,2ум}(h_{max,1ум})$ , функції розподілів  $P_{hmax,2ум} = \Phi_{hmax,2ум}(m_{hmax,1ум,hmax,2ум}, \sigma_{hmax,1ум,hmax,2ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимальних товщин льоду  $h_{max,2ум} = \arg \Phi_{hmax,2ум}(P_{hmax,2ум})$ , дійсні щорічні максимальні товщини льоду  $h_{max,1} = h_{max,1}(h_{max,1ум})$ ,  $h_{max,2} = h_{max,2}(h_{max,2ум})$  у створах гідровузлів.

1.11. Функції розподілів щорічних максимальних низьких середньомісячних температур  $t_{min}$  у створах гідровузлів Дніпровського каскаду  $P_{tmin} = \Phi_{tmin}(t_{min})$ , а також відповідні до них обернені функції щорічних максимальних низьких середньомісячних температур  $t_{min} = \arg \Phi_{tmin}(P_{tmin})$ .

1.12. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $t_{min,1ум}$  і  $t_{min,2ум}$  – щорічних максимальних низьких середньомісячних температур у створах двох гідровузлів. Параметрами нормального закону розподілу: математичні

очікування  $m_{t_{min},1ум}$ ,  $m_{t_{min},2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{t_{min},1ум}$ ,  $\sigma_{t_{min},2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{t_{min},1ум,t_{min},2ум}$ , а також кореляційний момент  $K_{t_{min},1ум,t_{min},2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Функції розподілів  $P_{t_{min},1ум} = \Phi_{t_{min},1ум}(t_{min},1ум)$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,1ум} = \arg\Phi_{t_{min},1ум}(P_{t_{min},1ум})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{t_{min},1ум,t_{min},2ум} = m_{t_{min},1ум,t_{min},2ум}(t_{min},1ум)$ ,  $\sigma_{t_{min},1ум,t_{min},2ум} = \sigma_{t_{min},1ум,t_{min},2ум}(t_{min},1ум)$ , функції розподілів  $P_{t_{min},2ум} = \Phi_{t_{min},2ум}(m_{t_{min},1ум,t_{min},2ум}, \sigma_{t_{min},1ум,t_{min},2ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,2ум} = \arg\Phi_{t_{min},2ум}(P_{t_{min},2ум})$ , дійсні щорічні максимально низькі середньомісячні температури  $t_{min,1} = t_{min,1}(t_{min},1ум)$ ,  $t_{min,2} = t_{min,2}(t_{min},2ум)$  у створах гідровузлів.

1.13. Функції розподілів щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t$  у створах гідровузлів Дніпровського каскаду  $P_{\Delta t} = \Phi_{\Delta t}(\Delta t)$ , а також відповідні до них обернені функції щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t = \arg\Phi_{\Delta t}(P_{\Delta t})$ .

1.14. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $\Delta t_{,1ум}$  і  $\Delta t_{,2ум}$  – щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у створах двох гідровузлів. Параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{\Delta t,1ум}$ ,  $m_{\Delta t,2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{\Delta t,1ум}$ ,  $\sigma_{\Delta t,2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}$ , а також кореляційний момент  $K_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Функції розподілів  $P_{\Delta t,1ум} = \Phi_{\Delta t,1ум}(\Delta t_{,1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{,1ум} = \arg\Phi_{\Delta t,1ум}(P_{\Delta t,1ум})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум} = m_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}(\Delta t_{,1ум})$ ,  $\sigma_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум} = \sigma_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}(\Delta t_{,1ум})$ , функції розподілів  $P_{\Delta t,2ум} = \Phi_{\Delta t,2ум}(m_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум}, \sigma_{\Delta t,1ум,\Delta t,2ум})$ , а також відповідні до них обернені функції щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{,2ум} = \arg\Phi_{\Delta t,2ум}(P_{\Delta t,2ум})$ , дійсні щорічні максимальні амплітуди середньомісячних температур  $\Delta t_1 = \Delta t_1(\Delta t_{,1ум})$ ,  $\Delta t_2 = \Delta t_2(\Delta t_{,2ум})$  у створах гідровузлів.

1.15. Функції розподілів щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів у Карпатах, районі Вранча, Криму  $P_J = \Phi_J(J)$ , а також відповідні до них обернені функції щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $J = \arg \Phi_J(J)$ .

2. Дані, необхідні для визначення впливу вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд (будівля гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла на скельовій основі і камера шлюзу Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

2.1. Функція розподілу міцності бетону при стисканні, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{Rb} = \Phi_{Rb}(R_b)$  для бетону класу C12/15 із математичним очікуванням  $m_{Rb} = 13.44$  МПа і коефіцієнтом варіації  $C_{v,Rb} = 0.135$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_b = \arg \Phi_{Rb}(P_{Rb})$ .

2.2. Функція розподілу міцності арматури при розтяганні, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{Rs} = \Phi_{Rs}(R_s)$  для арматури класу А–ІІ (А240) із математичним очікуванням  $m_{Rs} = 362.5$  МПа і коефіцієнтом варіації  $C_{v,Rs} = 0.08$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_s = \arg \Phi_{Rs}(P_{Rs})$ .

2.3. Залежність хвильового тиску  $p_{wave}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

2.4. Залежність реактивного тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{r,tw}$  на стінку споруди від щорічних максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min}$ , а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t$  зовнішнього повітря  $E_{r,tw} = E_{r,tw}(t_{min}, \Delta t)$ .

2.5. Залежність внутрішніх зусиль (згинального моменту  $M$  і поздовжньої сили  $N$ ) у розрахунковому перерізі залізобетонних конструкцій від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, від хвильового тиску  $p_{wave}$ , від реактивного тиску ґрунту  $E_{r,tw}$  оберненої засипки  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ , або  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{r,tw})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{r,tw})$ .

3. Дані, необхідні для визначення впливу небезпеки втрати стійкості проти зсуву гідротехнічних споруд (правобережний стоян з боку нижнього б'єфа Київського гідровузла на нескельовій основі, монтажний майданчик

гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла на скельовій основі, бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції-1 Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

3.1. Функція розподілу щільності бетону  $\gamma_b$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_b} = \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_b} = 24 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,\gamma_b} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_b = \arg \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

3.2. Функція розподілу щільності ґрунту оберненої засипки  $\gamma_{gr}$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{gr}} = \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{gr}} = 18 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,\gamma_b} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

3.3. Функція розподілу щільності наносів  $\gamma_{ws}$  у взаженому стані, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{ws}} = \Phi_{\gamma_{ws}}(\gamma_{ws})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{ws}} = 8 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,\gamma_{ws}} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_{ws} = \arg \Phi_{\gamma_{ws}}(\gamma_{ws})$ .

3.4. Функція розподілу коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів основи по підшвах гідротехнічних споруд на нескельових основах, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$  із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi}$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,tg\varphi} = 0.12$ , а також відповідна до неї обернена функція  $tg\varphi = \arg \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

3.5. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $tg\varphi$  – коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і  $c$  – питомого зчеплення скельової основи. Параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi,c} = 0,937$ , а також кореляційний момент  $K_{tg\varphi,c} = 0,975$  і коефіцієнт варіації  $C_{v,gr} = 0,122$ . Функції розподілів  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ , а також відповідні до них обернені функції коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi = \arg \Phi_{tg\varphi}(P_{tg\varphi})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi,c} = m_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ ,  $\sigma_{tg\varphi,c} = \sigma_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ , функції розподілів  $P_c = \Phi_c(m_{tg\varphi,c}, \sigma_{tg\varphi,c})$ , а також відповідні до них обернені функції питомого зчеплення  $c = \arg \Phi_c(P_c)$ .

3.6. Залежність хвильового тиску  $p_{wave}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

3.7. Залежність реактивного тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{r,tw}$  на стінку споруди від щорічних максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min}$ , а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t$  зовнішнього повітря  $E_{r,tw} = E_{r,tw}(t_{min}, \Delta t)$ .

3.8. Залежність горизонтального сейсмічного навантаження  $S$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $S = S(J)$ .

3.9. Залежність сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

3.10. Залежність сейсмічного гідродінамічного тиску ґрунту обернених засипок  $E_{psg}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{psg} = E_{psg}(J)$ .

3.11. Залежність підсумку спрямованих униз вертикальних сил  $V$ , які діють на гідротехнічну споруду, від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ , чи  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$ .

3.12. Залежність спрямованої догори сили протитиску  $W_{of}$  по підшві гідротехнічної споруди від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

3.13. Залежність підсумку горизонтальних сил зсуву  $F_c$ , які діють на гідротехнічну споруду, від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, від хвильового  $p_{wave}$ , або реактивного тиску  $E_{r,tw}$  ґрунту оберненої засипки і тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{s,tw}$  у стані спокою, горизонтального сейсмічного навантаження  $S$ , сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$ , сейсмічного гідродінамічного тиску ґрунту  $E_{psg}$  обернених засипок  $F_c = F_c(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{psg})$ , чи  $F_c = F_c(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{psg})$ .

4. Дані, необхідні для визначення впливу небезпеки втрати стійкості проти спливання гідротехнічних споруд (монтажний майданчик гідроелектростанції Київського гідровузла на нескельовій основі і камера однокамерного шлюзу

Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

4.1. Функція розподілу щільності бетону  $\gamma_b$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_b} = \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_b} = 24 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,\gamma_b} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{\gamma_b} = \arg\Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

4.2. Функція розподілу щільності ґрунту оберненої засипки  $\gamma_{gr}$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{gr}} = \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{gr}} = 18 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,\gamma_b} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{\gamma_b} = \arg\Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

4.3. Функція розподілу коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів обернених засипок гідротехнічних споруд на нескельових основах, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$  із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi}$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,tg\varphi} = 0.12$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{tg\varphi} = \arg\Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

4.4. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $tg\varphi$  – коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і  $c$  – питомого зчеплення скельової основи з боку бічних стінок гідротехнічних споруд. Параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi,c} = 0,937$ , а також кореляційний момент  $K_{tg\varphi,c} = 0,975$  і коефіцієнт варіації  $C_{v,gr} = 0,122$ . Функції розподілів  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ , а також відповідні до них обернені функції коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi = \arg\Phi_{tg\varphi}(P_{tg\varphi})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi,c} = m_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ ,  $\sigma_{tg\varphi,c} = \sigma_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ , функції розподілів  $P_c = \Phi_c(m_{tg\varphi,c}, \sigma_{tg\varphi,c})$ , а також відповідні до них обернені функції питомого зчеплення  $c = \arg\Phi_c(P_c)$ .

4.5. Залежність підсумку спрямованих униз вертикальних сил  $V$ , які діють на гідротехнічну споруду, від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ , чи  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$ .

4.7. Залежність спрямованої догори сили протитиску  $W_{of}$  по підшві гідротехнічної споруди від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

5. Дані, необхідні для визначення впливу небезпеки втрати стійкості проти перекидання гідротехнічних споруд (камера шлюзу Кременчуцького гідровузла на скельовій основі і бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції І Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

5.1. Функція розподілу щільності бетону  $\gamma_b$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_b} = \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_b} = 24 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, \gamma_b} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_b = \arg \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

5.2. Функція розподілу щільності ґрунту оберненої засипки  $\gamma_{gr}$  у взаженому стані, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{gr}} = \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{gr}} = 8 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, \gamma_{gr}} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

5.2. Функція розподілу щільності наносів  $\gamma_{ws}$  у взаженому стані, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{ws}} = \Phi_{\gamma_{ws}}(\gamma_{ws})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{ws}} = 8 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, \gamma_{ws}} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_{ws} = \arg \Phi_{\gamma_{ws}}(\gamma_{ws})$ .

5.3. Нормальний закон розподілу для випадкових корельованих величин  $tg\varphi$  – коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і  $c$  – питомого зчеплення скельової основи і основи з боку бічних стінок гідротехнічних споруд. Параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi, c} = 0,937$ , а також кореляційний момент  $K_{tg\varphi, c} = 0,975$  і коефіцієнт варіації  $C_{v, gr} = 0,122$ . Функції розподілів  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ , а також відповідні до них обернені функції коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi = \arg \Phi_{tg\varphi}(P_{tg\varphi})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi, c} = m_{tg\varphi, c}(tg\varphi)$ ,  $\sigma_{tg\varphi, c} = \sigma_{tg\varphi, c}(tg\varphi)$ , функції розподілів  $P_c = \Phi_c(m_{tg\varphi, c}, \sigma_{tg\varphi, c})$ , а також відповідні до них обернені функції питомого зчеплення  $c = \arg \Phi_c(P_c)$ .



5.4. Залежність хвильового тиску  $p_{wave}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

5.5. Залежність горизонтального сейсмічного навантаження  $S$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $S = S(J)$ .

5.6. Залежність сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

5.7. Залежність сейсмічного гідродінамічного тиску ґрунту обернених засипок  $E_{psg}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{psg} = E_{psg}(J)$ .

5.8. Тиск наносів  $E_{ws}$  на гідротехнічну споруду, висота яких  $h_{ws}$  відповідає позначці рівня мертвого об'єму водосховища.

5.9. Залежність сейсмічного тиску наносів  $E_{sws}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{sws} = E_{sws}(J)$ .

5.10. Залежність підсумку сил, які утворюють перекидальний момент  $M_{nep}$ , від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, від хвильового  $p_{wave}$ , або реактивного тиску  $E_{r,tw}$  ґрунту оберненої засипки і тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{s,tw}$  у стані спокою, горизонтального сейсмічного навантаження  $S$ , сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$ , сейсмічного гідродінамічного тиску ґрунту обернених засипок  $E_{psg}$ , тиску наносів  $E_{ws}$ , сейсмічного тиску  $E_{sws}$  наносів  $M_{nep} = M_{nep}(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ , чи  $M_{nep} = M_{nep}(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{s,tw}, E_{r,tw}, S, E_{psg})$ .

5.11. Залежність спрямованої догори сили протитиску  $W_{of}$  по підшві гідротехнічної споруди від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

5.12. Залежність підсумку сил, які утворюють утримуючий момент  $M_{ym}$ , від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, власної ваги  $G_b$  гідротехнічної споруди  $M_{ym} = M_{ym}(Z_{wt}, Z_{wb}, G_b)$ .

5.13. Функція розподілу опору скельного ґрунту зминанню  $R_{cs,m}$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{Rcs,m} = \Phi_{Rcs,m}(R_{cs,m})$  із математичним очікуванням  $m_{Rcs,m} = 10$  МПа (для бетонної водозливної греблі (щитова стінка)

гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла) і коефіцієнтом варіації  $C_{v,Rcs,m} = 0.2$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{cs,m} = \arg \Phi_{Rcs,m}(R_{cs,m})$ .

6. Дані, необхідні для визначення впливу вичерпання механічної міцності бетонних конструкцій гідротехнічних споруд (бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

6.1. Функція розподілу міцності бетону при стисканні, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{Rb} = \Phi_{Rb}(R_b)$  для бетону класу C12/15 із математичним очікуванням  $m_{Rb} = 13.44$  МПа і коефіцієнтом варіації  $C_{v,Rb} = 0.135$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_b = \arg \Phi_{Rb}(P_{Rb})$ .

6.2. Залежність хвильового тиску  $p_{wave}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

6.3. Залежність горизонтального сейсмічного навантаження  $S$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $S = S(J)$ .

6.4. Залежність сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

6.5. Тиск наносів  $E_{ws}$  на гідротехнічну споруду, висота яких  $h_{ws}$  відповідає позначці рівня мертвого об'єму водосховища.

6.6. Залежність сейсмічного тиску наносів  $E_{sws}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{sws} = E_{sws}(J)$ .

6.7. Залежність внутрішніх зусиль (згинального моменту  $M$  і поздовжньої сили  $N$ ) у розрахунковому перерізі залізобетонних конструкцій від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, від хвильового тиску  $p_{wave}$ , від горизонтального сейсмічного навантаження  $S$ , від сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$ , від тиску наносів  $E_{ws}$ , від сейсмічного тиску  $E_{sws}$  наносів  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ .

7. Дані, необхідні для визначення впливу вичерпання механічної міцності скельової основи гідротехнічних споруд (монтажний майданчик гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла на скельовій основі і бетонна водозливна гребля

(щитова стінка) гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

7.1. Функція розподілу щільності бетону  $\gamma_b$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_b} = \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_b} = 24 \text{ кН/м}^3$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v,\gamma_b} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{\gamma_b} = \arg\Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

7.2. Залежність хвильового тиску  $p_{wave}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

7.3. Залежність горизонтального сейсмічного навантаження  $S$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $S = S(J)$ .

7.4. Залежність сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

7.5. Тиск наносів  $E_{ws}$  на гідротехнічну споруду, висота яких  $h_{ws}$  відповідає позначці рівня мертвого об'єму водосховища.

7.6. Залежність сейсмічного тиску наносів  $E_{sws}$  на гідротехнічну споруду від щорічної максимальної бальності  $J$  землетрусів  $E_{sws} = E_{sws}(J)$ .

7.7. Залежність внутрішніх зусиль (згинального моменту  $M$  і поздовжньої сили  $N$ ) у розрахунковому перерізі залізобетонних конструкцій від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, від хвильового тиску  $p_{wave}$ , від горизонтального сейсмічного навантаження  $S$ , від сейсмічного гідродінамічного тиску води  $E_{psw}$ , від тиску наносів  $E_{ws}$ , від сейсмічного тиску  $E_{sws}$  наносів  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ .

7.8. Залежність нормальних напружень  $\sigma_{max}$  і  $\sigma_{min}$  у контактному перерізі від внутрішніх зусиль (згинального моменту  $M$  і поздовжньої сили  $N$ ) у розрахунковому перерізі конструкцій гідротехнічних споруд  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ ,  $\sigma_{min} = \sigma_{min}(M, N)$ .

7.9. Функція розподілу міцності скельової основи при стисканні  $R_{c,m}$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{R_{c,m}} = \Phi_{R_{c,m}}(R_{c,m})$  із математичним очікуванням  $m_{R_{c,m}} = 55 \text{ МПа}$  (для бетонної водозливної греблі (щитова стінка)

гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла) і коефіцієнтом варіації  $C_{v, R_{c,m}} = 0.3$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{c,m} = \arg \Phi_{R_{c,m}}(R_{c,m})$ .

7.10. Функція розподілу опору скельного ґрунту зминанню  $R_{cs,m}$ , прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{R_{cs,m}} = \Phi_{R_{cs,m}}(R_{cs,m})$  із математичним очікуванням  $m_{R_{cs,m}} = 10$  МПа (для бетонної водозливної греблі (щитова стінка) гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла) і коефіцієнтом варіації  $C_{v, R_{cs,m}} = 0.2$ , а також відповідна до неї обернена функція  $R_{cs,m} = \arg \Phi_{R_{cs,m}}(R_{cs,m})$ .

8. Дані, необхідні для визначення впливу вичерпання фільтраційної міцності нескельової основи гідротехнічних споруд (будівля гідроелектростанції Каховського гідровузла на нескельовій основі і гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

8.1. Функція розподілу осередненого критичного градієнта напору  $I_{cr,m}$  не скельової основи, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{I_{cr,m}} = \Phi_{I_{cr,m}}(I_{cr,m})$  із математичним очікуванням  $m_{I_{cr,m}} = 0.32$  (для дрібних пісків),  $m_{I_{cr,m}} = 0.42$  (для пісків середньої крупності), і коефіцієнтом варіації  $C_{v, I_{cr,m}} = 0.122$  (для споруд класу СС3),  $C_{v, I_{cr,m}} = 0.102$  (для споруд класу СС2-1), а також відповідна до неї обернена функція  $I_{cr,m} = \arg \Phi_{I_{cr,m}}(I_{cr,m})$ .

8.2. Залежність розрахункового середнього градієнта напору  $I_{est,m}$  від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах,  $I_{est,m} = I_{est,m}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

9. Дані, необхідні для визначення впливу вичерпання фільтраційної міцності тіла греблі на нескельовій основі (гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

9.1. Функція розподілу осередненого критичного градієнта напору  $I_{cr,m}$  тіла греблі, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{I_{cr,m}} = \Phi_{I_{cr,m}}(I_{cr,m})$  із математичним очікуванням  $m_{I_{cr,m}} = 1.0$  (із пісків середньої крупності),  $m_{I_{cr,m}} = 0.75$  (із дрібних пісків), і коефіцієнтом варіації  $C_{v, I_{cr,m}} = 0.122$  (для споруд класу СС3),  $C_{v, I_{cr,m}} = 0.102$  (для споруд класу СС2-1), а також відповідна до неї обернена функція  $I_{cr,m} = \arg \Phi_{I_{cr,m}}(I_{cr,m})$ .

9.2. Залежність розрахункового середнього градієнта напору  $I_{est,m}$  від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах,  $I_{est,m} = I_{est,m}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

10. Дані, необхідні для визначення впливу небезпеки переливу води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів (гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

10.1. Нормативна залежність висоти нахату хвилі на укис  $h_{run}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $h_{run} = h_{run}(h, \lambda)$ .

10.2. Нормативна залежність висоти вітрового нагону води перед греблею  $\Delta h$  від швидкості вітру  $V_{wind}$  і середньої глибини води  $H$  у водосховищі  $\Delta h = \Delta h(V_{wind}, H)$ .

10.3 Позначка гребеня греблі із ґрунтових матеріалів  $Z_{ГГ} = 69.10$  м.

11. Дані, необхідні для визначення впливу небезпеки обрушення верхового і низового укосів греблі із ґрунтових матеріалів (гребля із ґрунтових матеріалів Канівського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

11.1. Функція розподілу щільності ґрунту тіла греблі  $\gamma_{gr}$  у сухому стані, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{gr}} = \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{gr}} = 27$  кН/м<sup>3</sup> і коефіцієнтом варіації  $C_{v, \gamma_{gr}} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

11.2. Функція розподілу щільності ґрунту тіла греблі  $\gamma_{gr}$  у взаженому стані, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{\gamma_{gr}} = \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$  із математичним очікуванням  $m_{\gamma_{gr}} = 18$  кН/м<sup>3</sup> і коефіцієнтом варіації  $C_{v, \gamma_{gr}} = 0.02$ , а також відповідна до неї обернена функція  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

11.3. Функція розподілу коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів тіла греблі, прийнята за нормальним законом розподілу  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$  із математичним очікуванням  $m_{tg\varphi}$  і коефіцієнтом варіації  $C_{v, tg\varphi} = 0.12$ , а також відповідна до неї обернена функція  $tg\varphi = \arg \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

11.4. Залежності розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості верхового  $k_{pc,e}$  і низового  $k_{pc,n}$  укосів від від рівнів води у верхньому  $Z_{wt}$  і нижньому  $Z_{wb}$  б'єфах, коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів тіла греблі  $k_{pc,e} = k_{pc,e}(Z_{wt}, Z_{wb}, tg\varphi)$ ,  $k_{pc,n} = k_{pc,n}(Z_{wt}, Z_{wb}, tg\varphi)$ .

12. Дані, необхідні для визначення впливу втрати стійкості плит кріплення укосів при вириваючій дії примерзлого льоду (гребля із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

12.1. Залежність крутного моменту  $M_l$ , вириваючого кріплення при зміні рівня води від змінення рівня води  $h_0$  і максимальної товщини  $h_{max}$  льоду  $M_l = M_l(h_0, h_{max})$ .

12.2. Залежність моменту утримуючих сил  $M_{ym}$  від моменту сил від власної ваги плит кріплення  $M_{Gb}$ , моменту сил від власна ваги примерзлого льоду  $M_{Gl}$ ; моменту сил від власної ваги примерзлого до плит кріплення ґрунту  $M_{Ggr}$ ; моменту сил  $M_{Nc}$  від реактивних сил  $N_c$  у зв'язках сусідніх елементів кріплення  $M_{ym} = M_{ym}(M_{Gb}, M_{Gl}, M_{Ggr}, M_{Nc})$ .

Алгоритм вирішення задачі по визначенню узагальненого ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій базується на наступних підходах. Визначення узагальненого ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій здійснюється методом статистичних випробовувань (Монте-Карло) в рамках системної теорії надійності за наступним алгоритмом. Виконується  $N$  випробовувань. При кожному випробовуванні приймається наступна послідовність.

1. Обчислюються значення величин, котрі є загальними для усіх гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.

1.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щорічних максимальних паводкових витрат води  $P_Q$  у створі Київського гідровузла.

1.2. По значенню  $P_Q$  визначається квантиль – значення щорічних максимальних паводкових витрат води у створі Київського гідровузла з

урахуванням трансформації паводка у водосховищі у відповідності до оберненої функції витрат  $Q = \arg \Phi_Q(P_Q)$ .

1.3. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $Q_{1ум}$  – (щорічні максимальні паводкові витрати води у створі Київського гідровузла) і  $Q_{2ум}$  – (щорічні максимальні паводкові витрати води у створі Канівського гідровузла) визначаються параметри нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{Q_{1ум}}$ ,  $m_{Q_{2ум}}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{Q_{1ум}}$ ,  $\sigma_{Q_{2ум}}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$ , а також кореляційний момент  $K_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Будуються функції розподілів  $P_{Q_{1ум}} = \Phi_{Q_{1ум}}(Q_{1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних витрат  $Q_{1ум} = \arg \Phi_{Q_{1ум}}(P_{Q_{1ум}})$ , визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}(Q_{1ум})$ ,  $\sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}} = \sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}}(Q_{1ум})$ , функції розподілів  $P_{Q_{2ум}} = \Phi_{Q_{2ум}}(m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}, \sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних витрат  $Q_{2ум} = \arg \Phi_{Q_{2ум}}(P_{Q_{2ум}})$ , визначаються дійсні витрати  $Q_1 = Q_1(Q_{1ум})$ ,  $Q_2 = Q_2(Q_{2ум})$  у створах Київського і Канівського гідровузлів. Аналогічно визначаються дійсні витрати пар гідровузлів: Київського – Кременчуцького, Київського – Середньодніпровського, Київського – Дніпровського, Київського – Каховського гідровузлів.

1.4. Будуються залежності статичних рівнів води у водосховищах  $Z_{wt}$  від витрат води  $Z_{wt} = Z_{wt}(Q_1), \dots, Z_{wt} = Z_{wt}(Q_n)$ , де  $n$  – кількість водосховищ гідровузлів у каскаді гідроелектростанцій.

1.5. Будуються залежності рівнів води у нижніх б'єфах водосховищ  $Z_{wb}$  від витрат води  $Z_{wb} = Z_{wb}(Q_1), \dots, Z_{wb} = Z_{wb}(Q_n)$ .

1.6. Будуються залежності середніх глибин води у водосховищах  $H$  від статичних рівнів води у водосховищах  $H = H(Z_{wt})$ .

1.7. Задаються рівномірно розподіленими в інтервалі від 0 до 1 випадковими імовірностями щорічних максимальних швидкостей вітру  $P_V$  для місць розташування гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.

1.8. По значенням  $P_V$  визначаються квантілі – значення щорічних максимальних швидкостей вітру у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій у відповідності до обернених функцій  $V_{wind} = \arg \Phi_V(V_{wind})$ .

1.9. Визначаються довжини розгону хвиль у водосховищах  $L$  від статичних рівнів води у водосховищах  $L = L(Z_{wt})$ .

1.10. Визначаються висоти хвиль  $h$  у водосховищах, довжини хвиль  $\lambda$  за нормативними залежностями  $h = h(V_{wind}, H, L)$ ,  $\lambda = \lambda(V_{wind}, H, L)$ .

1.11. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щорічної максимальної товщини льоду  $P_{hmax}$  у створі Київського гідровузла.

1.12. По значенню  $P_{hmax}$  визначається квантиль – значення щорічної максимальної товщини льоду у створі Київського гідровузла у відповідності до оберненої функції щорічної максимальної товщини льоду  $h_{max} = \arg \Phi_{hmax}(P_{hmax})$ .

1.13. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $h_{max,1ум}$  – (щорічна максимальна товщина льоду у створі Київського гідровузла) і  $h_{max,2ум}$  – (щорічна максимальна товщина льоду у створі Канівського гідровузла) визначаються параметри нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{hmax,1ум}$ ,  $m_{hmax,2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{hmax,1ум}$ ,  $\sigma_{hmax,2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{hmax,1ум,hmax,2ум}$ , а також кореляційний момент  $K_{hmax,1ум,hmax,2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Будуються функції розподілів  $P_{hmax,1ум} = \Phi_{hmax,1ум}(h_{max,1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимальних товщин льоду  $h_{max,1ум} = \arg \Phi_{hmax,1ум}(P_{hmax,1ум})$ , визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{hmax,1ум,hmax,2ум} = m_{hmax,1ум,hmax,2ум}(h_{max,1ум})$ ,  $\sigma_{hmax,1ум,hmax,2ум} = \sigma_{hmax,1ум,hmax,2ум}(h_{max,1ум})$ , функції розподілів  $P_{hmax,2ум} = \Phi_{hmax,2ум}(m_{hmax,1ум,hmax,2ум}, \sigma_{hmax,1ум,hmax,2ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимальних товщин льоду  $h_{max,2ум} = \arg \Phi_{hmax,2ум}(P_{hmax,2ум})$ , визначаються дійсні щорічні максимальні товщини льоду  $h_{max,1} = h_{max,1}(h_{max,1ум})$ ,  $h_{max,2} = h_{max,2}(h_{max,2ум})$  у створах Київського і Канівського гідровузлів. Аналогічно визначаються дійсні щорічні максимальні товщини льоду пар гідровузлів: Київського – Кременчуцького, Київського – Середньодніпровського, Київського – Дніпровського, Київського – Каховського гідровузлів.



1.14. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щорічної максимально низької середньомісячної температури  $P_{min}$  у створі Київського гідровузла.

1.15. По значенню  $P_{min}$  визначається квантиль – значення щорічної максимально низької середньомісячної температури у створі Київського гідровузла у відповідності до оберненої функції щорічної максимально низької середньомісячної температури  $t_{min} = \arg \Phi_{tmin}(P_{min})$ .

1.16. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $t_{min,1ум}$  – (щорічна максимально низька середньомісячна температура у створі Київського гідровузла) і  $t_{min,2ум}$  – (щорічна максимально низька середньомісячна температура у створі Канівського гідровузла) визначаються параметри нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tmin,1ум}$ ,  $m_{tmin,2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tmin,1ум}$ ,  $\sigma_{tmin,2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tmin,1ум,tmin,2ум}$ , а також кореляційний момент  $K_{tmin,1ум,tmin,2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Будуються функції розподілів  $P_{tmin,1ум} = \Phi_{tmin,1ум}(t_{min,1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,1ум} = \arg \Phi_{tmin,1ум}(P_{tmin,1ум})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{tmin,1ум,tmin,2ум} = m_{tmin,1ум,tmin,2ум}(t_{min,1ум})$ ,  $\sigma_{tmin,1ум,tmin,2ум} = \sigma_{tmin,1ум,tmin,2ум}(t_{min,1ум})$ , функції розподілів  $P_{tmin,2ум} = \Phi_{tmin,2ум}(m_{tmin,1ум,tmin,2ум}, \sigma_{tmin,1ум,tmin,2ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимально низьких середньомісячних температур  $t_{min,2ум} = \arg \Phi_{tmin,2ум}(P_{tmin,2ум})$ , визначаються дійсні щорічні максимально низькі середньомісячні температури  $t_{min,1} = t_{min,1}(t_{min,1ум})$ ,  $t_{min,2} = t_{min,2}(t_{min,2ум})$  у створах Київського і Канівського гідровузлів. Аналогічно визначаються дійсні щорічні максимально низькі середньомісячні температури пар гідровузлів: Київського – Кременчуцького, Київського – Середньодніпровського, Київського – Дніпровського, Київського – Каховського гідровузлів.

1.17. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур  $P_{\Delta t}$  у створі Київського гідровузла.

1.18. По значенню  $P_{\Delta t}$  визначається квантиль – значення щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у створі Київського гідровузла у відповідності до оберненої функції щорічної максимально низької середньомісячної температури  $\Delta t = \arg \Phi_{\Delta t}(P_{\Delta t})$ .

1.19. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $\Delta t_{1ум}$  – (щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур у створі Київського гідровузла) і  $\Delta t_{2ум}$  – (щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур у створі Канівського гідровузла) визначаються параметри нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{\Delta t, 1ум}$ ,  $m_{\Delta t, 2ум}$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{\Delta t, 1ум}$ ,  $\sigma_{\Delta t, 2ум}$ , коефіцієнт кореляції  $r_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум}$ , а також кореляційний момент  $K_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум}$  і коефіцієнт варіації  $C_v$ . Будуються функції розподілів  $P_{\Delta t, 1ум} = \Phi_{\Delta t, 1ум}(\Delta t_{1ум})$ , а також відповідні до них обернені функції умовних щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{1ум} = \arg \Phi_{\Delta t, 1ум}(P_{\Delta t, 1ум})$ , параметри умовного закону розподілу  $m_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум} = m_{\Delta t, 1ум} \Delta t_{2ум}(\Delta t_{1ум})$ ,  $\sigma_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум} = \sigma_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум}(\Delta t_{1ум})$ , функції розподілів  $P_{\Delta t, 2ум} = \Phi_{\Delta t, 2ум}(m_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум} \sigma_{\Delta t, 1ум, \Delta t, 2ум})$ , а також відповідні до них обернені функції щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур  $\Delta t_{2ум} = \arg \Phi_{\Delta t, 2ум}(P_{\Delta t, 2ум})$ , визначаються дійсні щорічні максимальні амплітуди середньомісячних температур  $\Delta t_1 = \Delta t_1(\Delta t_{1ум})$ ,  $\Delta t_2 = \Delta t_2(\Delta t_{2ум})$  у створах Київського і Канівського гідровузлів. Аналогічно визначаються дійсні щорічні максимальні амплітуди середньомісячних температур пар гідровузлів: Київського – Кременчуцького, Київського – Середньодніпровського, Київського – Дніпровського, Київського – Каховського гідровузлів.

1.20. Задаються рівномірно розподілені в інтервалі від 0 до 1 випадкові імовірності щорічних максимальних бальностей землетрусів  $pJ$  у районі Карпат, районі Вранча і Криму.

1.21. По значенням  $pJ$  визначаються квантилі – значення щорічних максимальних бальностей землетрусів у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій у відповідності до обернених функцій щорічних максимальних

бальностей  $J$  землетрусів  $J = \arg \Phi_J(J)$ . Здійснюється перерахунок бальності землетрусів для району розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування гідровузла.

2. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки вичерпання механічної міцності залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд (будівля гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла на скельовій основі і камера шлюзу Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

2.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність міцності бетону при стисканні  $P_{Rb}$ .

2.2. По значенню  $P_{Rb}$  визначається квантиль – значення міцності бетону при стисканні  $P_{Rb}$  у відповідності до оберненої функції  $R_b = \arg \Phi_{Rb}(P_{Rb})$ .

2.3. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність міцності арматури при розтяганні  $P_{Rs}$ .

2.4. По значенню  $P_{Rs}$  визначається квантиль – значення міцності арматури при розтяганні  $P_{Rs}$  у відповідності до оберненої функції  $R_s = \arg \Phi_{Rs}(P_{Rs})$ .

2.5. Визначається значення хвильового тиску  $p_{wave}$  згідно із залежністю  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

2.6. Визначається тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{tw}$  на стінку споруди.

2.7. Визначається реактивний тиск ґрунту оберненої засипки  $E_{r,tw}$  на стінку споруди згідно із залежністю  $E_{r,tw} = E_{r,tw}(t_{min}, \Delta t)$ .

2.8. Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок  $E_{s,tw}$  згідно із залежністю  $E_{s,tw} = E_{s,tw}(J)$ .

2.9. Визначаються значення внутрішніх зусиль (згинального моменту  $M$  і поздовжньої сили  $N$ ) у розрахунковому перерізі залізобетонних конструкцій згідно із залежностями  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ , або  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{tw}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$ ,  $N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{tw}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$  і значення ексцентриситету за формулою  $e = M/N + h_0 - h/2$ .

2.10. Перевіряється виконання умови  $A_s \cdot R_s - R_b \cdot b \cdot \left( h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \cdot N \cdot e}{R_b \cdot b}} \right) - N \geq 1$ .

3. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки втрати стійкості проти зсуву гідротехнічних споруд (правобережний стоян з боку нижнього б'єфа Київського гідровузла на нескельовій основі, монтажний майданчик гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла на скельовій основі, бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

3.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності бетону  $P_{\gamma_b}$ .

3.2. По значенню  $P_{\gamma_b}$  визначається квантиль – значення щільності бетону  $\gamma_b$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_b = \arg \Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

3.3. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності ґрунту оберненої засипки  $P_{\gamma_{gr}}$ .

3.4. По значенню  $P_{\gamma_{gr}}$  визначається квантиль – значення щільності ґрунту оберненої засипки  $\gamma_{gr}$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

3.5. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності наносів у взаженому стані  $P_{\gamma_{ws}}$ .

3.6. По значенню  $P_{\gamma_{ws}}$  визначається квантиль – значення щільності наносів у взаженому стані  $\gamma_{ws}$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_{ws} = \arg \Phi_{\gamma_{ws}}(\gamma_{ws})$ .

3.7. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунтів нескельової основи  $P_{tg\varphi}$ .

3.8. По значенню  $P_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів нескельової основи у відповідності до оберненої функції  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

3.9. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунтів скельової основи  $P_{tg\varphi}$ .

3.10. По значенню  $P_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів скельової основи у відповідності до оберненої функції  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

3.11. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $tg\varphi$  – коефіцієнта внутрішнього тертя і  $c$  – питомого зчеплення скельової основи визначаються параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi,c}$ , а також кореляційний момент  $K_{tg\varphi,c}$  і коефіцієнт варіації  $C_{v,gr}$ . Будуються функції розподілів  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ , а також відповідні до них обернені функції коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi = \arg\Phi_{tg\varphi}(P_{tg\varphi})$ , визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi,c} = m_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ ,  $\sigma_{tg\varphi,c} = \sigma_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ , функції розподілів  $P_c = \Phi_c(m_{tg\varphi,c}, \sigma_{tg\varphi,c})$ , а також відповідна до них обернена функція питомого зчеплення  $c = \arg\Phi_c(P_c)$ .

3.12. Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$  згідно із залежностями  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

3.13. Визначається горизонтальне сейсмічне навантаження  $S$  згідно із залежністю  $S = S(J)$ .

3.14. Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  згідно із залежністю  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

3.15. Визначається тиск ґрунту оберненої засипки  $E_{tw}$  на стінку споруди.

3.16. Визначається реактивний тиску ґрунту оберненої засипки  $E_{r,tw}$  на стінку споруди згідно із залежністю  $E_{r,tw} = E_{r,tw}(t_{min}, \Delta t)$ .

3.17. Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок  $E_{s,tw}$  згідно із залежністю  $E_{s,tw} = E_{s,tw}(J)$ .

3.18. Визначається підсумок спрямованих униз вертикальних сил  $V$  згідно із залежностями  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ , чи  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{tw}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$ .

3.19. Визначається спрямована догори сила протитиску  $W_{of}$  по підшві гідротехнічної споруди згідно із залежністю  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

3.20. Визначається підсумок горизонтальних сил зсуву  $F_c$ , які діють на гідротехнічну споруду згідно із залежностями  $F_c = F_c(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw})$  чи  $F_c = F_c(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{tw}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$ .

3.21. Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти зсуву  $k = (V - W_{of}) \cdot tg\varphi / F_c \geq 1$  для скельової основи і  $k = ((V - W_{of}) \cdot tg\varphi + c \cdot A_n) / F_c \geq 1$  для нескельової основи.

4. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки втрати стійкості проти спливання гідротехнічних споруд (монтажний майданчик гідроелектростанції Київського гідровузла на нескельовій основі і камера однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

4.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності бетону  $P_{\gamma_b}$ .

4.2. По значенню  $P_{\gamma_b}$  визначається квантиль – значення щільності бетону  $\gamma_b$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_b = \arg\Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

4.3. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності ґрунту оберненої засипки  $P_{\gamma_{gr}}$ .

4.4. По значенню  $P_{\gamma_{gr}}$  визначається квантиль – значення щільності ґрунту оберненої засипки  $\gamma_{gr}$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_{gr} = \arg\Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

4.5. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя нескельових ґрунтів  $P_{tg\varphi}$  по бічних стінках гідротехнічних споруд.

4.6. По значенню  $P_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  нескельових ґрунтів у відповідності до оберненої функції  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

4.7. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунтів скельової основи  $P_{tg\varphi}$ .

4.8. По значенню  $P_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів скельової основи у відповідності до оберненої функції  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

4.9. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $tg\varphi$  – коефіцієнта внутрішнього тертя і  $c$  – питомого зчеплення скельової основи визначаються параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi,c}$ , а також кореляційний момент  $K_{tg\varphi,c}$  і коефіцієнт варіації  $C_{v,gr}$ . Будуються функції розподілів  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ , а також відповідні до них обернені функції коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi = \arg\Phi_{tg\varphi}(P_{tg\varphi})$ , визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi,c} = m_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ ,  $\sigma_{tg\varphi,c} = \sigma_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ , функції розподілів  $P_c = \Phi_c(m_{tg\varphi,c}, \sigma_{tg\varphi,c})$ , а також відповідна до них обернена функція питомого зчеплення  $c = \arg\Phi_c(P_c)$ .

4.10. Визначається підсумок спрямованих униз вертикальних сил  $V$  згідно із залежністю  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave})$ , чи  $V = V(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{s,tw}, E_{r,tw})$ .

4.11. Визначається спрямованої догори сили протитиску  $W_{of}$  по підошві гідротехнічної споруди згідно із залежністю  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

4.12. Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти спливання  $k = V / W_{of} \geq 1$ .

5. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки втрати стійкості проти перекидання гідротехнічних споруд (камера шлюзу Кременчуцького гідровузла на скельовій основі і бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції-1 Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

5.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності бетону  $P_{\gamma_b}$ .

5.2. По значенню  $P_{\gamma_b}$  визначається квантиль – значення щільності бетону  $\gamma_b$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_b = \arg\Phi_{\gamma_b}(\gamma_b)$ .

5.3. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності наносів у взаженому стані  $P_{\gamma_{ws}}$ .

5.4. По значенню  $P_{\gamma_{ws}}$  визначається квантиль – значення щільності наносів у взаженому стані  $\gamma_{ws}$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_{ws} = \arg \Phi_{\gamma_{ws}}(\gamma_{ws})$ .

5.5. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунтів скельової основи  $P_{tg\varphi}$ .

5.6. По значенню  $P_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  ґрунтів скельової основи у відповідності до оберненої функції  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

5.7. За нормальним законом розподілу для випадкових корельованих величин  $tg\varphi$  – коефіцієнта внутрішнього тертя і  $c$  – питомого зчеплення скельової основи визначаються параметрами нормального закону розподілу: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi,c}$ , а також кореляційний момент  $K_{tg\varphi,c}$  і коефіцієнт варіації  $C_{v,gr}$ . Будуються функції розподілів  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ , а також відповідні до них обернені функції коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi = \arg \Phi_{tg\varphi}(P_{tg\varphi})$ , визначаються параметри умовного закону розподілу  $m_{tg\varphi,c} = m_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ ,  $\sigma_{tg\varphi,c} = \sigma_{tg\varphi,c}(tg\varphi)$ , функції розподілів  $P_c = \Phi_c(m_{tg\varphi,c}, \sigma_{tg\varphi,c})$ , а також відповідна до них обернена функція питомого зчеплення  $c = \arg \Phi_c(P_c)$ .

5.8. Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$  від висоти  $h$  і довжини  $\lambda$  хвилі  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

5.9. Визначається горизонтальне сейсмічне навантаження  $S$  згідно із залежністю  $S = S(J)$ .

5.10. Визначається сейсмічний гідродінамичний тиск води  $E_{psw}$  згідно із залежністю  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

5.11. Визначається сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок  $E_{psg}$  згідно із залежністю  $E_{psg} = E_{psg}(J)$ .

5.12. Визначається тиск наносів  $E_{ws}$ .



5.13. Визначається сейсмічний тиск наносів  $E_{sws}$  згідно із залежністю  $E_{sws} = E_{sws}(J)$ .

5.14. Визначається підсумок сил, які утворюють перекидальний момент  $M_{nep}$  згідно із залежністю  $M_{nep} = M_{nep}(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$ , чи  $M_{nep} = M_{nep}(Z_{wt}, Z_{wb}, E_{s,tw}, E_{r,tw}, S, E_{psg})$ .

5.15. Визначається спрямовані догори сили протитиску  $W_{of}$  згідно із залежністю  $W_{of} = W_{of}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

5.16. Визначається підсумок сил, які утворюють утримуючий момент  $M_{ym}$  згідно із залежністю  $M_{ym} = M_{ym}(Z_{wt}, Z_{wb}, G_b)$ .

5.17. Перевіряється виконання умови для коефіцієнту стійкості проти перекидання  $k = M_{ym} / M_{nep} \geq 1$ .

6. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки вичерпання механічної міцності бетонних конструкцій гідротехнічних споруд (бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції-1 Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

6.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність міцності бетону при стисканні  $P_{Rb}$ .

6.2. По значенню  $P_{Rb}$  визначається квантиль – значення міцності бетону при стисканні  $P_{Rb}$  у відповідності до оберненої функції  $R_b = \arg \Phi_{Rb}(P_{Rb})$ .

6.3. Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$  згідно із залежністю  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

6.4. Визначається горизонтальне сейсмічне навантаження  $S$  згідно із залежністю  $S = S(J)$ .

6.5. Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  згідно із залежністю  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

6.6. Визначається тиск наносів  $E_{ws}$ .

6.7. Визначається сейсмічний тиск наносів  $E_{sws}$  згідно із залежністю  $E_{sws} = E_{sws}(J)$ .

6.8. Визначаються внутрішні зусилля (згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$ ) у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій згідно із залежностями  $M$

$= M(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws}), N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$  і значення ексцентриситету  $e = M/N$ .

6.9. Визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у розрахунковому перерізі згідно із залежністю  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ .

6.10. Визначається головне стискаюче напруження  $\sigma_3$  у розрахунковому перерізі згідно із залежністю  $\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_{max})$ .

6.11. Перевіряється виконання умови міцності бетону тіла греблі при стисканні  $|\sigma_3|/R_b \leq 1$ .

7. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки вичерпання механічної міцності скельової основи гідротехнічних споруд (монтажний майданчик гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла на скельовій основі і бетонна водозливна гребля (щитова стінка) гідроелектростанції І Дніпровського гідровузла на скельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

7.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність міцності бетону при стисканні  $P_{Rb}$ .

7.2. По значенню  $P_{Rb}$  визначається квантиль – значення міцності бетону при стисканні  $P_{Rb}$  у відповідності до оберненої функції  $R_b = \arg\Phi_{Rb}(P_{Rb})$ .

7.3. Визначається хвильовий тиск  $p_{wave}$  згідно із залежністю  $p_{wave} = p_{wave}(h, \lambda)$ .

7.4. Визначається горизонтальне сейсмічне навантаження  $S$  згідно із залежністю  $S = S(J)$ .

7.5. Визначається сейсмічний гідродінамічний тиск води  $E_{psw}$  згідно із залежністю  $E_{psw} = E_{psw}(J)$ .

7.6. Визначається тиск наносів  $E_{ws}$ .

7.7. Визначається сейсмічний тиск наносів  $E_{sws}$  згідно із залежністю  $E_{sws} = E_{sws}(J)$ .

7.8. Визначаються внутрішні зусилля (згинальний момент  $M$  і поздовжня сила  $N$ ) у розрахунковому перерізі бетонних конструкцій згідно із залежностями  $M = M(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws}), N = N(Z_{wt}, Z_{wb}, p_{wave}, S, E_{psw}, E_{ws}, E_{sws})$  і значення ексцентриситету  $e = M/N$ .

7.9. Визначаються максимальні нормальні стискаючі напруження  $\sigma_{max}$  у контактному перерізі згідно із залежністю  $\sigma_{max} = \sigma_{max}(M, N)$ .

7.10. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність міцності скельової основи при стисканні  $P_{Rm}$ .

7.11. По значенню  $P_{Rm}$  визначається квантиль – значення міцності скельової основи при стисканні  $R_m$  у відповідності до оберненої функції  $R_m = \arg\Phi_{Rm}(R_m)$ .

7.12. Перевіряється виконання умови міцності скельової основи при стисканні  $|\sigma_3|/R_{c,m} \leq 1$ .

7.13. Перевіряється виконання умови міцності скельової основи на зминання  $|\sigma_{max}|/R_{cs,m} \leq 1$ .

8. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки вичерпання фільтраційної міцності нескельової основи гідротехнічних споруд (будівля гідроелектростанції Каховського гідровузла на нескельовій основі і гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

8.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність осередненого критичного градієнта напору  $P_{Icr,m}$  нескельової основи.

8.2. По значенню  $P_{Icr,m}$  визначається квантиль – значення осередненого критичного градієнта напору  $I_{cr,m}$  нескельової основи у відповідності до оберненої функції  $I_{cr,m} = \arg\Phi_{Icr,m}(I_{cr,m})$ .

8.3. Визначається розрахунковий середній градієнт напору  $I_{est,m}$  згідно із залежністю  $I_{est,m} = I_{est,m}(Z_{wt}, Z_{wb})$ .

8.4. Перевіряється виконання умови фільтраційної міцності нескельової основи  $I_{est,m} \leq I_{cr,m}$ .

9. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки вичерпання фільтраційної міцності тіла греблі на нескельовій основі (гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

9.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність осередненого критичного градієнта напору  $P_{Icr,m}$  тіла греблі.

9.2. По значенню  $P_{I_{cr,m}}$  визначається квантиль – значення осередненого критичного градієнта напору  $I_{cr,m}$  тіла греблі у відповідності до оберненої функції  $I_{cr,m} = \arg \Phi_{I_{cr,m}}(I_{cr,m})$ .

8.4. Перевіряється умова фільтраційної міцності тіла греблі  $I_{est,m} \leq I_{cr,m}$ .

10. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки переливу води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів (гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

10.1. Визначається висота нахату хвилі на укис  $h_{run}$  згідно із залежністю  $h_{run} = h_{run}(h, \lambda)$ .

10.2. Визначається висота вітрового нагону води перед греблею  $\Delta h$  згідно із залежністю  $\Delta h = \Delta h(V_{wind}, H)$ .

10.3. Визначається позначка динамічного рівня води перед греблею  $Z$  згідно із залежністю  $Z = Z_{wt} + h_{run}1\% + \Delta h$ .

10.3 Перевіряється виконання умови  $Z \leq Z_{IT}$ .

11. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки обрушення верхового і низового укосів греблі із ґрунтових матеріалів (гребля із ґрунтових матеріалів Канівського гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

11.1. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності ґрунту тіла греблі у сухому стані  $P_{\gamma_{gr}}$ .

11.2. По значенню  $P_{\gamma_{gr}}$  визначається квантиль – значення щільності ґрунту тіла греблі у сухому стані  $\gamma_{gr}$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

11.3. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність щільності ґрунту тіла греблі у взаженому стані  $P_{\gamma_{gr}}$ .

11.4. По значенню  $P_{\gamma_{gr}}$  визначається квантиль – значення щільності ґрунту тіла греблі у взаженому стані  $\gamma_{gr}$  у відповідності до оберненої функції  $\gamma_{gr} = \arg \Phi_{\gamma_{gr}}(\gamma_{gr})$ .

11.5. Задається рівномірно розподілена в інтервалі від 0 до 1 випадкова імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунтів тіла греблі  $P_{tg\varphi}$ .

11.6. По значенню  $P_{tg\varphi}$  визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $tg\varphi$  нескельових ґрунтів тіла греблі у відповідності до оберненої функції  $P_{tg\varphi} = \Phi_{tg\varphi}(tg\varphi)$ .

11.7. Визначаються розрахункові коефіцієнти запасу стійкості верхового  $k_{pc,v}$  і низового  $k_{pc,n}$  згідно із залежністю  $k_{pc,v} = k_{pc,v}(Z_{wt}, Z_{wb}, tg\varphi)$ ,  $k_{pc,n} = k_{pc,n}(Z_{wt}, Z_{wb}, tg\varphi)$ .

11.8. Визначаються позначка динамічного рівня води перед греблею  $Z$  згідно із залежністю  $Z = Z_{wt} + h_{run1\%} + \Delta h$ .

11.9. Перевіряється виконання умови стійкості верхового і низового укосів греблі  $k_{pc,v} \leq k_{nc,v}$  і  $k_{pc,n} \leq k_{nc,n}$ .

12. Обчислюються значення величин, які характеризують вплив небезпеки втрати стійкості плит кріплення укосів при вириваючій дії примерзлого льоду (гребля із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла на нескельовій основі) на ризик виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій.

12.1. Визначається крутий момент  $M_l$ , вириваючого кріплення при зміні рівня води згідно із залежністю  $M_l = M_l(h_0, h_{max})$ .

12.2. Залежність моменту утримуючих сил  $M_{ym}$  від моменту сил від власної ваги плит кріплення  $M_{Gb}$ , моменту сил від власна ваги примерзлого льоду  $M_{Gl}$ ; моменту сил від власної ваги примерзлого до плит кріплення ґрунту  $M_{Ggr}$ ; моменту сил  $M_{Nc}$  від реактивних сил  $N_c$  у зв'язках сусідніх елементів кріплення  $M_{ym} = M_{ym}(M_{Gb}, M_{Gl}, M_{Ggr}, M_{Nc})$ .

12.3. Перевіряється виконання умови  $M_{ym} / M_l \geq 1$ .

Після виконання усіх  $N$  випробовувань обчислюється значення узагальненого ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій. Значення  $P_{us}$  визначається відношенням кількості випробовувань  $N_l$ , при яких відбувається настання хоча б одного із граничних станів, які регламентовані п.п. 1 – 12 наведеного вище алгоритму, до загальної кількості випробовувань  $N$ .

Для досягнення необхідної точності значення  $P_{us}$  проведено  $9 \times 10^6$  статистичних випробовувань. Отримано розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, яке дорівнює  $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$  1/рік. Обчислено 95% довірчий інтервал  $I = (4.58 \times 10^{-4}, 4.82 \times 10^{-4})$  1/рік для значення імовірності виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій.

Достовірність отриманих результатів підтверджується наступним:

1. Достовірністю статистичних даних природних факторів, які впливають на надійність і безпеку гідротехнічних споруд каскаду гідроелектростанцій, отриманих прямими замірами гідрометеорологічними і сейсмологічними станціями.

2. Відповідністю даних детерміністичних розрахунків із визначенням коефіцієнтів запасу міцності і стійкості з даними імовірностей аварій на зазначених спорудах.

3. Застосуванням методів механіки суцільного середовища і системної теорії надійності при виконанні розрахунків споруд каскаду.

Очевидно, що імовірність виникнення надзвичайного стану на будь-якому гідровузлі каскаду вище ніж імовірність виникнення надзвичайного стану на будь-якій споруді гідровузла, а імовірність виникнення надзвичайного стану на каскаді гідроелектростанцій вище ніж імовірність виникнення надзвичайного стану на будь-якому гідровузлі.

Отримані результати повинні регламентуватися нормами проектування. У сучасних нормах проектування гідротехнічних споруд відсутні допустимі значення імовірностей виникнення аварій на каскадах гідровузлів. Тому попередньо, із значним запасом, можна прийняти допустиме значення імовірності виникнення аварії на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій за табл. 2.4 [73].

В подальшому необхідно виконати дослідження, які дозволять обґрунтувати допустиме значення імовірностей виникнення аварій на каскадах гідровузлів, а запропонована методика дозволить забезпечити імовірнісну оцінку надійності і безпеки каскадів гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності. Дані про показники властивостей матеріалів, ґрунтів основи використано за даними

проектних і вишукувальних організацій, однак запропонований алгоритм може урахувати дані про властивості матеріалів, ґрунтів з урахуванням їх зміни у часі, а також з урахуванням дефектів і пошкоджень конструкцій гідротехнічних споруд.

### 6.7 Висновки за розділом 6

1. На основі аналізу компоновочних і конструктивних рішень гідровузлів Дніпровського каскаду розроблено дерева відмов і несправностей гідротехнічних споруд гідровузлів.
2. Запропоновано і реалізовано підходи, які дозволяють урахувати кореляційні зв'язки між випадковими величинами, що описують різноманітні впливи на гідротехнічні споруди пар гідровузлів каскаду гідроелектростанцій. Розглядаються наступні випадкові величини: щорічні максимальні паводкові витрати, щорічна максимальна товщина льоду, щорічна максимальна низька середньомісячна температура, щорічні максимальні амплітуди середньомісячних температур.
3. На підставі результатів імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності із застосуванням принципу слабкої ланки розроблено блок-схему підсистем розрахункового дерева відмов і несправностей, а також узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій.
4. Із застосуванням узагальненого дерева відмов і несправностей розроблено алгоритм імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності. Отримано розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, яке дорівнює  $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$  1/рік.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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

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

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

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

Коефіцієнт кореляції вибірок між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у пунктах спостереження м. Вишгород – м. Київ дорівнює 0.9717. Коефіцієнт кореляції вибірок товщини льоду Канівського – Каховського



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

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

5. Розроблено дерева відмов і несправностей гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Запропоновано та реалізовано підходи, які дозволяють ураховувати кореляційні зв'язки між випадковими величинами, що описують різноманітні впливи на гідротехнічні споруди пар гідровузлів каскаду гідроелектростанцій. Розглядаються такі випадкові

величини: щорічні максимальні паводкові витрати, щорічна максимальна товщина льоду, щорічна максимальна низька середньомісячна температура, а також максимальні амплітуди середньомісячних температур. За результатами імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках параметричної теорії надійності із застосуванням принципу слабкої ланки розроблено блок-схему підсистем розрахункового дерева відмов і несправностей, а також узагальнене дерево відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Обчислено розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, яке дорівнює  $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$  1/рік.

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авакян А. Б. Классификация водохранилищ мира по важнейшим параметрам. *Гидротехническое строительство*. 1978. №12. С. 44–48.
2. Альберт И. У. Вероятностная оценка надежности системы сейсмоизолированное сооружение – основание при сейсмических воздействиях. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2004. Т. 244. С. 203–209.
3. Аналіз надійності сталезалізобетонних балок із зовнішнім листовим армуванням із урахуванням деформацій кручення / О. П. Воскобійник та ін. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия* : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. 2015. № 81. С. 235–241.
4. Анапольская Л. Е. Режим скоростей ветра на территории СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1961. 202 с.
5. Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР 1911–1957 г.г. Москва : Изд-во АН СССР, 1962. 337 с.
6. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. М. Вероятностные модели в строительном проектировании. Москва : Стройиздат, 1988. 584 с.
7. Аэроклиматический атлас характеристик ветра свободной атмосферы над СССР / под. ред. И. Г. Гутермана. Москва : Гидрометеиздат, 1973. 54 с.
8. Бамбура А. М., Барашиков А. Я., Гурківський О. Б. Основні положення розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій по національному нормативному документу (ДБН), що розробляється. *Будівельні конструкції*. К. : НДІБК, 2005. Вип. 62. Т. 1. С. 131–136.
9. Бамбура А. Н., Гурковский А. Б. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе. *Строительные конструкции*: сб. науч. тр. К. : НИИСК, 2003. Вып. 59. С. 121–130.
10. Бамбура А. Н., Дорогова Е. В. Несущая способность железобетонных элементов кольцевого сечения по деформационной модели. *Строительные конструкции* : межведомств. на-уч.-техн. сб. Киев : ГП НИИСК, 2011. Вып. 74. С. 180–188.

11. Бамбура А. Н., Дорогова Е. В. Несущая способность железобетонных элементов кольцевого сечения по упрощенным диаграммам деформации бетона и арматуры. *Строительные конструкции* : межведомств. науч.-техн. сб. Киев : ГП НИИСК, 2012. Вып. 76. С. 382–391.
12. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.23.01. Харків, 2006. 39 с.
13. Бамбура А. Н., Калинин Е. М. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов, усиленных путем наклеивания стальных и базальтовых полос. *Строительные материалы и изделия*. 2003 г. №6. С. 26–28.
14. Бамбура А. Н. К оценке прочности железобетонных конструкций на основе деформационного подхода и реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры. *Бетон на рубеже третьего тысячелетия* : материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. Москва, 9–14 сент. 2001 г. Т. 2. С. 750–757.
15. Бамбура А. М., Перлова О. М. Несуча здатність, жорсткість та деформативність залізобетонних елементів, підсилених наклеюванням зовнішнього армування. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2009. Вып. 50. С. 25–32.
16. Бамбура А. М. Про втрату стійкості позацентрово стиснутих елементів пружно–пластичного матеріалу. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій* : зб. наук. пр. НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка. Львів : Каменяр, 2002. Вип. 5. С. 213–218.
17. Бамбура А. Н. Развитие методов оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности железобетонных конструкций на основе реальных диаграмм деформирования материалов. *Научно-практические проблемы современного железобетона* : сб. тезисов первой Всеукр. науч.-техн. конф. Киев : НИИСК, 1996. С. 36–39.

18. Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. К. Вопросы математической теории надежности. Москва : Радио и связь, 1983. 376 с.
19. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности и испытания на безотказность. Москва : Советское радио, 1969. 488 с.
20. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. Москва : Наука, 1984. 328 с.
21. Бартлетт М. С. Введение в теорию случайных процессов / пер. с англ. Б. А. Севостьянова. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1968. 384 с.
22. Беллендир Е. Н., Сольский С. В., Никитина Н. Я. Методические основы, анализ и оценка риска аварий грунтовых плотин в Российской Федерации. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 238. С. 15–19.
23. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. Москва : Статистика, 1980. 262 с.
24. Бирбраер А. Н., Шульман Г. С. Оценка надежности оборудования АЭС в рамках линейно-спектральной теории сейсмостойкости. *Труды ЦКТИ им. И. И. Ползунова*. 1984. Вып. 212. С. 26–33.
25. Бирбраер А. Н., Киндер В. А., Цейтлин Б. В. Об оценке надежности оборудования АЭС при землетрясениях. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1989. Т. 212. С. 110–118.
26. Биргер И. А. Техническая диагностика. Москва : Машиностроение, 1978. 240 с.
27. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1981. 351 с.
28. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1981. 351 с.
29. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1971. 255 с.
30. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Издательство литературы по строительству, 1971. 256 с.

31. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 1984. 312 с.
32. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 1990. 448 с.
33. Болотин В. В. Случайные колебания упругих систем. Москва: Наука, 1979. 335 с.
34. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. Москва : Стройиздат, 1965. 279 с.
35. Брэдлиу Д. Д., Пальмиери А., Салман М. А. Нормативно-правовая база безопасности плотин / пер. с англ. М. А. Салман. Москва : Издательство «Весь Мир», 2003. 196 с.
36. Буторин Л. С. Прогнозирование возможных последствий землетрясений для сооружений АС ВВЭР–1000. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 139–145.
37. Вайнберг А. И. Влияние природных факторов на надежность и безопасность гидротехнических сооружений: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Харьковск. госуд. техн. ун-т стр-ва и архит. Харьков, 2008. 349 с.
38. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений : монография. Харьков: Тяжпромавтоматика, 2008. 304 с.
39. Вайнберг А. И. Оценка нормативного риска возникновения аварий на бетонных плотинах. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2008. Т. 250. С. 108–119.
40. Вайнберг А. И. Оценка риска перелива воды через гребень плотины из грунтовых материалов методом статистических испытаний. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 246. С. 121–127.
41. Василевский А. Г., Каган А. А., Кривоногова Н. Ф. Надежность оснований плотин, возводимых в районах с суровыми климатическими условиями. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 238. С. 37–41.
42. Василевский А. Г., Штильман В. Б., Шульман С. Г. Методы оценки надежности затворов гидротехнических сооружений (системный анализ). С.-Пб. : Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2010. 529с.

43. Векслер А. Б., Ивашинов Д. А., Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. С.–Петербург : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. 589 с.
44. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. 5-е изд. стер. Москва : Высш. шк., 1998. 576 с.
45. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений : в 2 т. / Беллендир Е. Н. и др. С.–Петербург : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. Т. 1. 553 с.
46. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. : в 2 т. / Беллендир Е. Н. и др. С. – Петербург : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2004. Т. 2. 524 с.
47. Волков Е. Б., Судаков Р. С., Сырицын Т. А. Основы теории надежности ракетных двигателей. Москва : Машиностроение, 1974. 400 с.
48. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. Москва : Машгиз, 1960. 176 с.
49. Вопросы безопасности и прочности строительных конструкций / сборник статей под ред. А. Р. Ржаницына. Москва : Стройиздат, 1952. 178 с.
50. Воскобийник О. П., Семко О. В. Сучасний стан проблеми керування технічними ризиками (ризик-менеджмент) у будівництві. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : ПолтНТУ, 2015. Вип. 1(43). С. 35–44.
51. Гавриленко Т. В. Анализ надежности водосброса на основе системного подхода. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1993. Т. 227. С. 84–90.
52. Гидрология и гидротехнические сооружения / Смирнов Г. Н., Курлович Е. В., Витрешко И. А., Мальгина И. А. Москва : Высш. шк., 1988. 472 с.
53. Гинзбург С. М., Юделевич А. М. Оценка надежности бетонных гравитационных плотин на стадии эксплуатации. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2002. Т.241. С. 169–172.

54. Гинзбург С. М., Рукавишников Т. Н., Шейнкер Н. Я. Вероятностная оценка трещиностойкости бетонного массива в период возведения. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2004. Т. 244. С. 221–227.
55. Глаговский В. Б., Финагенов О. М. Оценка безопасности грунтовых гидротехнических сооружений при землетрясении. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 238. С. 28–33.
56. Гнеденко Б. В. Вопросы математической теории надежности. Москва : Наука, 1983. 28 с.
57. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Л. Математические методы в теории надежности. Москва : Наука, 1965. 524 с.
58. Гнеденко Б. В., Ушаков И. А. Современная теория надежности: состояние, проблемы и перспективы. *Надежность и контроль качества*. 1989. № 1. С. 6–22.
59. Голышев А. Б., Кривошеев П. И., Бамбура А. Н. Теория железобетона на экспериментальной основе / под. ред. А. Б. Голышева. Киев: Гамма-Принт, 2009. 397 с.
60. Гордиенко С. Г., Савельева Ю. Ю. Вероятностно-статистический прогноз образования суффозионных воронок в зоне дренажа (на примере Нижегородской ГЭС). *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2001. Т. 239. С. 119–124.
61. Гордон Л. А., Затеев В. Б., Стефаненко Н. И. Оценка безопасности плотины Саяно–Шушенской ГЭС (по данным натурных измерений плановых перемещений). *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2005. Т. 244. С. 55–64.
62. ГОСТ 27.001-95. Система стандартов "Надежность в технике". Основные положения. [Дата введения 1998-07-01]. Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1997. 4 с. (Межгосударственный стандарт).
63. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: [Дата введения 1990-07-01]. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. 37 с. (Государственный стандарт Союза ССР).



64. ГОСТ 27.003-90. Состав и общие правила задания требований по надежности. [Дата введения 1992-01-01]. Москва : Изд-во стандартов, 1991. 19 с. (Государственный стандарт Союза ССР).
65. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. [Дата введения 1997-01-01]. Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1996. 19 с. (Межгосударственный стандарт).
66. ГОСТ 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения (ИЕС 812–85). [Дата введения 1999-01-01]. Москва : Изд-во стандартов, 1994. 12 с. (Межгосударственный стандарт).
67. Данные по климату СССР. В 5 т. Т. 1. Карты климатических характеристик температуры воздуха, температуры поверхности оголенной почвы, скорости и направления ветра. Обнинск, 1977. 209 с.
68. Данные по климату СССР. В 5 т. Т. 3. Таблицы месячных характеристик температуры воздуха, скорости и направления ветра по экономическим районам СССР. Обнинск, 1978. 66 с.
69. Дашко Р. Э. Инженерно-геологические и геоэкологические аспекты безопасности эксплуатации сооружений промышленной гидротехники (хвостохранилища обогатительных фабрик). *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 247. С. 19–28.
70. ДБН В.1.1–12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. [Чинний від 2014–10–01]. Київ : Мінрегіон України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2014. 110 с. (Державні будівельні норми України).
71. ДБН В.1.2–2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Видавництво «Сталь», 2006. 60 с. (Державні будівельні норми України).
72. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Чинний від 2009-12-01]. Київ : ДП “Укрархбудінформ”, 2009. 30 с. (Державні будівельні норми України).

73. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. [Чинний від 2011-01-01]. Київ : ДП "Укрархбудінформ", 2010. 37 с. (Державні будівельні норми України).
74. Деформаційна модель та алгоритм визначення напружено– деформованого стану розрахункового перерізу залізобетонних елементів / А. М. Бамбура та ін. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. науч. трудов. Днепропетровск : ПГАСА, 2009. Вып. № 50. С. 19–25.
75. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем / пер. с англ. Е. Г. Коваленко. Под ред. Е. К. Масловского. Москва : Мир, 1984. 318 с.
76. Добрецова И. В., Юделевич А. М. Методика оценки параметров эксплуатационного состояния гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях с помощью идентифицированных расчетных моделей. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2005. Т. 244. С. 95–100.
77. ДСТУ 3760:2006. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. (ISO 6935-2:1991, NEQ). [Чинний від 2007-10-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2007. 21 с. (Державний Стандарт України).
78. ДСТУ Б. В. 1.1-27: 2010. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-11-01]. Київ : Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2011. 124 с.
79. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Настанова. Основи проектування конструкцій. (EN 1990:2002, IDN). [Чинний від 2009-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с. (Національний стандарт України).
80. Дубинский И. Б., Костина А. Ф., Капитонова С. А. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1967 году* : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта. Москва : Наука, 1970. С. 21–22.
81. Дубинский И. Б. Ощутимые землетрясения Крыма за 1963–1967 гг. *Сейсмологические данные по Украине. Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона за 1963-1967 гг.* Киев : Наук. думка, 1969. С. 71–73.
82. Дубинский И. Б., Капитонова С. А., Костина А. Ф. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1968 году* : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта. Москва : Наука. 1972. С. 15–16.

83. Дубинский И. Б., Капитонова С. А., Костина А. Ф. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1969 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1973. С. 17–18.
84. Дубинский И. Б. , Капитонова С. А., Попов И. И. Подробные данные о землетрясениях Крыма и черного моря 1973-1974 гг. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1980. С. 21–25.
85. Дубинский И. Б., Капитанова С. А. Каталог землетрясений Крыма и Черного моря в 1975г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1975-1976 гг.) : сб. науч. трудов*. Киев : Наук. думка, 1982. С. 4–7.
86. Дурчева В. Н., Майорова М. А. Статистические методы анализа состояния бетонных плотин. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2002. Т. 241. С. 120–126.
87. Дурчева В. Н. Назначение критериев безопасности бетонных плотин в период их строительства. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 249. С. 25–31.
88. Евсеев С. В. Сейсмичность Украины. *Интенсивность землетрясений Украины*. Киев : Наук. думка, 1969. С. 32–55.
89. Евсеев С. В. Землетрясения Украины : Каталог землетрясений Украины с 1000 по 1940 гг. Киев : Изд-во АН УССР, 1961. 75 с.
90. Ермолаев Н. Н., Михеев В. В. Надежность оснований сооружений. Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1976. 152 с.
91. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. В. Н. Варыгин. Москва : Статистика, 1976. 598 с.
92. Залесский Ф. В., Крашников А. Ф. Учет воздействия максимального стока при определении надежности сооружений. *Гидротехническое строительство*. 1984. № 11. С. 41–43.
93. Землетрясения в СССР. Москва : Изд-во АН СССР, 1961. 473 с.

94. Землетрясения Карпат / О. П. Костюк и др. *Землетрясения в СССР в 1965 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1967. С. 13–17.
95. Землетрясения Крымско-Черноморского региона в 1970-1972 гг. / И. И. Попов и др. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1980. С. 4–20.
96. Золотов Д. А., Иващенко И. Н., Семенов В. М. Количественная оценка надежности плотин. *Гидротехническое строительство*. 1989. №7. С. 8–11.
97. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: учеб. для гидротехн. спец. вузов. Москва : Высш. шк., 1985. 352 с.
98. Иващенко И. Н. Инженерная оценка надежности грунтовых плотин. Москва : Энергоатомиздат. 1993. Вып. 105. 144 с.
99. Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии. Москва : МГУ, 1988. 248 с.
100. Исследования, расчеты и прогнозы ледовых явлений на реках и водохранилищах / под. ред. Р. В. Донченко, А. Н. Чиждова. *Труды государственного ордена трудового красного знамени гидрологического института*. 1985. Вып. 309. 77 с.
101. Калустян Э. С. Уроки аварий бетонных плотин на скальных основаниях. *Гидротехническое строительство*. 1995. №2. С. 13–17.
102. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / пер. с англ. Е. Г. Коваленко. Под ред. И. А. Ушакова. Москва : Мир, 1980. 604 с.
103. Капустин Э. В. Обеспечение надежности бетонных плотин на основе диагностики их скальных оснований. *Гидротехническое строительство*. 1994. №5. С. 20–25.
104. Карпаты / И. М. Руденская и др. *Землетрясения в СССР в 1986 году : сб. науч. трудов АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1989. С. 224–225.

105. Карпаты / И. М. Руденская и др. *Землетрясения в СССР в 1987 году : сб. науч. трудов АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1990. С. 186.
106. Карпаты / И. М. Руденская и др. *Землетрясения в СССР в 1989 году : сб. науч. трудов*. Москва : Наука, 1993. С. 254.
107. Каталог землетрясений Крыма за 1977 г. / О. П. Костюк и др. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1977 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1983. С. 5–6.
108. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпат за 1977 г. / О. П. Костюк и др. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1977 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1983. С. 21–22.
109. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1978 г. / О. П. Костюк и др. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1978-1979 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1983. С. 30–31.
110. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1981 г. / О. П. Костюк и др. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты, 1981-1982 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина*. Киев : Наук. думка, 1985. С. 56–57.
111. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1984 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР*

(Крым - Карпаты, 1984 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1987. С. 125–127.

112. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1985 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым - Карпаты, 1985 г.)* : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1988. С. 52–54.
113. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1988 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Западной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР за 1988 г.* : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН ССР Молдова, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1991. С. 79–81.
114. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1995 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1995-1996 гг.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 1997. С. 51.
115. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1996 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1995-1996 гг.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 1997. С. 87.
116. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1998 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1998 г.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 62.
117. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1999 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1999 г.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке

*сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. С. 32.

118. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2000 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. С. 30.
119. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2001 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2001 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 44–45.
120. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2002 г. / И. М. Руденская и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2002 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. С. 40–41.
121. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2003 г. / М. В. Чуба и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2003 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. С. 51–52.
122. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2004 г. / М. В. Чуба и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2004 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. С. 49–51.
123. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2005 г. / М. В. Чуба и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке*

*сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. С. 40-41.

124. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2005 г. / В. А. Свидлова и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. С. 14.
125. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2006 г. / М. В. Чуба и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 138–143.
126. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2006 г. / В. А. Свидлова и др. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 112.
127. Кисляк О. О., Мозговий А. О. Побудова функції розподілу фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 291–301.
128. Климатический атлас СССР : в 3 т. / под. ред. Е. С. Рубинштейн. Москва : Гидрометеиздат, 1960. Т. 1. 332 с.
129. Климатологический справочник СССР : температура воздуха. Ленинград : Гидрометеиздат, 1957. Ч. 1. Вып. 1. 81 с.
130. Климат Союза Советских Социалистических Республик. Ленинград : Ленинградский Гублит, 1926. 128 с.
131. Климат Союза Советских Социалистических Республик : температура воздуха. Ленинград : ГГО, 1929. Ч. 1. Вып. 2. А. 180 с.



132. Климат Союза Советских Социалистических Республик : температура воздуха. Ленинград : ГГО, 1930. Ч. 1. Вып. 2. В. 319 с.
133. Климатологический атлас СССР : труды конференции по размещению производственных сил в СССР. Ленинград : Издание Госплана СССР и ГМК СССР и РСФСР, 1933. Вып. III. 6 с.
134. Климатический атлас Украинской ССР / под. ред. Г. Ф. Прихотько и др. Ленинград : Гидрометеиздат, 1968. 238 с.
135. Клименко Є. В., Карпюк В. М., Агаєва О. А. Розрахунок надійності прогінних залізобетонних елементів за міцністю нормальних перерізів. *Наука та будівництво : науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал*. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2018. № 1 (15). С. 50–57.
136. Козак О. И., Костюк О. П. Землетрясения Карпат в 1976 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1975-1976 гг.) : сб. науч. трудов*. Киев : Наук. думка, 1982. С. 85–90.
137. Конюкова Л. Г., Орлова В. В., Швер Ц. А. Климатические характеристики СССР по месяцам / под. ред. Н. В. Смирновой. Ленинград : Гидрометеиздат, 1971. 144 с.
138. Костина А. Ф. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1964 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1967. С. 14–18.
139. Костина А. Ф., Капитонова С. А., Дубинский И. Б. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1965 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1967. С. 18–19.
140. Костина А. Ф., Капитонова С. А., Дубинский И. Б. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1966 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1970. С. 16–17.
141. Костюк О. П., Волосецкий Б. И. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1962 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1964. С. 14–16.

142. Костюк О. П., Руденская И. М. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1963 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1966. С. 14–16.
143. Костюк О. П., Руденская И. М. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1964 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1967. С. 12–13.
144. Костюк О. П., Руденская И. М. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1966 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1970. С. 12–15.
145. Костюк О. П., Руденская И. М. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1967 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1970. С. 12–14.
146. Костюк О. П., Руденская И. М. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1968 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1972. С. 13–14.
147. Костюк О. П., Руденская И. М. Землетрясения Карпат. *Землетрясения в СССР в 1969 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1973. С. 14–16.
148. Костюк О. П., Козак О. И., Карпив Т. С. Землетрясения Карпатской зоны в 1970 г. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1980. С. 70–75.
149. Костюк О. П., Козак О. И., Карпив Т. С. Карпатские землетрясения в 1971 г. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1980. С. 92–95.
150. Костюк О. П., Руденская И. М., Карпив Т. С. Землетрясения Карпат в 1972 г. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы*

*сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1980. С. 116–119.*

151. Костюк О. П., Руденская И. М., Козак О. И. Сейсмичность Карпат в 1973 г. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР. Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1980. С. 138-141.*
152. Костюк О. П. Каталог землетрясений Карпат в 1975 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1975-1976 гг.) : сб. науч. трудов. Киев : Наук. думка, 1982. С. 29–30.*
153. Костюк О. П., Руденская И. М., Подымова И. С. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1979 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1978-1979 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1983. С. 48–50.*
154. Костюк О. П., Руденская И. М., Карпив Т. С. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1980 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1980 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1984. С. 43–46.*
155. Костюк О. П., Руденская И. М., Подымова И. С. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 1982 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты, 1981-1982 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1985. С. 135–136.*
156. Костюк О. П., Руденская И. М., Хивренко З. С. Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпат за 1983 г. *Сейсмологический бюллетень Западной*

*территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым, Карпаты, 1983 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1986. С. 40–42.*

157. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты (регулирование речного стока, водохозяйственные и водноэнергетические расчеты). Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1952. 392 с.
158. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. Москва : Наука, 1981. 255 с.
159. Кудзис А. П. Оценка надежности железобетонных конструкций. Вильнюс : Моклас, 1985. 155 с.
160. Кузнецов В. С. Критерии оценки надежности и безопасности грунтовых плотин. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 238. С. 20–24.
161. Кузнецов В. С. Техника определения критериев состояния грунтовых плотин. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2003. Т. 242. С. 83–99.
162. Ландау Ю., Сиренко Л. Гидроэнергетика и окружающая среда. Киев : Либра, 2004. 484 с.
163. Лебедев А. Н. Климат СССР : Европейская территория СССР. Вып. 1. Ленинград : Гидрометеоздат, 1958. 107 с.
164. Левина С. М., Томашевский Б. А. Оценка надежности плитного крепления дна нижнего бьефа водосбросных сооружений. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 89–95.
165. Ледотермический режим свободных рек и подпертых бьефов и его регулирование : труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 42. / под. ред. Р. В. Красовицкого. 1968. 499 с.
166. Лентяев Л. Д., Смирнов Л. В. Обеспечение надежности водосбросных и водопропускных сооружений крупных гидроузлов. *Гидротехническое строительство*. 1983. №8. С. 40–42.
167. Лившиц Н. А., Пугачев В. Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления: 1. Вероятностные и статистические характеристики воздействий и

- процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы. Москва : Физматгиз, 1963. 895 с.
168. Линден Н. А. Каталог глубокофокусных землетрясений по данным сейсмической сети СССР за 1909-1944 годы. Москва-Ленинград : Изд-во АН СССР, 1947. 15 с.
169. Ллойд Д. К., Липов М. Надежность: организация исследования, методы, математический аппарат. Москва : Советское радио, 1964. 686 с.
170. Лужин О. В. Вероятностные методы расчета сооружений. Москва : МИСИ им. Куйбышева, 1983. 122 с.
171. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. Москва : Высшая школа, 1988. 239 с.
172. Ляпиичев П. А. Методика регулирования стока и водохозяйственных расчетов. Москва : Стройиздат, 1972. 272 с.
173. Лятхер В. М. и др. Оценка надежности гидросооружений. *Гидротехническое строительство*. 1985. № 22. С. 6–12.
174. Мартенсон И. В., Фрейшист А. Р. Проблемы надежности механического оборудования и аварии гидросооружений. *Энергетическое строительство за рубежом*. 1986. № 3. С. 23–30.
175. Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах 1947–55 г.г. Вып. 1. Ч. 1. / под. ред. З. А. Викулиной. Ленинград : ГГИ, 1962. 516 с.
176. Материалы наблюдений на водохранилищах / под. ред. Заводцовой А. Н. *Дополнение к гидрологическому ежегоднику 1975 г.* Киев: УГМС УССР, 1977. Т. II. Вып.4, 5. С. 202–245.
177. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. Москва : Гос. изд. лит. по стр-ву, арх-ре и строит. матер. 1962. 284 с.
178. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 78 с.
179. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений : СТП ВНИИГ 210.02.НТ – 04. С. – Петербург : ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2005. 80 с.

180. Мирзаев А. Я., Букаринова Т. П., Иванов В. М. Оценка косвенных ущербов при разработке деклараций безопасности гидротехнических сооружений. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2003. Т. 242. С. 34–40.
181. Мирцхулава Ц. Е. Оценка надежности плотин и других сооружений с учетом интенсивности старения. *Современные проблемы водного хозяйства и инженерной экологии. Институт водного хозяйства и инженерной экологии АН Грузии*. Тбилиси, 1999. С. 80–100.
182. Мирцхулава Ц. Е. Анализ безопасности и надежности водопропускных сооружений. *Материалы конференций и совещаний по гидротехнике ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. Ленинград, 1985. С. 81–84.
183. Михалев М. А. Инженерная гидрология. С.-Петербург : Изд-во С.-Петербург ГТУ, 2002. 124 с.
184. Многолетние характеристики температуры и высоты нижней и верхней границ облаков над территорией СССР : сборник таблиц. Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. 171 с.
185. Могилевская С. Е. Повышение надежности инженерно-геологических исследований скальных оснований ГТС. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2004. Т. 243. С. 55–62.
186. Могилевская С. Е. Прогноз деформаций скального основания бетонной плотины с использованием инженерно-геологических критериев безопасности (на примере плотины Камской ГЭС). *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2005. Т. 244. С. 81–90.
187. Могилевская С. Е. Управление безопасностью скальных оснований бетонных плотин. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 249. С. 39–46.
188. Моделирование температурного режима бетонной плотины на р. Бо во Вьетнаме / Ю. И. Чайка и др. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 63. С. 516–521.
189. Можевитинов А. Л. О направлениях развития теории надежности. *Материалы конференций и совещаний по гидротехнике ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. Ленинград, 1981. С. 16–19.

190. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2010. Вип. 58. С. 264–270.
191. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними. *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2011. Вип. 127. С. 171–175.
192. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і вибір параметрів функції розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 2011. Вип. 101. С. 123–127.
193. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2011. Вип. 1 (53). С. 119–126.
194. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних аварій гідротехнічних споруд. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 66. С. 192–196.
195. Мозговий А. О., Балабай О. О. Комплексна ймовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на прикладі бетонної греблі Дніпровської ГЕС. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Полща, 2017. Т. 1 (17). Ч. 1. С. 117–126.
196. Мозговий А. О., Бутнік С. В. Імовірнісна оцінка надійності греблі із ґрунтових матеріалів гідровузла Nam Chien у В'єтнамі із застосуванням методу Монте-Карло. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VII-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 166–167.

197. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 65. С. 364–370.
198. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальної товщини льоду за статистичними даними спостережень у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2018. Т. 93, №3. С. 149–155.
199. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності температурних впливів за статистичними даними по гідровузлах Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 72. С. 135–145.
200. Мозговий А. О. Загальні підходи щодо керування ризиком втрати надійності каскаду гідровузлів під час проходження катастрофічного паводку. *Науковий вісник будівництва: матеріали VI Міжнародної наукової конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд"*. Харків, 2013. Вип. 73. С. 531–536.
201. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву бетонних гребель гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 154–165.
202. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 161. С. 90–101.
203. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського*



*державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 165. С. 99–109.

204. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 168. С. 62–70.
205. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 174. С. 70–80.
206. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 181. С. 81–91.
207. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 182. С. 6–17.
208. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм стійкості укосів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 113–126.
209. Мозговий А. О. Узагальнена оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на гідротехнічних спорудах каскаду гідроелектростанцій. *Східно-Європейський науковий журнал*. Варшава, республіка Полща, 2019. Т. 1 (17), ч. 1. С. 117–126.

210. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності греблі із ґрунтових матеріалів гідровузла ГЕС Тхакмо у В'єтнамі за критерієм переливу води через гребінь греблі. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2016. Т. 86, № 4. С. 122–127.
211. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер і голів шлюзів. *70-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 17–19 березня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 12.
212. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву монтажних майданчиків будівель ГЕС гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VII Міжнародної наукової конференції, 20–21 жовтня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 78–80.
213. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур* : тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару, 11–12 жовтня 2016 р. Харків : ХНУБА, 2016. С. 56–58.
214. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VI Міжнародної науково-технічної конференції, 19–21 квітня 2017 р. Харків : УкрДУЗТ, 2017. С. 140–141.
215. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VIII Міжнародної наукової конференції, 18–19 жовтня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 119–122.

216. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VII-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 164–165.
217. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Імовірнісний спосіб комплексної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельовій основі за нормативною методикою. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур, присвячено 100-річчю створення Харківської каналізації* : тези за матеріалами VI Всеукраїнського наукового семінару, 15–16 жовтня 2014 р. Харків : ХНУБА, 2014. С. 139–141.
218. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Умови формування замулювання водосховищ річкових гідровузлів. *Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства* : матеріали IV міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 25 листопада–25 грудня 2014 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. С. 117–120.
219. Мозговий А. О. Метод розв'язку задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2017. Вип. 66. С. 162–168.
220. Мозговий А. О. Метод розв'язання задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи. *72-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 14–17 березня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 38–39.
221. Мозговий А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 54. С. 272–277.

222. Мозговий А. О. Оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм переливу води через гребінь греблі. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: до 100-річчя від дня народження Заслуженого діяча науки України, докт. техн. наук, проф. Прокоповича І. Є.* Одеса, 2013. Вип. 49, ч. 2. С. 178–184.
223. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / Гордеев В. Н. и др. ; под общей ред А. В. Перельмутера. Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. 482 с.
224. Надежность машиностроительной продукции: практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению / Акинфиев Л. Л. и др. Москва : Издательство стандартов, 1990. 328 с.
225. Науменко И. И. Надежность сооружений гидромелиоративных систем. Киев : Вища школа, 1987. 224 с.
226. Никитина Н. Я., Лопатина М. Г. Анализ безопасности типовых комплексов очистных сооружений (на примере Центральной станции аэрации ГУЛ "Водоканал Санкт–Петербурга"). *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 2003. Т. 242. С. 24–33.
227. О прогнозировании надежности камер рабочих колес диагональных и поворотно-лопастных гидротурбин / Е. М. Дзюбанов и др. *Гидротехническое строительство.* 1996. №2. С. 8–15.
228. Осадчук В. А., Ландау Ю. А., Поташник С. И. Роль ГАЕС в развитии энергетики в Украине. *Энергетика и электрификация.* 2001. №1. С. 4–12.
229. О температуре воздуха в Российской империи. Санкт-Петербург : Типография императорской академии наук, 1882. С. 79–80, 216–230, 238, ХСІ, CLXXXIII–CLXXXV, CLXXXVIII, CCXLII–CCXLIX.
230. Оценка напряженно-деформированного состояния агрегатной шахты первой очереди Днестровской гидроаккумулирующей электростанции / А. А. Мозговой и др. *Науковий вісник будівництва.* Харків, 2008. Вип. 48. С. 106–112.

231. Оцінка напружено-деформованого стану бетонних труб іригаційних водоводів / А. О. Мозговий та ін. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 52. С. 260–263.
232. Оценка устойчивости бетонной плотины на сдвиг с учетом натуральных данных / С. М. Гинзбург и др. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2001. Т. 239. С. 50–57.
233. Панов Б. П. Зимний режим рек СССР. Ленинград : Изд-во Ленинградского университета, 1960. 238 с.
234. Панов С. И., Воронин С. М., Николаев Ю. М. Критерии безопасности каменно-земляных плотин на Крайнем Севере по температурному состоянию. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 249. С. 54–60.
235. Панов С. И., Прямицкий А. В. Критерии безопасности земляных плотин со стальными диафрагмами в условиях Крайнего Севера. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2008. Т. 251. С. 25–31.
236. Педь Д. А., Туркетти З. Л. Распределение суточных амплитуд температуры воздуха на территории СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1961. 168 с.
237. Педь Д. А., Туркетти З. Л. Атлас суточных амплитуд температуры воздуха в СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1962. 103 с.
238. Пепоян В. В., Троицкий А. П. К вопросу оценки надежности водоупорных элементов грунтовых плотин, возводимых в сейсмических районах. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1989. Т. 212. С. 62–69.
239. Пичугин С. Ф. Крановые нагрузки на строительные конструкции: монография. Полтава: ООО «АСМИ», 2014. 503 с.
240. Пичугин С. Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій: монографія. Полтава: ТОВ «Асмі», 2016. 520 с.
241. Пічугін С. Ф., Патенко Ю. Е. Оцінка надійності сталевих колон постійного перерізу виробничих будівель. *Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр.* Одесса : ОГАСА, 2011. № 15. Ч. 2. С. 191–197.
242. Пічугін С. Ф., Патенко Ю. Е. Визначення внеску в'язевих елементів у надійність каркасів виробничих будівель. *Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. пр.* Полтава : ПолтНТУ, 2015. Вип. 1(43). С. 29–34.

243. Пічугін С. Ф., Патенко Ю. Е. Ймовірнісна модель кранових навантажень на каркаси виробничих будівель. *Стальзалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: зб. наук. статей*. Полтава : ПолтНТУ, 2016. Вип. 12. С. 189–195.
244. Попов И. И., Костина А. Ф., Аронович З. И. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1962 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1964. С. 17–21.
245. Попов И. И., Костина А. Ф., Аронович З. И. Землетрясения Крыма. *Землетрясения в СССР в 1963 году : сб. науч. трудов АН СССР, ИФЗ им. О. Ю. Шмидта*. Москва : Наука, 1966. С. 17–18.
246. Попов И. И. Сейсмичность Крыма в 1976 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1975-1976 гг.) : сб. науч. трудов*. Киев : Наук. думка, 1982. С. 67–68.
247. Попов И. Я., Рябых В. М. О высоте наката волны на отос. *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. Ленинград, 1969. Вып. 50. С. 473 – 476.
248. Пособие к разделу 5 : Гидротехнические сооружения СНиП II-7-81. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. П 17-85. Ленинград : Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1986. 310 с.
249. Пособие к СНиП 2.06.01-86. П-884-91. Проектирование зданий ГЭС и ГАЭС. Расчеты и конструирование. Москва : ВНИИО "ГИДРОПРОЕКТ" им. С. Я. Жука, 1991. 146 с.
250. Пособие к СНиП II-16-76. Проектирование оснований гидротехнических сооружений. П 13-83. Ленинград : Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1984. 402 с.
251. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (без предварительного напряжения): к СНиП 2.06.08.87. [Дата введения II квартал 1991]. Ленинград : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991. 276 с.

252. Пособие по проектированию судоходных шлюзов к главе СНиП 2.06.07-87. П-864-88. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Москва : ВНИИО "ГИДРОПРОЕКТ" им. С. Я. Жука, 1988. 352 с.
253. Потапов М. В. Регулирование стока (водохозяйственные расчеты): учеб. для институтов и факультетов. Изд. 2-е, перераб. и расширен. Москва : Сельхозгиз, 1940. 280 с.
254. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду / А. В. Яцик та ін. Київ : Генеза, 2003. 176 с.
255. Пугачев В. С. Введение в теорию вероятностей. Москва : Физматгиз, 1968. 367 с.
256. Пугачев В. С. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. Москва : Физматгиз, 1973. 255 с.
257. Пугачев В. С. Основы общей теории случайных функций. Москва : Физматгиз, 1952. 344 с.
258. Пугачев В. С. Статистические методы в технической кибернетике. Москва : Физматгиз, 1971. 190 с.
259. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Москва : Физматгиз, 1962. 883 с.
260. Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск : Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
261. Разработка и создание комплекса мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений : методическое пособие. Европейская экономическая комиссия организации объединенных наций / Ш. Талипов и др. Алматы : ТОО «La Creation», 2014. 80с.
262. Райзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1986. 192 с.
263. Райзер В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1995. 348 с.
264. Райзер В. Д. Теория надежности в строительном проектировании. Москва : АСВ, 1998. 304 с.

265. Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС / О. Д. Рубин и др. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2004. Т. 244. С. 227–233.
266. Расчеты и прогнозы ледовых явлений на реках / под. ред. С. Н. Булатова. *Труды гидрометцентра СССР*. 1974. Вып. 117. С. 75–98.
267. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
268. Регулирование ледовых явлений на каскадах гидроузлов : труды координационных совещаний по гидротехнике / под. ред. Р. В. Красовицкого. Ленинград, 1976. Вып. 111. 218 с.
269. Рекомендации российских нормативных документов по обеспечению надежности грунтовых плотин / Е. Н. Беллендир и др. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 238. С. 5–14.
270. Рогачко С. И., Бааджи В. Г. Особенности проектирования морских берегозащитных сооружений. *Будівельні конструкції*. 2016. №. 83 (2). С. 282–287.
271. Рогачко С. И. Концептуальная конструкция островного морского нефтегазопромыслового гидротехнического сооружения. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. №. 67. С. 110–114.
272. Рогачко С. И., Панова И. Н. Экспериментальные исследования волновых нагрузок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. Т. 1. № 7. (79). С. 10–16.
273. Рогачко С. И., Сахненко М. А. Надежность морских гидротехнических сооружений. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. №. 58. С. 324–329.
274. Рогачко С. И., Слободяник А. В., Казмирук О. В. Универсальное гидротехническое сооружение. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. №. 67. С. 115–120.
275. Рогачко С. И., Шунько Н. В. Научное сопровождение проектирования берегозащитных сооружений. *Вестник МГСУ*. 2016. № 12. С. 103–114



276. Рождественский А. В., Чеботарев А. И. Статистические методы в гидрологии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. 424 с.
277. Розанов Н. П., Бочкарев Я. В., Лапшенков В. С. Гидротехнические сооружения. Москва : Агропромиздат, 1985. 432 с.
278. Роль оценки состояния высоконапорных золошлакоотвалов и хвостохранилищ в обеспечении их безопасности / Б. В. Беляев и др. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 249. С. 69–77.
279. Романчук К. Г., Стефанишин Д. В. Сценарний підхід та метод Байєса для оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2016. № 2. С. 116–123.
280. Россинский К. И. Термический режим водохранилищ. Москва : Наука, 1974. 167 с.
281. Рубинштейн Е. С. Климат СССР : атлас. Ленинград, 1926. 81 с.
282. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов). Ленинград : Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1977. 316 с.
283. Рымша В. А. Ледовые исследования на реках и водохранилищах. Ленинград : Гидрометеиздат, 1959. 190 с.
284. Светлицкий В. А. Статистическая механика и теория надежности. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 504 с.
285. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. Москва : Физматгиз, 1968. 463 с.
286. Свидлова В. А., Горячун А. В. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1978 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1978-1979 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии*. Киев : Наук. думка, 1983. С. 4–5.
287. Свидлова В. А., Горячун А. В. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1979 г. *Сейсмологический бюллетень*

*Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1978-1979 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1983. С. 18–24.*

288. Свидлова В. А., Горячун А. В. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1980 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1980 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1984. С. 5–6.*
289. Свидлова К. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1981 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты, 1981-1982 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1985. С. 5–6.*
290. Свидлова К. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1982 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты, 1981-1982 гг.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1985. С. 84–85.*
291. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1983 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым, Карпаты, 1983 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1986. С. 4.*
292. Свидлова В. А., Сыкчина З. Н. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1984 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым - Карпаты, 1984 г.) : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1987. С. 4–6.*

293. Свидлова В. А., Сафонова Г. П. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1985 г. *Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым - Карпаты, 1985 г.)* : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина. Киев : Наук. думка, 1988. С. 4–5.
294. Свидлова В. А. Крым. *Землетрясения в СССР в 1986 году* : сб. науч. трудов АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Москва : Наука, 1989. С. 226.
295. Свидлова В. А. Крым. *Землетрясения в СССР в 1987 году* : сб. науч. трудов АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Москва : Наука, 1990. С. 187.
296. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1988 г. *Сейсмологический бюллетень Западной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР за 1988 г.* : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН ССР Молдова, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1991. С. 5–6.
297. Свидлова В. А. Крым. *Землетрясения в СССР в 1989 году* : сб. науч. трудов. Москва : Наука, 1993 С. 255-256.
298. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1995 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1995-1996 гг.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 1997. С. 9.
299. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1996 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1995-1996 гг.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 1997. С. 21.
300. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1998 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1998 г.* : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по

*оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 13–14.

301. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1999 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 1999 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. С. 11.
302. Свидлова В. А. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2000 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. С. 11.
303. Свидлова В. А., Сыкчина З. Н. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2001 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2001 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 13–14.
304. Свидлова В. А., Сыкчина З. Н., Козиненко Н. М. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2002 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2002 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. С. 26.
305. Свидлова В. А., Сыкчина З. Н., Козиненко Н. М. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2003 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2003 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений*. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. С. 15–16.
306. Свидлова В. А., Сыкчина З. Н., Козиненко Н. М. Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2004 г. *Сейсмологический бюллетень Украины за 2004 г. : сб. науч. трудов НАНУ, Ин-т геофизики*

им. С. И. Субботина, КЭС по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений. Симферополь : НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. С. 11–12.

307. Сейсмическое районирование СССР / под. ред. С. В. Медведева. Москва : Наука, 1968. 476 с.
308. Сейсмичность Карпатской зоны в 1974 г. / Т. С. Карпив и др. *Сейсмический бюллетень Западной территориальной зоны единой системы сейсмических наблюдений СССР (Крым-Карпаты за 1970-1974 гг.)* : сб. науч. трудов АН УССР, Ин-т геофизики им. С. И. Субботина, АН Молд.ССР, Ин-т геофизики и геологии. Киев : Наук. думка, 1980. С. 161–163.
309. Системный анализ надежности водопроводящих трактов ГЭС / Е. М. Дзюбанов и др. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1997. Т. 233. С. 47–54.
310. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика [Дата введения 1984-01-01]. Москва.: Госстрой СССР, 1982. 109 с. (Строительные нормы и правила).
311. СНиП 2.02.02–85. Основания гидротехнических сооружений. [Дата введения 1987-01-01]. Москва : Госстрой СССР, 1986. 48 с. (Строительные нормы и правила).
312. СНиП 2.06.04–82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). [Дата введения 1984-01-01]. Москва : Госстрой СССР, 1989. 71 с. (Строительные нормы и правила).
313. СНиП 2.06.05–84\*. Плотины из грунтовых материалов. [Дата введения 1985-07-01]. Москва : Госстрой СССР, 1985. 68 с. (Строительные нормы и правила).
314. СНиП 2.06.06-85. Плотины бетонные и железобетонные. [Дата введения 1986-07-01]. Москва : Стройиздат, 1986. 62 с. (Строительные нормы и правила).
315. СНиП 2.06.07–87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. [Дата введения 1988-01-01]. Москва.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 40 с. (Строительные нормы и правила).
316. СНиП 2.06.08–87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. [Дата введения 1988-01-01]. Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1987. 32 с. (Строительные нормы и правила).

317. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. [Дата введения 2004-01-01]. Москва : ФГУП ЦПП, 2004. 24 с. (Строительные нормы и правила Российской федерации).
318. СО 34.21.307.–2005. Безопасность гидротехнических сооружений. Основные понятия, термины и определения. [Дата введения 2006-01-01]. С.-Петербург, 2006. 10 с. (Стандарт организации).
319. Сольский С. В., Никитина Н. Я., Бондарева Н. Л. Обеспечение безопасности сложных природно-технических систем, включающих грунтовые гидротехнические сооружения и опасные производственные объекты. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2001. Т. 239. С. 206–212.
320. Справочник по климату СССР. Украинская ССР. Ветер / под. ред. Л. С. Березиной, Н. Н. Акимовича. Ленинград : Гидрометеиздат, 1967. Вып. 10. Ч. III. 699 с.
321. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агrometeorологический ежегодник за 1966 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1969. Т. 1. С. 39–44.
322. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агrometeorологический ежегодник за 1967 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1971. Т. 1. С. 31–35.
323. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агrometeorологический ежегодник за 1968 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1971. С. 15–19.
324. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агrometeorологический ежегодник за 1969 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1972. С. 17–19.
325. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агrometeorологический ежегодник за 1970 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1974. С. 19–22.

326. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1971 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1975. С. 16–19.
327. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1972 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1976. С. 15–18.
328. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1973 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1979. С. 10–13.
329. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1974 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1980. С. 15–19.
330. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1975 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1978. С. 15–19.
331. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1976 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1979. С. 13–17.
332. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1977 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1980. С. 14–18.
333. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник за 1979 год по территории Украинской ССР*. Киев, 1980. С. 13–17.
334. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник по территории Украинской ССР за 1980 год*. Киев, 1982. Вып. 10. Ч. 1. С. 14–18.
335. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник по территории Украинской ССР за 1981 год*. Киев, 1983. Вып. 10. Ч. 1. С. 10–14.

336. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник по территории Украинской ССР за 1982 год*. Киев, 1984. Вып. 10. Ч. 1. С. 11–15.
337. Средняя декадная температура воздуха / под. ред. Н. Ф. Цупенко. *Агрометеорологический ежегодник по территории Украинской ССР за 1983 год*. Киев, 1985. Вып. 10. Ч. 1. С. 11–15.
338. Средняя температура воздуха по сезонам. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. Н. П. Горбачевич, З. И. Кирпатовской. *Гидрологический ежегодник 1959 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1962. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 20.
339. Средняя температура воздуха по сезонам. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. Н. П. Горбачевич, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1960 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1963. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 61.
340. Средняя температура воздуха по сезонам. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. А. П. Свириденко, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1961 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 20.
341. Средняя температура воздуха по сезонам. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. Н. П. Горбачевич, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1962 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 19.
342. Средняя температура воздуха по сезонам. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. Н. П. Горбачевич, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1963 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 21.
343. Средняя температура воздуха по сезонам. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. З. Е. Громыхалиной, Н. П. Горбачевич, З. И. Кирпатовской. *Гидрологический ежегодник 1964 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 16.



344. Статистические методы в экспериментальной физике / Идьё В. и др. ; пер. с англ. В. С. Курбатова ; под ред. А. А. Тяпкина. Москва : Атомиздат, 1976. 335 с.
345. Статистические характеристики распределения температуры в свободной атмосфере для станций СССР: сборник таблиц. Ч.1 / под. ред. И. В. Ханевской. Обнинск : ВНИИГМИ МЦД, 1975. 216 с.
346. Статистические характеристики распределения температуры в свободной атмосфере для станций СССР: сборник таблиц. Ч.2 / под. ред. И. В. Ханевской. Обнинск : ВНИИГМИ МЦД, 1975. 207 с.
347. Статистические характеристики распределения температуры в свободной атмосфере для станций СССР: сборник таблиц. Ч.3 / под. ред. И. В. Ханевской. Обнинск : ВНИИГМИ МЦД, 1975. 195 с.
348. Статистические характеристики распределения температуры в свободной атмосфере для станций СССР: сборник таблиц. Ч.4 / под. ред. И. В. Ханевской. Обнинск : ВНИИГМИ МЦД, 1975. 123 с.
349. Стефанишин Д. В. Управление рисками от паводков на плотинах и затапливаемых территориях при стохастической неопределенности максимального речного стока. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 249. С. 78–85.
350. Стефанишин Д. В. Выбор аналитических кривых обеспеченностей максимальных гидрологических характеристик с учетом риска. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2006. Т. 245. С. 51–59.
351. Стефанишин Д. В. Некоторые результаты оценки вероятности аварии на плотине Бурейской ГЭС. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2008. Т. 251. С. 10–17.
352. Стефанишин Д. В. Оценка вероятности повреждения грунтовых плотин фильтрационным потоком в рамках нормативной методики. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1987. Т. 202. С. 43–47.
353. Стефанишин Д. В. Оценка вероятности разрушения грунтовых плотин при отказе водосбросных сооружений. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1987. Т. 202. С. 53–57.

354. Стефанишин Д. В. К оценке надежности грунтовых плотин с учетом воздействия обвальных волн. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1989. Т. 212. С. 69–74.
355. Стефанишин Д. В., Троицкий А. П., Шульман С. Г. Методика оценки надежности грунтовых плотин с учетом комплекса случайных факторов. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1989. Т. 214. С. 4–11.
356. Стефанишин Д. В. Расчет деревьев отказов для грунтовых плотин с учетом стохастических связей между событиями. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1993. Т. 227. С. 38–46.
357. Стефанишин Д. В. К оценке надежности водопропускных сооружений гидроузлов. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 236. С. 77–82.
358. Стефанишин Д. В., Шульман С. Г. Методика оценки надежности и безопасности золоотвалов и хвостохранилищ. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1991. Т. 225. С. 12–18.
359. Стефанишин Д. В. Оценка вероятности переполнения отстойного пруда накопителя промышленных отходов в результате отказа водосбросных устройств. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2006. Т. 245. С. 45–50.
360. Стефанишин Д. В. Статистическая оценка надежности гидротехнических затворов с учетом восстановления работоспособности. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1993. Т. 227. С. 95–99.
361. Стефанишин Д. В. Вибрані задачі оцінку ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності. Київ : Азимут – Україна, 2009. 104 с.
362. Стефанишин Д. В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2008. Т. 251. С. 3–9.
363. Стрелецкий Н. С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. Москва : Стройиздат, 1947. 35 с.
364. Судаков В. Б., Караваев А. В. Оценка надежности старых гравитационных плотин. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2000. Т. 237. С. 124–128.

365. Температура воздуха на Украине: справочник специалиста / под. ред. В. Н. Бабиченко. Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. 398 с.
366. Теория случайных процессов : в 3 т. / И. И. Гихман, А. В. Скороход. Москва : Наука, 1971. Т. 1. 664 с.
367. Теория случайных процессов : в 3 т. / И. И. Гихман, А. В. Скороход. Москва : Наука, 1973. Т. 2. 639 с.
368. Теория случайных процессов : в 3 т. / И. И. Гихман, А. В. Скороход. Москва : Наука, 1975. Т. 3. 496 с.
369. Термічний режим і напружено-деформований стан гравітаційної бетонної греблі Huong Dien на річці Бо у В'єтнамі / А. О. Мозговий та ін. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 64. С. 54–58.
370. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. Москва : Физматгиз, 1970. 342 с.
371. Тихонова Т. С. Экспертные оценки и их информационно-аналитическое обеспечение в проблеме надежности и безопасности гидротехнических сооружений ГЭС. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 119–126.
372. Толщина льда и снега на льду. Река Днепр и верхняя часть его бассейна до р. Десны и бассейн р. Десны / под. ред. Н. П. Горбацевич. *Гидрологический ежегодник 1956 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1959. Т. 2. Вып. 2–4. С. 171–196.
373. Толщина льда и снега на льду. Бассейн р. Днепр ниже устья р. Припять / под. ред. Н. П. Горбацевич, З. И. Кирпатовской. *Гидрологический ежегодник 1957 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1960. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 87–96.
374. Толщина льда и снега на льду. Бассейн р. Днепр ниже устья р. Припять / под. ред. Н. П. Горбацевич, З. И. Кирпатовской. *Гидрологический ежегодник 1958 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа)*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1961. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 77–90.
375. Толщина льда. Бассейн р. Днепр ниже устья р. Припять / под. ред. Н. П. Горбацевич, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический*

*ежегодник 1960 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1963. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 411–413.

376. Толщина льда. Бассейн р. Днепр ниже устья р. Припять / под. ред. Н. П. Горбачевич, З. И. Кирпатовской. *Гидрологический ежегодник 1959 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1962. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 193–202.
377. Толщина льда. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. З. Е. Громыхалиной, А. Д. Гудовой, З. И. Кирпатовской, А. П. Свириденко. *Гидрологический ежегодник 1965 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1967. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 381–390.
378. Толщина льда. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. Б. Ф. Бенды, З. Е. Громыхалиной, А. Д. Гудовой, З. И. Кирпатовской. *Гидрологический ежегодник 1965 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1968. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 329–333.
379. Толщина льда и высота снега на льду. Река Днепр и ее бассейн ниже устья р. Припять / под. ред. Б. Ф. Бенды, В. И. Таран. *Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1978 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. Т. 2. Ч. 1. Вып. 4, 5. С. 217–228.
380. Толщина льда и высота снега на льду. Река Днепр и ее бассейн ниже устья р. Припять / под. ред. Б. Ф. Бенды, В. И. Таран. *Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1979 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. Т. 2. Ч. 1. Вып. 4, 5. С. 227–238.
381. Толщина льда. Река Днепр и ее бассейн до устья р. Припяти и бассейн р. Припяти. / под. ред. С. Г. Бархан, А. П. Свириденко. *Гидрологический ежегодник 1961 г.* Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 2, 3. С. 159–172.
382. Толщина льда. Река Днепр и ее бассейн до устья р. Припяти и бассейн р. Припяти. / под. ред. А. П. Свириденко, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1961 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 215–224.

383. Толщина льда. Река Днепр и ее бассейн до устья р. Припяти и бассейн р. Припяти. / под. ред. С. Г. Бархан, А. П. Свириденко. *Гидрологический ежегодник 1962 г.* Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 2, 3. С. 199–210.
384. Толщина льда. Река Днепр и ее бассейн до устья р. Припяти и бассейн р. Припяти. / под. ред. А. П. Свириденко, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1962 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 269–271.
385. Толщина льда. Бассейн р. Днепр ниже р. Припять / под. ред. А. П. Свириденко, З. И. Кирпатовской, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1963 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 285–288.
386. Толщина льда. Река Днепр и ее бассейн до устья р. Припяти и бассейн р. Припяти / под. ред. С. Г. Бархан, А. В. Мазурец. *Гидрологический ежегодник 1964 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. Т. 2. Вып. 2, 3. С. 275–277.
387. Толщина льда. р. Днепр и ее бассейн ниже устья р. Припяти / под. ред. З. Е. Громыхалиной, З. И. Кирпатовской, А. П. Свириденко, И. И. Царева. *Гидрологический ежегодник 1964 г. Бассейны Черного и Азовского морей (без Кавказа).* Ленинград : Гидрометеиздат, 1966. Т. 2. Вып. 4, 5. С. 275–278.
388. Финагенов О. М., Бешлиян А. Р. Риск в гидротехнике. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 2007. Т. 246. С. 107–112.
389. Финагенов О. М., Крупнов О. Р., Белякова С. Н. Учет социальных последствий аварий и нарушений при принятии решений по обеспечению надежности и безопасности эксплуатируемых ГТС. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 2007. Т. 246. С. 113–120.
390. Финагенов О. М., Шульман Г. С. К вопросу оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.* 1999. Т. 234. С. 7–15.

391. Финагенов О. М., Шульман С. Г. К вопросу оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 7–15.
392. Флорина О. И. Использование метода статических испытаний для расчетов консолидации оттаивающего грунтового слоя. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 51–56.
393. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. Москва : Мир, 1969. 396 с.
394. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой. Под общей ред. В. С. Сыромятникова. Москва : Машиностроение, 1984. 528 с.
395. Чугаев Р. Р. Гидротехнические сооружения: в 2 частях. Ч. 1. Глухие плотины: учебное пособие. Москва : Агропромиздат, 1985. 318 с.
396. Шайтан В. С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений. Москва : Стройиздат, 1974. 351 с.
397. Шинтемиров М. А. Особенности вероятностной оценки устойчивости откосов накопителей промышленных отходов. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 246. С. 64–68.
398. Шинтемиров М. А. Подходы к оценке социально–экологической безопасности хвостохранилищ обогатительных фабрик. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2007. Т. 248. С. 37–43.
399. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций / пер. с нем. О. О. Андреева. Москва : Стройиздат, 1994. 288 с.
400. Штильман В. Б. Исследования надежности металлоконструкций гидротурбинных блоков. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1997. Т. 230. С. 456–462.
401. Штильман В. Б. Оценка вероятности отказа затвора гидроемкости при сейсмическом воздействии. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1990. Т. 223. С. 94–99.

402. Штильман В. Б. Оценка долговечности плоского затвора при гидродинамических воздействиях. *Известия ВИИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1991. Т. 225. С. 125–130.
403. Штильман В. Б. Оценка надежности затворов гидротехнических сооружений: автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук : 05.23.07. Ленинград, 1992. 20 с.
404. Шульман Г. С. Оценка надежности оборудования при экстремальных динамических воздействиях. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 152–157.
405. Шульман Г. С. К оценке надежности подземных трубопроводов и туннелей АЭС при сейсмическом воздействии. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1999. Т. 234. С. 56–61.
406. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification / O. Morales-Nápoles and others. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014. Vol. 10. Issue 5. P. 589–603.
407. Alembagheri M., Seyedkazemi M. Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015. Vol. 44. Issue 1. P. 41–58.
408. A manual for the control of concrete construction. Concrete manual : eighth edition. Washington : United States Department of the interior, U.S. government printing office, 1988. 627 p. (A water resources technical publication).
409. Arbeitshilfe zur DIN 19700 für hochwasserrückhaltebecken / Landesanstalt für umwelt, messungen und naturschutz. Baden-Württemberg : JVA Mannheim @ Druckerei, 2007. 143 p. (Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz).
410. Arch dams: Federal Energy Regulatory Commission Division of Dam Safety and Inspections Washington. Washington : Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects, 1999. Chapter 11. P. 140–165.
411. A reliability-based approach to evaluating the stability of high rockfill dams using a nonlinear shear strength criterion / Z. Y. Wu and others. *Computers and Geotechnics*. 2013. Vol. 51. P. 42–49.

412. Arunraj N. S., Mandal S., Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation. *Accident Analysis & Prevention*. 2013. Vol. 55. P. 242–255.
413. Boccotti P., Rosso R. Risk analysis of spillway design floods. *Proc. of the Int. Conf. on Safety of Dams*. Coimbra : 1984. P. 85–92.
414. Bowles D. S. A comparison of methods for integrated risk assessment of dams. *Engineering Reliability and Risk Analysis in Water Resources*. 1987. Nijhoff Publishers, Series E, 124. P. 147–173.
415. 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).
416. Calamak M., Yanmaz A. M. Probabilistic assessment of slope stability for earth-fill dams having random soil parameters. *Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes* : 11th National Conference on Hydraulics in Civil Engineering & 5th International Symposium on Hydraulic Structures. Engineers Australia : 2014. P. 34.
417. Cao Z., Wang Y., Li D. Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet. *Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017. P. 147–167.
418. Charles J. A. Internal erosion in European embankment dams: Progress report. *ICOLD EUROPEAN CLUB*. France : 2004. 8 p.
419. Cherednikov V. M., Voskobiinyk O. P., Cherednikova O. V. Evaluation of the warping model for analysis of polystyrene concrete slabs with profiled steel sheeting. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017. № 61(3). P. 483–490.
420. Cho S. E. Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation. *Engineering Geology*. 2012. Vol. 133–134(0). P. 30–39.



421. Concrete manual. United States Department of the interior: earth sciences division, Surface water branch. Washington : U. S. Government printing office, 1975. 627 p. (A water resources technical publication).
422. Dam failures – Statistical Analysis. *Bulletin № 99 ICOLD*. Paris : ICOLD, 1995. 73 p.
423. Dams less than thirty metres high – cost savings and safety improvements. *Bulletin № 109 ICOLD*. Paris: ICOLD, 1997. 171 p.
424. Dam Safety Program Report 2015-2016 (F2016). Vancouver : Dam Safety, 2016. 42 p. (Annual Report 2015 / 2016).
425. Design of small dams. United States Department of the interior. Washington : U. S. Government printing office, 1987. 860 p. (A water resources technical publication).
426. Design of gravity dams : design manual for concrete gravity dams. United States Department of the interior. Washington : U. S. Government printing office, 1976. 553 p. (A water resources technical publication).
427. Design regulations of Swedish board of housing, building and planning. Swedish Board of housing, building and planning. Sweden, Karlskrona : Boverket, 2000. 187 p. (Mandatory provisions and general recommendations).
428. Douglas K., Spannagle M., Fell R. Analysis of concrete and masonry dam incidents. *Hydropower & Dams*. 1999. Issue 4. P. 108–115.
429. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower : Chapter 1. Washington : FERC, 2016. 77 p. (Federal energy regulatory commission, Division of dam safety and inspections).
430. Evaluations of Structural Failure Probabilities and Candidate Inservice Inspection Programs : Manuscript Completed: November 2008. Richland : office of United States nuclear regulatory commission, 2009. 195 p. (D. A. Jackson and W. E. Norris, NRC Project Managers, NRC Job Code N6398).
431. Federal Guidelines for Dam Safety. U. S. Department Of Homeland Security Federal Emergency Management Agency. FEMA. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 1979. 63 p.
432. Federal Guidelines for Dam Safety : Earthquake Analyses and Design of Dam. FEMA. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2005. 75 p.

433. Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incident and Failures : First Edition. FEMA P-946. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2013. 145 p.
434. Federal Guidelines for Dam Safety : Emergency Action Planning for Dams. FEMA 64. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2013. 73 p.
435. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. FEMA P-1025 : Catalog №14353-1. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2015. 49 p.
436. Flood Hydrology Manual. United States Department of the interior. Washington : U.S. Government printing office, 1992. 243 p. (A water resources technical publication).
437. Fu W., Liao Y. Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation. *Computers and Geotechnics*. 2010. Vol. 37. №. 3. P. 288–298.
438. General design and construction : considerations for earth and rock-fill dams. U. S. army corps of engineers. Washington : Department of the army, 2004. 130 p. (Engineer manual).
439. General principles on reliability for structures : ISO 2394. Geneva : ISO copyright office Case postale 56 1 CH-1211, 2015. 112 p. (International standard).
440. General principles on reliability for structures. Sydney : Standards Australia Limited, 2017. 114 p. (Australian Standard).
441. Gravity dam design. U. S. army corps of engineers. Washington : Department of the army, 1995. 88 p. (Engineer manual).
442. Guidelines for design of dams. New York : New York State Department of environmental conservation division of water, 1989. 32 p. (Guidelines dam safety section).
443. 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).
444. 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).

445. Guide de lecture des études de dangers des barrages. Lyon : Colloque organisé par le CFBR et l'AFEID, 2012. 54 p.
446. Guide to risk assessment for reservoir safety management: Methodology and supporting information. Bristol : Environment Agency, 2013. Volume 2. 311 p. (Report – SC090001/R2).
447. Idriss I. M. Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice. *Proc. Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Fransisco, 1985. Vol. 1. P. 255–320.
448. JCSS Probabilistic model code. Part 1. Basis of design. JCSS working materials. JCSS. 2000. 62 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch> (дата звернення: 12.05.2017).
449. JCSS Probabilistic model code. Part 2. Load models. JCSS working materials. JCSS. 2001. 73 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch> (дата звернення: 12.05.2017).
450. JCSS Probabilistic model code. Part 3. Material properties resistance models. Memorandum. JCSS. 2000. 41 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch> (дата звернення: 12.05.2017).
451. Jeppsson J. Reliability-based assessment procedures for existing concrete structures : doctoral thesis. Sweden : Lund, 2003. 184 p.
452. Krounis A. Sliding stability re-assessment of concrete dams with bonded concrete-rock interfaces : doctoral thesisю. Sweden : Stockholm, 2016. 97 p.
453. Legislated dam safety reviews in BC. Burnaby : The association of professional engineers and geoscientists of British Columbia, 2016. 90 p. (APEGBC professional practice guidelines).
454. Lemperiere F. Dams that have failed by flooding: an analysis of 70 failures. *Water Power & Dam Construction*. 1993. September / October. P. 19–24.
455. Lemperiere F. Risk analysis: what sort should be applied and to which dams? *Hydropower & Dams*. 1999. Issue 4. P. 128–132.
456. Li H. J., Zhang Y. Y., Yan Z. W. A Further Study on Soil Slope Stability Analysis by Finite Element Slip Surface Stress Method. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2012. Vol. 204. P. 492–501.

457. Lupoi A., Callari C. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2012. Vol. 8. Issue 10. P. 985–998.
458. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Instruções para Apresentação do Plano de Segurança da Barragem. Volume I. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 126 p.
459. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem. Volume II. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 218 p.
460. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem. Volume III. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 66 p.
461. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência. Volume IV. Agência Nacional do Aguas (Brasil). PAE. Brasília: ANA, 2016. 129 p.
462. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Diretrizes Para Elaboração de Projetos de Barragens. Volume V. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 156 p.
463. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Diretrizes para a construção de barragens. Volume VI. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 67 p.
464. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens. Volume VII. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 135 p.
465. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Guia Prático de Pequenas Barragens. Volume VIII. Agência Nacional do Aguas (Brasil). Brasília: ANA, 2016. 120 p.
466. Matsui T., San K. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. *Soils and foundations*. 1992. Vol. 32. №. 1. P. 59–70.

467. McDonald L. A. The status of risk assessment. Australia. In: Risk-based dam safety evaluations. Workshop report. Part one. *Hydropower & Dams*. 1998. Issue One. P. 89–97.
468. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis / L. Altarejos-García and others. *Structural Safety*. 2012. Vol. 36–37. P. 1–13.
469. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields / A. Gaspar and others. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 65. P. 99–110.
470. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures : ASCE/ SEI 7-16. Reston : ASCE, 2017. 825 p. (ASCE Standard).
471. Mozgovuy A. O., Butnik S. V. Probable reliability prediction of the dam constructed by ground materials of the hydraulic power system Nam Chien in Vietnam using Monte–Carlo method. *Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings : 7th International Scientific Conference*. Transbud-2018. MATEC Web of Conferences, November 14-16, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. Volume 230, 02019 (2018). P. 1–7.
472. Penalty function-based method for obtaining a reliability indicator of gravity dam stability / Y. Li and others. *Computers and Geotechnics*. 2016. Vol. 81. P. 19–25.
473. Petits barrages, recommandations pour la conception, la réali-sation et le suivi. Paris : Comité Français des Grands Barrages, 2002. 173 p.
474. Pichugin S. Analysis of Bridge Crane Loads on Industrial Buildings. *XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB*. Poznan-Krynica, 1998. T. 7. P. 171–178.
475. Pichugin S. F., Demchenko N. A. Reliability of Building Structures. Poltava : PNTU, 2005. 91 p.
476. Pichugin S. Probabilistic Description of Crane Load on Building Structures. *XLIII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB*. Poznan-Krynica, 1997. T. III. P. 171–178.

477. Pichugin S. F. Reliability Analysis of Steel Structures. *Proceedings of METNET Seminar 2014 in Moscow*. Hamk University of Applied Sciences: Hömeenlinna, Finland, 2014. P. 115–122.
478. Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Chapter R20. Washington : DRAFT, 2014. 84 p. (Engineering guidelines).
479. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods—application to hazards studies / L. Peyras and others. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012. Vol. 16. Issue 7. P. 795–817.
480. Rahman S., Xu H. A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2004. Vol. 19. №. 4. P. 393–408.
481. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids / Editeur : L. Peyras, P. Royet. Paris : Comité Français des Barrages et réservoirs, 2006. 62 p.
482. Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages. Paris : Comité Français des barrages et réservoirs, 2013. 325 p. (Dam spillway design guidelines).
483. Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai. Paris : Comité Français des barrages et réservoirs, 2016. 260 p. (Guidelines for the justification of embankments dams and levees).
484. Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2015. 191 p. (Groupe de Travail «Référentiel technique digues maritimes et fluviales»).
485. Reliability analysis of embankment dam sliding stability using the sparse polynomial chaos expansion / X. Guo and others. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 174. P. 295–307.
486. Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques. Rapport du groupe de travail "barrages et séismes" – version définitive octobre 2014. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2014. 316 p. (Rapport rédigé à la demande du MEDDE – DGPR).

487. Rogachko S. I. The protection of estuaries, bays, lakes shores from destructions. *Transport development*. 2018. №. 2 (3). C. 149–158.
488. Royet P., Peyras L. Recommendations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Recommendations provisoires. *Revue Francaise de geotechnique*. 2011. № 136. 69 p.
489. Safety of dams – policy and procedures. U. S. army corps of engineers. Washington : Department of the army, 2014. 528 p. (Engineering and design).
490. Safety of dams – policy and procedures. U. S. Army Corps of Engineers. Washington : Department of the army, 2011. 432 p. (Engineering and design).
491. Scoping study for a guide to risk assessment of reservoirs. Bristol : Environment Agency, 2009. 33 p. (Report – SC070087/R1).
492. Seepage analysis and control for dams. U. S. army corps of engineers. Washington : Department of the army, 1993. 392 p. (Engineering and design).
493. Seismic Design. Chapter 13. Buildings : DS-9(13)-1: Phase 4 (Final). Washington : U. S. Department of interior bureau of reclamation, 2012. 34 p. (Design Standards No. 9).
494. Serafim J., Laginha. Safety of dams judged from failures. *Water Power & Dam Construction*. 1981. December. P. 32–35.
495. Slope stability. U. S. army corps of engineers. Washington : Department of the army, 2003. 205 p. (Engineer manual).
496. Statistical methods for quality control of building materials and components : ISO 12491:1997(E). Geneva : ISO copyright office Case postale 56 1 CH-1211, 1997. 24 p. (International standard).
497. Stedinger J. R., Heath D. C., Thompson K. Risk analysis for dam safety evaluation: hydrologic risk. Ithaca : Cornell university, 1996. 81 p. (For U. S. army corps of engineers, Institute for water resources).
498. Su H. Z., Hu J., Wen Z. P. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit–cost ratio using a life quality index. *Natural hazards*. 2013. Vol. 65. Issue 1. P. 799–817.

499. Tschuchnigg F., Schweiger H. F., Sloan S. W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity. *Computers and geotechnics*. 2015. Vol. 70. P. 169–177.
500. Wei W. B., Cheng Y. M., Li L. Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods. *Computers and geotechnics*. 2009. Vol. 36. №. 1-2. P. 70–80.
501. Westberg M. Reliability-based evaluation of concrete dams : licentiate thesis, Citation for published version (APA). Sweden : Lund, 2007. 210 p.
502. Westberg M. Reliability-based assessment of concrete dam stability : doctoral thesis. Sweden : Lund, 2010. 144 p.
503. Westberg M., Johansson F. Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet. Bakgrundsbeskrivning till framtagande av ”Probabilistic model code for concrete dams”. Sweden : Energiforsk, 2016. 50 p.
504. Workshop on Hydrologic Research Needs for Dam Safety. U. S. Army Corps of Engineers. Davic : Hydrologic Engineering Center, 2001. 179 p. (Engineering and design).



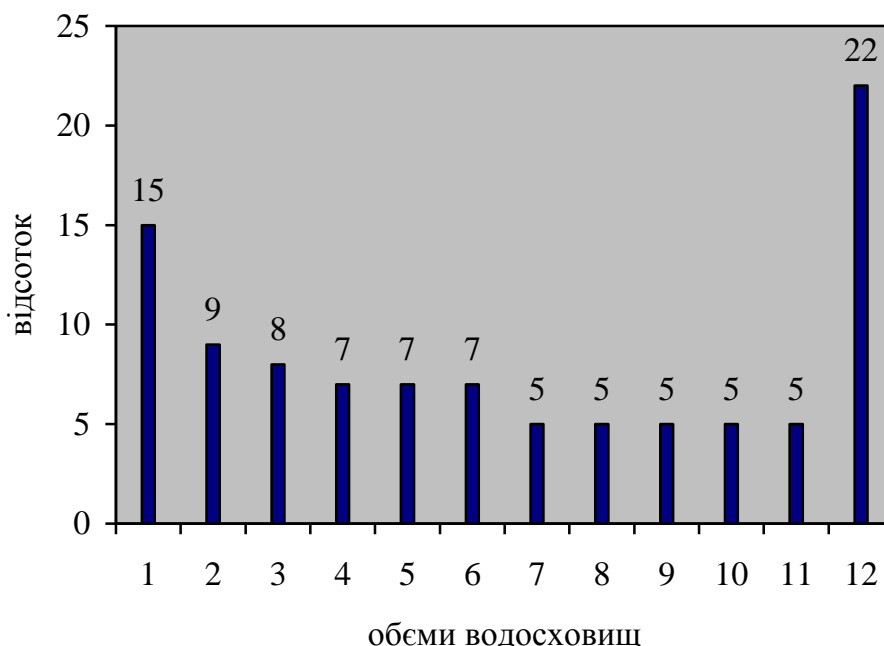


Рис. А.1. Об'єми водосховищ, греблі яких зазнали відмови у роботі:

1 – водосховища об'ємом до 1,0 млн. м<sup>3</sup>; 2 – об'ємом 40,0 – 100,0 млн. м<sup>3</sup>; 3 – об'ємом 100,0 – 1000,0 млн. м<sup>3</sup>; 4, 5, 6 – об'ємом 8,0 – 16,0 млн. м<sup>3</sup>, 16,0 – 20,0 млн. м<sup>3</sup>, 20,0 – 40,0 млн. м<sup>3</sup> відповідно; 7, 8, 9, 10, 11 – об'ємом 1,0 – 2,0 млн. м<sup>3</sup>, 2,0 – 3,0 млн. м<sup>3</sup>, 3,0 – 4,0 млн. м<sup>3</sup>, 4,0 – 8,0 млн. м<sup>3</sup>, 1000,0 – 8,0 млрд. м<sup>3</sup> відповідно; 12 – інші

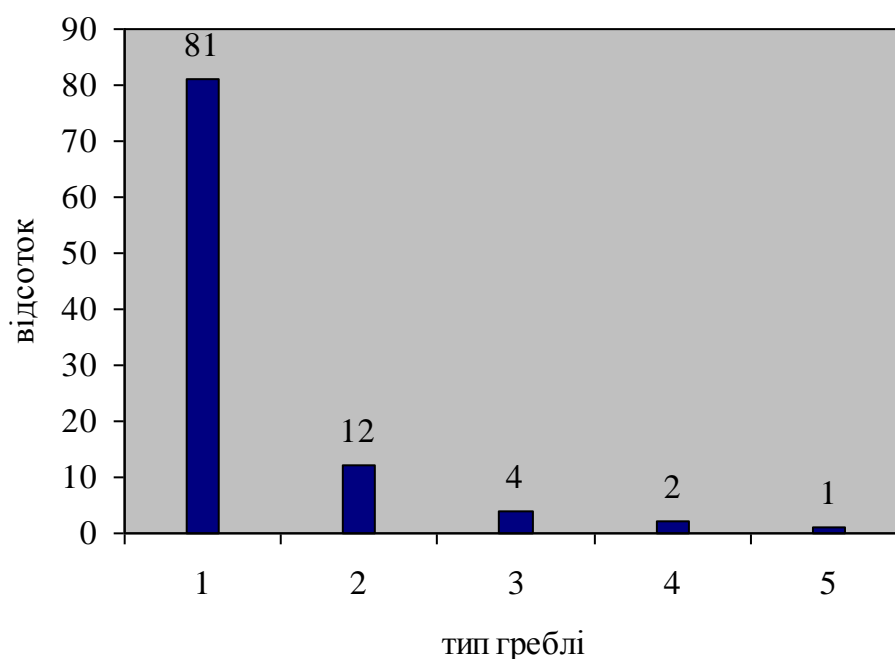


Рис. А.2. Аварії і пошкодження гребель в залежності від конструкції і матеріалу тіла греблі: 1 – греблі із ґрунтових матеріалів; 2 – бетонні гравітаційні греблі; 3 – бетонні контрфорсні греблі; 4 – бетонні аркові греблі; 5 – бетонні багатоаркові греблі

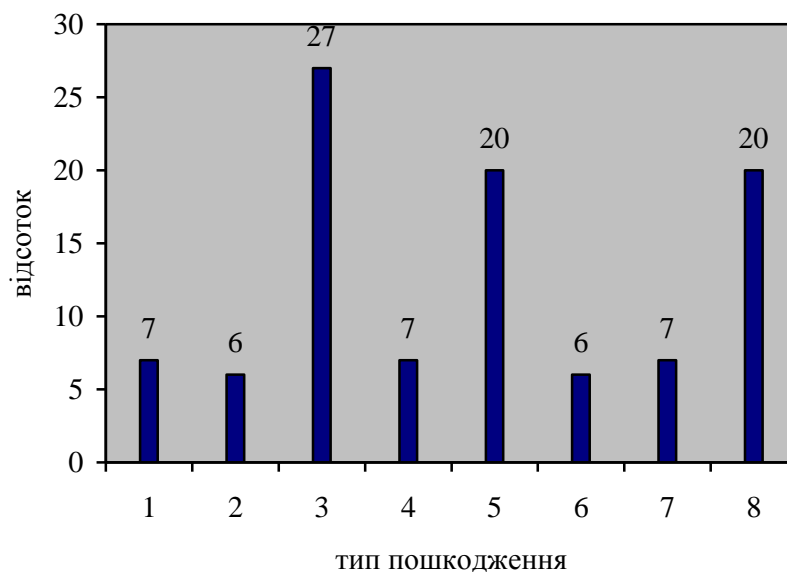


Рис. А.3. Первинні чинники пошкоджень бетонних гребель:

1 – помилки при проектуванні; 2 – недостатня дослідженість основи;  
 3 – перевищення силою зсуву розрахункової величини; 4 – надмірна фільтрація у  
 грунтах основи; 5 – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 6 – старіння бетону;  
 7 – переповнення водосховища стихійного характеру; 8 – пошкодження стоянів  
 стихійного характеру

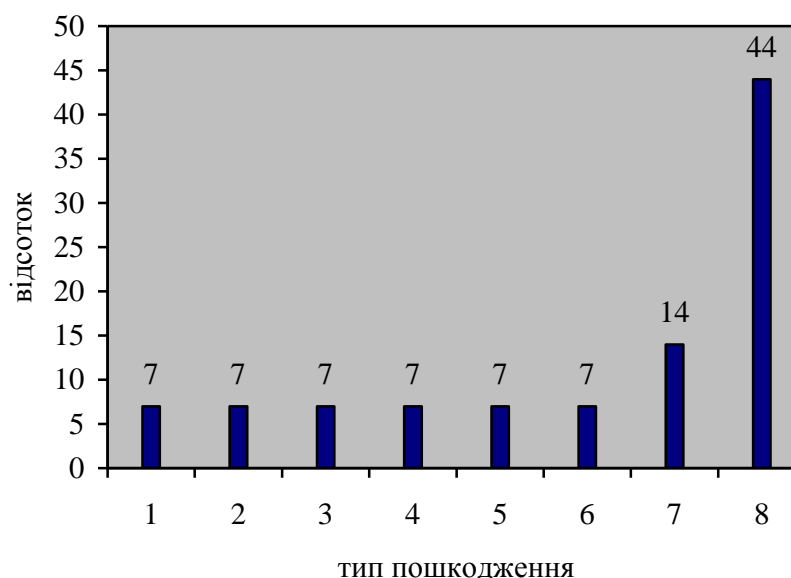


Рис. А.4. Вторинні чинники пошкоджень бетонних гребель: 1 – помилки при  
 проектуванні; 2 – надмірна фільтрація у грунтах основи; 3 – надмірні розтягуючі  
 напруження у верховому укосі; 4 – недостатній опір бетону циклічному  
 "заморожуванню – відтаненню"; 5 – надмірна водопроникність бетону;  
 6 – порушення структурної міцності ґрунтів основи аркових і багатоаркових  
 гребель; 7 – надмірні розтягуючі напруження в тілі гравітаційних і контрфорсних  
 гребель; 8 – інші.

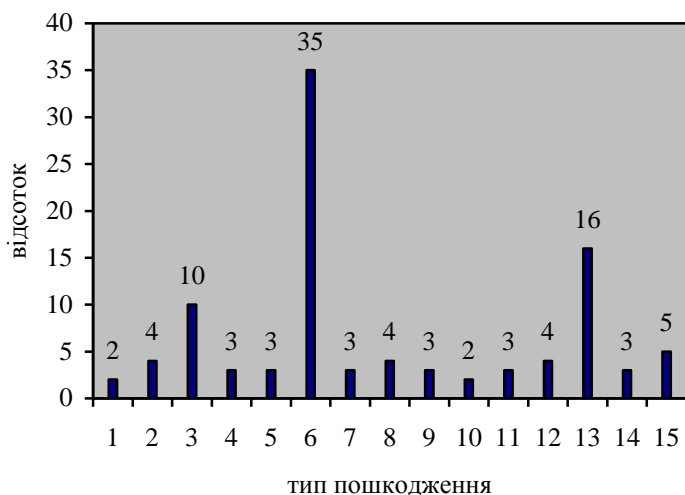


Рис. А.5. Первинні чинники пошкоджень земляних і кам'яно-накидних гребель:  
 1 – деформування і випір основи; 2 – надмірна фільтрація у ґрунтах основи;  
 3 – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 4 – невдала компоновка гідровузла;  
 5 – землетрус; 6 – перелив води через гребінь греблі стихійного характеру;  
 7 – прорив напірного фронту розташованої вище греблі; 8 – руйнування конструкції греблі;  
 9 – зміщення участків тіла греблі; 10 – кріплення укосів греблі;  
 11 – розкриття тріщини; 12 – просочування води крізь тіло греблі; 13 – надмірна фільтрація;  
 14 – прорив трубопроводу у тілі греблі; 15 – особливості рел'єфу місцевості; порушення суцільності конструкційних матеріалів тіла греблі;  
 руйнування структурних елементів тіла греблі; текучість водонасиченого матеріалу тіла греблі;  
 навмисне руйнування греблі на локальній ділянці для запобігання переповнення водосховища

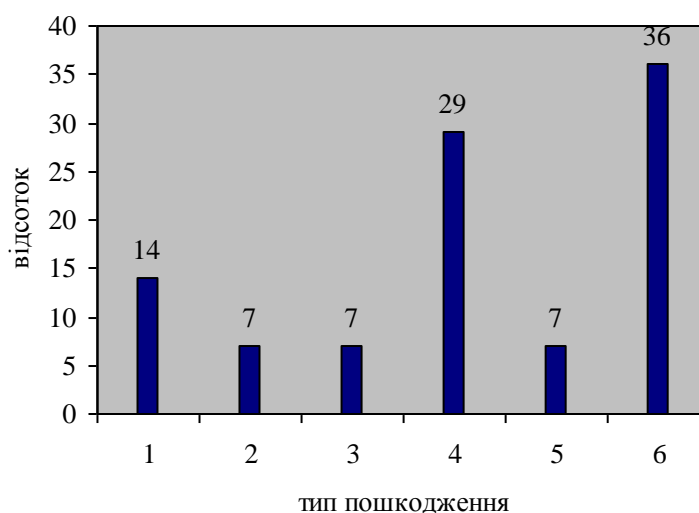


Рис. А.7. Чинники пошкоджень гребель із кам'яної кладки: 1 – прорив напірного фронту розташованої вище греблі; 2 – перевищення силою зсуву розрахункової величини; 3 – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; 4 – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 5 – перевищення протитиску стихійного характеру; 6 – перелив води через гребінь греблі стихійного характеру

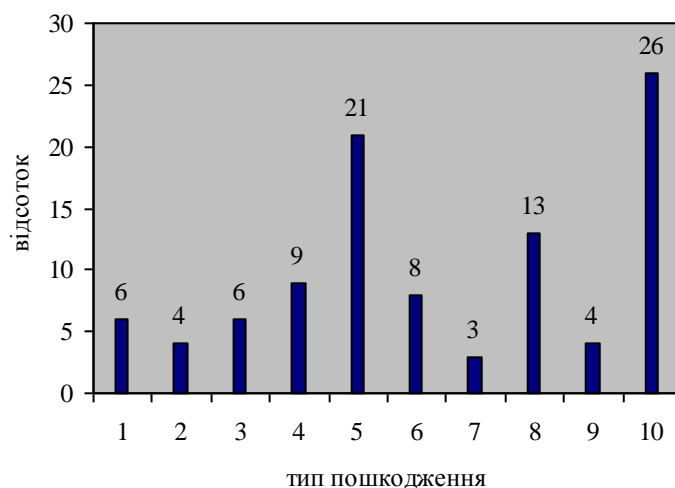


Рис. А.6. Вторинні чинники пошкоджень земляних і кам'яно-накидних гребель:  
 1 – деформування і випір основи; 2 – перевищення силою зсуву розрахункової величини;  
 3 – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 4 – атмосферний вплив; 5 – перелив води через гребінь греблі стихійного характеру; 6 – розкриття тріщини; 7 – просочування води крізь тіло греблі; 8 – надмірна фільтрація; 9 – руйнування низового укосу; 10 – надмірна фільтрація у ґрунтах основи; силовий вплив на греблю; зсуви ґрунту біля греблі; розмивання глини тіла греблі; вимивання піска з тіла греблі; особливості рел'єфу місцевості; гідростатичний тиск, наноси, льод; руйнування поблизу греблі; пошкодження ядра греблі; порушення суцільності конструкційних матеріалів тіла греблі; кріплення укосів греблі; надмірне навантаження, тріщини, гідравлічні фактори; текучість водонасиченого матеріалу тіла греблі (кожен фактор поз.10 складає ~2%)

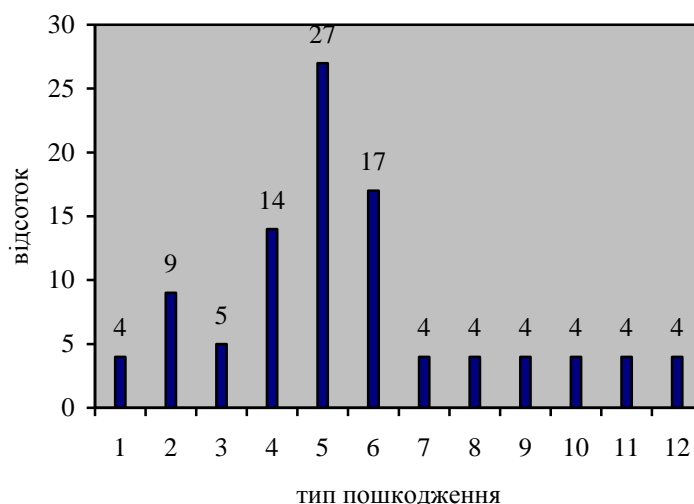


Рис. А.8. Первинні чинники пошкоджень водопровідних пригребельних споруд:  
 1 – пошкодження тунелів або каналів; 2 – надмірна деформація і осідання ґрунтів основи;  
 3 – внутрішня ерозія ґрунтів основи; 4 – порушення структурної міцності водоскиду;  
 5 – недостатня пропускна спроможність водоскиду; 6 – ерозія основи водоскиду;  
 7 – порушення структурної міцності тунелів або каналів; 8 – надвисокі швидкості течії;  
 9 – хвильовий вплив; 10 – відмова водопропускної системи; 11 – неадекватне керування механічним обладнанням; 12 – відмова механічного обладнання

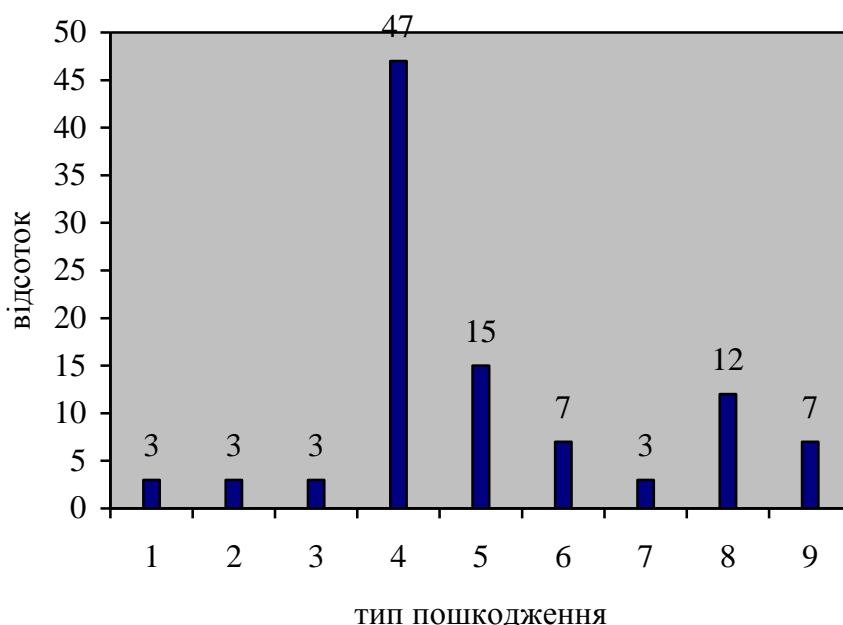


Рис. А.9. Вторинні чинники пошкоджень водопровідних пригребельних споруд:  
 1 – надмірна деформація і осідання ґрунтів основи; 2 – впливи механічного характеру; 3 – порушення структурної міцності водоскиду; 4 – недостатня пропускна спроможність водоскиду; 5 – надвисокі швидкості течії; 6 – суфозія; 7 – потрапляння плаваючих тіл; 8 – відмова водопропускної системи; 9 – відмова механічного обладнання

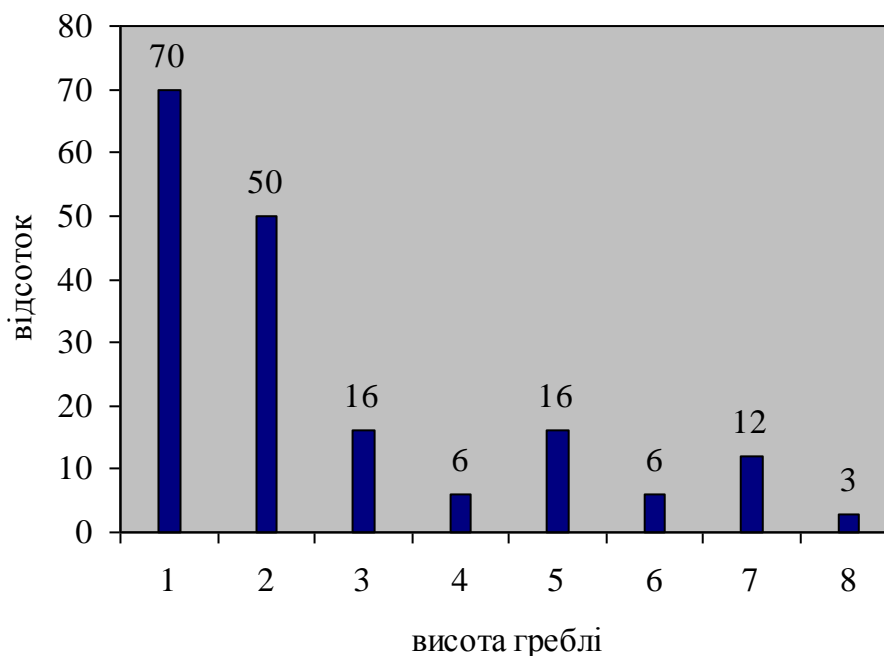


Рис. А.10. Відсоток відмов гребель в залежності від висоти: 1 – для гребель заввишки не більше 30 м; 2 – заввишки 15–20 м; 3 – заввишки 20–25 м; 4 – заввишки 25–30м, 5 – заввишки 30–35м, 6 – заввишки 40–45м; 7 – заввишки 45–50м; 8 – заввишки 55–60м

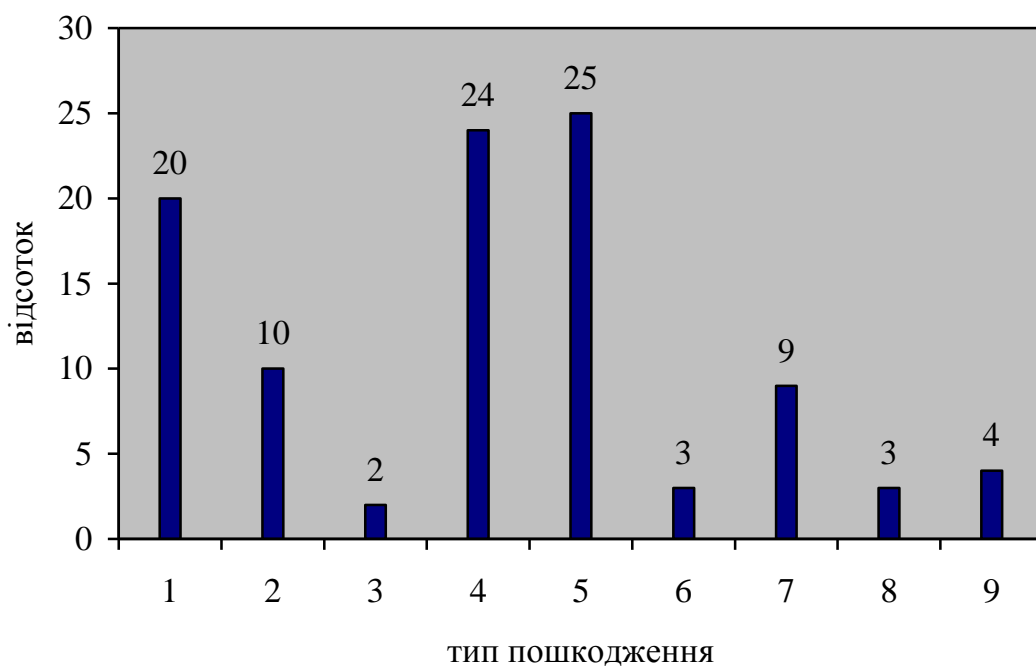


Рис. А.11. Чинники руйнувань і пошкоджень насипних гребель: 1 – ерозія у місцях контакту з водопроводящою трубою, безпосередньо у трубі або на виході з неї; 2 – відмова мембрани; 3 – відмова глинистого екрану; 4 – перелам ядра; 5 – неадекватний дренаж; 6 – суфозія ґрунту основи; 7 – неякісна підготовка основи; 8 – військові дії; 9 – інші чинники



Рис. А.12. Проран в тілі греблі Сент Френсіс (США, 1928 рік)



Рис. А.13. Перелив води через гребінь греблі Вайонт, оповзень у водосховище (Італія, 1963 рік)



Рис. А.14. Гребля Дніпрогес після підриву (Україна, 1941 рік)



Рис. А.15. Проран на греблі Тітон (США, 1976 рік)

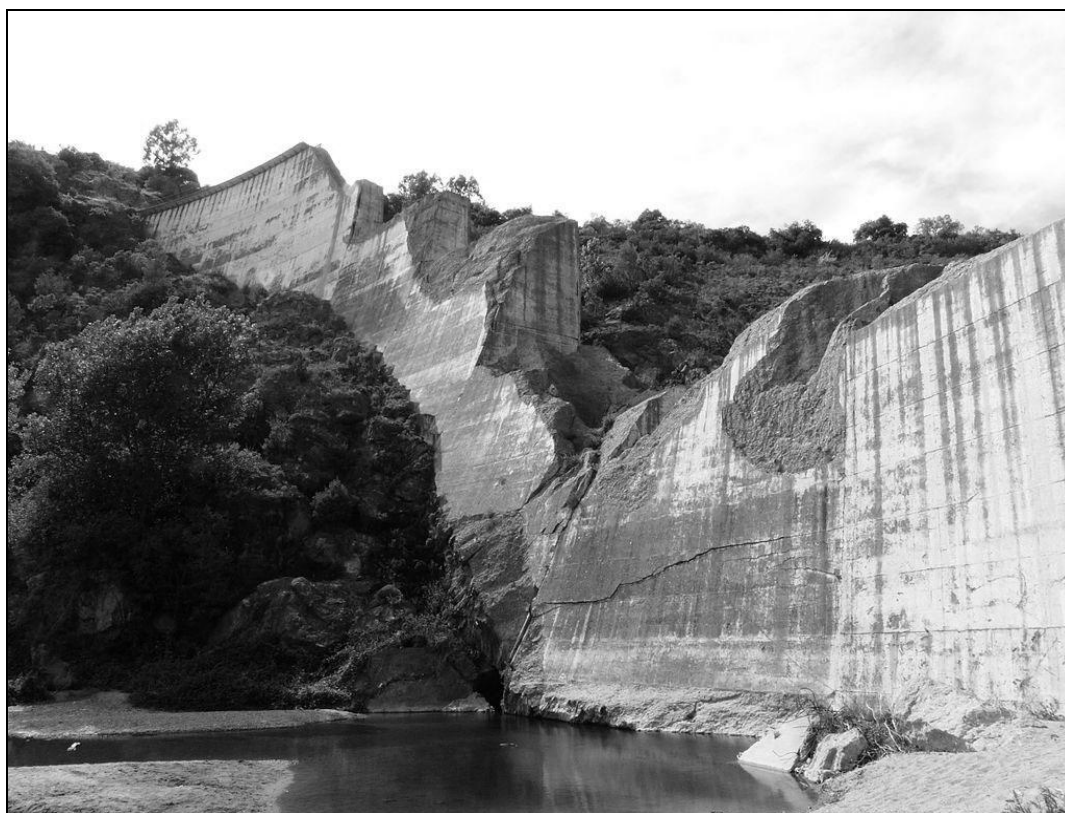


Рис. А.16. Зсув берегового примикання греблі Мальпассе (Франція, 1959 рік)



Статистичні дані щодо найбільших за кількістю людських жертв аварій  
гідротехнічних споруд [261]

Гідровузол, країна	Висота, (м)	Рік аварії	Основні чинники аварії	Кількість жертв
1	2	3	4	5
Дейл Дайк (Англія)	29.0	1864	Перелив води через гребінь, повінь	238
Саус Форк (США)	21.5	1889	Перелив води через гребінь, повінь	2500
Аустін (США)	15.2	1911	Зсув по основі	100
Глено (Італія)	52.0	1923	Зсув по основі	500
Сент Френсіс (США)	62.6	1928	Хімічна суфозія	400
Дніпрогес (Україна)	60.0	1941	Підрив греблі	1500
Мальпассе (Франція)	66.0	1959	Зсув берегового примикання	423
Оруш (Бразилія)	54.0	1960	Перелив води через гребінь, відмова водоскиду	1000
Вайонт (Італія)	262.0	1963	Перелив води через гребінь, оповзень у водосховище	2600
Семпор (Індонезія)	54.0	1967	Перелив води через гребінь, відмова водоскиду	200
Буфало Крік (США)	32.0	1972	Перелив води через гребінь, повінь	125
Баньцяо (Китай)	118.0	1975	Перелив води через гребінь, повінь	26000
Тітон (США)	93.0	1976	Контактна суфозія, грубі помилки проекту	11
Мачху–II (Індія)	26.0	1979	Перелив води через гребінь, відмова затвору водоскиду	2000
Тірлянське водосховище, Башкірія (Росія)		1994	Прорив греблі	29

## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5
Пасні (Пакистан)	150	2005	Прорив греблі, повінь	135
Киадат (В'єтнам)		2007	Прорив греблі	35
Саяно– Шушенська гідроелектростанція (Росія)	245	2009	Аварія у машинній залі гідроелектростанції	75
Кизилагаш (Казахстан)	40	2010	Перелив води через гребінь, повінь	43
Угорщина		2010	Прорив дамби	2 загиблих, 7 зниклих безвісті, 120 звернулись за медичною допомогою
Каліфорнія, США, Оровільська гребля	235	2017	Пошкодження водозливу	Евакуація 180 000

## Додаток Б

Таблиця Б.1

Статистичні дані про землетруси Кримсько-Чорноморського регіону, району Карпат і району Вранча

№ з/п	Рік	Район спостереження	Бали землетрусів							Джерело інформації
			IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1578	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
2	1596	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
3	1598	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
4	1619	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
5	1620	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
6	1620	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[88]
7	1637	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
8	1637	Район Вранча	-	-	-	-	+	-	-	[88]
9	1638	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
10	1662	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[88]
11	1665	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
12	1670	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[88]
13	1675	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[88]
14	1681	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[88]
15	1701	Район Вранча	-	-	-	-	+	-	-	[88]
16	1738	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[88]
17	1754	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
18	1778	Карпатські гори	-	-	-	-	+	-	-	[307]
19	1779	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
20	1781	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
21	1781	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
22	1784	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[88]
23	1786	Карпатські гори	-	-	-	-	-	-	+*	[88]
24	1790	Карпатські гори	-	-	-	-	+	-	-	[307]
25	1790	Район Вранча	-	-	-	-	+	-	-	[88]
26	1791	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
27	1797	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
28	1802	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[88]
29	1802	Район Вранча	-	-	-	-	-	-	+	[5, 307]
30	1811	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
31	1815	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
32	1821	Карпатські гори	-	-	+	+	-	-	-	[307]
33	1821	Район Вранча	-	-	-	-	+	-	-	[88]
34	1822	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
35	1823	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
36	1823	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
37	1827	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
38	1829	Карпатські гори	-	-	-	-	-	+	-	[307]
39	1829	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[307]
40	1830	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88]
41	1832	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
42	1832	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
43	1834	Карпатські гори	-	-	-	-	+	-	-	[307]
44	1835	Кримські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
45	1835	Карпатські гори	-	-	-	-	+	-	-	[307]
46	1836	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
47	1838	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
48	1838	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[307]

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
49	1842	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
50	1843	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
51	1849	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
52	1853	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
53	1855	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
54	1857	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
55	1863	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
56	1864	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
57	1865	Кримські гори	-	-	-	-	-	+	-	[307]
58	1865	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
59	1865	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[307]
60	1866	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
61	1869	Кримські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
62	1870	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
63	1872	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
64	1872	Карпатські гори	-	-	-	-	+	-	-	[307]
65	1873	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
66	1875	Кримські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
67	1875	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
68	1877	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
69	1878	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
70	1878	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
71	1879	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
72	1884	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
73	1885	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
74	1888	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
75	1890	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
76	1890	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
77	1892	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
78	1893	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
79	1893	Карпатські гори	-	-	-	-	+	-	-	[307]
80	1894	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
81	1894	Район Вранча	-	-	-	-	-	-	+	[307]
82	1895	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
83	1897	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
84	1897	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
85	1898	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
86	1898	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
87	1899	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
88	1900	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
89	1901	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
90	1901	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
91	1902	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
92	1902	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
93	1903	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
94	1903	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
95	1903	Район Вранча	-	-	+	-	-	-	-	[307]
96	1904	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
97	1904	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
98	1906	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
99	1906	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
100	1907	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
101	1908	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
102	1908	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
103	1908	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[5, 307]
104	1910	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
105	1912	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[88, 307]
106	1913	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
107	1914	Карпатські гори	-	-	-	+	-	-	-	[88, 307]
108	1914	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[5]
109	1916	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[5]
110	1917	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[5]
111	1919	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
112	1919	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[5]
113	1921	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[307]
114	1923	Кримські гори	-	-	-	+	-	-	-	[307]
115	1923	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
116	1926	Карпатські гори	-	-	-	-	-	+	-	[5]
117	1927	Кримські гори	-	-	-	-	-	+	-	[5]
118	1927	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[307]
119	1928	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[5]
120	1929	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[5]
121	1931	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
122	1932	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[88, 307]
123	1932	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[5]
124	1934	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[5]
125	1934	Район Вранча	-	-	-	-	-	+	-	[88, 307]
126	1935	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[5]
127	1936	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]
128	1937	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[307]





## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
156	1965	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[81, 139]
157	1965	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[94]
158	1965	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[94]
159	1966	Кримські гори	-	-	-	+	-	-	-	[81, 140]
160	1966	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[144]
161	1966	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[144]
162	1967	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[80–81]
163	1967	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[145]
164	1967	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[145]
165	1968	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[82]
166	1968	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[146]
167	1968	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[146]
168	1969	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[83]
169	1969	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[147]
170	1969	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[147]
171	1970	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[95]
172	1970	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[95, 148]
173	1970	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[95, 148]
174	1971	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[95]
175	1971	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[95, 149]
176	1971	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[95, 149]
177	1972	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[95]
178	1972	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[95, 150]
179	1972	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[95, 150]
180	1973	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[84]

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
181	1973	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[84, 151]
182	1973	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[84, 151]
183	1974	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[84]
184	1974	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[84, 308]
185	1974	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[84, 136]
186	1975	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[85]
187	1975	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[152]
188	1975	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[152]
189	1976	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[246]
190	1976	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[136]
191	1976	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[136]
192	1977	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[107]
193	1977	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[108]
194	1977	Район Вранча	-	-	-	+	-	-	-	[108]
195	1978	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[286]
196	1978	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[109]
197	1978	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[109]
198	1979	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[287]
199	1979	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[153]
200	1979	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[153]
201	1980	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[288]
202	1980	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[154]
203	1980	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[154]
204	1981	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[289]
205	1981	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[110]
206	1981	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[110]



## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
234	1996	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[299]
235	1996	Карпатські гори	-	-	+	-	-	-	-	[115]
236	1996	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[115]
237	1998	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[300]
238	1998	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[116]
239	1998	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[116]
240	1999	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[301]
241	1999	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[117]
242	1999	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[117]
243	2000	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[302]
244	2000	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[118]
245	2000	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[118]
246	2001	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[303]
247	2001	Карпатські гори	+	-	-	-	-	-	-	[119]
248	2001	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[119]
249	2002	Кримські гори	+	-	-	-	-	-	-	[304]
250	2002	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[120]
251	2002	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[120]
252	2003	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[305]
253	2003	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[121]
254	2003	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[121]
255	2004	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[306]
256	2004	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[122]
257	2004	Район Вранча	-	-	+	-	-	-	-	[122]
258	2005	Кримські гори	-	-	+	-	-	-	-	[124]
259	2005	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[123]
260	2005	Район Вранча	-	+	-	-	-	-	-	[123]

## Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
261	2006	Кримські гори	-	+	-	-	-	-	-	[126]
262	2006	Карпатські гори	-	+	-	-	-	-	-	[125]
263	2006	Район Вранча	+	-	-	-	-	-	-	[125]

Примітка: \* - землетрус силою більше 10 балів за шкалою MSK-64

I, бали

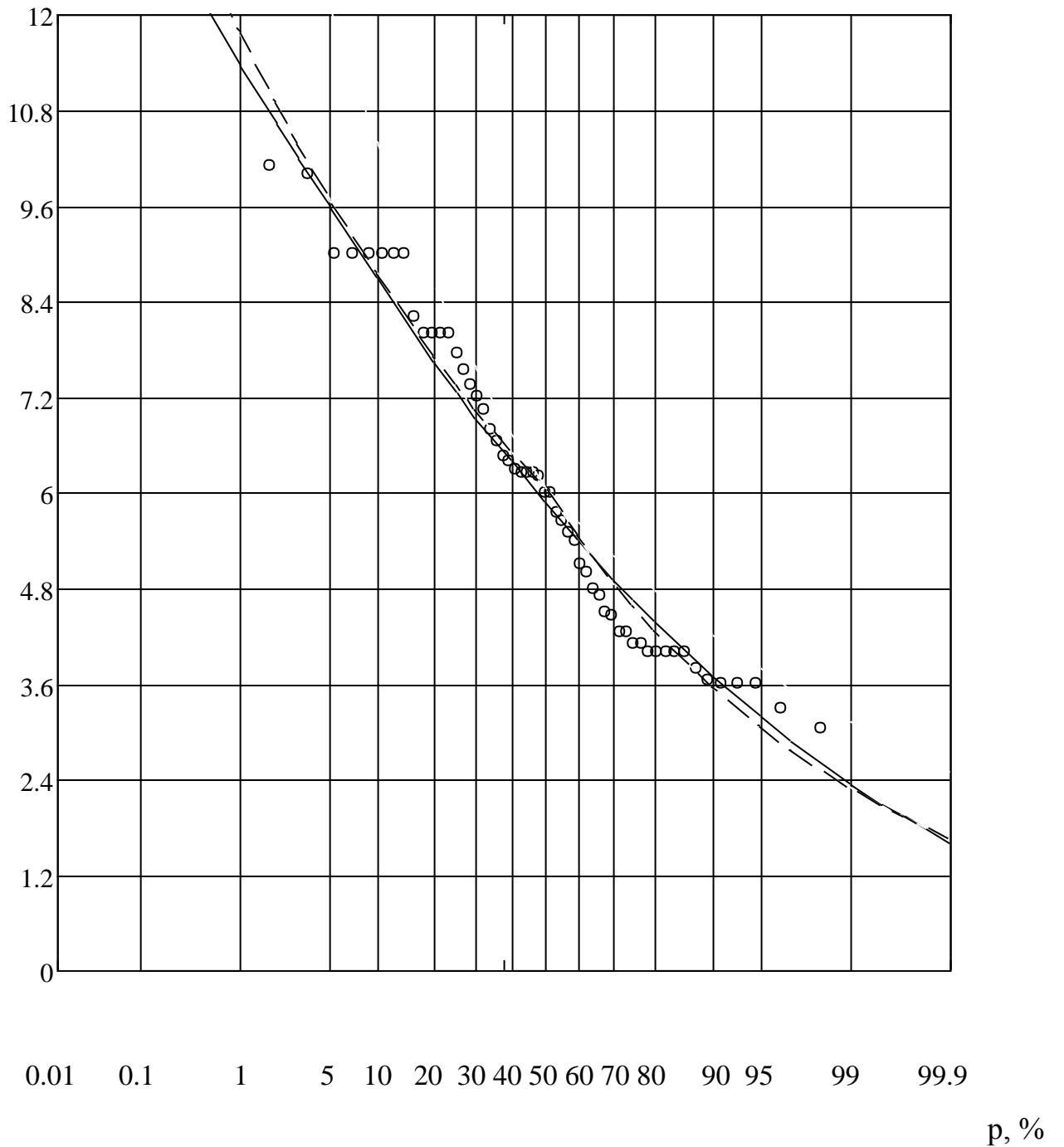


Рис. В.1. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної бальності землетрусів Карпатських гір в районі Вранча за період спостережень з 1578 р. по 2009 р.: ..... – зафіксована бальність,  
 ————— – трьохпараметричний гамма-розподіл,  
 - - - - - – логарифмічно-нормальний розподіл.

I, бали

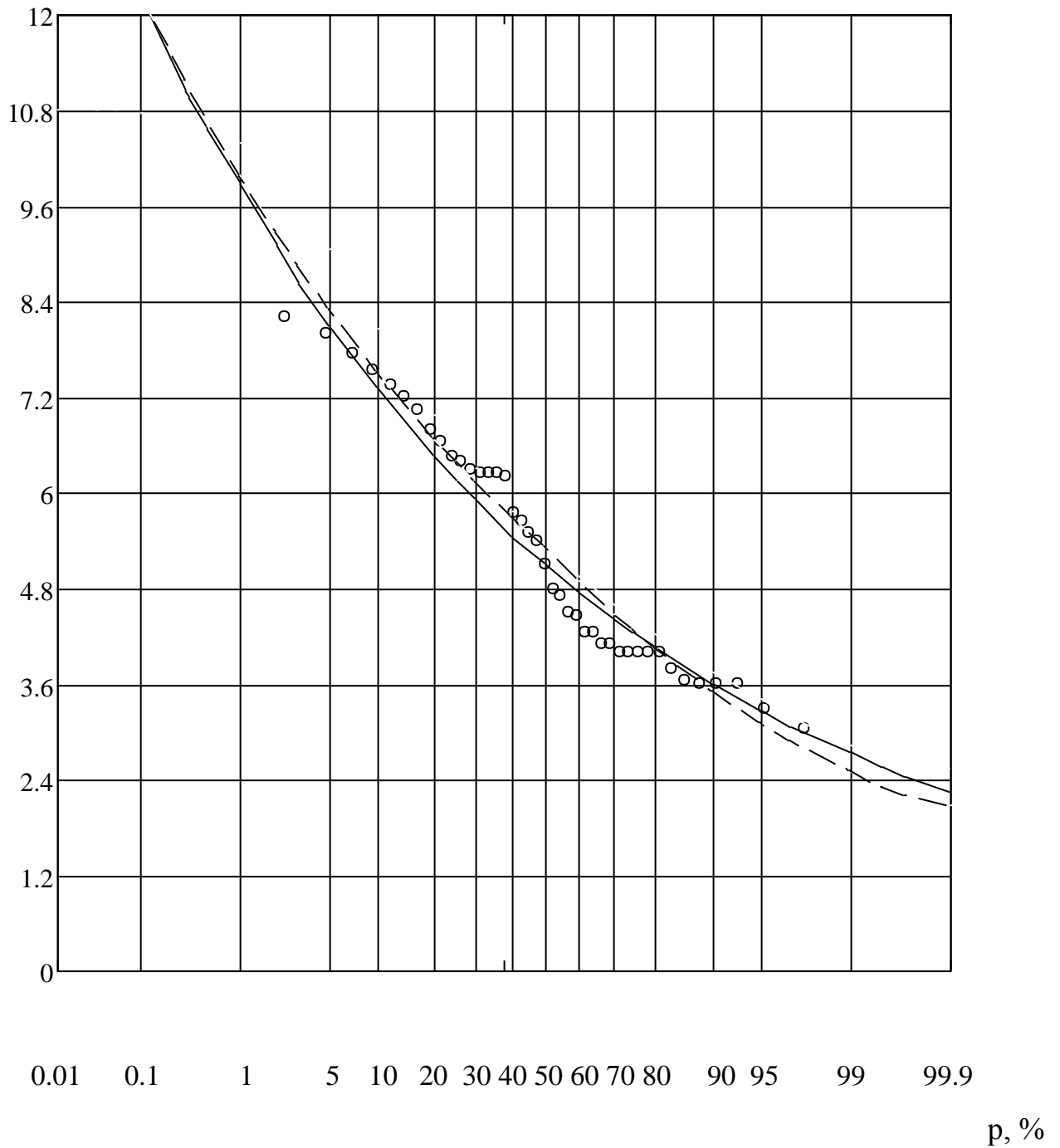


Рис. В.2. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної бальності землетрусів Карпатських гір в районі Вранча за період спостережень з 1908 р. по

2009 р.: ○○○○○○○○○○ – зафіксована бальність,

————— – трьохпараметричний гамма-розподіл,

- - - - - – логарифмічно-нормальний розподіл.

I, бали

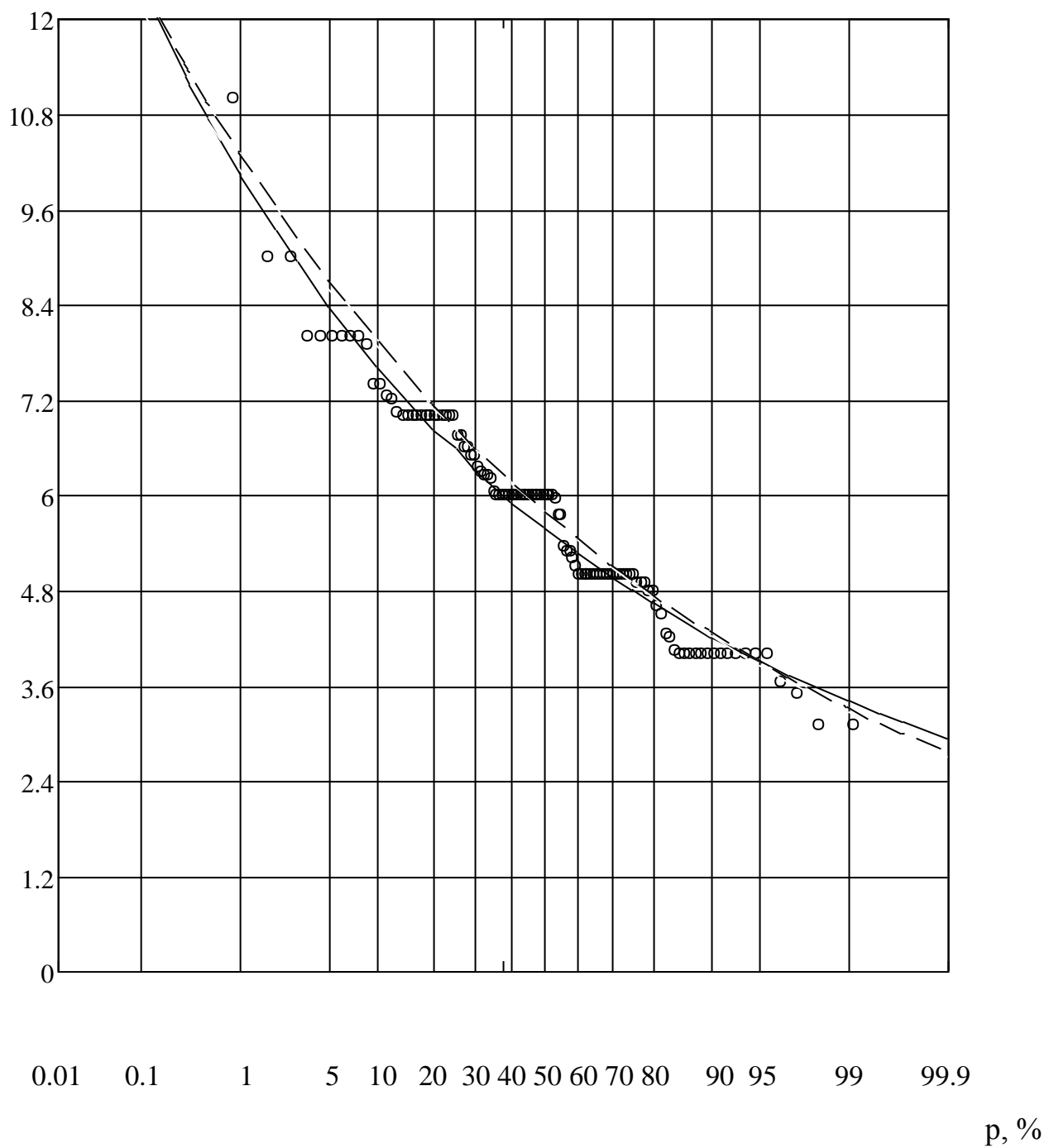


Рис. В.3. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної бальності землетрусів Карпатських гір за період спостережень з 1578 р. по 2009 р.:

- ..... – зафіксована бальність,
- – трьохпараметричний гамма-розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.



I, бали

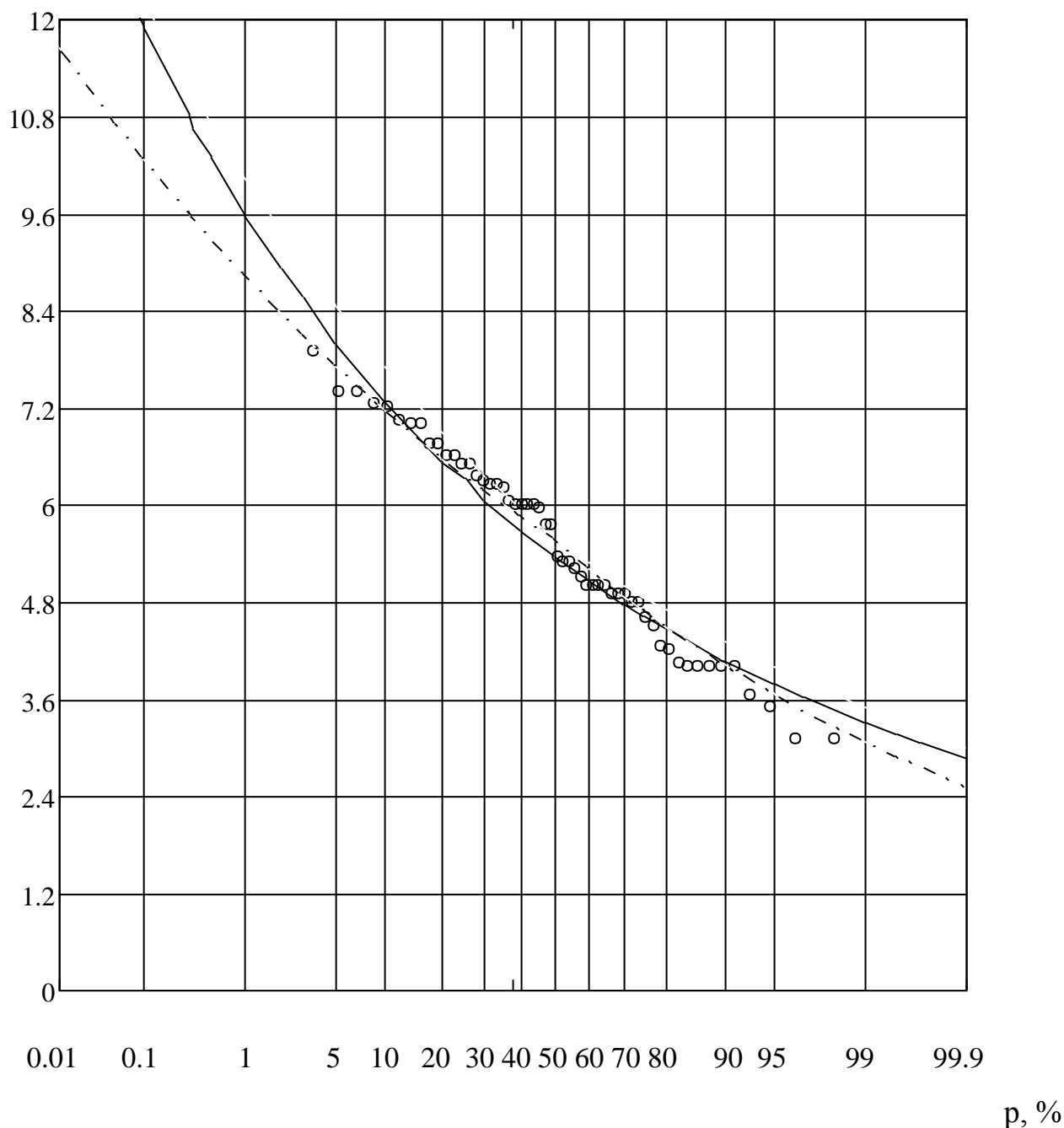


Рис. В.4. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної бальності землетрусів Карпатських гір за період спостережень з 1908 р. по 2009 р.:

- ..... – зафіксована бальність,
- – трьохпараметричний гамма-розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.

I, бали

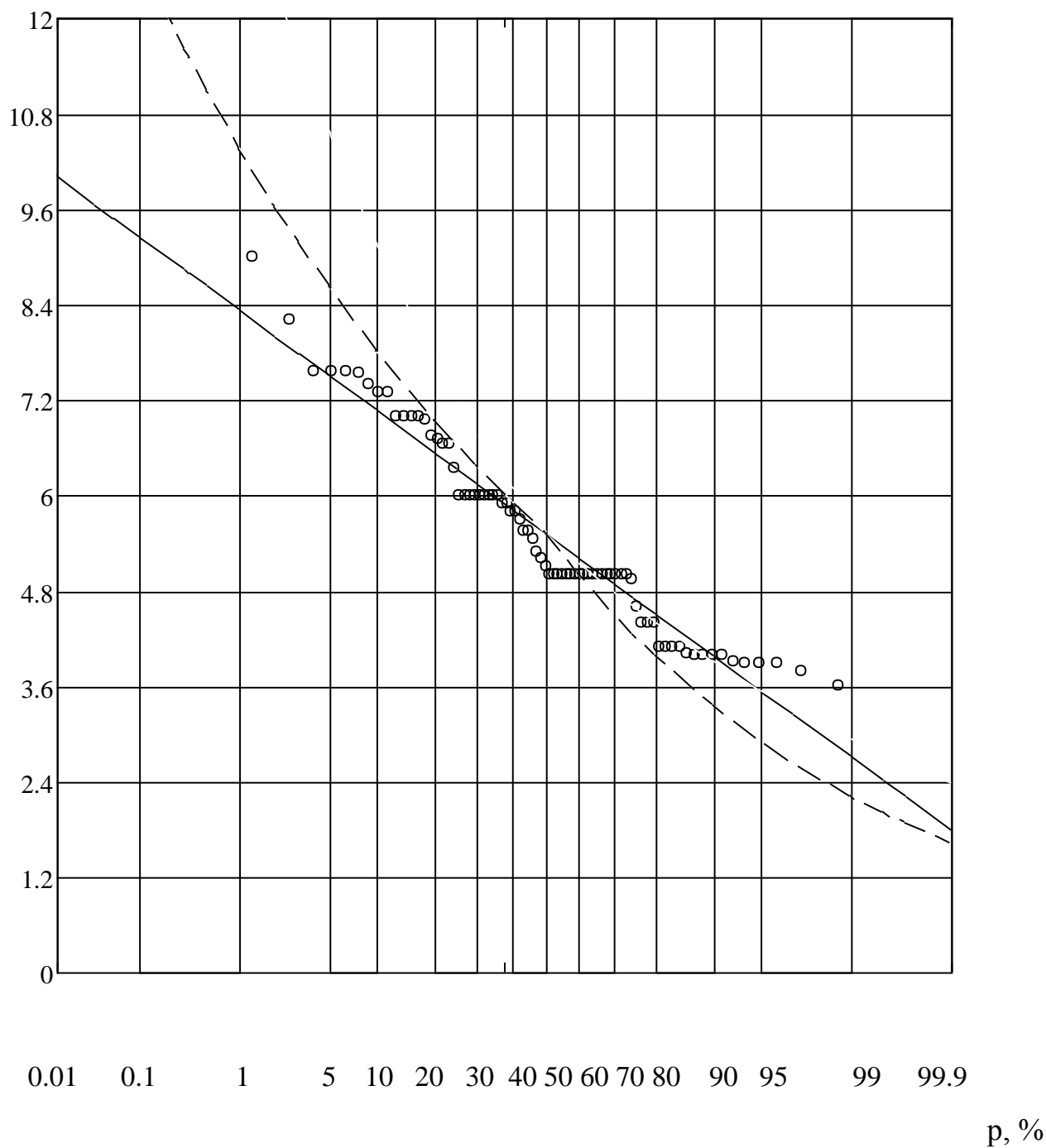


Рис. В.5. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної бальності землетрусів Криму за період спостережень з 1578 р. по 2009 р.:

- ..... – зафіксована бальність,
- – трьохпараметричний гамма-розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.



Таблиця Г.1

Статистичні дані про середні місячні температури повітря по м. Київ за багаторічний період (за даними Центральної Геофізичної Обсерваторії)

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1812	-	-4.4	-0.4	4.9	12.7	18.2	21.2	19.8	13.6	10.6	1.8	-9.4	-
1813	-9.6	-2.4	-0.3	9.1	14.4	16.2	18.8	18.2	14.9	7.6	6.3	-2.8	7.5
1814	-2.4	-8.4	0.7	8.6	11.9	17.3	21.6	19.8	13.4	6.2	-0.2	0.4	7.4
1815	-10.8	-3.1	-1.7	6.7	14.6	18.0	17.6	18.4	13.1	7.6	3.5	-6.6	6.4
1816	-2.6	-7.0	3.0	7.2	13.6	19.7	18.5	17.9	15.7	6.9	4.4	-4.8	7.7
1817	-1.9	-0.4	2.7	4.8	13.6	18.8	20.6	22.7	13.5	4.9	1.1	-2.2	8.2
1818	-3.1	-0.8	4.0	9.8	12.2	15.4	19.4	19.6	14.5	9.0	2.4	-6.3	8.0
1819	-2.4	-4.4	1.6	9.5	13.3	20.0	19.7	20.7	17.6	12.4	3.3	-7.8	8.6
1820	-7.0	-5.5	-2.1	8.7	14.3	16.5	17.1	20.0	14.7	9.2	1.6	-6.2	6.8
1821	-2.1	-4.5	-3.3	10.1	16.5	16.0	19.0	17.2	13.3	8.3	2.6	0.4	7.8
1822	-2.6	-1.7	3.8	10.3	14.1	15.4	21.0	17.0	12.2	8.4	1.8	-3.8	8.0
1823	-12.1	-5.0	2.1	5.1	12.4	18.3	18.8	18.6	12.7	8.4	2.6	0.7	6.9
1824	-3.5	-2.4	3.4	6.7	11.4	14.7	16.7	18.2	16.3	8.4	2.8	1.9	7.9
1825	-3.3	-5.6	-5.0	3.4	11.3	15.8	15.3	15.8	12.4	6.4	5.0	-1.6	5.8
1826	-8.9	-6.3	-0.8	4.2	11.9	15.8	20.9	17.2	13.4	7.2	2.2	0.3	6.4
1827	-2.0	-6.0	1.5	6.9	13.4	18.7	18.9	18.0	11.4	7.3	-0.6	-2.8	7.1
1828	-11.2	-10.3	0.4	6.0	11.9	18.3	18.9	14.9	10.2	6.7	-0.1	-7.0	4.9
1829	-11.6	-7.6	-2.6	7.2	10.5	14.8	19.7	17.2	14.7	4.9	-2.9	-10.9	4.5
1830	-11.5	-7.7	-2.3	6.6	13.7	18.2	15.7	20.8	11.8	5.4	1.6	-0.5	6.0
1831	-8.6	-4.9	-2.3	7.1	12.4	15.7	17.2	16.4	11.6	7.0	-0.6	-6.5	5.4
1832	-6.8	-5.0	-3.7	3.8	12.4	13.5	14.9	16.1	10.5	6.4	-3.7	-8.7	4.1
1833	-7.7	-2.8	-0.8	5.7	12.8	19.6	17.6	13.1	11.7	4.7	-0.1	-3.0	5.9
1834	-5.6	-7.3	0.3	4.6	15.9	17.3	21.0	20.6	15.4	7.5	1.4	-2.9	7.4
1835	-4.8	-1.4	0.7	6.1	12.8	17.2	17.4	14.0	12.0	6.1	-4.2	-9.1	5.6
1836	-6.6	-3.1	5.2	9.3	10.5	15.6	17.3	16.3	12.4	10.5	-0.7	-1.5	7.1
1837	-5.8	-5.9	-0.7	9.2	13.8	14.9	15.9	19.7	14.4	6.5	1.9	-8.9	6.3
1838	-15.1	-6.2	-0.4	7.2	13.9	16.3	18.4	16.9	17.2	6.1	0.6	-3.9	5.9

## Продовження таблиці Г.1

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1839	-5.9	-5.0	-5.6	4.0	15.0	18.7	19.9	22.5	16.9	7.6	1.6	-10.2	6.6
1840	-4.8	-5.9	-2.0	4.0	11.4	16.0	20.6	17.2	16.4	6.0	1.3	-10.8	5.8
1841	-6.8	-12.2	-1.8	6.9	16.0	19.6	22.2	21.0	15.6	10.4	2.7	-1.7	7.7
1842	-11.4	-5.2	-0.3	4.0	13.9	17.1	18.3	18.2	13.8	6.9	0.6	-0.2	6.3
1843	-2.3	4.1	-0.2	7.4	9.9	18.2	17.3	18.6	11.7	7.9	1.7	-0.1	7.9
1844	-5.8	-1.7	-1.3	5.1	15.4	15.9	17.9	17.8	15.4	8.0	-1.4	-9.0	6.4
1845	-3.7	-9.2	-4.4	5.1	12.5	17.7	21.9	17.9	12.3	8.6	3.1	-1.1	6.7
1847	-9.8	-3.2	-0.2	8.8	14.0	18.2	18.6	20.6	15.8	7.9	1.8	-6.5	7.2
1851	-	-	-1.3	9.2	15.9	17.2	20.9	19.4	16.1	10.5	8.8	-0.3	-
1852	-2.9	-5.1	-1.3	2.8	12.6	19.6	17.0	18.2	14.2	7.2	2.6	-0.2	7.1
1853	-2.1	-2.9	-0.3	6.7	15.3	19.2	20.2	19.0	12.7	10.5	0.2	-5.3	7.8
1854	-7.0	-5.1	-2.7	6.0	17.3	15.8	19.9	21.5	13.7	8.9	2.7	-1.0	7.5
1855	-8.7	-7.4	0.9	9.0	17.6	21.9	21.6	19.2	12.2	10.7	0.8	-10.8	7.3
1856	-1.7	-4.2	-4.1	7.8	15.7	19.7	18.8	16.7	14.0	7.1	-1.4	0.1	7.4
1857	-3.6	-7.4	0.5	10.2	14.1	18.7	17.9	17.2	11.4	9.4	0.7	-0.7	7.4
1858	-7.4	-8.9	-2.0	5.3	15.2	17.6	22.4	19.7	14.6	11.0	-3.9	-4.0	6.6
1859	-3.8	-2.0	0.0	8.4	14.8	17.0	20.3	21.4	13.9	8.7	1.2	-4.0	8.0
1860	-3.3	-4.2	-4.8	7.4	14.4	19.0	19.7	19.8	15.0	6.5	-0.6	-4.4	7.0
1861	-14.6	-5.1	0.7	3.8	11.4	18.3	20.3	17.7	13.3	6.5	3.9	-6.1	5.8
1862	-12.1	-11.9	1.2	7.3	14.8	19.4	20.1	18.6	14.6	7.4	-4.3	-11.8	5.3
1863	-2.9	-1.9	1.9	4.6	15.9	16.8	17.8	19.0	17.7	8.0	3.1	-3.7	8.0
1864	-7.9	-4.0	3.0	6.6	9.0	19.6	17.4	16.5	13.9	5.2	-2.6	-8.7	5.7
1865	-3.5	-9.5	-3.5	5.4	15.2	13.7	21.5	18.0	11.5	7.4	2.5	-3.1	6.3
1866	-1.9	-5.5	3.6	8.4	12.7	19.5	19.2	17.8	17.3	3.4	0.4	-3.7	7.6
1867	-2.2	-3.2	-5.7	6.4	12.6	16.7	19.7	17.2	12.0	7.7	-1.5	-5.8	6.2
1868	-7.5	-6.7	-1.5	6.4	14.0	18.7	19.9	20.0	15.5	9.1	-0.8	-1.9	7.1
1869	-8.8	0.5	2.4	7.8	17.1	17.4	19.0	20.1	13.8	8.9	2.0	-1.5	8.2
1870	-4.1	-11.9	-2.3	6.4	13.8	16.1	18.9	16.8	11.0	5.4	5.4	-8.6	5.6
1871	-10.0	-10.6	-2.1	6.2	10.7	18.6	21.4	19.4	11.1	3.7	2.2	-4.4	5.5
1872	-3.6	-11.1	0.9	11.0	20.4	18.2	18.8	19.8	15.3	7.8	4.9	-2.3	8.3
1873	-1.2	-5.7	1.2	6.2	12.8	18.8	20.0	19.0	13.2	8.8	1.8	-0.8	7.8

## Продовження таблиці Г.1

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1874	-3.6	-4.8	-2.3	6.6	11.0	17.5	19.6	19.6	15.4	8.7	-0.2	0.6	7.3
1875	-5.9	-7.6	-7.3	3.0	13.5	21.6	20.5	18.8	11.2	4.9	-0.6	-10.9	5.1
1876	-9.3	-3.9	3.9	12.1	10.2	19.6	20.1	18.6	13.5	6.1	-2.9	-9.4	6.6
1877	-8.0	-5.2	-1.0	5.6	14.3	17.9	18.8	18.7	10.6	5.1	2.7	-4.7	6.2
1878	-7.5	-3.6	-0.6	8.8	13.1	18.6	16.6	19.0	16.2	11.1	4.9	-1.7	7.9
1879	-8.4	-1.9	-1.8	8.2	15.2	19.7	18.3	17.2	14.4	7.2	-0.4	-8.9	6.6
1880	-9.2	-8.4	-3.3	8.0	13.3	17.7	20.6	18.2	13.9	6.7	2.2	-2.9	6.4
1881	-9.9	-6.2	-2.2	4.4	14.1	16.9	19.6	18.1	12.3	4.6	0.4	-4.9	5.6
1882	-1.4	-2.5	4.4	7.6	15.3	16.1	22.7	18.4	14.5	4.6	0.5	-5.6	7.9
1883	-10.2	-7.7	-3.8	4.6	14.6	19.3	21.1	18.5	16.0	8.2	3.1	-3.7	6.7
1884	-3.5	-1.6	-2.6	4.1	13.9	18.2	19.6	15.5	12.1	7.4	-1.4	0.4	6.8
1885	-6.3	-3.4	0.0	9.0	13.0	19.0	22.8	16.1	14.3	10.3	-0.5	-3.5	7.6
1886	-4.0	-8.6	-3.9	8.2	15.2	17.3	17.9	18.7	13.7	5.5	3.2	0.9	7.0
1887	-4.3	-6.2	-0.9	6.3	16.2	13.9	18.8	16.9	15.5	5.9	2.9	-1.3	7.0
1888	-8.5	-9.7	-2.1	8.5	13.9	16.6	17.7	17.2	14.0	8.6	-0.8	-7.3	5.7
1889	-9.4	-3.9	-4.8	7.4	17.4	17.9	20.7	18.0	10.6	10.2	3.3	-6.2	6.8
1890	-4.0	-6.8	1.6	10.6	16.6	16.1	20.6	22.8	14.0	6.5	0.7	-11.9	7.2
1891	-9.0	-6.4	1.1	5.7	16.3	17.5	21.3	18.6	14.4	8.8	-2.5	-1.8	7.0
1892	-7.6	-2.3	-1.3	8.2	15.9	20.7	18.2	20.1	16.7	7.7	-1.0	-5.6	7.5
1893	-14.6	-5.2	-0.1	2.9	12.5	16.5	18.6	17.7	12.6	9.3	1.4	-2.9	5.7
1894	-8.1	-2.6	1.4	7.8	13.5	14.4	19.6	18.3	10.2	6.8	0.6	-3.9	6.5
1895	-2.0	-7.5	-1.7	5.7	13.6	17.0	20.1	18.8	12.8	9.0	1.9	-8.2	6.6
1896	-10.7	-5.1	-0.8	4.2	13.3	18.7	19.3	19.7	14.8	12.1	-1.4	-3.5	6.7
1897	-6.9	-3.9	1.1	9.6	17.4	18.5	21.8	20.3	14.6	7.1	-1.4	-5.1	7.8
1898	-2.9	-4.9	-4.4	5.2	16.4	16.0	18.2	19.4	12.0	4.9	3.5	0.7	7.0
1899	-0.3	-3.3	-0.3	8.5	14.3	14.9	19.0	16.0	14.4	7.6	3.4	-8.3	7.2
1900	-5.1	-3.2	-2.8	5.7	14.2	16.4	19.8	20.2	12.3	8.7	-0.3	-0.3	7.1
1901	-6.2	-6.4	0.5	6.9	14.6	21.6	20.1	19.6	12.2	7.8	0.7	0.0	7.6
1902	-0.4	-3.2	0.3	5.2	12.4	18.1	16.9	17.2	12.1	5.1	-3.7	-8.2	6.0
1903	-4.6	-0.2	3.8	8.3	14.5	19.0	20.0	18.6	15.1	5.8	2.9	-4.6	8.2
1904	-6.8	-1.3	-2.4	6.6	11.9	16.0	17.2	17.3	11.4	7.9	0.6	-1.2	6.4

## Продовження таблиці Г.1

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1905	-7.4	-3.5	-1.5	5.7	15.4	19.4	18.9	19.5	13.8	6.6	3.2	-2.4	7.3
1906	-3.7	-4.7	1.9	9.9	17.9	19.1	19.3	16.5	11.6	6.5	3.4	-2.9	7.9
1907	-7.7	-8.1	-2.5	4.8	16.8	17.2	17.8	17.2	14.4	10.9	-2.3	-6.0	6.0
1908	-4.7	-2.6	-1.7	5.4	14.2	17.2	19.0	17.4	13.2	5.4	-3.4	-7.2	6.0
1909	-8.9	-9.0	-1.6	4.9	12.3	17.8	19.3	19.9	18.4	10.8	1.5	-0.8	7.1
1910	-3.4	-1.0	1.4	8.3	16.2	19.9	19.0	16.9	13.5	5.7	2.0	-0.8	8.1
1911	-6.3	-10.8	-0.9	8.2	16.1	15.0	17.0	17.6	13.0	8.0	2.9	-4.1	6.3
1912	-8.8	-6.1	2.2	5.4	11.5	18.2	17.0	17.4	11.8	2.8	0.5	0.2	6.0
1913	-5.1	-4.1	4.2	10.4	12.2	15.4	17.7	19.0	14.1	7.3	4.1	0.2	8.0
1914	-5.0	0.7	3.9	8.2	15.7	18.0	20.0	16.8	11.5	5.6	-1.9	-1.4	7.7
1915	-2.7	-3.3	-3.0	7.9	13.8	18.1	20.0	16.6	12.2	6.2	0.9	-1.7	7.1
1916	-2.1	-2.5	0.9	8.7	12.2	16.8	18.6	16.5	12.2	7.7	1.7	-2.3	7.4
1917	-8.2	-11.0	-3.7	8.0	12.4	19.8	17.6	19.1	13.3	8.8	4.7	-3.9	6.4
1918	-2.5	-2.8	0.3	10.6	11.6	16.7	18.1	17.0	15.1	12.1	0.1	-2.9	7.8
1919	-4.6	-5.3	-0.6	9.4	10.4	16.1	18.8	16.2	17.0	6.7	-3.5	-3.7	6.4
1920	-4.6	-5.3	2.9	12.5	16.9	15.6	22.4	20.4	13.9	2.2	-2.5	-5.7	7.4
1921	-1.1	-6.5	4.8	10.6	16.6	17.9	19.6	19.8	11.8	7.9	-3.5	-5.9	7.7
1922	-8.6	-5.4	1.4	6.6	14.5	17.5	20.5	18.1	11.4	4.0	1.9	-1.7	6.7
1923	-2.6	-8.4	1.0	5.5	16.7	16.1	18.1	16.4	15.8	10.4	5.8	-3.5	7.6
1924	-11.8	-7.4	-3.5	5.3	17.7	21.3	18.2	18.6	16.9	8.1	0.5	-5.0	6.6
1925	-0.3	1.5	1.9	9.0	16.8	14.9	20.6	17.9	12.7	6.8	1.9	-4.2	8.3
1926	-5.8	-4.8	-1.9	8.6	15.0	17.5	20.1	15.5	12.6	7.6	6.1	-2.7	7.3
1927	-8.2	-6.4	1.7	7.3	12.7	19.7	20.4	20.3	16.6	8.9	1.5	-9.2	7.1
1928	-5.3	-7.9	-5.3	6.1	13.0	14.3	19.4	16.4	13.5	6.9	4.5	-2.6	6.1
1929	-8.8	-15.9	-4.6	2.0	16.7	15.4	19.0	22.8	12.3	11.8	3.3	-1.7	6.0
1930	-2.2	-3.9	2.3	9.0	14.5	17.0	17.8	18.8	13.0	9.0	4.0	-5.8	7.8
1931	-7.0	-9.9	-2.8	4.4	16.9	17.9	21.6	18.1	12.2	6.8	-0.3	-3.7	6.2
1932	-2.5	-10.3	-4.8	6.7	16.5	17.7	20.9	18.9	16.7	9.7	2.0	0.1	7.6
1933	-9.2	-5.2	-1.2	3.7	12.9	14.8	19.4	16.6	12.6	8.4	1.5	-9.4	5.4
1934	-6.4	-3.3	3.4	10.7	16.6	17.5	19.1	19.2	15.9	9.9	3.8	-6.8	8.3
1935	-9.9	-3.5	-1.1	7.8	12.5	19.2	16.9	18.4	14.4	12.4	-0.9	-1.2	7.1

## Продовження таблиці Г.1

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1936	0.4	-5.4	2.9	7.5	16.4	19.0	25.5	18.2	12.4	4.9	1.9	-1.2	8.5
1937	-9.1	-4.3	2.1	7.9	17.4	19.5	19.8	19.2	17.8	7.5	2.6	-2.0	8.2
1938	-6.0	-3.4	3.4	6.8	14.0	18.6	22.6	21.9	15.9	10.2	4.9	-6.7	8.5
1939	-2.8	-1.0	-0.5	9.1	15.2	19.5	21.5	22.0	14.5	5.0	1.9	-3.2	8.4
1940	-11.2	-9.5	-3.5	5.6	14.3	19.0	19.5	18.2	13.8	5.1	4.6	-5.7	5.9
1941	-9.9	-3.3	-1.6	7.3	11.4	16.0	20.4	18.4	13.8	5.0	4.6	-5.7	6.4
1942	-15.0	-8.9	-6.9	4.3	13.2	15.3	19.0	20.0	15.9	8.2	-0.9	-3.3	5.1
1943	-9.6	-3.3	0.7	9.6	12.6	17.9	17.9	20.2	15.9	8.1	-0.9	-3.0	7.2
1944	-2.1	-2.1	0.3	5.1	13.5	17.5	19.9	19.3	15.8	9.3	3.2	-4.1	8.0
1945	-7.7	-6.1	-0.4	6.9	12.8	17.1	19.2	19.1	14.3	6.6	0.6	-4.8	6.5
1946	-5.5	-3.9	0.2	9.6	16.5	21.2	20.5	22.8	15.3	3.2	-0.6	-5.8	7.8
1947	-9.7	-8.2	0.3	9.3	15.3	19.9	21.5	17.8	14.9	4.2	1.2	-0.4	7.2
1948	-1.2	-5.4	-1.0	10.2	16.7	19.9	18.5	19.6	13.8	8.3	0.6	-5.3	7.9
1949	-1.8	-2.9	-0.3	7.5	17.5	16.5	19.1	18.2	14.8	7.0	4.4	0.0	8.3
1950	-12.4	-1.2	1.1	12.9	15.8	17.5	18.9	17.2	14.6	6.5	2.4	-0.7	7.7
1951	-5.1	-6.6	0.7	10.7	13.9	19.3	20.4	20.6	15.3	4.6	2.2	-0.4	8.0
1952	-1.6	-3.1	-6.4	9.3	12.7	17.4	19.5	20.8	14.5	8.1	1.1	-3.1	7.4
1953	-4.7	-7.4	0.5	7.9	13.7	20.9	22.1	19.2	13.6	7.9	-1.6	-3.7	7.4
1954	-12.5	-13.0	0.9	5.3	15.4	21.8	20.3	20.4	16.0	7.9	1.8	-1.8	6.9
1955	-3.6	-3.1	-0.8	5.0	13.4	16.9	21.0	19.8	16.6	9.9	-0.2	-3.1	7.7
1956	-4.3	-13.1	-2.8	7.0	13.4	20.9	18.2	18.1	12.2	8.0	-2.8	-3.3	6.0
1957	-4.1	0.6	-0.3	9.3	14.6	18.9	20.3	19.1	13.7	8.0	3.0	-3.3	8.3
1958	-3.8	-1.0	-0.6	5.8	17.6	16.7	19.8	18.3	12.2	8.1	1.0	-0.5	7.8
1959	-2.1	-2.6	1.8	8.0	13.3	19.0	23.4	19.7	10.9	5.5	-0.3	-5.1	7.6
1960	-4.8	-5.0	-2.2	7.4	14.4	19.3	21.3	17.9	12.0	9.3	3.7	2.8	8.0
1961	-4.5	-1.3	3.4	9.6	13.2	20.3	20.4	18.4	13.5	8.1	2.8	-3.8	8.3
1962	-1.2	-3.8	-1.6	10.3	14.8	16.8	17.4	18.7	13.2	8.7	4.2	-4.0	7.8
1963	-13.8	-5.6	-3.9	6.4	18.2	17.4	21.6	20.9	16.5	8.7	4.4	-7.0	7.0
1964	-6.5	-7.4	-4.2	8.4	13.0	22.3	20.2	16.4	14.1	9.1	2.1	0.0	7.3
1965	-4.8	-7.2	-0.2	5.2	12.7	17.6	18.6	17.1	14.6	6.4	-1.7	0.2	6.5
1966	-3.9	-1.8	3.3	11.5	16.4	16.9	20.7	19.5	12.7	11.5	1.2	-3.5	8.7



## Продовження таблиці Г.1

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1967	-9.8	-6.3	1.6	9.6	17.5	18.2	20.4	18.5	15.6	11.2	4.4	-4.5	8.0
1968	-9.0	-4.4	1.0	10.4	15.1	20.1	18.0	19.4	14.1	7.0	1.0	-3.4	7.4
1969	-9.8	-7.0	-3.5	7.4	14.8	17.3	18.8	18.1	13.2	7.5	5.7	-6.5	6.3
1970	-5.5	-4.9	0.5	9.4	15.0	17.2	20.8	17.7	13.4	6.4	3.2	-2.0	7.6
1971	-3.0	-3.6	-1.7	7.4	16.1	18.1	18.4	19.1	12.1	7.2	2.1	0.9	7.8
1972	-10.9	-4.4	1.5	10.9	16.0	19.7	22.0	20.8	13.4	6.8	3.4	-0.5	8.2
1973	-6.9	-0.2	1.6	10.6	14.4	17.9	20.1	18.5	12.1	7.3	0.9	-2.6	7.8
1974	-5.7	-0.1	2.7	6.9	12.6	17.0	17.9	18.7	15.6	9.6	2.9	0.4	8.2
1975	0.4	-2.0	3.7	11.2	19.0	20.7	20.3	19.5	16.9	7.6	-0.3	-1.3	9.6
1976	-5.8	-8.7	0.0	10.2	12.6	16.2	18.1	16.5	13.3	4.2	2.6	-0.8	6.5
1977	-6.4	-1.0	2.8	8.3	15.2	17.2	19.0	16.9	11.7	7.7	4.1	-4.3	7.6
1978	-5.8	-5.2	2.3	8.7	12.6	16.6	17.1	18.0	11.9	8.1	4.7	-6.1	6.9
1979	-5.4	-6.3	2.2	6.5	17.6	21.5	16.9	19.1	14.9	5.9	0.9	-0.1	7.8
1980	-7.2	-4.4	-3.6	7.0	11.3	17.1	18.8	17.3	13.7	8.8	1.3	-1.3	6.6
1981	-	-2.2	2.0	5.4	16.1	21.1	20.8	18.3	14.2	9.6	1.8	-1.5	-
1982	-3.1	-4.9	2.0	7.0	15.1	16.9	18.5	19.3	15.7	8.7	4.0	2.2	8.5
1983	-0.5	-2.6	3.2	10.9	17.9	18.2	19.2	18.9	16.2	8.3	1.2	-1.4	9.1
1984	-2.4	-5.9	0.4	9.8	16.7	15.7	17.6	18.7	15.4	10.1	0.5	-5.0	7.6
1985	-9.5	-12.5	-3.3	9.4	17.0	16.7	17.9	20.7	12.5	8.1	-1.4	-1.3	6.2
1986	-2.7	-9.2	0.2	10.7	16.7	19.3	19.0	19.9	12.5	7.3	1.7	-3.5	7.7
1987	-13.7	-3.9	-5.7	5.0	14.2	18.2	20.3	16.4	13.3	6.8	2.2	-3.0	5.8
1988	-4.8	-3.4	1.3	8.1	15.2	18.3	21.7	18.5	14.1	7.2	-2.2	-3.1	7.6
1989	0.5	2.5	5.2	10.1	15.2	19.4	19.4	19.6	14.5	9.1	0.2	-0.2	9.6
1990	-0.1	2.7	6.9	9.4	14.6	16.9	18.4	18.5	12.0	8.6	5.2	-2.3	9.2
1991	-1.6	-5.8	0.5	-	12.8	18.5	21.2	18.9	14.8	8.8	2.4	-2.8	-
1992	-1.8	-1.7	3.7	7.0	13.6	18.7	20.7	22.9	13.5	6.4	1.6	-3.6	8.4
1993	-1.2	-2.4	0.9	8.0	16.5	16.7	17.9	17.5	11.5	7.8	-6.0	-0.2	7.3
1994	0.1	-5.8	1.4	10.9	13.1	16.3	21.1	19.1	17.8	8.0	1.1	-3.4	8.3
1995	-3.9	2.2	3.5	8.8	14.0	20.1	20.5	19.8	13.8	9.0	-0.3	-5.4	8.5
1996	-9.8	-7.1	-3.0	9.2	18.6	18.8	19.3	19.1	11.2	8.6	6.7	-3.9	7.3
1997	-5.7	-1.1	2.1	6.1	16.1	18.3	19.4	19.2	11.8	6.2	3.2	-4.2	7.6

## Продовження таблиці Г.1

Рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII
1998	-1.0	0.4	1.3	10.3	15.2	19.8	19.5	18.3	14.2	7.7	-3.3	-5.1	8.1
1999	-2.2	-1.5	3.2	11.7	12.8	22.6	22.7	19.3	15.8	8.2	-0.2	-0.2	9.4
2000	-4.1	0.0	1.7	12.7	15.4	17.9	19.1	20.5	12.3	9.5	4.5	1.3	9.2
2001	-1.0	-2.5	2.7	11.2	14.2	16.7	24.6	21.0	13.8	9.3	2.3	-7.3	8.8
2002	-2.6	3.7	5.5	9.9	16.5	18.4	23.9	20.1	13.9	7.0	3.9	-8.4	9.3
2003	-3.8	-6.4	0.1	6.9	19.4	18.0	21.3	19.2	14.1	6.8	3.4	-0.6	8.2
2004	-4.3	-2.6	3.9	9.1	13.2	17.7	20.5	20.1	14.2	9.3	2.9	0.1	8.7
2005	-0.6	-5.1	-1.6	10.3	16.4	17.3	21.4	20.0	16.3	9.0	2.2	-1.0	8.7
2006	-7.5	-6.1	0.0	9.7	14.4	18.4	20.9	19.9	15.5	9.7	3.4	2.4	8.4
2007	2.1	-4.2	6.3	9.0	18.4	20.4	21.3	21.5	14.8	9.4	0.6	-0.9	9.9
2008	-3.0	0.6	4.6	10.7	14.3	18.8	20.8	21.6	13.5	10.7	3.5	-0.6	9.6

**ЦЕНТРАЛЬНА ГЕОФІЗИЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ**

<http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/index.php>

Таблиця Г.2

Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур у м. Київ за період спостережень 1812-1847, 1852-2010 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимально низька середньомісячна температура, t, °C	Щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур, Δt, °C	Джерело інформації
1	2	3	4	5
1	1812	-7,1	28,5	[132, 229]
2	1813	-9,6	28,4	[132, 229]
3	1814	-2,4	24,0	[132, 229]
4	1815	-10,8	28,4	[132, 229]
5	1816	-2,6	21,1	[132, 229]

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
6	1817	-1,9	22,5	[132, 229]
7	1818	-3,1	22,5	[132, 229]
8	1819	-2,4	22,1	[132, 229]
9	1820	-7,0	24,1	[132, 229]
10	1821	-2,1	21,1	[132, 229]
11	1822	-2,6	23,6	[132, 229]
12	1823	-12,1	30,9	[132, 229]
13	1824	-3,5	20,2	[132, 229]
14	1825	-3,3	18,6	[132, 229]
15	1826	-8,9	29,8	[132, 229]
16	1827	-2,0	20,9	[132, 229]
17	1828	-11,2	30,1	[132, 229]
18	1829	-11,6	31,3	[132, 229]
19	1830	-11,5	27,2	[132, 229]
20	1831	-8,6	25,8	[132, 229]
21	1832	-6,8	21,7	[132, 229]
22	1833	-7,7	25,3	[132, 229]
23	1834	-5,6	26,6	[132, 229]
24	1835	-4,8	22,8	[132, 229]
25	1836	-6,6	23,9	[132, 229]
26	1837	-5,8	21,7	[132, 229]
27	1838	-15,1	33,5	[132, 229]
28	1839	-5,0	24,9	[132, 229]
29	1840	-4,8	25,4	[132, 229]
30	1841	-6,8	29,0	[132, 229]
31	1842	-11,4	29,7	[132, 229]
32	1843	-2,3	19,6	[132, 229]
33	1844	-5,8	23,7	[132, 229]

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
34	1845	-3,7	25,6	[132, 229]
35	1847	-9,8	28,4	[132, 229]
36	1852	-2,9	19,9	[132, 229]
37	1853	-2,1	22,3	[132, 229]
38	1854	-7,0	26,9	[132, 229]
39	1855	-8,7	30,3	[132, 229]
40	1856	-1,7	20,5	[132, 229]
41	1857	-3,6	21,5	[132, 229]
42	1858	-7,4	29,8	[132, 229]
43	1859	-3,8	24,1	[132, 229]
44	1860	-3,3	23,0	[132, 229]
45	1861	-14,6	34,9	[132, 229]
46	1862	-12,1	32,2	[132, 229]
47	1863	-2,9	20,7	[132, 229]
48	1864	-7,9	25,3	[132, 229]
49	1865	-3,5	25,0	[132, 229]
50	1866	-1,9	21,1	[132, 229]
51	1867	-2,2	21,9	[132, 229]
52	1868	-7,5	27,4	[132, 229]
53	1869	-8,8	27,8	[132, 229]
54	1870	-4,1	23,0	[132, 229]
55	1871	-10,0	31,4	[132, 229]
56	1872	-3,6	22,4	[132, 229]
57	1873	-1,2	21,2	[132, 229]
58	1874	-3,6	23,2	[132, 229]
59	1875	-5,9	26,4	[132, 229]
60	1876	-9,3	29,4	[132]
61	1877	-8,0	26,8	[132]

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
62	1878	-7,5	24,1	[132]
63	1879	-8,4	26,7	[132]
64	1880	-9,2	29,8	[132]
65	1881	-9,9	29,5	[130, 132]
66	1882	-1,4	24,1	[130, 132]
67	1883	-10,2	31,3	[130, 132]
68	1884	-3,3	22,9	[130, 132]
69	1885	-9,2	32,0	[130, 132]
70	1886	-4,0	21,9	[130, 132]
71	1887	-4,3	23,1	[130, 132]
72	1888	-8,1	25,8	[130, 132]
73	1889	-9,4	30,1	[130, 132]
74	1890	-4,0	24,6	[130, 132]
75	1891	-9,0	30,3	[130, 132]
76	1892	-7,6	25,8	[130, 132]
77	1893	-14,6	33,2	[130, 132]
78	1894	-8,1	27,7	[130, 132]
79	1895	-2,0	22,1	[130, 132]
80	1896	-10,7	30,0	[130, 132]
81	1897	-6,9	28,7	[130, 132]
82	1898	-2,9	21,1	[130, 132]
83	1899	-0,3	19,3	[130, 132]
84	1900	-5,1	24,9	[130, 132]
85	1901	-6,2	26,3	[130, 132]
86	1902	-0,4	17,3	[130, 132]
87	1903	-4,6	24,6	[130, 132]
88	1904	-6,8	24,0	[130, 132]
89	1905	-7,4	26,3	[130, 132]

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
90	1906	-3,7	23,0	[130, 132]
91	1907	-7,7	25,5	[130, 132]
92	1908	-4,7	23,7	[130, 132]
93	1909	-8,9	28,2	[130, 132]
94	1910	-3,4	22,4	[130, 132]
95	1911	-6,3	23,3	[130, 132]
96	1912	-8,8	25,8	[130, 132]
97	1913	-5,1	22,8	[130, 132]
98	1914	-5,0	25,0	[130, 132]
99	1915	-2,7	22,7	[130, 132]
100	1916	-2,1	20,7	[131–133, 281]
101	1917	-8,2	25,8	[131–133, 281]
102	1918	-2,5	-20,6	[131–133, 281]
103	1919	-4,6	23,4	[131–133, 281]
104	1920	-4,6	27,0	[131–133, 281]
105	1921	-1,1	20,7	[131–133, 281]
106	1922	-8,6	29,1	[131–133, 281]
107	1923	-2,6	20,7	[131–133, 281]
108	1924	-11,8	30,0	[131–133, 281]
109	1925	-0,3	20,9	[131–133, 281]
110	1926	-5,8	25,9	[128–129]
111	1927	-8,2	28,6	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
112	1928	-5,3	24,7	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
113	1929	-8,8	27,8	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
114	1930	-2,2	20,0	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
115	1931	-7,0	28,6	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
116	1932	-2,5	23,4	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
117	1933	-9,2	28,6	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
118	1934	-6,4	25,5	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
119	1935	-9,9	26,8	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
120	1936	0,4	25,9	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
121	1937	-9,1	28,9	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
122	1938	-6,0	28,6	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
123	1939	-2,8	24,3	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
124	1940	-11,2	30,7	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
125	1941	-9,9	30,3	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
126	1942	-15,0	34,0	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
127	1943	-9,6	27,5	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
128	1944	-2,1	22,0	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
129	1945	-7,7	26,9	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
130	1946	-5,5	26,0	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
131	1947	-9,7	31,2	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
132	1948	-1,2	19,7	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
133	1949	-1,8	20,9	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
134	1950	-12,4	31,3	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
135	1951	-5,1	25,5	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
136	1952	-1,6	21,1	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
137	1953	-4,7	26,8	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
138	1954	-12,5	32,8	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
139	1955	-3,6	24,6	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
140	1956	-4,3	22,5	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
141	1957	-4,1	24,4	[128–129, 134, 137, 167, 184, 236–237, 365]
142	1958	-3,8	23,6	[128–129, 345-348]
143	1959	-2,1	25,5	[338, 345-348]
144	1960	-4,8	26,1	[339, 345-348]
145	1961	-4,5	24,9	[340, 345-348]
146	1962	-1,2	18,6	[67–68, 341, 345-348]
147	1963	-13,8	35,4	[67–68, 342, 345-348]
148	1964	-6,5	26,7	[67–68, 343, 345-348]
149	1965	-4,8	23,4	[67–68, 345-348]
150	1966	-3,9	24,6	[67–68, 321, 345-348]
151	1967	-9,8	30,2	[67–68, 322, 345-348]
152	1968	-9,0	27,0	[67–68, 323, 345-348]
153	1969	-9,8	28,6	[67–68, 324, 345-348]
154	1970	-5,5	26,3	[67–68, 325, 345-348]
155	1971	-3,0	21,4	[67–68, 326, 345-348]



## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
156	1972	-10,9	32,9	[67–68, 327, 345–348]
157	1973	-6,9	27,0	[67–68, 328, 345–348]
158	1974	-5,7	23,6	[67–68, 329, 345–348]
159	1975	0,4	20,7	[67–68, 330]
160	1976	-5,8	23,9	[331]
161	1977	-6,4	25,4	[332]
162	1978	-5,8	22,9	Дані ЦГО м. Київ
163	1979	-5,4	22,3	[333]
164	1980	-7,2	26,0	[334]
165	1981	-3,4	24,2	[335]
166	1982	-3,1	21,6	[336]
167	1983	-0,5	19,7	[337]
168	1984	-2,4	20,0	Дані ЦГО м. Київ
169	1985	-9,5	27,4	Дані ЦГО м. Київ
170	1986	-2,7	21,7	Дані ЦГО м. Київ
171	1987	-13,7	34,0	Дані ЦГО м. Київ
172	1988	-4,8	26,5	Дані ЦГО м. Київ
173	1989	0,5	19,9	Дані ЦГО м. Київ
174	1990	-0,1	18,5	Дані ЦГО м. Київ
175	1991	-1,6	22,8	Дані ЦГО м. Київ
176	1992	-1,8	22,5	Дані ЦГО м. Київ
177	1993	-1,2	19,1	Дані ЦГО м. Київ
178	1994	0,1	21,2	Дані ЦГО м. Київ
179	1995	-3,9	24,4	Дані ЦГО м. Київ
180	1996	-9,8	29,1	Дані ЦГО м. Київ
181	1997	-5,7	25,1	Дані ЦГО м. Київ

## Продовження таблиці Г.2

1	2	3	4	5
182	1998	-1,0	20,5	Дані ЦГО м. Київ
183	1999	-2,2	24,9	Дані ЦГО м. Київ
184	2000	-4,1	23,2	Дані ЦГО м. Київ
185	2001	-1,0	25,6	Дані ЦГО м. Київ
186	2002	-2,6	26,5	Дані ЦГО м. Київ
187	2003	-3,8	25,1	Дані ЦГО м. Київ
188	2004	-4,3	24,8	Дані ЦГО м. Київ
189	2005	-0,6	22,0	Дані ЦГО м. Київ
190	2006	-7,5	28,4	Дані ЦГО м. Київ
191	2007	2,1	23,4	Дані ЦГО м. Київ
192	2008	-3,0	23,8	Дані ЦГО м. Київ
193	2009	-3,1	25,3	Дані ЦГО м. Київ
194	2010	-7,6	32,9	Дані ЦГО м. Київ

Таблиця Г.3

Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур у м. Канів за період спостережень 1899, 1959-1964, 1966-1983, 2003-2010 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимально низька середньомісячна температура, t, °С	Щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур, Δt, °С	Джерело інформації
1	2	3	4	5
1	1899	+0,6	20,4	[130, 132]
2	1959	-1,7	19,0	[338, 345-348]
3	1960	-4,9	22,2	[339, 345-348]
4	1961	-1,3	18,7	[340, 345-348]
5	1962	-2,9	19,9	[67-68, 341, 345-348]
6	1963	-8,5	27,9	[67-68, 342, 345-348]
7	1964	-8,2	25,8	[67-68, 343, 345-348]
8	1966	-2,5	23,8	[67-68, 321, 345-348]
9	1967	-9,6	30,0	[67-68, 322, 345-348]
10	1968	-9,5	28,0	[67-68, 323, 345-348]
11	1969	-8,8	28,0	[67-68, 324, 345-348]
12	1970	-4,9	22,0	[67-68, 325, 345-348]
13	1971	-2,5	21,5	[67-68, 326, 345-348]
14	1972	-11,2	34,0	[67-68, 327, 345-348]
15	1973	-8,4	28,5	[67-68, 328, 345-348]
16	1974	-6,0	24,3	[67-68, 329, 345-348]
17	1975	0,1	20,7	[67-68, 330]

## Продовження таблиці Г.3

1	2	3	4	5
18	1976	-5,9	23,7	[331]
19	1977	-8,1	27,1	[332]
20	1979	-5,4	23,3	[333]
21	1980	-7,2	26,7	[334]
22	1981	-3,9	25,2	[335]
23	1982	-3,7	22,0	[336]
24	1983	-1,0	26,8	[337]
25	2003	-3,6	23,9	Дані ЦГО м. Київ
26	2004	-3,1	22,9	Дані ЦГО м. Київ
27	2005	0,5	19,7	Дані ЦГО м. Київ
28	2006	-6,6	26,2	Дані ЦГО м. Київ
29	2007	2,7	25,0	Дані ЦГО м. Київ
30	2008	-2,1	23,6	Дані ЦГО м. Київ
31	2009	-3,3	24,9	Дані ЦГО м. Київ
32	2010	-7,9	33,0	Дані ЦГО м. Київ

Таблиця Г.4

Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур у м. Кременчук за період спостережень 1966-1983, 2002-2010 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимально низька середньомісячна температура, t, °С	Щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур, Δt, °С	Джерело інформації
1	2	3	4	5
1	1966	-3,1	25,1	[67–68, 321, 345-348]
2	1967	-8,6	28,9	[67–68, 322, 345-348]
3	1968	-9,2	28,2	[67–68, 323, 345-348]

## Продовження таблиці Г.4

1	2	3	4	5
4	1969	-8,2	27,9	[67–68, 324, 345-348]
5	1970	-2,9	25,7	[67–68, 325, 345-348]
6	1971	-1,6	21,5	[67–68, 326, 345-348]
7	1972	-12,0	35,3	[67–68, 327, 345-348]
8	1973	-7,8	28,8	[67–68, 328, 345-348]
9	1974	-5,9	24,8	[67–68, 329, 345-348]
10	1975	0,1	21,6	[67–68, 330]
11	1976	-5,6	23,8	[331]
12	1977	-7,8	27,4	[332]
13	1979	-4,7	23,1	[333]
14	1980	-6,8	26,5	[334]
15	1981	-2,9	24,6	[335]
16	1982	-3,7	22,4	[336]
17	1983	-1,1	21,5	[337]
18	2002	-3,2	28,4	Дані ЦГО м. Київ
19	2003	-4,4	26,1	Дані ЦГО м. Київ
20	2004	-2,1	22,9	Дані ЦГО м. Київ
21	2005	0,5	20,9	Дані ЦГО м. Київ
22	2006	-7,3	28,7	Дані ЦГО м. Київ
23	2007	2,2	21,6	Дані ЦГО м. Київ
24	2008	-3,1	25,3	Дані ЦГО м. Київ
25	2009	-3,4	26,9	Дані ЦГО м. Київ
26	2010	-6,7	32,0	Дані ЦГО м. Київ

Таблиця Г.5

Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур у м. Кам'янське за період спостережень 1839-1842, 1850-1853, 1855, 1883, 1887-1915, 1959-1964, 1966-1983, 2002-2010 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимально низька середньомісячна температура, t, °C	Щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур, Δt, °C	Джерело інформації
1	2	3	4	5
1	1839	-5,4	30,3	[132, 229]
2	1840	-6,7	31,2	[132, 229]
3	1841	-7,2	32,6	[132, 229]
4	1842	-9,5	31,5	[132, 229]
5	1850	-11,8	35,5	[132, 229]
6	1851	-8,7	32,4	[132, 229]
7	1852	-5,3	25,3	[132, 229]
8	1853	-2,3	26,6	[132, 229]
9	1855	-9,5	32,0	[132, 229]
10	1883	-10,7	31,7	[132, 229]
11	1887	-3,9	25,1	[132, 229]
12	1888	-7,4	28,5	[132, 229]
13	1889	-9,9	33,7	[132, 229]
14	1890	-5,4	30,1	[132, 229]
15	1891	-8,3	33,0	[132, 229]
16	1892	-8,2	30,1	[132, 229]
17	1893	-13,4	34,6	[132, 229]
18	1894	-10,5	32,9	[132, 229]
19	1895	-0,4	23,7	[132, 229]
20	1896	-12,8	34,8	[132, 229]
21	1897	-6,3	30,3	[132, 229]

## Продовження таблиці Г.5

1	2	3	4	5
22	1898	-4,8	26,5	[132, 229]
23	1899	0,1	21,9	[132, 229]
24	1900	-5,2	27,9	[132, 229]
25	1901	-6,3	29,7	[132, 229]
26	1902	0,2	20,3	[132, 229]
27	1903	-4,1	27,1	[132, 229]
28	1904	-6,5	28,0	[132, 229]
29	1905	-8,3	31,0	[132, 229]
30	1906	-3,0	25,7	[132, 229]
31	1908	-5,4	26,8	[132, 229]
32	1909	-8,9	31,4	[132, 229]
33	1910	-2,5	24,8	[132, 229]
34	1911	-7,4	27,2	[132, 229]
35	1912	-7,3	26,2	[132, 229]
36	1913	-4,5	24,5	[132, 229]
37	1914	-4,6	26,7	[132, 229]
38	1915	1,0	23,5	[132, 229]
39	1959	-2,2	20,6	[128–129, 345-348]
40	1960	-4,0	22,2	[338, 345-348]
41	1961	-1,0	19,4	[339, 345-348]
42	1962	-2,9	21,6	[340, 345-348]
43	1963	-6,5	26,5	[67–68, 341, 345-348]
44	1964	-7,7	26,0	[67–68, 342, 345-348]
45	1966	-0,2	23,5	[67–68, 321, 345-348]
46	1967	-7,6	28,6	[67–68, 322, 345-348]
47	1968	-8,2	28,6	[67–68, 323, 345-348]

## Продовження таблиці Г.5

1	2	3	4	5
48	1969	-9,3	28,9	[67–68, 324, 345-348]
49	1970	-5,0	28,4	[67–68, 325, 345-348]
50	1971	-1,9	230	[67–68, 326, 345-348]
51	1972	-12,9	36,2	[67–68, 327, 345-348]
52	1973	-7,8	28,5	[67–68, 328, 345-348]
53	1974	-7,3	26,9	[67–68, 329, 345-348]
54	1975	-1,2	21,1	[67–68, 330]
55	1976	-6,3	24,5	[331]
56	1977	-8,7	28,6	[332]
57	1979	-4,9	23,9	[333]
58	1980	-8,0	28,6	[334]
59	1981	-1,5	24,2	[335]
60	1982	-4,8	23,6	[336]
61	1983	-3,3	24,4	[337]
62	2002	-3,5	30,1	Дані ЦГО м. Київ
63	2003	-4,1	24,7	Дані ЦГО м. Київ
64	2004	-1,2	21,3	Дані ЦГО м. Київ
65	2005	0,7	21,4	Дані ЦГО м. Київ
66	2006	-8,2	30,2	Дані ЦГО м. Київ
67	2007	1,1	23,3	Дані ЦГО м. Київ
68	2008	-4,0	26,1	Дані ЦГО м. Київ
69	2009	-4,7	29,4	Дані ЦГО м. Київ
70	2010	-5,0	30,6	Дані ЦГО м. Київ



Таблиця Г.6

Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур у м. Запоріжжя за період спостережень 1850-1855, 1952-1955, 1966-1977, 1979-1982, 2002-2010 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимально низька середньомісячна температура, t, °C	Щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур, Δt, °C	Джерело інформації
1	2	3	4	5
1	1850	-10,4	35,3	[132, 229]
2	1851	-7,1	31,4	[132, 229]
3	1852	-4,0	24,4	[132, 229]
4	1853	-0,4	24,0	[132, 229]
5	1854	-7,6	31,4	[132, 229]
6	1855	-7,7	32,4	[132, 229]
7	1952	0,3	21,1	[128–129, 134, 137, 163, 236–237, 184, 365]
8	1953	-2,2	25,6	[128–129, 134, 137, 163, 184, 236–237, 365]
9	1954	-13,0	37,7	[128–129, 134, 137, 163, 184, 236–237, 365]
10	1955	-0,6	23,9	[128–129, 134, 137, 163, 184, 236–237, 365]
11	1966	0,2	23,6	[67–68, 321, 345-348]
12	1967	-6,3	27,6	[67–68, 322, 345-348]
13	1968	-6,7	27,9	[67–68, 323, 345-348]
14	1969	-8,7	28,6	[67–68, 324, 345-348]
15	1970	-4,3	27,7	[67–68, 325, 345-348]
16	1971	-1,7	23,6	[67–68, 326, 345-348]
17	1972	-12,5	36,0	[67–68, 327, 345-348]

## Продовження таблиці Г.6

1	2	3	4	5
18	1973	-7,4	28,5	[67–68, 328, 345-348]
19	1974	-7,2	27,1	[67–68, 329, 345-348]
20	1975	-1,4	23,4	[67–68, 330]
21	1976	-4,7	23,9	[331]
22	1977	-9,0	29,3	[332]
23	1979	-4,1	24,2	[333]
24	1980	-7,8	29,1	[334]
25	1981	-0,8	23,1	[335]
26	1982	-4,4	23,5	[336]
27	1983	-2,4	23,5	[337]
28	2002	-3,2	28,2	Дані ЦГО м. Київ
29	2003	-2,3	22,6	Дані ЦГО м. Київ
30	2004	-0,2	21,3	Дані ЦГО м. Київ
31	2005	0,7	21,5	Дані ЦГО м. Київ
32	2006	-8,0	28,8	Дані ЦГО м. Київ
33	2007	1,9	23,3	Дані ЦГО м. Київ
34	2008	-4,5	27,1	Дані ЦГО м. Київ
35	2009	-4,4	29,8	Дані ЦГО м. Київ
36	2010	-5,4	31,4	Дані ЦГО м. Київ

Таблиця Г.7

Статистичні дані про щорічну максимально низьку середньомісячну температуру і щорічну максимальну амплітуду середньомісячних температур у м. Нова Каховка за період спостережень 1826-1852, 1882-1915, 1959-1964, 1966-1983, 2002-2010 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимально низька середньомісячна температура, t, °C	Щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур, Δt, °C	Джерело інформації
1	2	3	4	5
1	1826	-4,4	31,8	[132, 229]
2	1827	3,1	27,1	[132, 229]
3	1829	-7,7	31,0	[132, 229]
4	1830	-7,3	29,6	[132, 229]
5	1831	-4,6	26,5	[132, 229]
6	1832	-4,3	23,7	[132, 229]
7	1833	-7,2	31,1	[132, 229]
8	1834	-3,9	27,2	[132, 229]
9	1835	-3,0	26,4	[132, 229]
10	1836	-7,2	27,1	[132, 229]
11	1837	-3,3	22,9	[132, 229]
12	1838	-13,0	33,9	[132, 229]
13	1839	-2,6	27,1	[132, 229]
14	1840	-5,0	31,2	[132, 229]
15	1841	-3,5	30,5	[132, 229]
16	1842	-5,4	28,3	[132, 229]
17	1843	0,1	22,1	[132, 229]
18	1844	-3,7	27,2	[132, 229]
19	1845	-2,3	29,0	[132, 229]
20	1846	-0,8	25,2	[132, 229]
21	1847	-9,3	32,9	[132, 229]
22	1848	-10,2	36,1	[132, 229]

## Продовження таблиці Г.7

1	2	3	4	5
23	1849	-6,3	29,9	[132, 229]
24	1850	-7,9	32,5	[132, 229]
25	1851	-4,7	27,1	[132, 229]
26	1852	-0,9	21,2	[130, 132]
27	1883	-7,4	32,7	[130, 132]
28	1884	-2,6	25,9	[130, 132]
29	1885	-5,7	30,8	[130, 132]
30	1886	0,9	22,2	[130, 132]
31	1887	-1,0	23,3	[130, 132]
32	1888	-6,3	29,0	[130, 132]
33	1889	-8,3	33,1	[130, 132]
34	1890	-2,8	28,4	[130, 132]
35	1891	-4,7	30,4	[130, 132]
36	1892	-3,5	26,3	[130, 132]
37	1893	-10,1	33,1	[130, 132]
38	1894	-7,4	30,8	[130, 132]
39	1895	4,0	29,4	[130, 132]
40	1896	-10,8	34,1	[130, 132]
41	1897	-3,5	29,0	[130, 132]
42	1898	-2,1	25,5	[130, 132]
43	1899	2,7	26,5	[130, 132]
44	1900	-1,8	26,5	[130, 132]
45	1901	-4,4	28,2	[130, 132]
46	1902	2,2	23,3	[130, 132]
47	1903	-2,3	25,2	[130, 132]
48	1904	-5,6	27,6	[130, 132]
49	1905	-6,2	29,3	[130, 132]
50	1906	-0,1	22,5	[130, 132]

## Продовження таблиці Г.7

1	2	3	4	5
51	1907	-5,0	28,1	[130, 132]
52	1908	-3,1	25,6	[130, 132]
53	1909	-5,9	29,4	[130, 132]
54	1910	-0,8	23,3	[130, 132]
55	1911	-4,9	26,2	[130, 132]
56	1912	-5,4	25,4	[130, 132]
57	1913	-3,1	24,0	[130, 132]
58	1914	-3,5	26,6	[130, 132]
59	1915	2,9	26,4	[130, 132]
60	1959	-0,4	19,9	[338, 345-348]
61	1960	-1,6	20,8	[339, 345-348]
62	1961	0,9	18,8	[340, 345-348]
63	1962	-0,5	20,3	[67-68, 341, 345-348]
64	1963	-3,9	25,1	[67-68, 342, 345-348]
65	1964	-4,4	23,6	[67-68, 343, 345-348]
66	1966	1,6	22,7	[67-68, 321, 345-348]
67	1967	-5,1	28,3	[67-68, 322, 345-348]
68	1968	-4,6	26,5	[67-68, 323, 345-348]
69	1969	-6,3	27,6	[67-68, 324, 345-348]
70	1970	-1,2	26,2	[67-68, 325, 345-348]
71	1971	-0,1	20,3	[67-68, 326, 345-348]
72	1972	-9,5	33,8	[67-68, 327, 345-348]
73	1973	-5,5	27,7	[67-68, 328, 345-348]
74	1974	-4,6	25,6	[67-68, 329, 345-348]
75	1975	0,9	22,7	[67-68, 330]
76	1976	-3,0	23,1	[331]
77	1977	-5,5	26,9	[332]
78	1979	-1,6	22,1	[333]

## Продовження таблиці Г.7

1	2	3	4	5
79	1980	-4,4	26,6	[334]
80	1981	0,5	22,6	[335]
81	1982	-2,2	22,7	[336]
82	1983	0,0	22,3	[337]
83	2002	-1,4	27,6	Дані ЦГО м. Київ
84	2003	-2,0	23,9	Дані ЦГО м. Київ
85	2004	0,8	21,4	Дані ЦГО м. Київ
86	2005	2,8	21,6	Дані ЦГО м. Київ
87	2006	-6,0	28,6	Дані ЦГО м. Київ
88	2007	0,8	24,4	Дані ЦГО м. Київ
89	2008	-2,7	25,7	Дані ЦГО м. Київ
90	2009	-1,2	26,5	Дані ЦГО м. Київ
91	2010	-3,0	28,6	Дані ЦГО м. Київ

Таблиця Г.8

Статистичні дані про багаторічну середньомісячну температуру у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду [78, 229, 365]

№	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Багаторічна середньомісячна температура у м. Вишгород											
	-5,6	-4,2	0,7	8,7	15,2	18,2	19,3	18,6	13,9	8,1	2,1	-2,3
2	Багаторічна середньомісячна температура у м. Канів											
	-5,9	-4,7	1,9	7,2	15,0	18,0	20,2	19,0	13,9	7,7	1,1	-3,1
3	Багаторічна середньомісячна температура у м. Кременчук											
	-6,3	-4,8	1,1	7,5	15,4	18,5	21,0	19,7	14,2	7,9	1,0	-3,5
4	Багаторічна середньомісячна температура у м. Кам'янське											
	-7,4	-5,9	-1,3	7,1	16,2	20,6	23,4	22,1	15,9	9,8	3,3	-5,5
5	Багаторічна середньомісячна температура у м. Запоріжжя											
	-6,2	-3,4	0,8	8,2	17,8	21,8	23,6	23,5	15,8	11,1	4,2	-2,1
6	Багаторічна середньомісячна температура у м. Нова Каховка											
	-4,8	-2,5	1,7	9,2	16,3	21,1	23,4	22,8	17,4	10,8	4,4	-1,9

t, °C

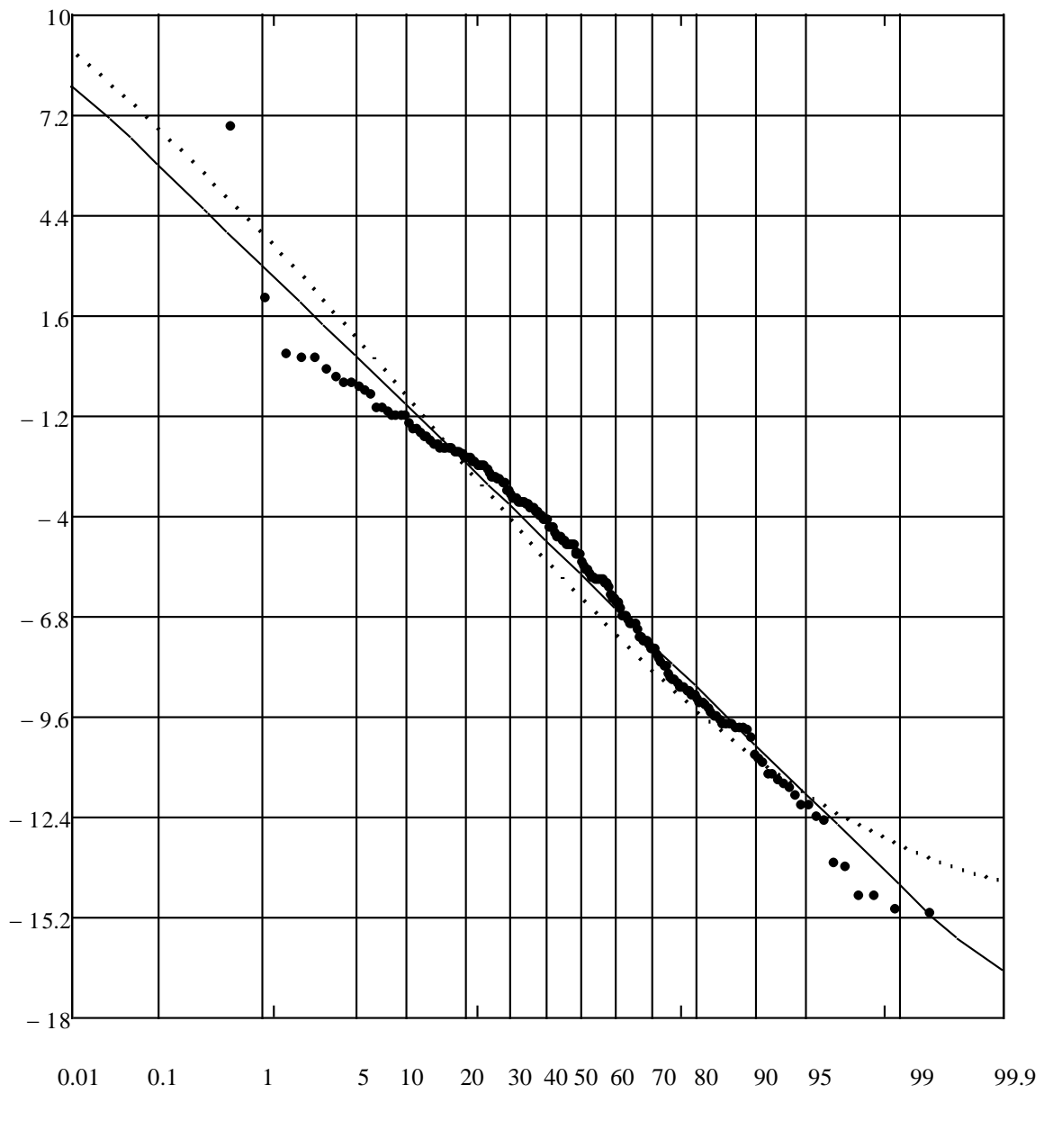


Рис. Д.1. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Вишгород за період спостережень 1812–1847, 1852–2010 рр.:

- – зафіксована температура,
- - - - - – біекспоненціальний розподіл,
- – нормальний розподіл.

t, °C

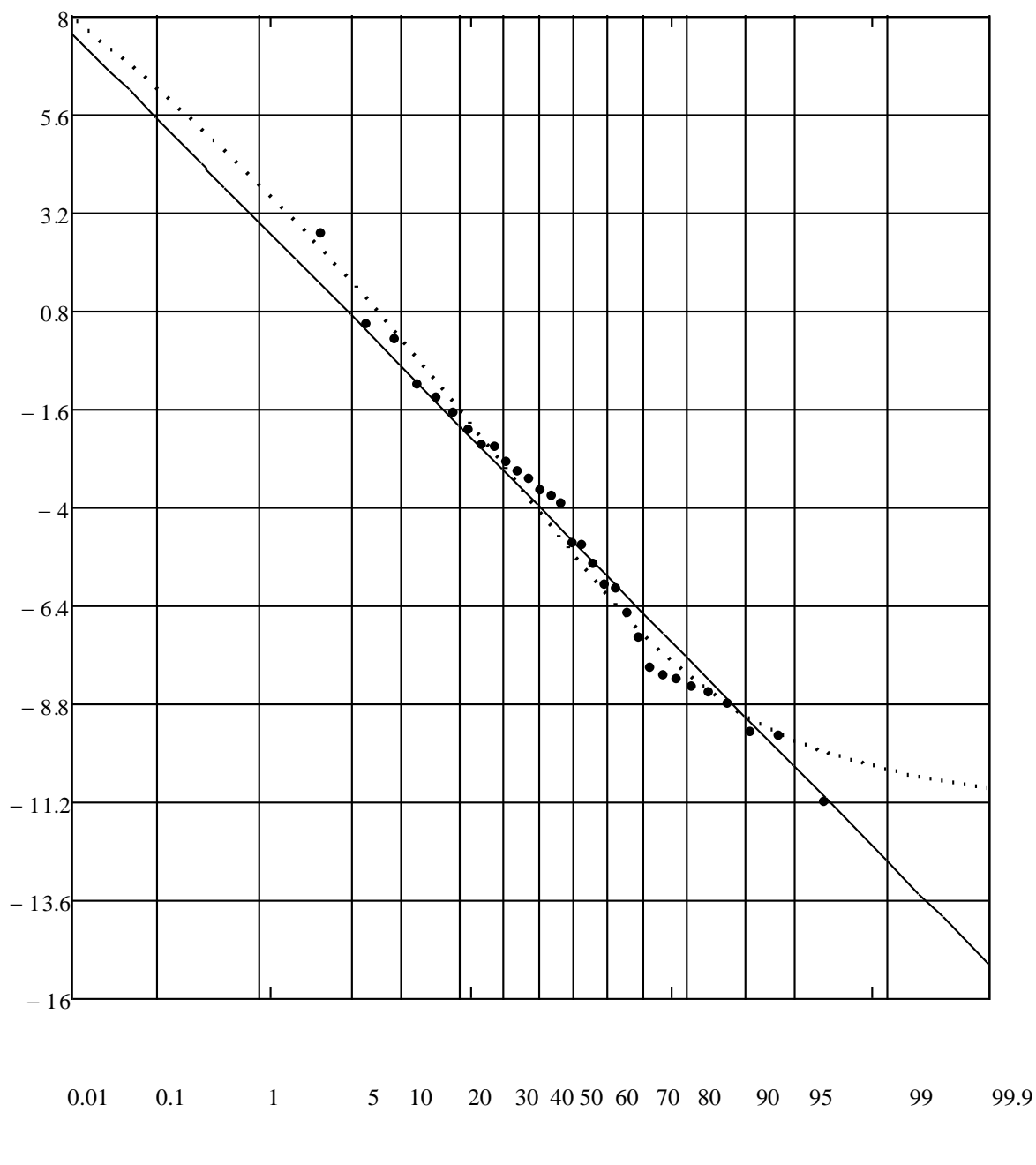


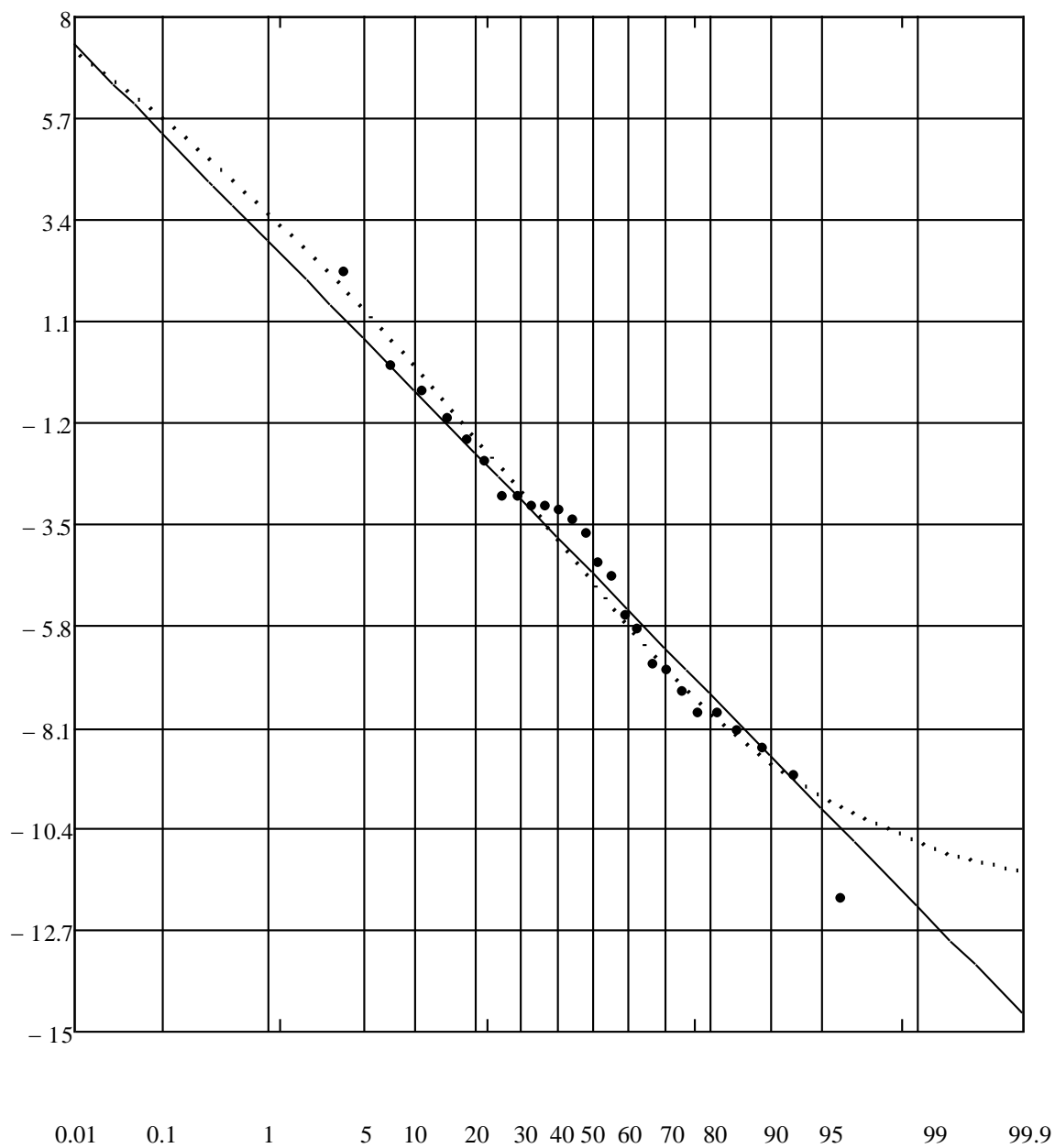
Рис. Д.2. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Канів за період спостережень

1899, 1959–1964, 1966–1983, 2003–2010 рр.:

- – зафіксована температура,
- – біекспоненціальний розподіл,
- – нормальний розподіл.



t, °C



p, %

Рис. Д.3. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Кременчук за період спостережень 1966–1983, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована температура,
- - - - - – біекспоненціальний розподіл,
- – нормальний розподіл.

t, °C

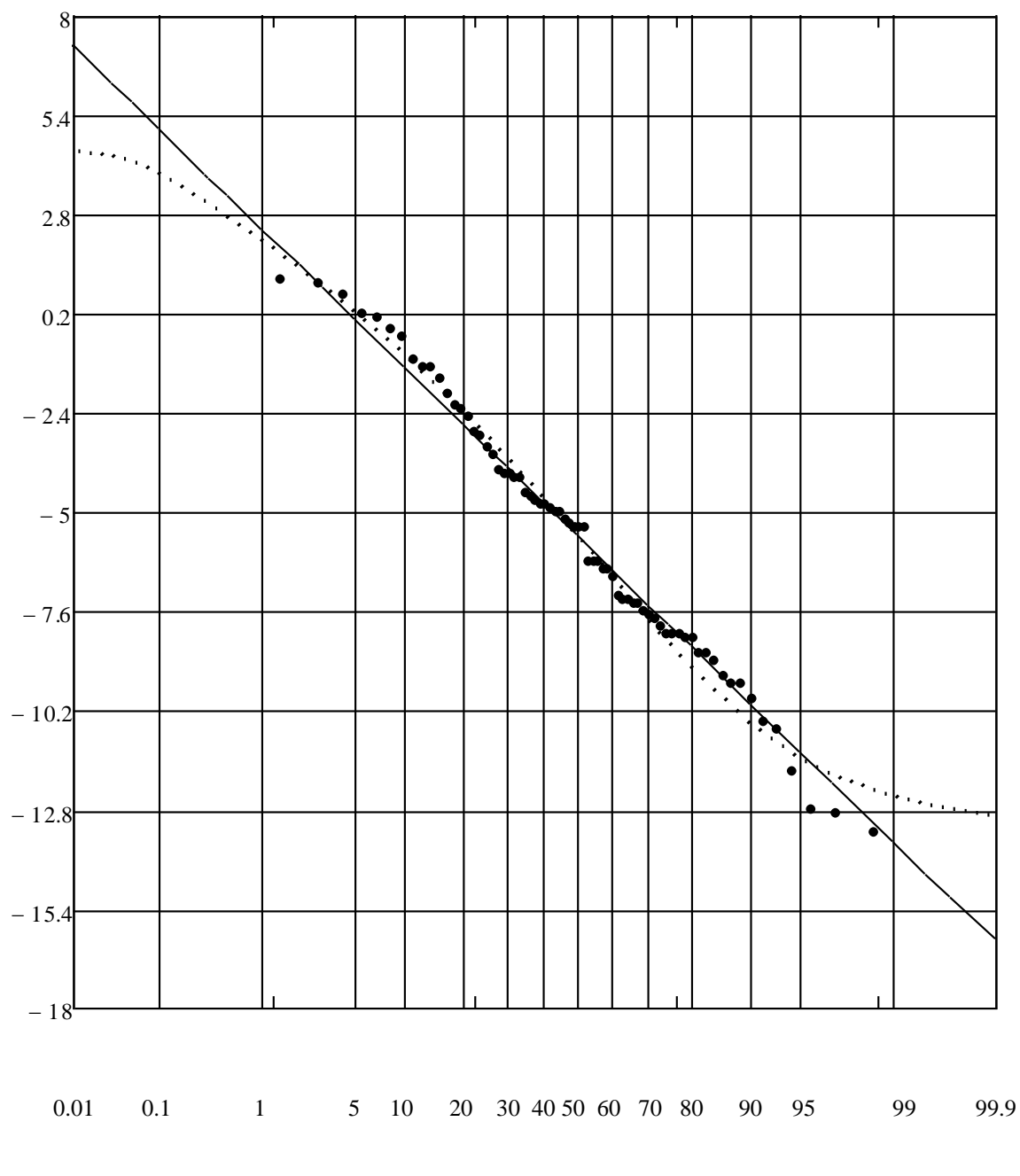
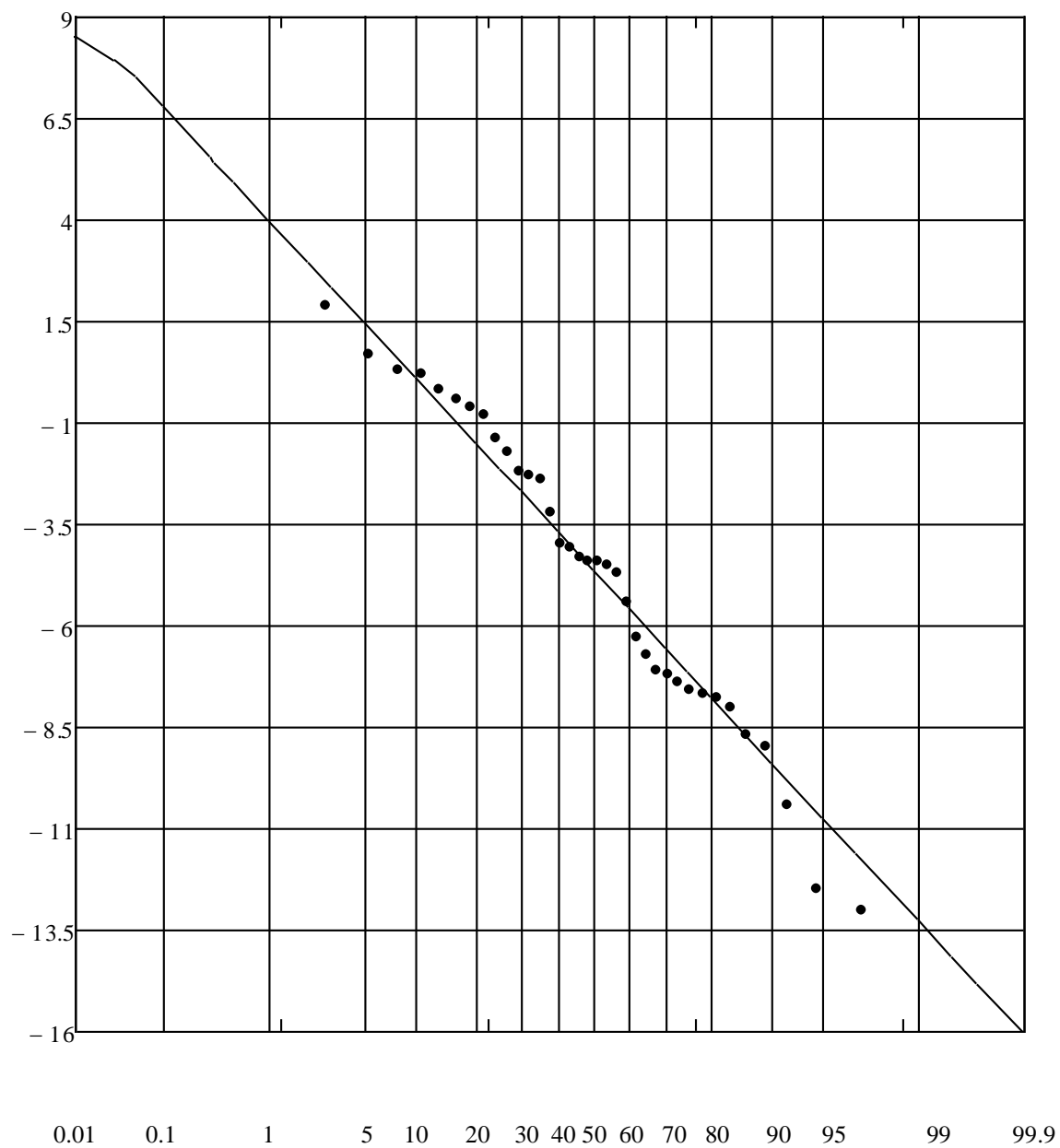


Рис. Д.4. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Кам'янське за період спостережень 1839–1842, 1850–1853, 1855, 1883, 1887–1915, 1959–1964, 1966–1983, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована температура,
- - - - - – біекспоненціальний розподіл,
- – нормальний розподіл.

t, °C



p, %

Рис. Д.5. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Запоріжжя за період спостережень 1850–1855, 1952–1955, 1966–1977, 1979–1982, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована температура,
- – нормальний розподіл.

t, °C

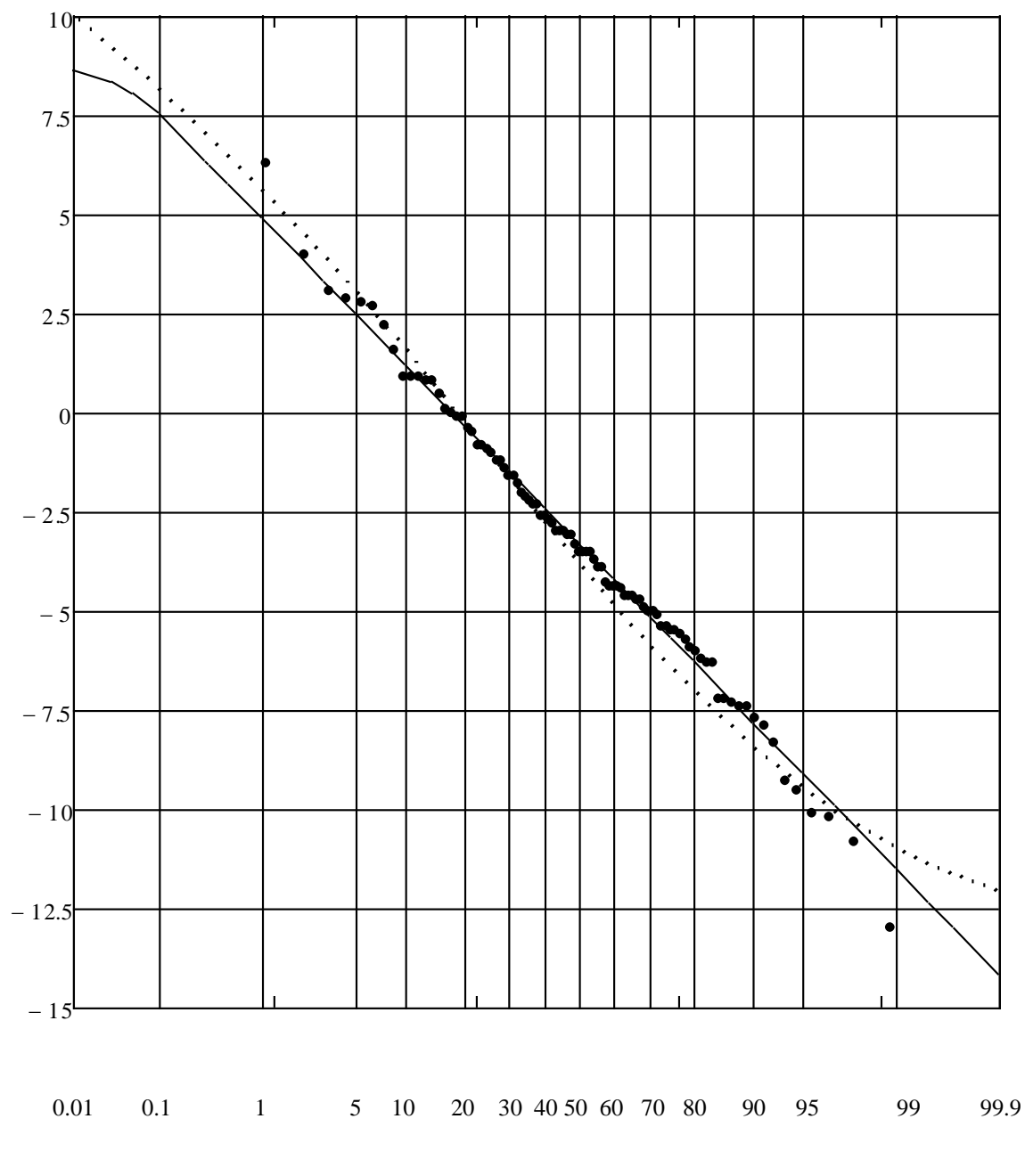


Рис. Д.6. Результати розрахунків імовірності щорічної максимально низької середньомісячної температури у м. Нова Каховка за період спостережень 1826–1852, 1882–1915, 1959–1964, 1966–1983, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована температура,
- – біекспоненціальний розподіл,
- – нормальний розподіл.

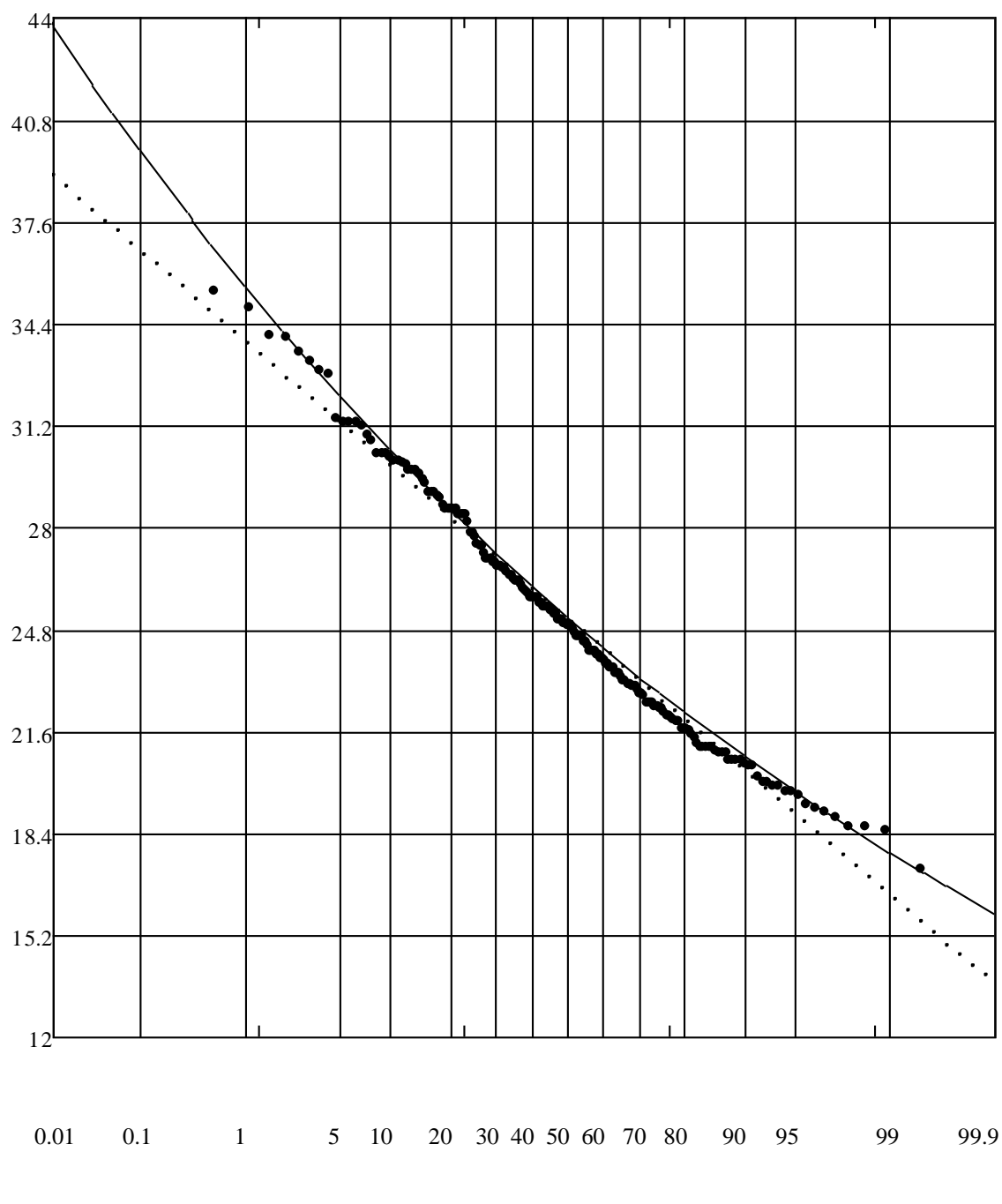
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. Д.7. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у м. Вишгород за період спостережень 1812–1847, 1852–2010 рр.:

- – зафіксована амплітуда температур,
- - - - - – нормальний розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.

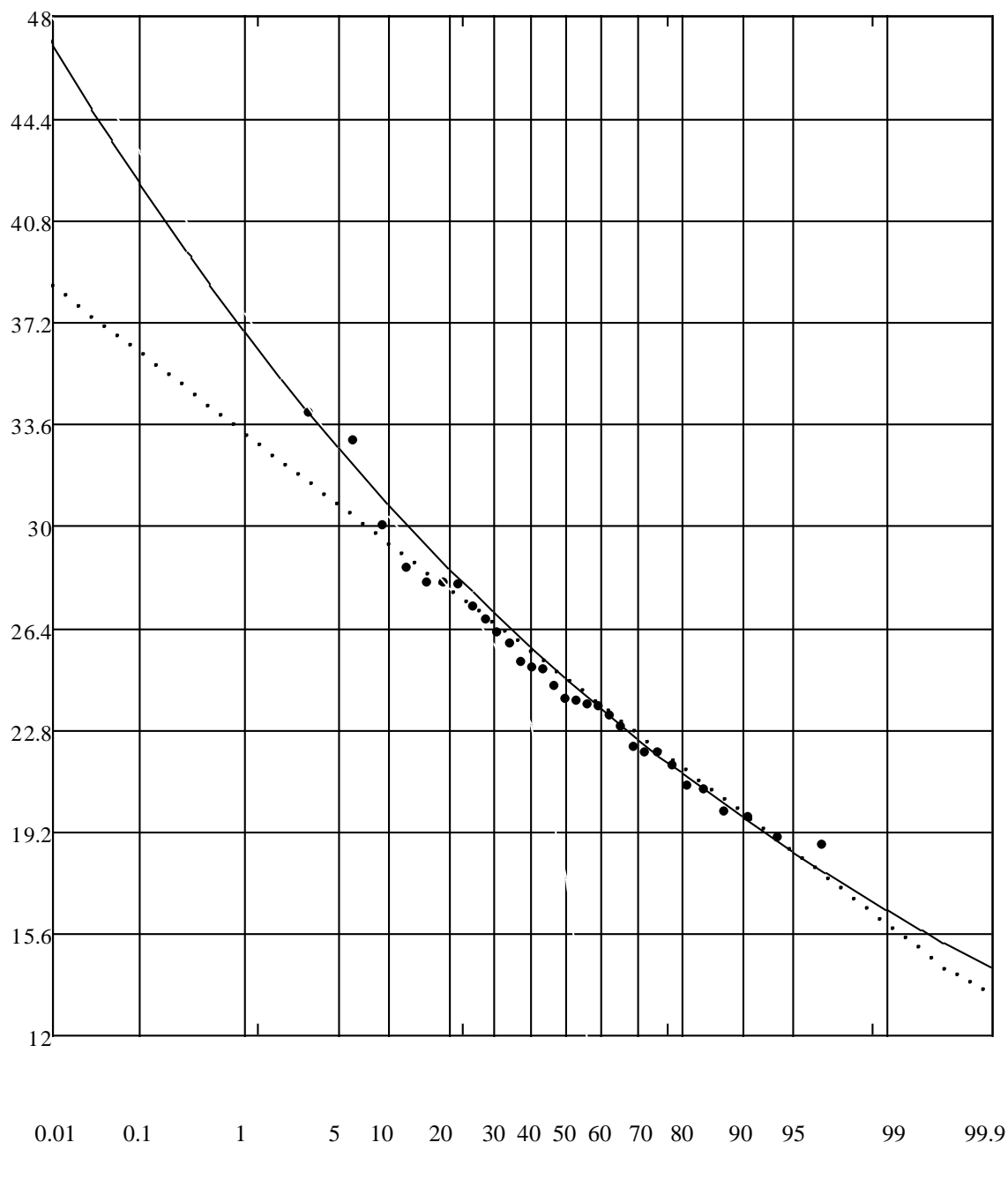
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. Д.8. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у м. Канів за період спостережень

1899, 1959–1964, 1966–1983, 2003–2010 рр.:

- – зафіксована амплітуда температур,
- – нормальний розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.

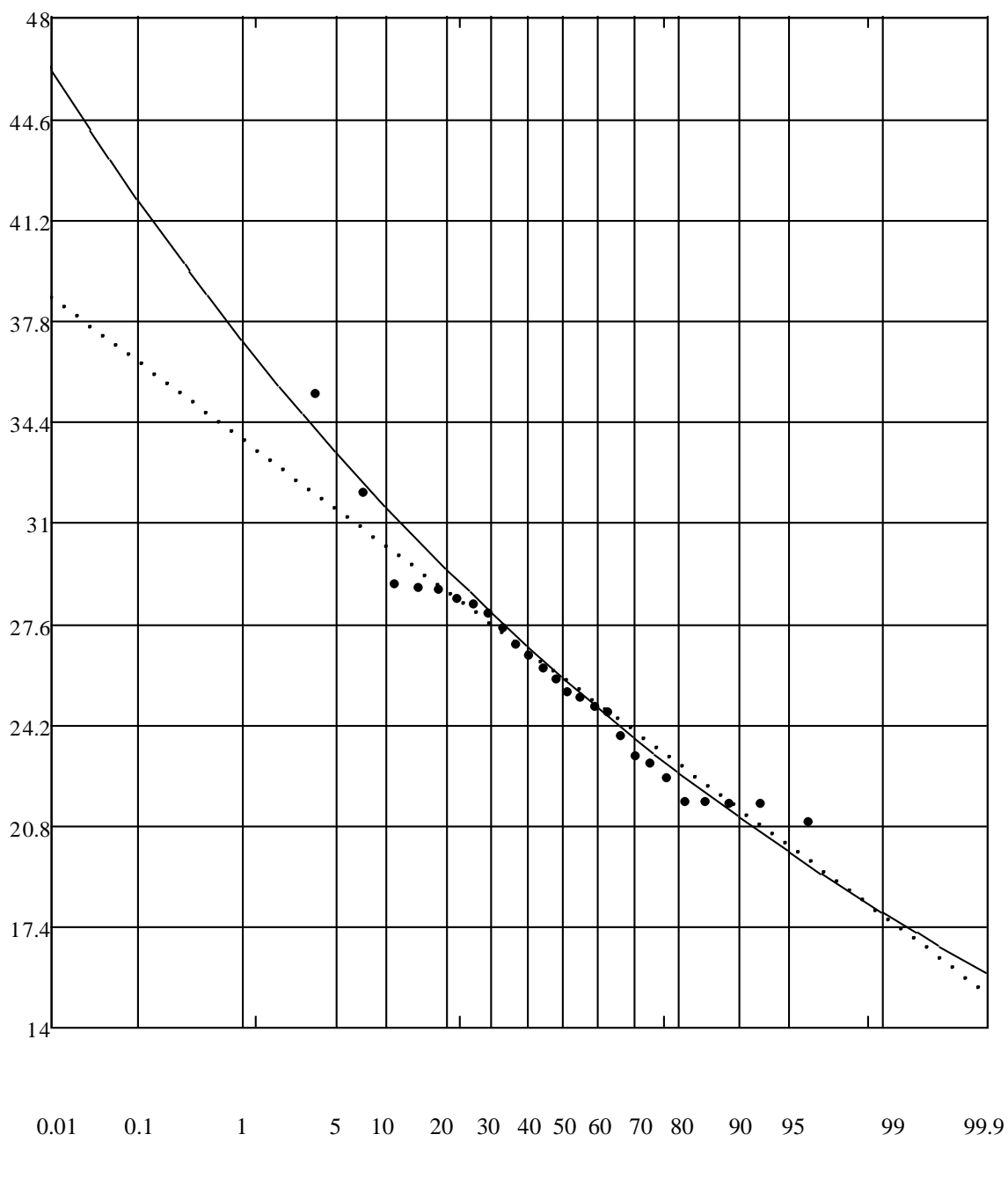
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. Д.9. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у м. Кременчук за період спостережень 1966–1983, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована амплітуда температур,
- - - - - – нормальний розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.

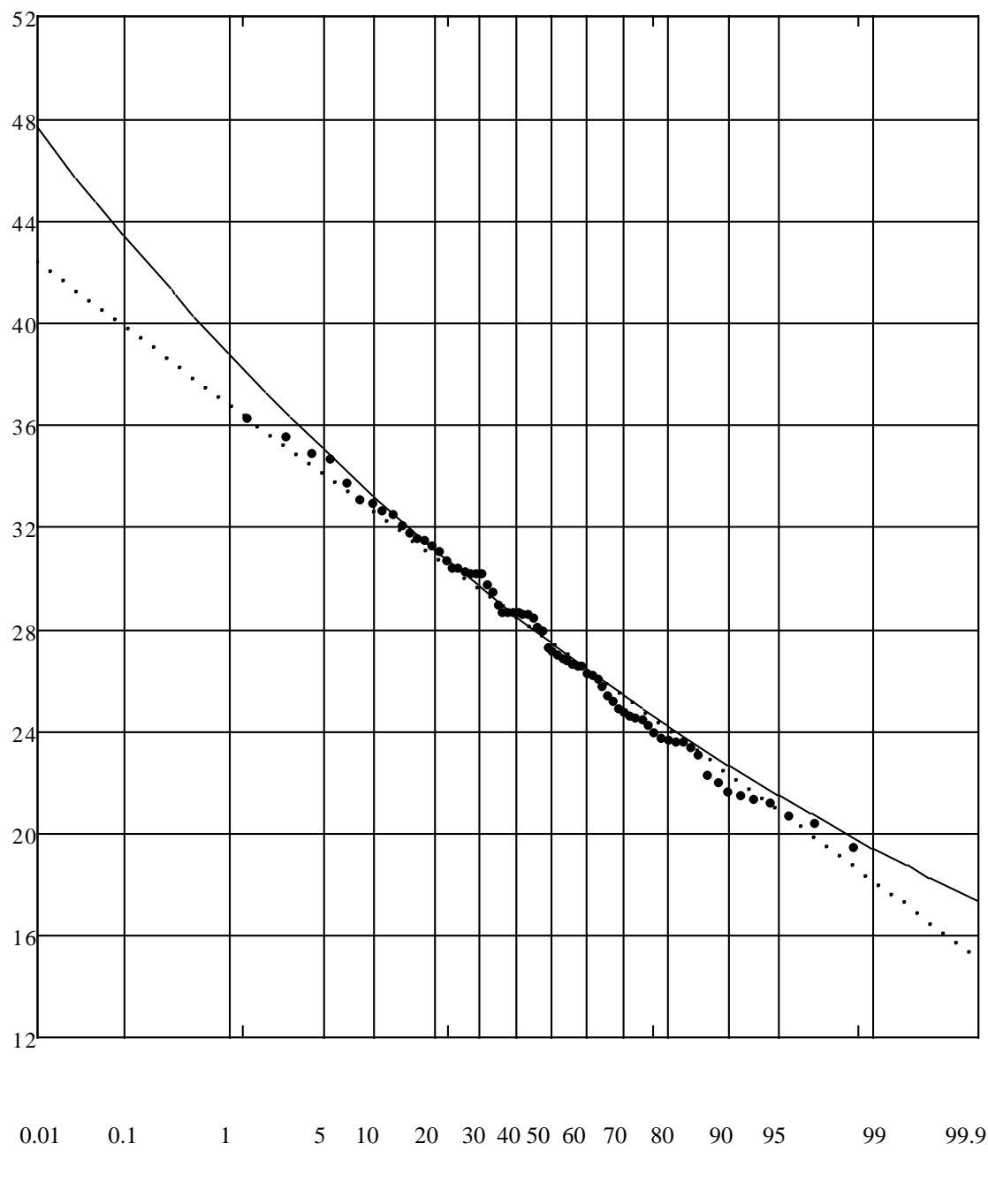
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. Д.10. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у м. Кам'янське за період спостережень 1839–1842, 1850–1853, 1855, 1883, 1887–1915, 1959–1964, 1966–1983, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована амплітуда температур,
- – нормальний розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.



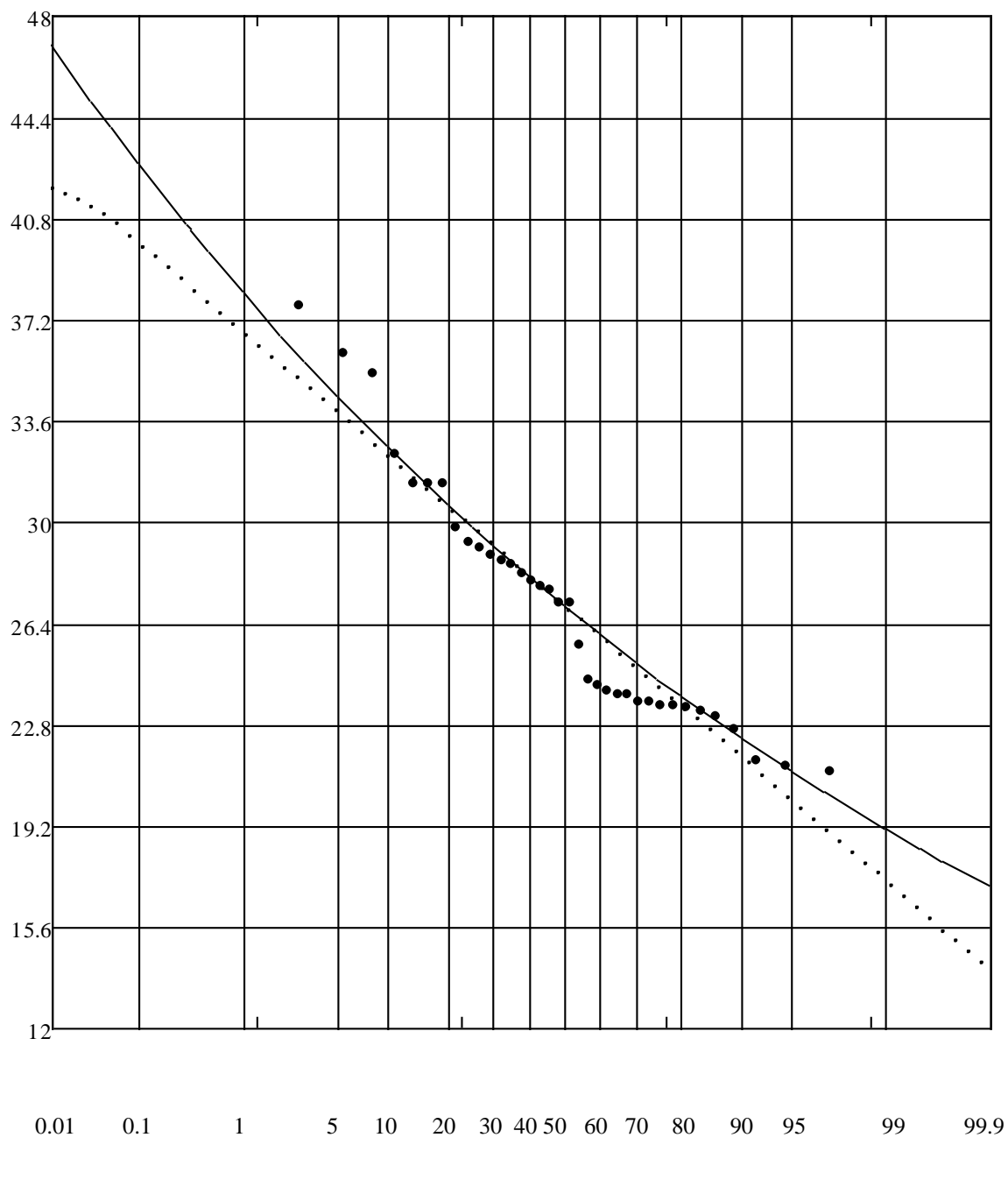
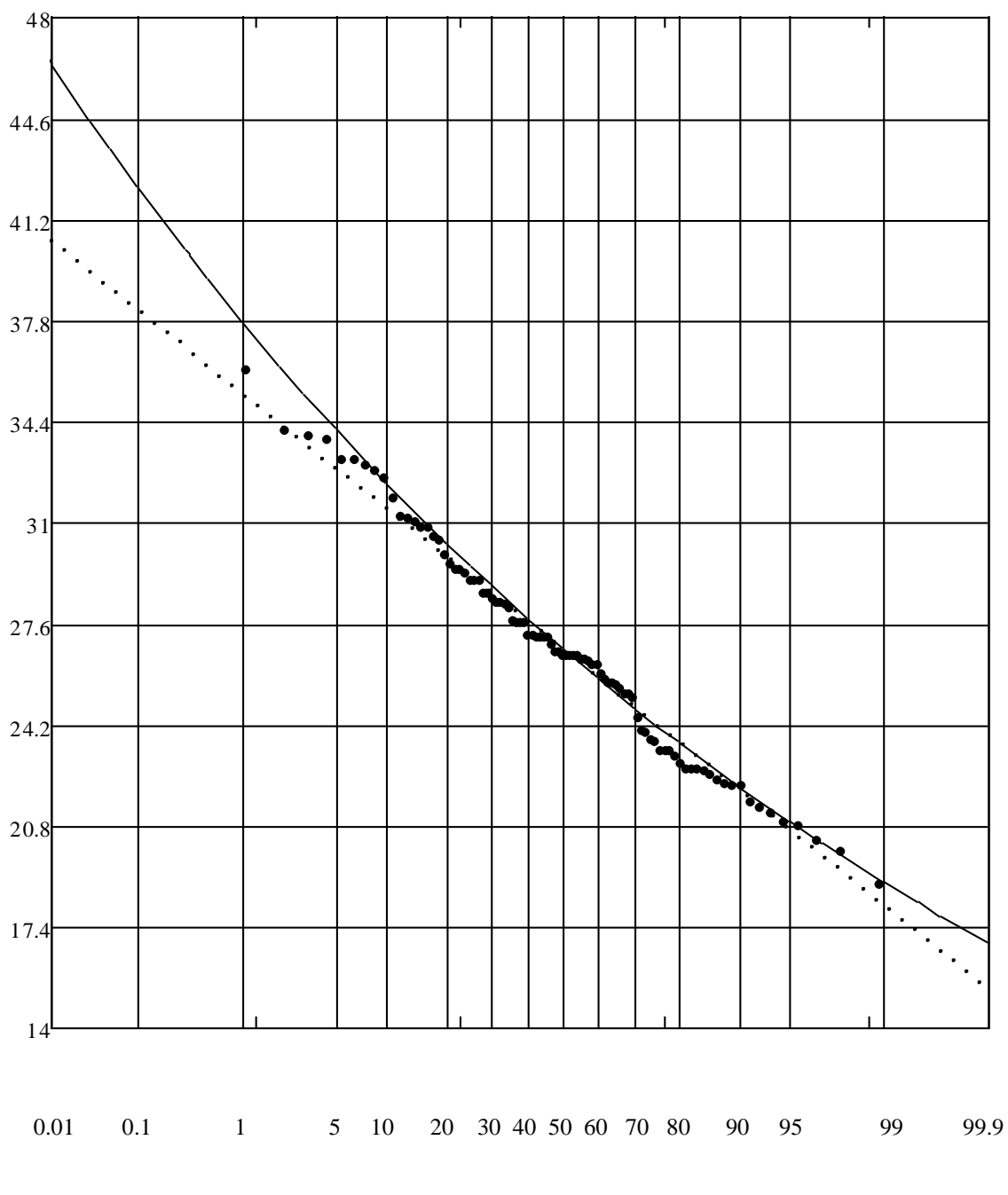
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. Д.11. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у м. Запоріжжя за період спостережень 1850–1855, 1952–1955, 1966–1977, 1979–1982, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована амплітуда температур,
- - - - - – нормальний розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.

$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

p, %

Рис. Д.12. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у м. Нова Каховка за період спостережень 1826–1852, 1882–1915, 1959–1964, 1966–1983, 2002–2010 рр.:

- – зафіксована амплітуда температур,
- - - - - – нормальний розподіл,
- – логарифмічно-нормальний розподіл.

Таблиця Е.1

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості  
вітру, м/с по гідровузлах Дніпровського каскаду

№	Район спостережень	Зафіксована швидкість вітру, м/с можлива 1 раз у					Дже- рело інфор- мації
		1 рік	5 років	10 років	15 років	20 років	
		Імовірність неперевищення, % (забезпеченість)					
		50%	20%	10%	6,37%	5%	
1	м. Вишгород за період: 1936–1941, 1943–1960 рр.	17	21	22	23	24	[320]
	м. Вишгород за період: 1936–1940, 1944–1956 рр.	21	25	27	28	29	[4]
2	м. Канів за період: 1936–1960 рр.	20	23	25	26	26	[320]
3	м. Кременчук за період: 1936–1960 рр.	20	24	25	26	26	[320]
4	м. Кам'янське за період: 1936–1938, 1944–1960 рр.	21	24	25	26	27	[320]
	м. Кам'янське за період: 1936–1938, 1944, 1946–1955 рр.	20	24	26	27	28	[4]
5	м. Запоріжжя за період: 1936–1940, 1944–1960 рр.	21	25	26	27	28	[320]
	м. Запоріжжя за період: 1936–1941, 1944–1958 рр.	24	27	30	31	32	[4]
6	м. Нова Каховка за період: 1936–1960 рр.	23	26	27	28	29	[320]

Таблиця Е.2

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру, м/с у Київській області

(за даними Центральної геофізичної обсерваторії, м. Київ)

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ (м/с)													
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
КИЇВСЬКА ОБЛАСТЬ													
м. Вишгород													
Середня	2,8	2,8	2,6	2,6	2,2	2,2	2,1	2,0	2,1	2,3	2,6	2,7	2,4
Середнє квадратичне відхилення	0,5	0,6	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,2
Коефіцієнт варіації	0,18	0,23	0,21	0,15	0,12	0,15	0,14	0,18	0,18	0,15	0,20	0,15	0,10
Найменша	2,0	1,7	1,3	1,9	1,6	1,4	1,6	1,3	1,3	1,6	1,8	1,9	1,9
Рік	1963, 1974	1972	1978	1963	1961, 1977	1977	1963	1974	1975	1972, 1977	1975	1972	1977
Найбільша	3,9	5,0	3,9	3,4	2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	3,0	3,6	3,4	2,9
Рік	1983	1969	1990	1981, 1987	1969, 1990	1968	1965, 1968	1966	1985	1970	1981	1988	1983
Максимальна	23	20	24	>20	>20	24	23	>20	20	>20	23	21	24
Рік	1986	1953, 1978	1983	1967	1966, 1970	1989	1988	1966	1964, 1982	1969, 1971	1981	1983	1983, 1989
Дата	21	22, 25	12	18	29, 25	7	7	13	13, 8	28, 23	3	29	12.III, 7.VI

Таблиця Е.3

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру, м/с у Кропивницькій області

(за даними Центральної геофізичної обсерваторії, м. Київ)

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ (м/с)													
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
КРОПИВНИЦЬКА ОБЛАСТЬ													
м. Світловодськ													
Середня	4,6	4,7	4,3	4,0	3,6	3,5	3,5	3,5	3,7	4,1	4,6	4,6	4,1
Середнє квадратичне відхилення	0,9	1,2	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,7	0,9	1,1	0,8	0,6
Коефіцієнт варіації	0,19	0,25	0,21	0,20	0,24	0,23	0,22	0,26	0,20	0,20	0,24	0,17	0,16
Найменша	2,7	3,0	2,9	2,9	2,2	1,8	2,2	2,1	2,2	2,5	2,6	2,9	2,9
Рік	1988	1982	1986, 1989	1989, 1990	1989	1989	1986, 1988	1989	1989, 1990	1990	1986, 1990	1990	1989, 1990
Найбільша	6,7	9,3	6,4	6,8	5,1	5,0	5,3	5,6	5,1	5,7	6,4	6,2	5,1
Рік	1964	1969	1961	1965	1966	1962	1962	1961	1973	1969	1972	1967	1965, 1969
Максимальна	34	34	34	22	20	24	24	24	22	28	28	24	34
Рік	1964	1969	1968	1987, 1988	1978	1966	1968	1960	1985	1969	1964	1979	1968, 1969
Дата	27	16	15	27, 11	18	14	20	24	30	28	8	7	15.III, 16.II

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру, м/с у Черкаській області  
(за даними Центральної геофізичної обсерваторії, м. Київ)

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ (м/с)													
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
ЧЕРКАСЬКА ОБЛАСТЬ													
м. Канів													
Середня	3,3	3,5	3,4	3,4	2,9	2,6	2,5	2,4	2,6	2,9	3,4	3,4	3,0
Середнє квадратичне відхилення	0,9	1,1	1,0	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	1,1	0,8	0,6
Коефіцієнт варіації	0,29	0,30	0,28	0,22	0,20	0,23	0,22	0,23	0,28	0,27	0,32	0,25	0,20
Найменша	1,5	2,0	1,5	2,0	1,6	1,2	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6	2,1	1,9
Рік	1980	1980	1978	1966	1979	1979	1966, 1972	1977	1979	1977	1966	1972	1979
Найбільша	5,4	6,3	5,9	4,8	4,2	3,7	3,3	3,2	4,0	4,6	6,2	4,7	4,0
Рік	1983	1969	1990	1981	1990	1982	1981, 1985	1987	1985	1987	1981	1981, 1989	1981
Максимальна	26	24	30	24	20	28	28	22	28	22	28	24	30
Рік	1982	1983	1981	1983	1990	1971	1990	1986	1984	1980	1977	1974	1981
Дата	9	9	12	22	29	13	5	25	19	11	27	30	12.III
м. Черкаси													
Середня	4,5	4,6	4,4	4,3	3,8	3,2	3,1	3,2	3,3	3,6	4,1	4,3	3,9
Середнє квадратичне відхилення	0,5	0,8	0,6	0,7	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,7	0,7	0,6	0,2
Коефіцієнт варіації	0,10	0,16	0,14	0,16	0,14	0,15	0,10	0,13	0,16	0,20	0,17	0,15	0,06
Найменша	3,9	3,1	3,1	2,8	2,7	2,2	2,6	2,2	2,4	2,4	2,8	3,1	3,4
Рік	1973, 1978	1982	1978	1966	1971, 1977	1988	1961	1968	1965, 1969	1961, 1966	1966	1968	1968
Найбільша	5,4	6,6	5,7	5,8	4,7	4,6	3,9	4,3	4,5	5,3	5,7	5,5	4,3
Рік	1979	1984	1990	1965	1971, 1978	1962	1965	1973	1985	1973	1981	1973	1962, 1981
Максимальна	28	28	28	25	26	23	28	25	23	25	28	28	28
Рік	1964	1962	1983	1987	1986	1974	1981	1986	1987	1969, 1974	1970	1974	1981, 1983
Дата	27	15	8	18	30	12	21	20	21	28, 22	4	30	21.VI, 8.III

Таблиця Е.5

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру, м/с у Дніпровській області  
(за даними Центральної геофізичної обсерваторії, м. Київ)

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ (м/с)													
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
СІЧЕСЛАВСЬКА ОБЛАСТЬ													
м. Кам'янське													
Середня	4,0	4,1	3,7	3,5	3,0	2,6	2,7	2,6	2,8	3,2	3,6	3,8	3,3
Середнє квадратичне відхилення	0,9	1,2	0,8	0,8	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5	0,7	0,8	0,8	0,6
Коефіцієнт варіації	0,21	0,29	0,21	0,24	0,26	0,21	0,19	0,19	0,19	0,23	0,22	0,22	0,17
Найменша	2,8	2,4	2,4	2,4	1,7	1,7	1,9	1,6	1,9	2,3	2,2	2,6	2,6
Рік	1988	1982	1985	1985	1984	1988	1988	1982	1989	1985	1986	1985	1982, 1985
Найбільша	5,3	8,6	5,1	6,2	4,8	3,7	3,7	3,5	3,9	5,1	5,5	5,8	4,7
Рік	1965	1969	1966	1965	1966	1969	1968	1969, 1975	1973	1969	1969	1973	1969
Максимальна	28	24	28	23	24	21	20	29	20	24	34	28	34
Рік	1975	1971	1990	1987	1976	1983	1966, 1971	1977	1977	1973	1981	1971, 1974	1981
Дата	5	7, 9	31	18	8	26	17, 3	20	11	19	4	26, 30	4.XI
м. Дніпро													
Середня	5,4	5,7	5,2	5,0	4,4	3,8	3,7	3,8	4,1	4,6	4,9	5,2	4,7
Середнє квадратичне відхилення	0,8	1,4	0,8	0,9	0,7	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,8	0,5
Коефіцієнт варіації	0,14	0,25	0,16	0,17	0,16	0,19	0,16	0,19	0,18	0,16	0,17	0,14	0,11
Найменша	3,9	2,8	2,1	3,7	3,4	2,5	2,6	2,3	2,2	3,1	3,7	3,8	3,6
Рік	1982	1982	1982	1966	1976, 1987	1988	1966	1982	1980	1967	1982, 1986	1970	1982
Найбільша	7,4	10,2	6,7	7,0	5,9	5,3	5,0	5,2	5,8	6,4	7,4	7,7	6,1
Рік	1979	1969	1990	1965	1962	1984	1962, 1971	1972	1962	1987	1962	1962	1962
Максимальна	25	29	29	26	24	25	20	22	20	25	26	24	29
Рік	1964	1969	1966	1962	1962	1967	1983	1981	1971, 1974	1969	1988	1974, 1989	1966, 1969
Дата	27	13, 18	15	15	4	26	27	26	20, 27	28	30	30, 8	15.III, 13,18. II

Таблиця Е.6

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру, м/с у Херсонській області  
(за даними Центральної геофізичної обсерваторії, м. Київ)

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ (м/с)													
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
ХЕРСОНСЬКА ОБЛАСТЬ													
м. Нова Каховка													
Середня	4,2	4,4	4,0	3,6	3,2	3,0	3,0	3,1	3,0	3,3	3,8	3,9	3,5
Середнє квадратичне відхилення	1,1	1,5	0,7	0,9	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,9	1,0	0,9	0,7
Коефіцієнт варіації	0,27	0,33	0,17	0,24	0,23	0,20	0,16	0,18	0,19	0,27	0,26	0,23	0,19
Найменша	2,6	2,4	2,7	2,3	2,3	1,7	2,2	2,1	2,0	2,2	2,0	1,9	2,5
Рік	1989	1989	1989	1986, 1990	1987, 1988	1989	1985, 1990	1990	1985, 1990	1967, 1985	1982, 1990	1985	1990
Найбільша	7,2	10,2	5,2	6,5	4,7	3,9	3,9	4,0	3,9	6,4	6,5	5,7	4,6
Рік	1969	1969	1970	1965	1963	1961, 1962	1962	1963, 1974	1968, 1973	1961	1962	1961	1962
Максимальна	34	34	28	28	22	22	24	25	25	30	24	24	34
Рік	1969	1969	1970	1960, 1965	1978, 1979	1971	1967, 1974	1975	1975	1969	1953, 1966	1962	1969
Дата	4. 6	12	9	7, 11	3, 31	14	16, 16	13	7	28	17, 29	22	4.6.I, 12.II
м. Херсон													
Середня	4,3	4,5	4,3	3,9	3,4	3,1	3,1	3,0	2,9	3,2	3,8	4,0	3,6
Середнє квадратичне відхилення	0,9	1,2	0,7	0,7	0,5	0,6	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,6	0,4
Коефіцієнт варіації	0,21	0,27	0,16	0,17	0,16	0,20	0,12	0,13	0,17	0,20	0,17	0,14	0,12
Найменша	3,3	3,3	3,2	2,8	2,6	2,2	2,3	2,3	2,2	2,0	2,6	2,6	3,1
Рік	1985	1987, 1989	1978	1986	1984	1989	1986	1982	1982	1967	1986	1985	1989, 1990
Найбільша	8,0	9,7	5,8	5,3	4,6	5,3	4,2	3,8	4,2	4,7	4,8	5,4	4,9
Рік	1969	1969	1969	1969	1966	1974	1971	1971, 1974	1968	1971, 1975	1968, 1969	1969	1969
Максимальна	30	24	28	22	22	20	25	40	20	30	22	24	40
Рік	1969	1978	1966	1965	1978	1986	1973	1963	1975	1969	1984	1962, 1974	1963
Дата	5	3	15	3	3	10, 15	19	16	3	28	12	24, 9,10	16.VI II

Таблиця Е.7

Статистичні дані про максимальні щорічні швидкості вітру, м/с у Запорізькій області  
(за даними Центральної геофізичної обсерваторії, м. Київ)

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ (м/с)													
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
ЗАПОРІЗЬКА ОБЛАСТЬ													
м. Запоріжжя													
Середня	3,1	3,6	3,1	2,9	2,5	2,1	2,0	2,0	2,3	2,5	3,0	3,0	2,7
Середнє квадратичне відхилення	0,8	1,7	0,8	0,9	0,7	0,5	0,3	0,5	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5
Коефіцієнт варіації	0,25	0,48	0,26	0,31	0,26	0,22	0,17	0,23	0,27	0,26	0,23	0,17	0,18
Найменша	1,7	2,2	1,9	1,7	1,5	1,1	1,1	1,2	1,3	1,7	1,7	1,9	1,8
Рік	1988	1980, 1988	1989	1990	1988	1988	1988	1989	1988	1989, 1990	1990	1985	1988
Найбільша	5,8	11,4	5,1	6,4	4,0	3,2	2,7	3,3	3,6	4,4	5,0	4,0	4,0
Рік	1969	1969	1974	1965	1966	1972	1972	1972	1974	1961	1962	1969	1969
Максимальна	28	>40	24	24	24	24	24	20	20	30	24	24	>40
Рік	1956	1969	1984	1962	1970	1976	1970	1976	1973	1969	1956, 1962	1973	1969
Дата	21, 22	16	3	15	5	16	18	6	28	28	14, 11	1	16.II





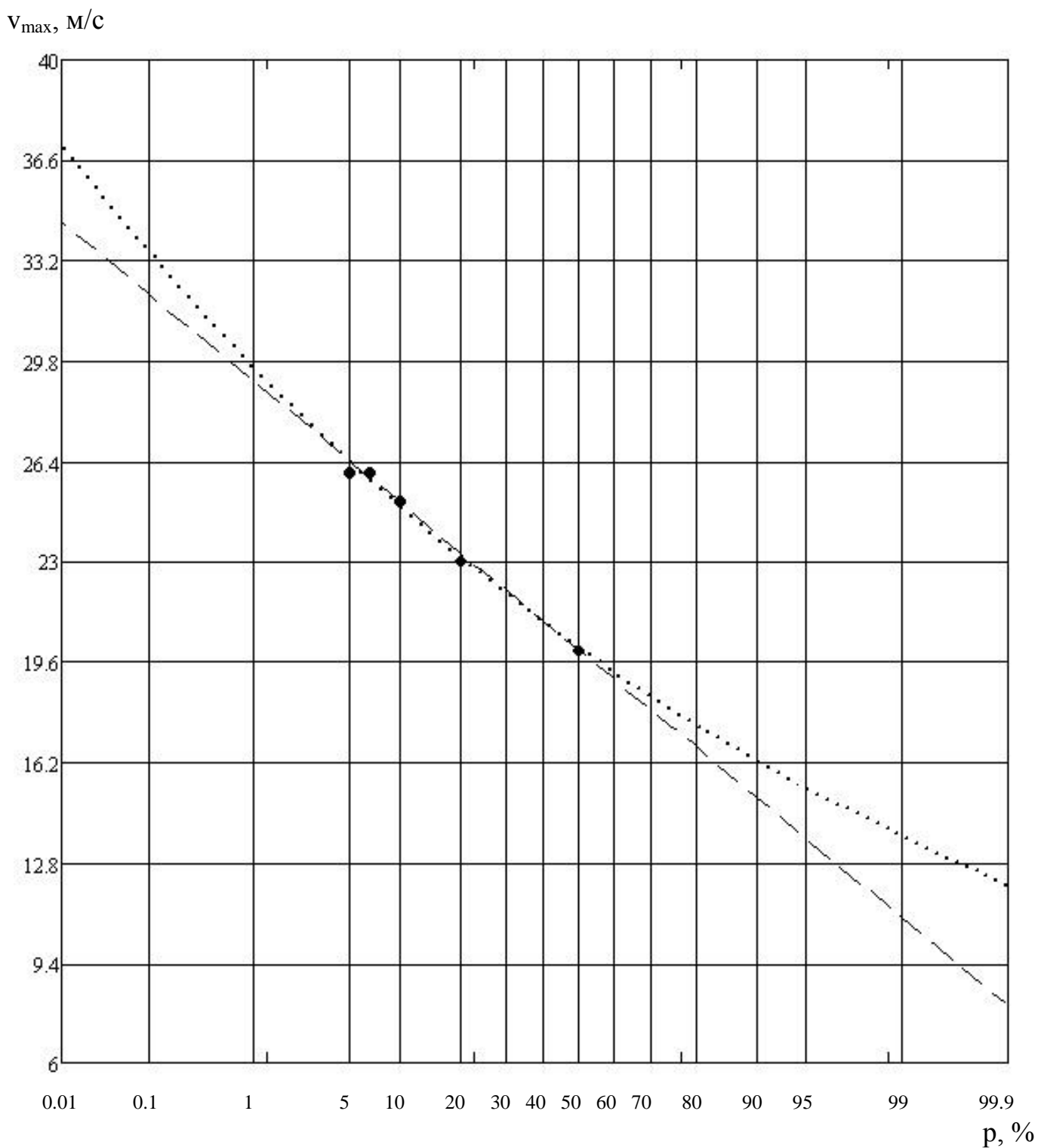


Рис. Ж.2. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної швидкості вітру у м. Канів за період спостережень 1936–1960 рр.:

- • • • • — імовірність зафіксованої максимальної швидкості вітру,
- • • • • — логарифмічно-нормальний розподіл,
- — — — — нормальний розподіл





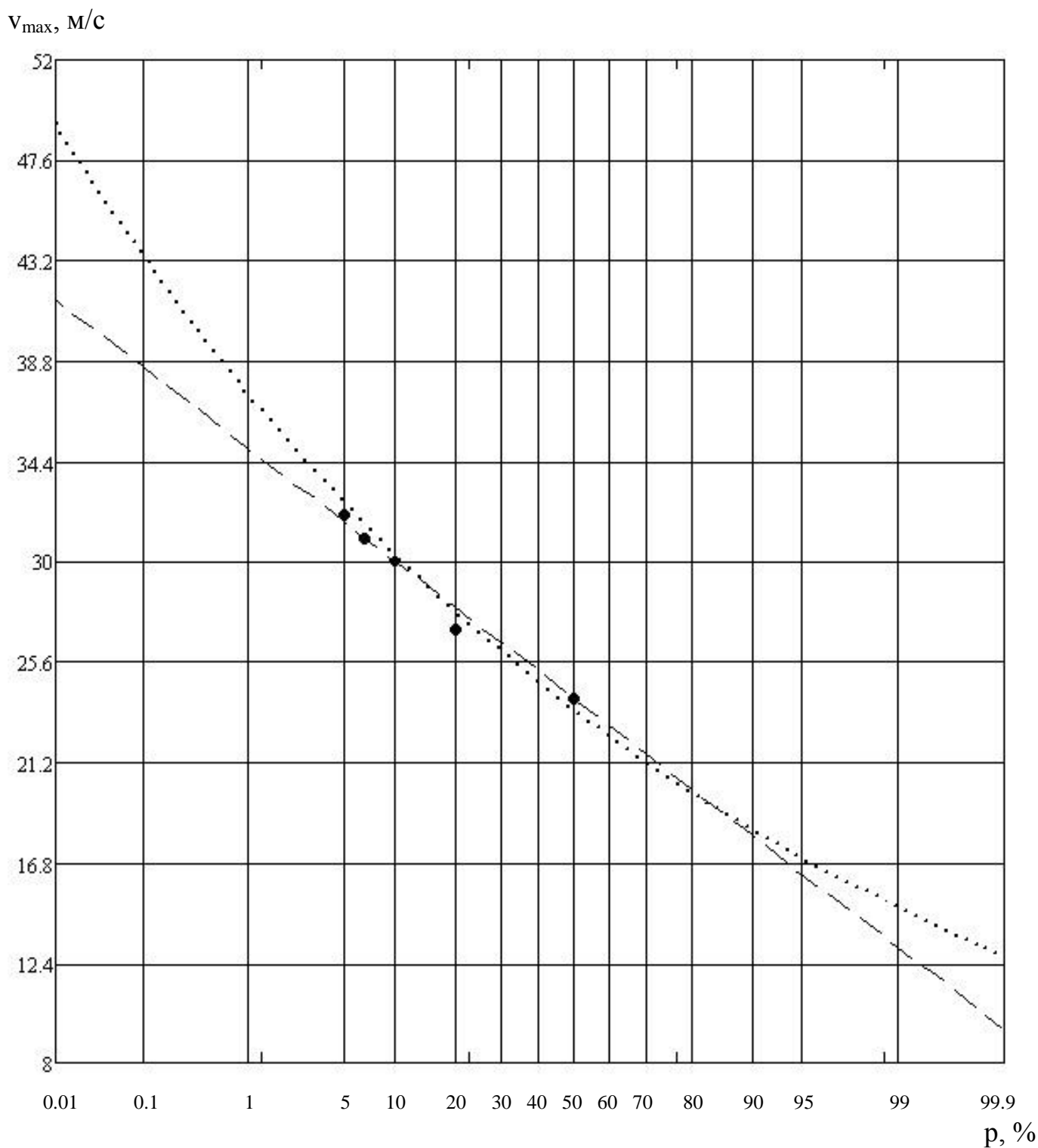


Рис. Ж.5. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної швидкості вітру у м. Запоріжжя за період спостережень 1936–1940, 1944–1960 рр.:

- • • • • — імовірність зафіксованої максимальної швидкості вітру,
- • • • • — логарифмічно-нормальний розподіл,
- — — — — нормальний розподіл

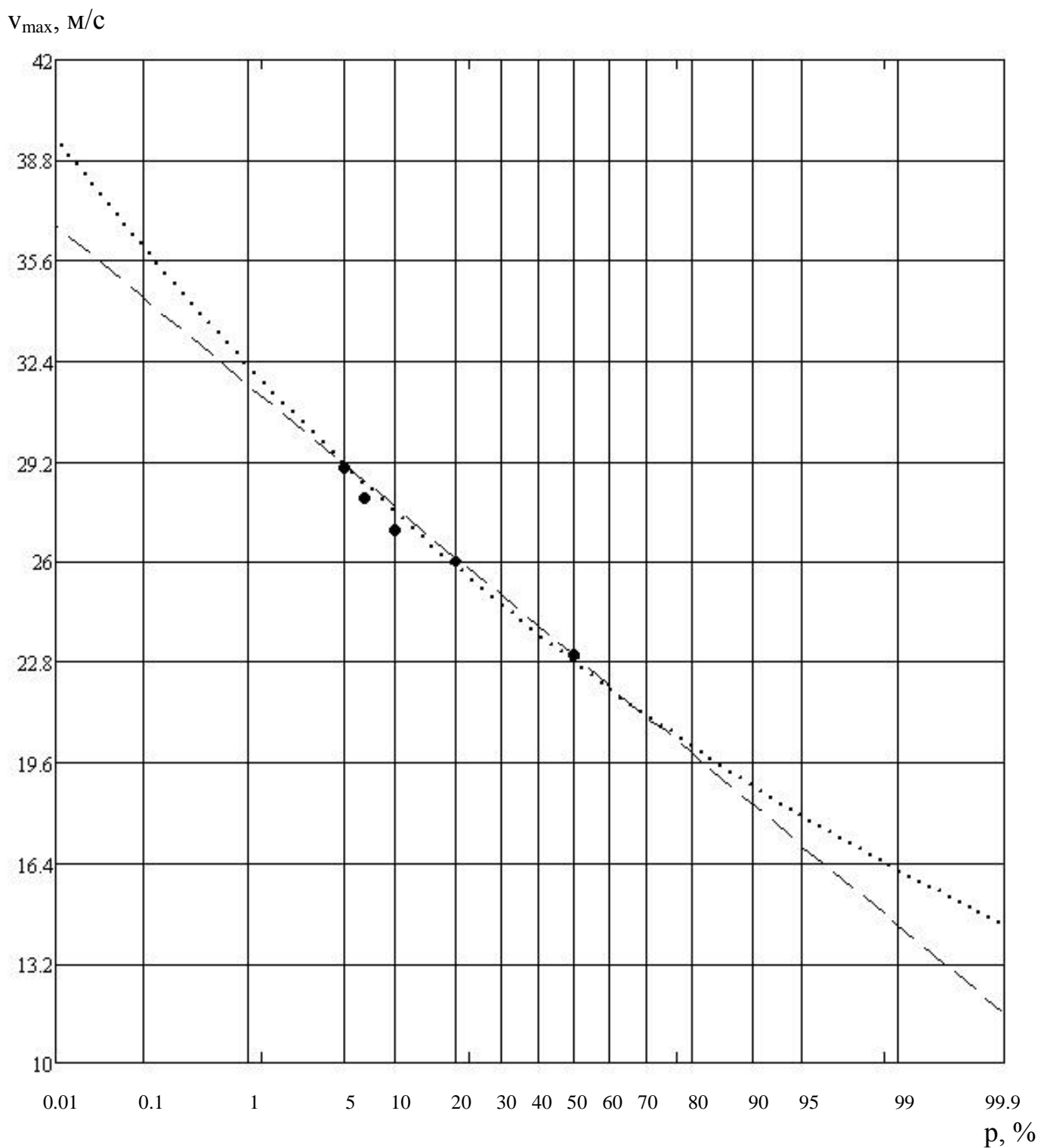


Рис. Ж.6. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної швидкості вітру у м. Каховка за період спостережень 1936–1960 рр.:

- • • • • — імовірність зафіксованої максимальної швидкості вітру,
- • • • • — логарифмічно-нормальний розподіл,
- — — — — нормальний розподіл

## Додаток И

Таблиця И.1

Щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Київського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимальна товщина льоду, льоду $h_{\max}$ , см	Джерело Інформації
1	1956	73	[372]
2	1957	41	[373]
3	1958	46	[374]
4	1959	41	[376]
5	1960	58	[375]
6	1961	38	[381–382]
7	1962	34	[383–384]
8	1963	80	[385]
9	1964	56	[386–387]
10	1965	76	[377]
11	1966	54	[378]

Таблиця И.2

Щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Канівського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимальна товщина льоду, льоду $h_{\max}$ , см	Джерело інформації
1	1956	61	[372]
2	1957	38	[373]
3	1958	43	[374]
4	1959	37	[376]
5	1960	55	[375]
6	1961	37	[381–382]
7	1962	32	[383–384]
8	1963	59	[385]
9	1964	55	[386–387]
10	1965	45	[377]
11	1966	32	[378]

Таблиця И.3

Щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Кременчуцького гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимальна товщина льоду, льоду $h_{\max}$ , см	Джерело інформації
1	1956	60	[372]
2	1957	37	[373]
3	1958	43	[374]
4	1959	36	[376]
5	1960	55	[375]
6	1961	30	[381–382]
7	1962	27	[383–384]
8	1963	46	[385]
9	1964	55	[386–387]
10	1965	40	[377]
11	1966	25	[378]

Таблиця И.4

Щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Середньодніпровського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимальна товщина льоду, льоду $h_{\max}$ , см	Джерело інформації
1	1956	60	[372]
2	1957	37	[373]
3	1958	31	[374]
4	1959	35	[376]
5	1960	38	[375]
6	1961	28	[381–382]
7	1962	26	[383–384]
8	1963	45	[385]
9	1964	55	[386–387]
10	1965	40	[377]
11	1966	17	[378]



Таблиця И.5

Щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Дніпровського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимальна товщина льоду, льоду $h_{\max}$ , см	Джерело Інформації
1	1956	60	[372]
2	1957	37	[373]
3	1958	27	[374]
4	1959	35	[376]
5	1960	35	[375]
6	1961	21	[381–382]
7	1962	26	[383–384]
8	1963	37	[385]
9	1964	55	[386–387]
10	1965	33	[377]
11	1966	9	[378]

Таблиця И.6

Щорічна максимальна товщина льоду у водосховищі Каховського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.

№ з/п	Рік	Щорічна максимальна товщина льоду, льоду $h_{\max}$ , см	Джерело інформації
1	1956	45	[372]
2	1957	36	[373]
3	1958	28	[374]
4	1959	28	[376]
5	1960	29	[375]
6	1961	20	[381–382]
7	1962	23	[383–384]
8	1963	29	[385]
9	1964	40	[386–387]
10	1965	28	[377]
11	1966	7	[378]

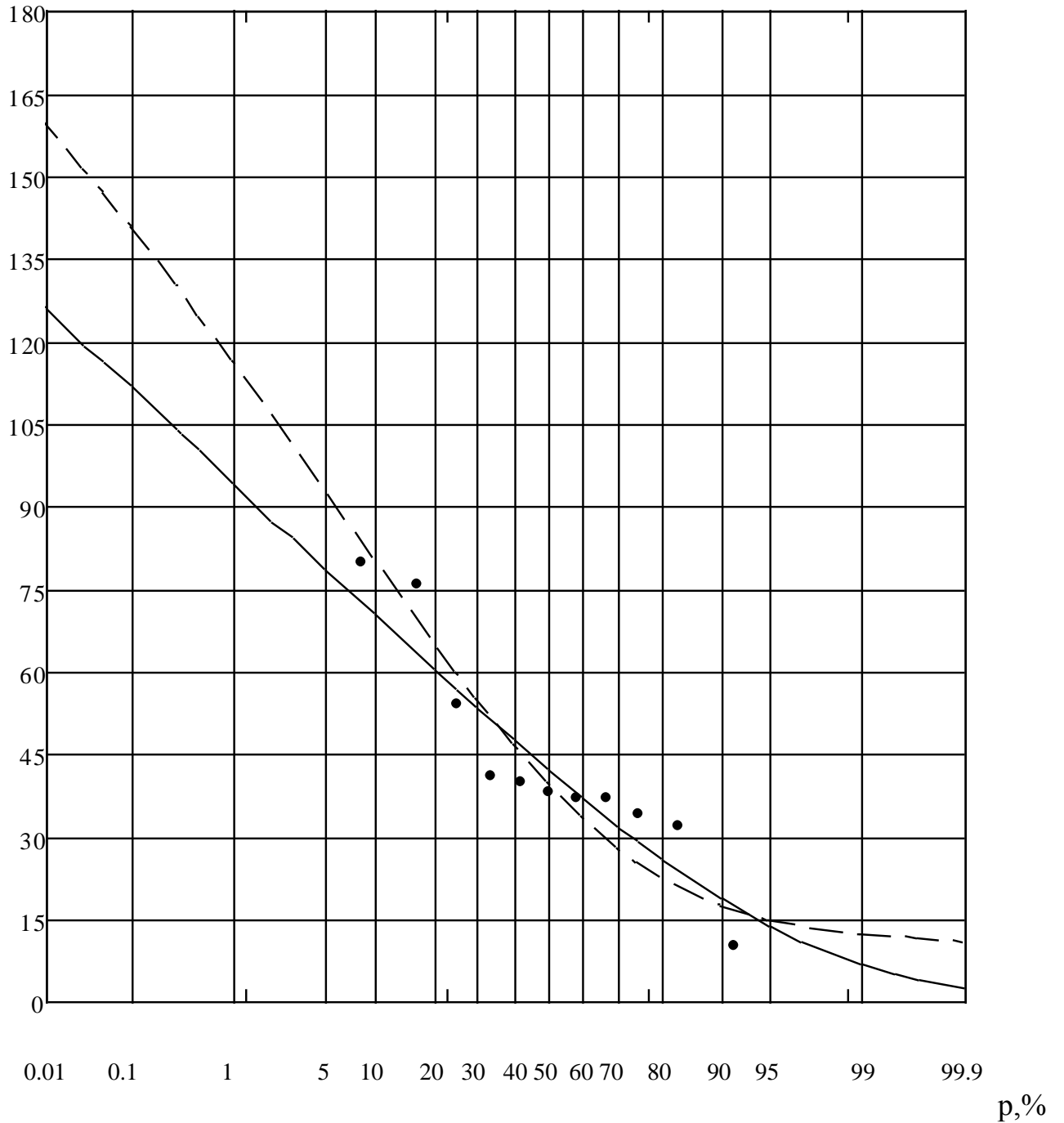
$h_{\max}, \text{см}$ 

Рис. К.1. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищі Київського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.:

- • • • • – імовірність зафіксованої максимальної товщини льоду,
- – трьохпараметричний гамма-розподіл,
- – біекспоненціальний розподіл

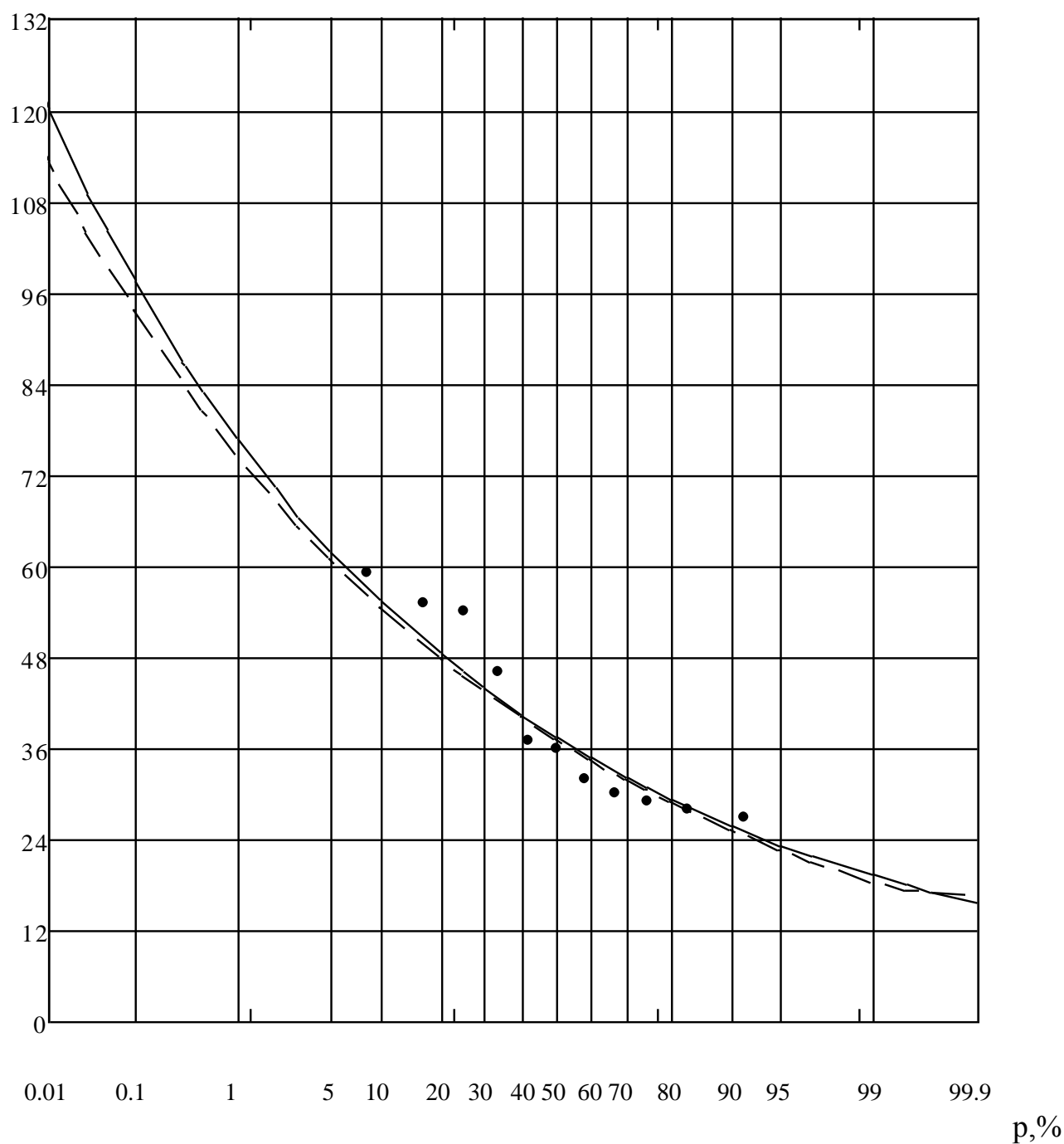
$h_{\max}, \text{CM}$ 

Рис. К.2. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищі Канівського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.:

- • • • • — імовірність зафіксованої максимальної товщини льоду,
- — трьохпараметричний гамма-розподіл,
- — логарифмічно-нормальний розподіл

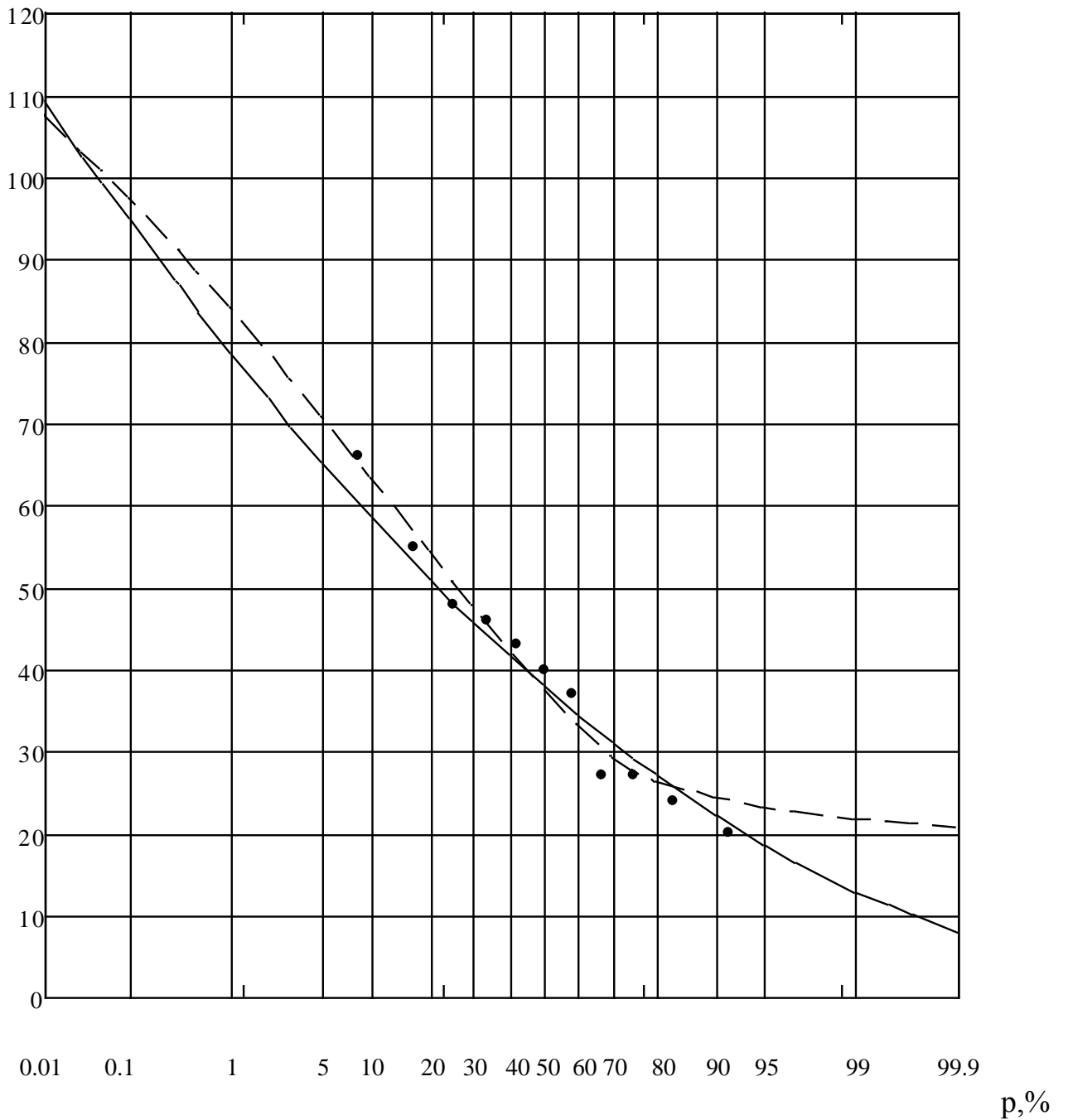
$h_{\max}, \text{CM}$ 

Рис. К.3. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищі Кременчуцького гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.:

- • • • • — імовірність зафіксованої максимальної товщини льоду,
- — трьохпараметричний гамма-розподіл,
- — біекспоненціальний розподіл

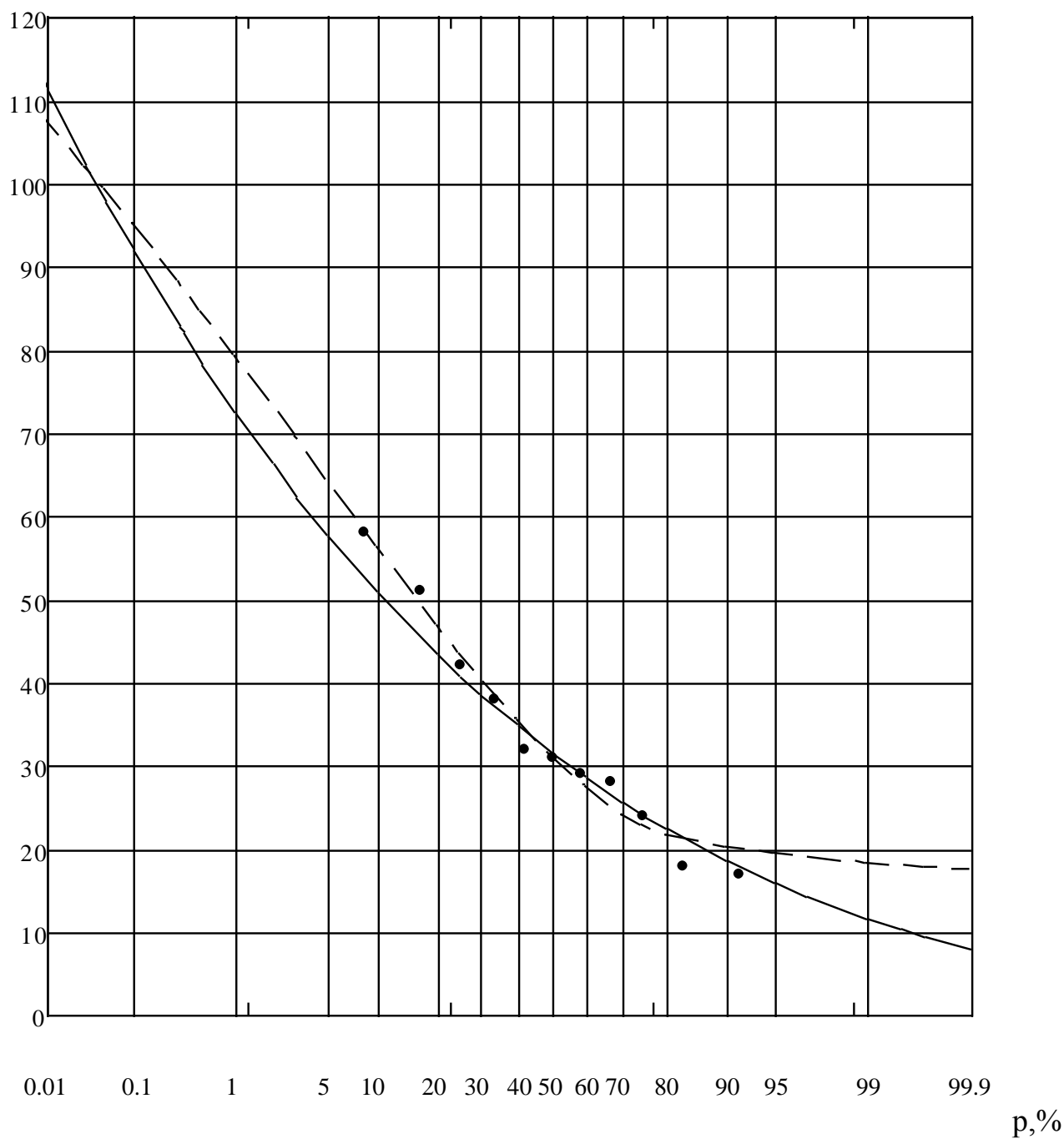
$h_{\max}, \text{CM}$ 

Рис. К.4. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищі Середньодніпровського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.:

- • • • • – імовірність зафіксованої максимальної товщини льоду,
- – трьохпараметричний гамма-розподіл,
- – біекспоненціальний розподіл

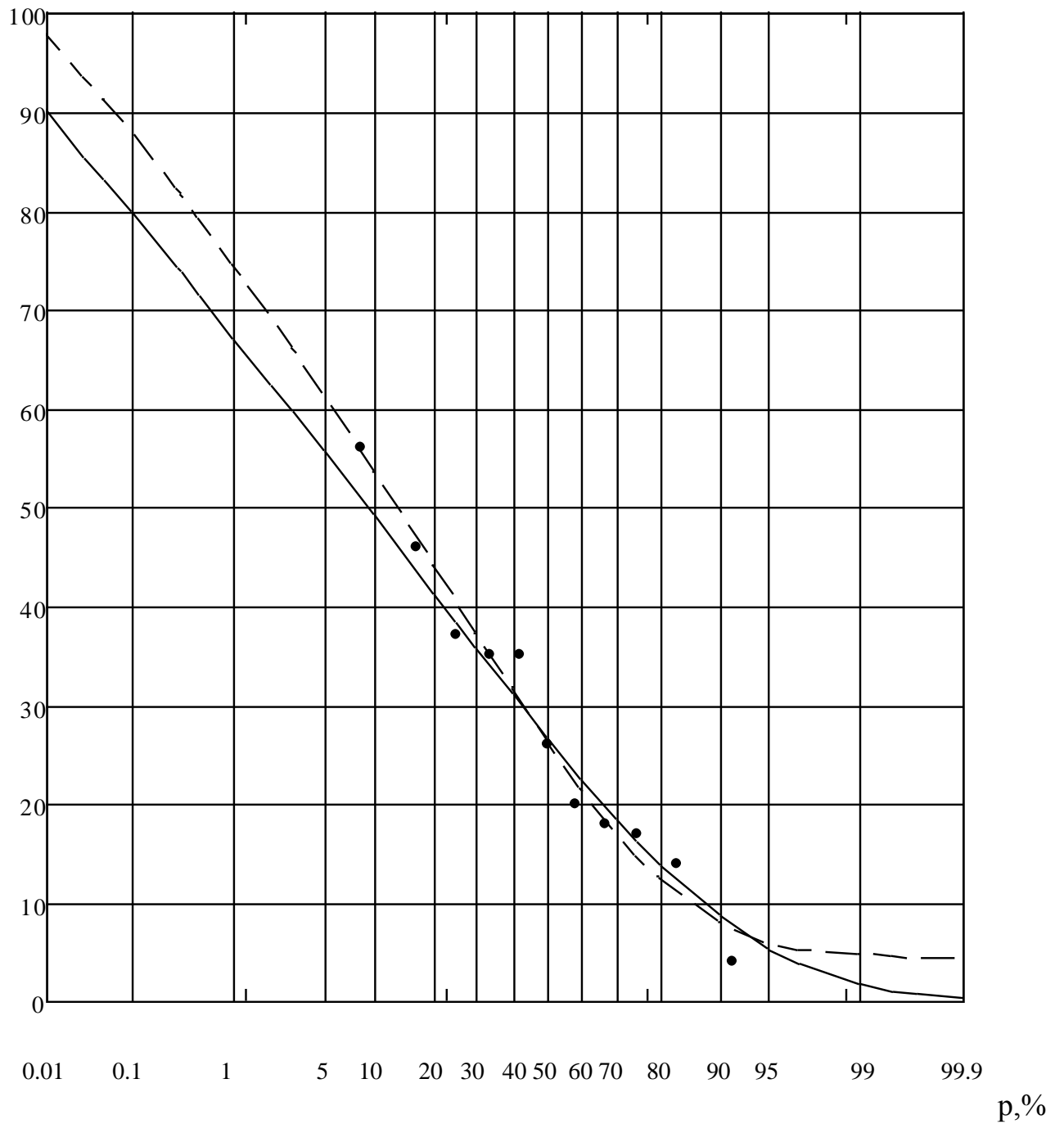
$h_{\max}, \text{см}$ 

Рис. К.5. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищі Дніпровського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.:

- • • • • – імовірність зафіксованої максимальної товщини льоду,
- – трьохпараметричний гамма-розподіл,
- – біекспоненціальний розподіл

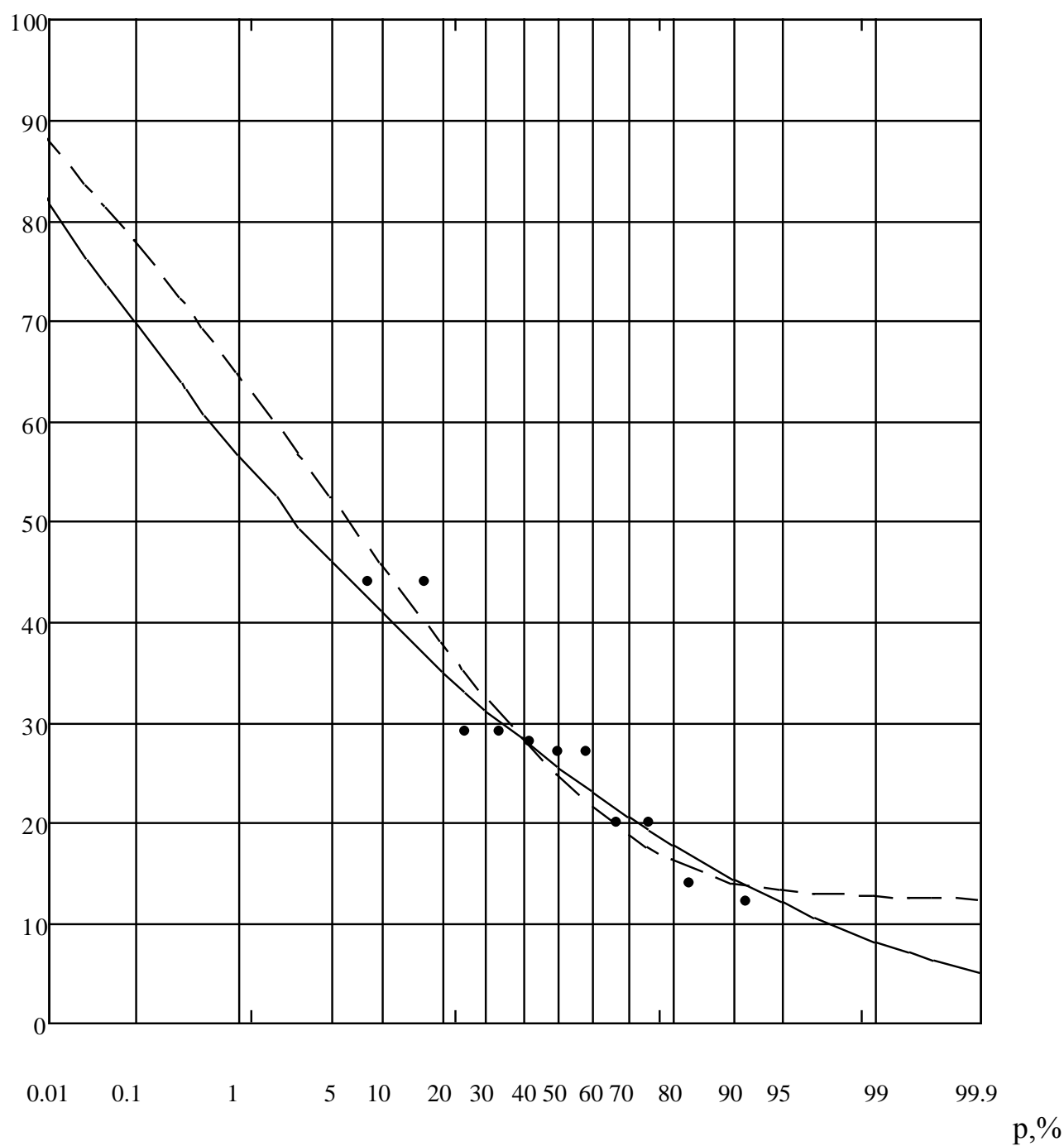
$h_{\max}, \text{CM}$ 

Рис. К.6. Результати розрахунків імовірності щорічної максимальної товщини льоду у водосховищі Каховського гідровузла за період спостережень 1956–1966 рр.:

- • • • • — імовірність зафіксованої максимальної товщини льоду,
- — трьохпараметричний гамма-розподіл,
- — біекспоненціальний розподіл

Статистичні дані про максимальні паводкові витрати у пунктах спостережень  
р. Дніпро [37]

№ з/п	Рік спостереження	Максимальні паводкові витрати м <sup>3</sup> /с у пунктах спостережень			
		м. Вишгород	м. Київ	м. Кременчук	пгт. Лоцманська-Кам'янка
1	2	3	4	5	6
1	1787	10400	14200	14600	15400
2	1788	4900	6800	7240	7300
3	1789	11050	15200	15200	16400
4	1790	2040	2800	2900	3030
5	1791	3030	4200	4300	4500
6	1792	5650	7800	8000	8380
7	1793	3030	4200	4300	4500
8	1794	2020	2800	2900	3000
9	1795	6070	8300	8600	9000
10	1796	3030	4200	4300	4500
11	1797	10380	14200	15200	15400
12	1798	3030	4200	4300	4500
13	1799	5400	7400	7600	8000
14	1800	8830	12100	12400	13100
15	1801	5030	6900	7100	7470
16	1802	3730	5100	5300	5530
17	1803	5240	7200	7400	7770
18	1804	4640	6400	6500	6890
19	1805	5650	8610	8350	8380
20	1806	3570	4900	5000	5280
21	1807	3730	5100	5300	5530
22	1808	9030	12400	12700	13400
23	1809	5030	6900	7100	7470
24	1810	2180	3000	3080	3240
25	1811	2470	3400	3500	3670
26	1812	4840	6600	6800	7180
27	1813	6740	8610	9010	10000
28	1814	5240	7200	7400	7770



## Продовження таблиці Л.1

1	2	3	4	5	6
29	1815	1660	2280	2340	2460
30	1816	5440	7500	7700	8070
31	1817	2470	3400	3500	3670
32	1818	3750	4860	5090	5560
33	1819	4290	5800	6220	6360
34	1820	10240	14300	13700	15200
35	1821	4680	6360	6700	6950
36	1822	3110	4250	4300	4620
37	1823	2390	3420	3410	3540
38	1824	2240	3130	3240	3320
39	1825	5280	6670	7480	7830
40	1826	2700	3720	3940	4020
41	1827	3120	6360	4300	4620
42	1828	3900	5310	5520	5790
43	1829	7750	10600	10500	11500
44	1830	4530	6070	6460	6720
45	1831	5500	7000	7480	8160
46	1832	2240	3130	3240	3320
47	1833	2530	3420	3580	3760
48	1834	3570	4860	5090	5300
49	1835	1720	2370	2460	2550
50	1836	2200	3060	3080	3260
51	1837	3850	5310	5520	5710
52	1838	5000	6670	6950	7410
53	1839	4360	5800	6220	6470
54	1840	5280	7750	7340	7830
55	1841	7820	10100	10500	11600
56	1842	1420	2060	2040	2110
57	1843	1600	2260	2320	2370
58	1844	5860	8170	8200	8690
59	1845	13600	20600	20900	22500
60	1846	2040	2730	2920	3030
61	1847	5030	7000	7210	7470
62	1848	3700	4750	4880	5040
63	1849	11190	16200	16300	16600
64	1850	8560	11200	11600	12700

## Продовження таблиці Л.1

1	2	3	4	5	6
65	1851	3850	5310	5520	5710
66	1852	3280	4650	4680	4870
67	1853	5340	7000	7480	7920
68	1854	5520	7750	7760	8190
69	1855	7280	9560	9720	10800
70	1856	3430	4860	4880	5090
71	1857	2330	3670	3320	3450
72	1858	2940	4060	4200	4360
73	1859	2500	3570	3580	3710
74	1860	5650	7740	7760	8380
75	1861	9170	10100	12300	13600
76	1862	3630	4980	5200	5380
77	1863	1330	1645	1670	1830
78	1864	1520	2030	2180	2250
79	1865	5960	7070	8350	8850
80	1866	5220	6790	7210	7740
81	1867	6400	7000	8840	9500
82	1868	6800	9070	9010	10100
83	1869	2100	3200	3000	3110
84	1870	3280	5120	4680	4870
85	1871	6700	9000	9010	10000
86	1872	5120	6300	7480	8040
87	1873	1930	2700	2760	2870
88	1874	2500	3750	3580	3710
89	1875	1780	2620	2540	2640
90	1876	7000	10100	9540	10400
91	1877	12270	15800	17800	18200
92	1878	7820	10800	10500	11600
93	1879	5220	7180	7370	7740
94	1880	3870	5620	5500	5740
95	1881	5050	7180	7540	8130
96	1882	2580	3460	3500	3520
97	1883	6720	9660	10400	11200
98	1884	2850	3860	3930	3980
99	1885	2750	3460	3500	3470
100	1886	5330	6660	7210	7770

## Продовження таблиці Л.1

1	2	3	4	5	6
101	1887	3040	4040	4490	4570
102	1888	8760	11800	12900	14100
103	1889	7530	11700	12800	13100
104	1890	3920	5080	5130	5060
105	1891	5100	5480	5700	5710
106	1892	2930	3940	4130	4090
107	1893	4540	6610	7080	7560
108	1894	2180	3010	3210	3160
109	1895	7620	13100	14800	14900
110	1896	4930	6470	6980	7330
111	1897	5670	8170	8480	8880
112	1898	3340	4050	4090	4320
113	1899	2010	2860	2730	2810
114	1900	7560	10600	10800	12000
115	1901	3720	5080	5170	5180
116	1902	3590	5480	5500	5710
117	1903	2860	3680	3820	4040
118	1904	2520	3180	3060	3200
119	1905	5010	8390	8640	9200
120	1906	4170	5800	6600	7010
121	1907	8380	12300	13600	14600
122	1908	8660	14600	15000	16500
123	1909	5030	5910	6410	6410
124	1910	2500	3180	3310	3340
125	1911	3890	4720	4920	5110
126	1912	5310	5960	6560	7060
127	1913	2710	3680	3790	3890
128	1914	3410	4310	4450	4480
129	1915	7660	12600	12100	13400
130	1916	7530	10200	9830	11200
131	1917	10840	18800	19000	20700
132	1918	3420	4080	4090	4040
133	1919	4180	6390	6600	6890
134	1920	3770	5290	5500	5870
135	1921	1570	2220	2270	2600
136	1922	7200	8840	8770	9990

## Продовження таблиці Л.1

1	2	3	4	5	6
137	1923	2900	3510	4410	4820
138	1924	9790	10800	10100	11800
139	1925	1090	1480	1560	1670
140	1956	6060	8570	8410	9070
141	1927	4310	5010	5320	5760
142	1928	4910	7920	7760	8260
143	1929	7740	10900	11200	11500
144	1930	1620	2550	2940	3180
145	1931	15300	23100	23900	25100
146	1932	9140	14300	15500	16800
147	1933	3640	5120	5320	5980
148	1934	7950	9100	9300	10600
149	1935	6530	7440	7560	7510
150	1936	3730	4670	4670	4820
151	1937	4160	8010	8200	8750
152	1938	4890	5900	6120	6050
153	1939	2120	2830	2830	3670
154	1940	9820	12000	12200	12600
155	1941	6820	8850	8840	9080
156	1942	9570	16000	17200	16500
157	1943	1670	2380	2400	2410
158	1944	3730	4410	4470	4340
159	1945	4290	5360	5750	5560
160	1946	3020	5850	5980	5660
161	1947	5590	10500	9910	10400
162	1948	3000	4070	3850	4770
163	1949	2930	3670	3670	3780
164	1950	1610	2220	2680	2440
165	1951	5820	8880	8610	8500
166	1952	1950	3300	3320	3320
167	1953	5560	8200	8400	8590
168	1954	1790	2610	2620	2640
169	1955	3920	5050	5070	5140
170	1956	11090	12100	11100	11170
171	1957	2830	3670	3560	3680
172	1958	11140	12300	12300	12600

## Продовження таблиці Л.1

1	2	3	4	5	6
173	1959	2870	3730	3810	3560
174	1960	2240	3640	3600	3700
175	1961	2270	2870	2910	2980
176	1962	6140	6560	5980	5990
177	1963	5600	8340	7670	7970
178	1964	3640	4650	4520	4580
179	1965	3340	3940	3820	3880
180	1966	5540	6490	6520	6690
181	1967	4700	6770	6530	6610
182	1968	4250	5150	5160	5360
183	1969	4650	5830	5750	5860
184	1970	12300	19700	19100	19500
185	1971	4600	5680	5670	5790
186	1972	2160	2760	2820	2890
187	1973	2480	3090	3200	3400
188	1974	1350	1870	1900	2010
189	1975	3110	3500	3600	3800
190	1976	4240	4820	4900	5210
191	1977	2840	3520	3600	3800
192	1978	3660	4690	4800	5100
193	1979	9150	10870	11160	11800
194	1980	3330	4720	4800	5100
195	1981	4310	5300	5400	5700
196	1982	3330	4410	4500	4800
197	1983	3740	4870	5000	5300
198	1984	1680	2290	2350	2500
199	1985	3430	4440	4560	4810
200	1986	4340	5270	5400	5700
201	1987	3080	4020	4130	4400
202	1988	3000	4580	4700	4980
203	1989	2370	3100	3180	3350
204	1990	2200	2900	2970	3130
205	1991	3200	4100	4200	4430
206	1992	2300	3000	3080	3240
207	1993	3200	3900	4000	4220
208	1994	4800	5700	5840	6160

## Продовження таблиці Л.1

1	2	3	4	5	6
209	1995	2100	2900	2970	3130
210	1996	2390	3170	3260	3440
211	1997	1470	1980	2040	2150
212	1998	2850	4000	4100	4400
213	1999	4440	5000	5200	5450

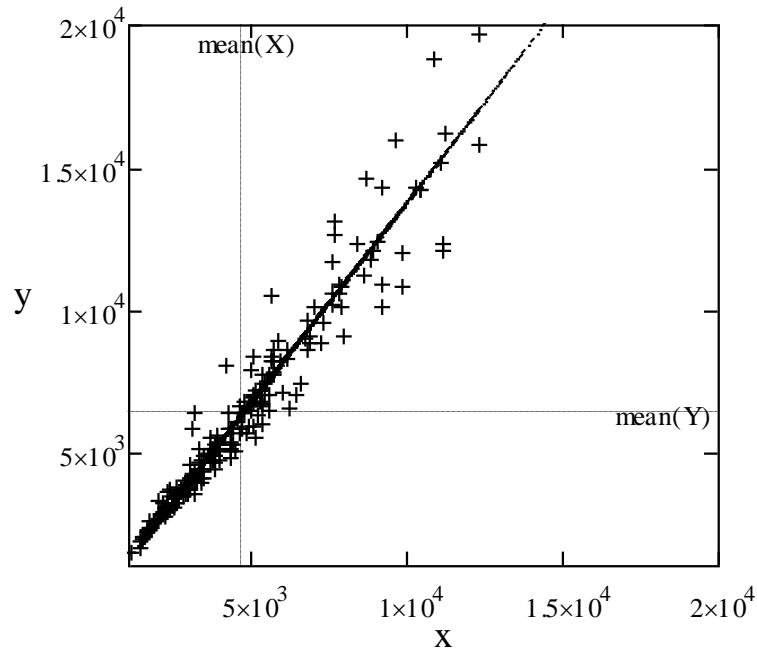


Рис. М.1. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Вишгород (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, що спостерігались у м. Київ (вісь  $y$ ) з 1787 по 1999 рр.

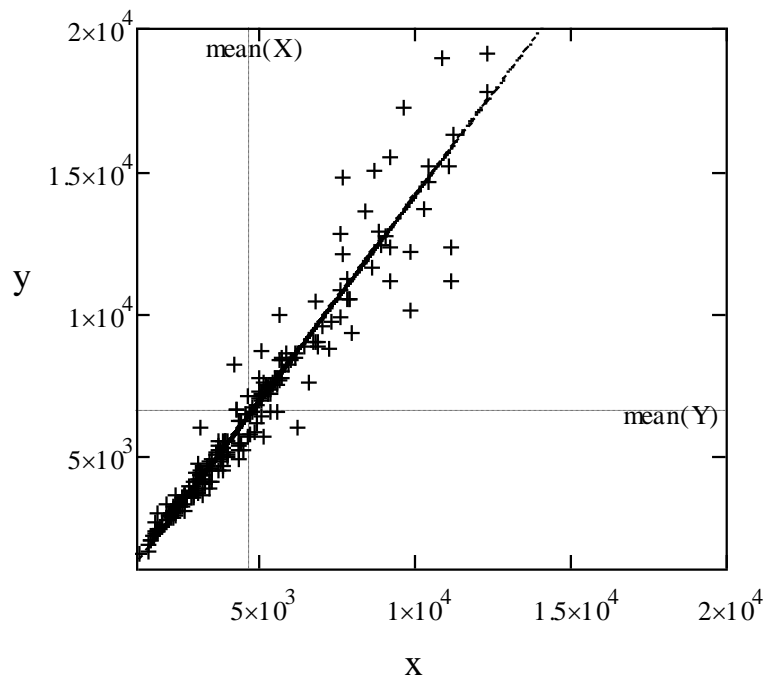


Рис. М.2. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Вишгород (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, що спостерігались у м. Кременчук (вісь  $y$ ) з 1787 по 1999 рр.

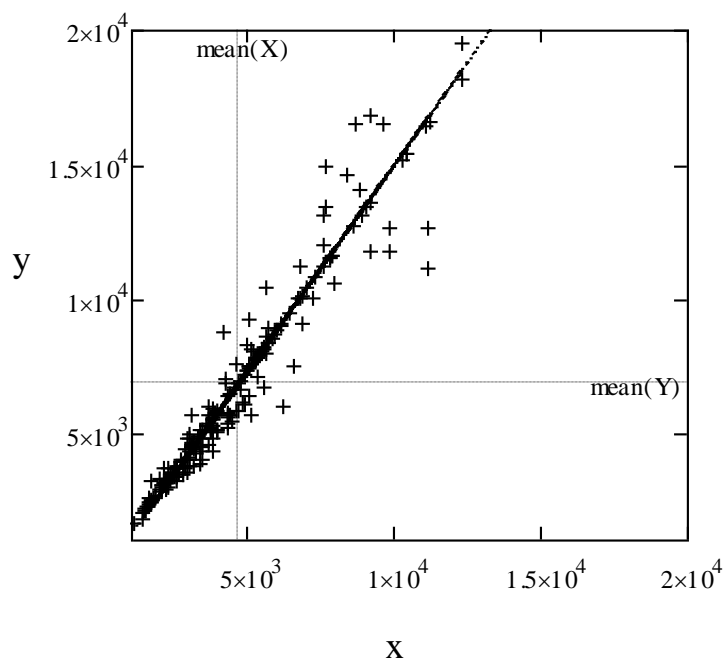


Рис. М.3. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Вишгород (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, що спостерігались у смт. Лоцмано-Кам'янка (вісь  $y$ ) з 1787 по 1999 рр.

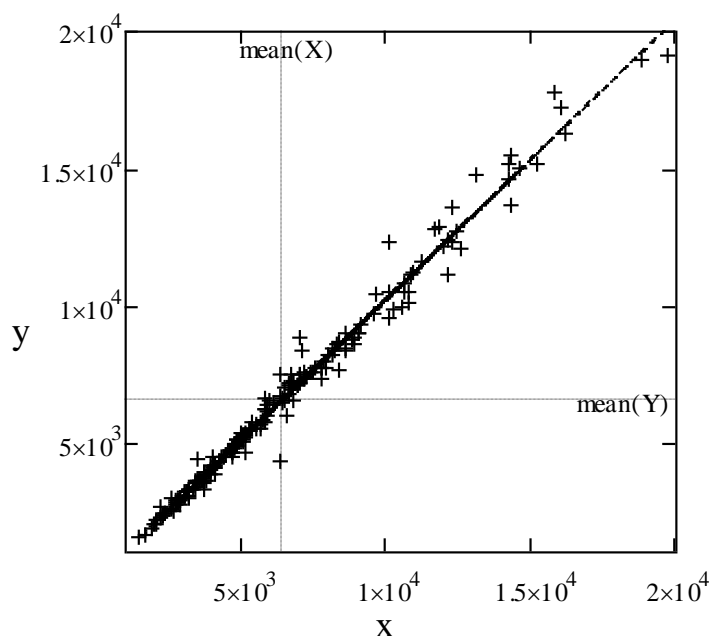


Рис. М.4. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Київ (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, що спостерігались у м. Кременчук (вісь  $y$ ) з 1787 по 1999 рр.



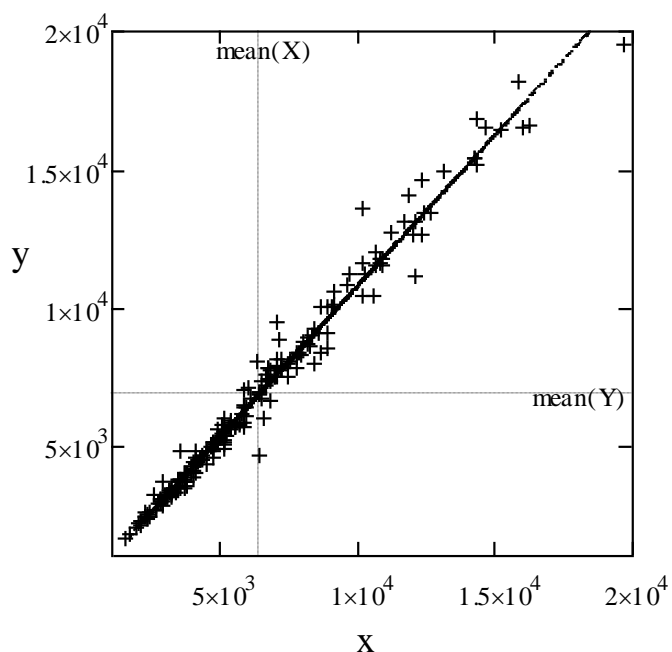


Рис. М.5. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Київ (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, що спостерігались у смт. Лоцмано-Кам'янка (вісь  $y$ ) з 1787 по 1999 рр.

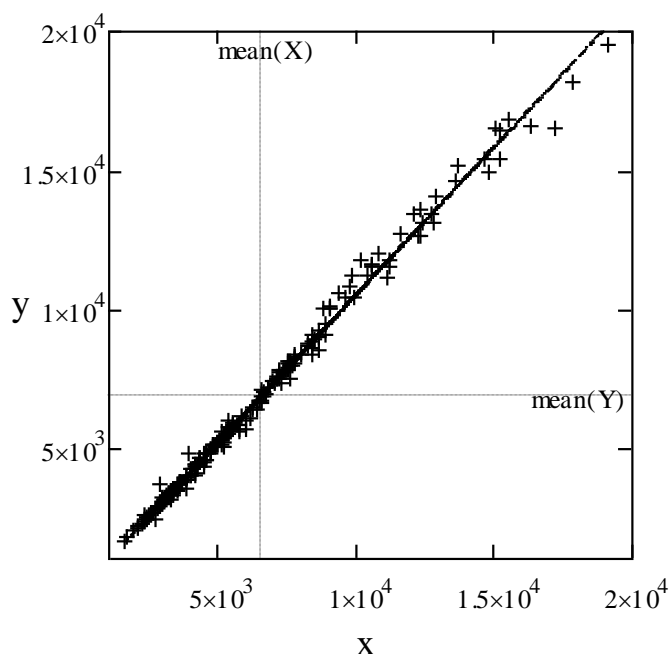


Рис. М.6. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с р. Дніпро, що спостерігались у м. Кременчук (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальних витрат  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, що спостерігались у смт. Лоцмано-Кам'янка (вісь  $y$ ) з 1787 по 1999 рр.

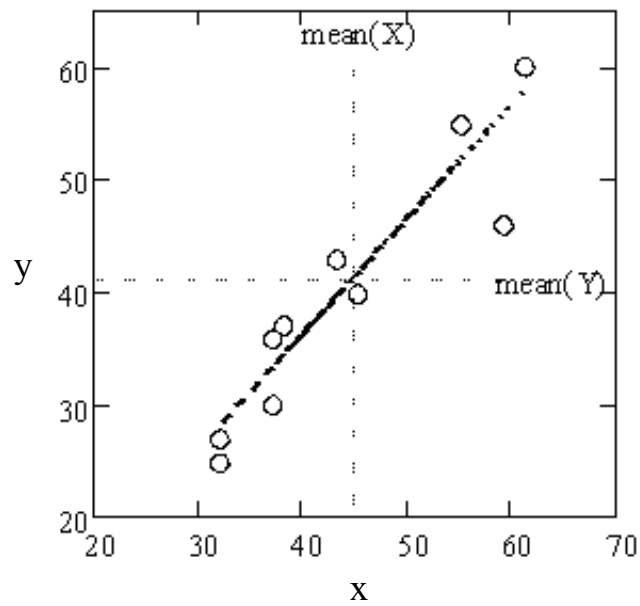


Рис. Н.1. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см, що спостерігалась у створі Канівського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см, що спостерігалась у створі Кременчуцького гідровузла (вісь  $y$ ): - - - – графік функції лінійної регресії;

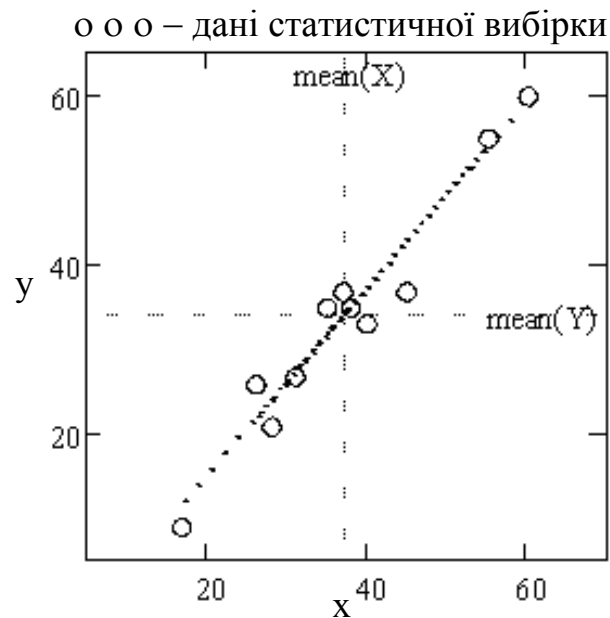


Рис. Н.2. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см, що спостерігалась у створі Середньодніпровського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см, що спостерігалась у створі Дніпровського гідровузла (вісь  $y$ ): - - - – графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

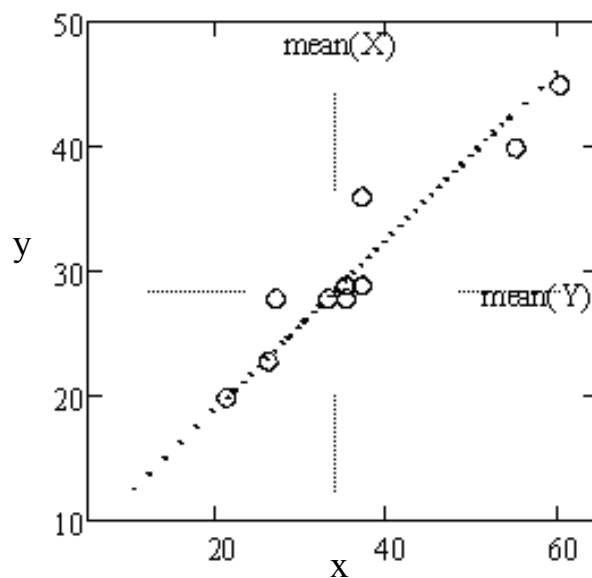


Рис. Н.3. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см, що спостерігалась у створі Дніпровського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку максимальної товщини льоду  $h_{max}$ , см, що спостерігалась у створі Каховського гідровузла (вісь  $y$ ):

- - - – графік функції лінійної регресії; o o o – дані статистичної вибірки

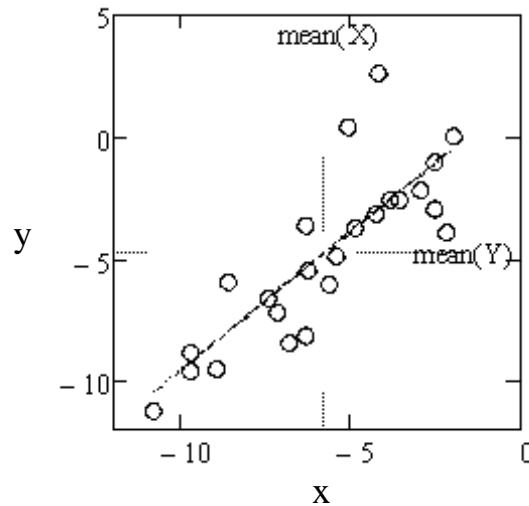


Рис. П.1. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря  $t_{min}$ , °С, що спостерігалась у створі Київського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря  $t_{min}$ , °С, що спостерігалась у створі Канівського гідровузла (вісь  $y$ ):  
 - - - - графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

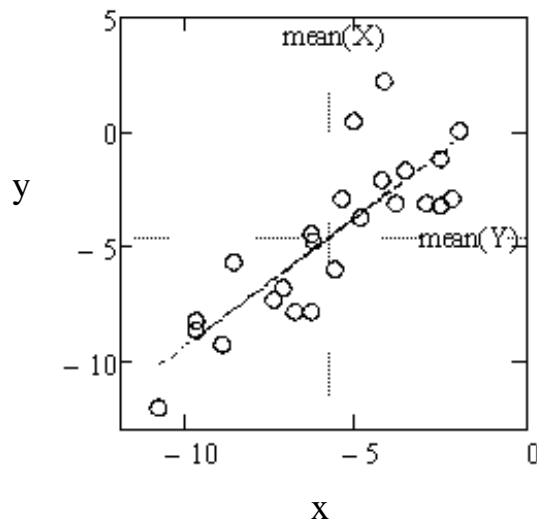


Рис. П.2. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря  $t_{min}$ , °С, що спостерігалась у створі Київського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря  $t_{min}$ , °С, що спостерігалась у створі Кременчуцького гідровузла (вісь  $y$ ):  
 - - - - графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

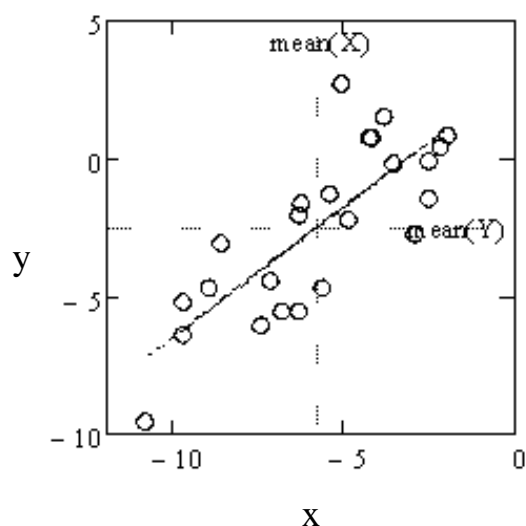


Рис. П.3. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря  $t_{min}$ , °С, що спостерігалась у створі Київського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку щорічної максимально низької середньомісячної температури зовнішнього повітря  $t_{min}$ , °С, що спостерігалась у створі Каховського гідровузла (вісь  $y$ ):

- - - - графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

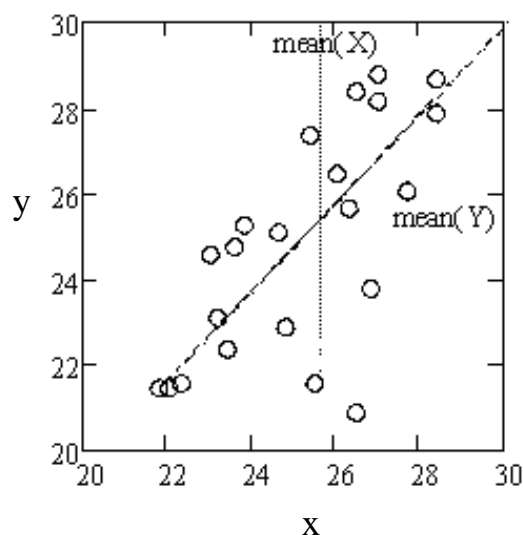


Рис. П.4. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря  $\Delta t$ , °С, що спостерігалась у створі Київського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря  $\Delta t$ , °С, що спостерігалась у створі Кременчуцького гідровузла (вісь  $y$ ):

- - - - графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

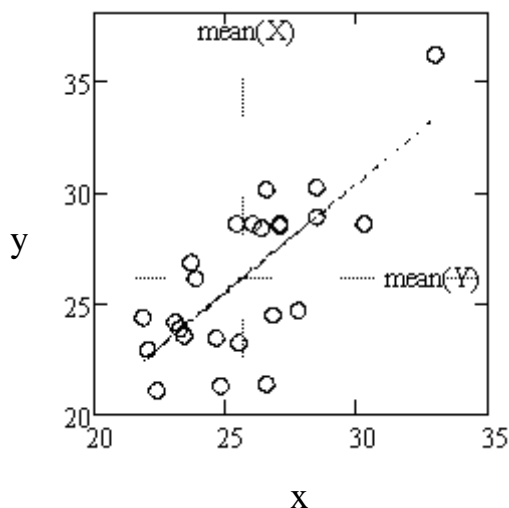


Рис. П.5. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря  $\Delta t$ , °С, що спостерігалась у створі Київського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря  $\Delta t$ , °С, що спостерігалась у створі Середньодніпровського гідровузла (вісь  $y$ ): - - - – графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

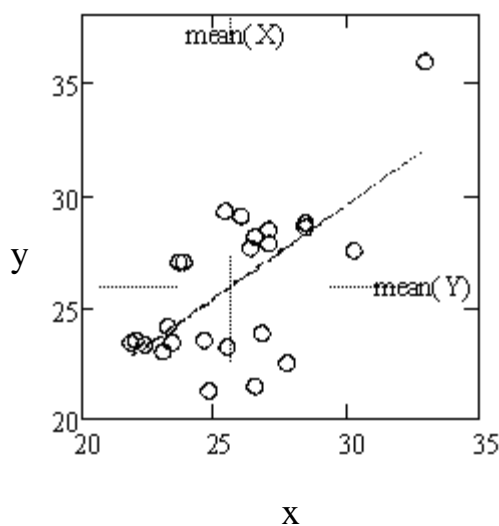


Рис. П.6. Графік лінійної функції регресії статистичної вибірки щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря  $\Delta t$ , °С, що спостерігалась у створі Київського гідровузла (вісь  $x$ ), на статистичну вибірку щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур зовнішнього повітря  $\Delta t$ , °С, що спостерігалась у створі Дніпровського гідровузла (вісь  $y$ ): - - - – графік функції лінійної регресії; о о о – дані статистичної вибірки

## Додаток Р

Таблиця Р.1

Результати розрахунків земляної греблі Київського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка нормального підпірного рівня води $Z_{НПР}$ , м	103,0
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 2% забезпеченості	30,76
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	4,0
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	24,4
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	57000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,69
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	0,75
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	2,92
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	13,34
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	1,58
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,9$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	1,91
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	106,11
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	108,5

Таблиця Р.2

Результати розрахунків земляної греблі Київського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для другого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка форсованого підпірного рівня води $Z_{ФПР}$ , м	104,4
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 20% забезпеченості	25,0
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	5,4
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	25,8
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	60000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,38
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	0,86
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	3,36
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	17,66
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	1,84
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,96$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,38
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	107,66
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	108,5

Таблиця Р.3

Результати розрахунків земляної греблі Канівського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка нормального підпірного рівня води $Z_{НПР}$ , м	91,5
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 2% забезпеченості	28,24
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	3,9
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	27,9
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	25000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,27
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	0,70
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	2,86
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	12,75
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	1,46
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,88$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	1,74
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	93,94
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	97,0

Таблиця Р.4

Результати розрахунків земляної греблі Канівського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для другого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка форсованого підпірного рівня води $Z_{ФПР}$ , м	92,7
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 20% забезпеченості	23,1
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	5,1
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	29,1
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	26000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,12
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	0,77
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	3,21
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	16,07
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	1,63
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,94$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,06
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	95,38
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	97,0



Таблиця Р.5

Результати розрахунків земляної греблі Кременчукського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка нормального підпірного рівня води $Z_{НПР}$ , м	81,0
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 2% забезпеченості	28,65
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	6,0
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	27,0
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	95000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,85
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	1,00
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	3,57
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	19,86
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	2,15
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,89$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,57
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	84,91
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	86,00

Таблиця Р.6

Результати розрахунків земляної греблі Кременчукського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для другого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка форсованого підпірного рівня води $Z_{ФПР}$ , м	82,4
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 20% забезпеченості	22,97
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	7,4
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	28,4
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	97000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,44
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	1,06
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	3,91
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	23,9
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	2,31
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,94$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,92
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	85,65
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	86,0

Таблиця Р.7

Результати розрахунків земляної греблі Середньодніпровського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка нормального підпірного рівня води $Z_{НПР}$ , м	64,0
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 2% забезпеченості	28,5
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	4,3
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	20,0
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	29000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,34
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	0,75
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	3,0
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	14,05
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	1,59
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,87$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	1,86
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	66,7
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	69,2

Таблиця Р.8

Результати розрахунків земляної греблі Середньодніпровського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для другого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка форсованого підпірного рівня води $Z_{ФПР}$ , м	66,0
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 20% забезпеченості	24,07
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	6,3
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	22,0
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	31000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,21
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	0,92
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	3,55
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	19,66
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	1,95
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,92$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,44
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	69,14
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	69,2

Таблиця Р.9

Результати розрахунків земляної греблі Каховського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для першого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка нормального підпірного рівня води $Z_{НПР}$ , м	16,0
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 2% забезпеченості	30,93
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	8,4
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	24,6
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	21000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,26
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	1,24
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	4,02
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	25,17
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	2,6
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,71$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,5
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	19,26
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	21,62

Таблиця Р.10

Результати розрахунків земляної греблі Каховського гідровузла за умовою недопущення переливу води через гребінь за нормативною методикою для другого розрахункового випадку

№	Найменування розрахункових величин	Значення
1	Позначка форсованого підпірного рівня води $Z_{ФПР}$ , м	18,0
2	Максимальна розрахункова швидкість вітру $V$ , м/с 20% забезпеченості	25,83
3	Середнє значення глибини води у водосховищі $H$ , м	10,4
4	Глибина води у водосховищі $H_c$ , м перед греблею	26,6
5	Довжина розгону хвилі $L$ , м	22000
6	Висота вітрового нагону $dh$ , м	0,15
7	Середня висота хвилі $h_{cp}$ , м	1,28
8	Середній період хвилі $T_{cp}$ , с	4,28
9	Середня довжина хвилі $\lambda_{cp}$ , м	28,67
10	Висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$ , м	2,7
11	Коефіцієнти: $k_r = 1,0$ ; $k_p = 0,9$ ; $k_{sp} = 1,5$ ; $k_{run} = 0,75$	
12	Висота нахату хвилі на відкос $h_{run1\%}$ , м	2,72
13	Необхідна за розрахунком позначка гребня греблі $Z_{ГГН}$ , м	21,37
14	Фактична позначка гребня греблі $Z_{ГГФ}$ , м	21,62

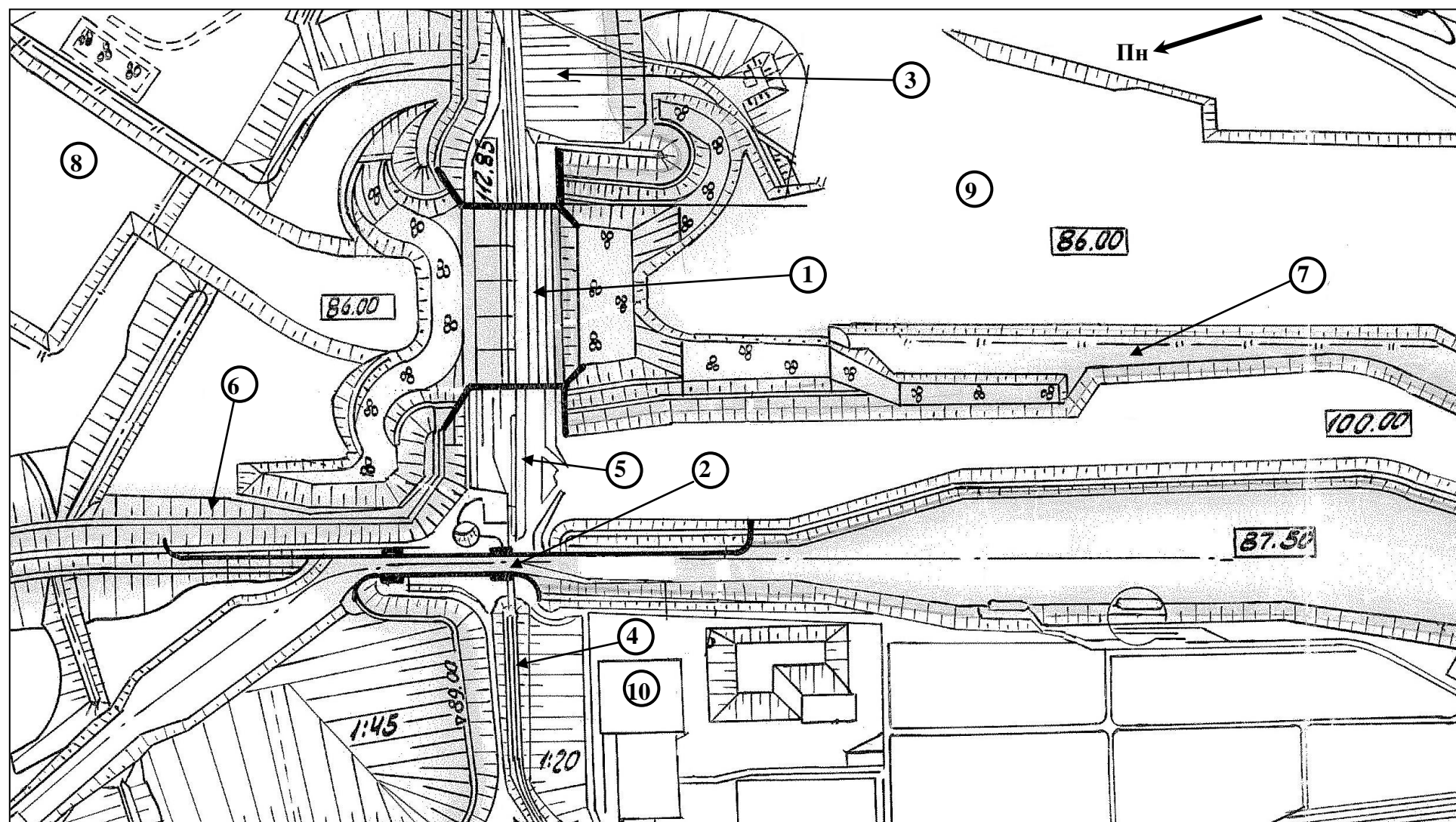


Рис. С.1. Фрагмент плану Київського гідровузла: 1 – будівля гідроелектростанції; 2 – шлюз; 3 – руслова ділянка греблі; 4 – правобережна гребля; 5 – земляна вставка між шлюзом і будівлею гідроелектростанції; 6 – дамба хвилелом; 7 – роздільна дамба; 8 – Київське водосховище; 9 – нижній б'єф; 10 – відкритий розподільчий пристрій

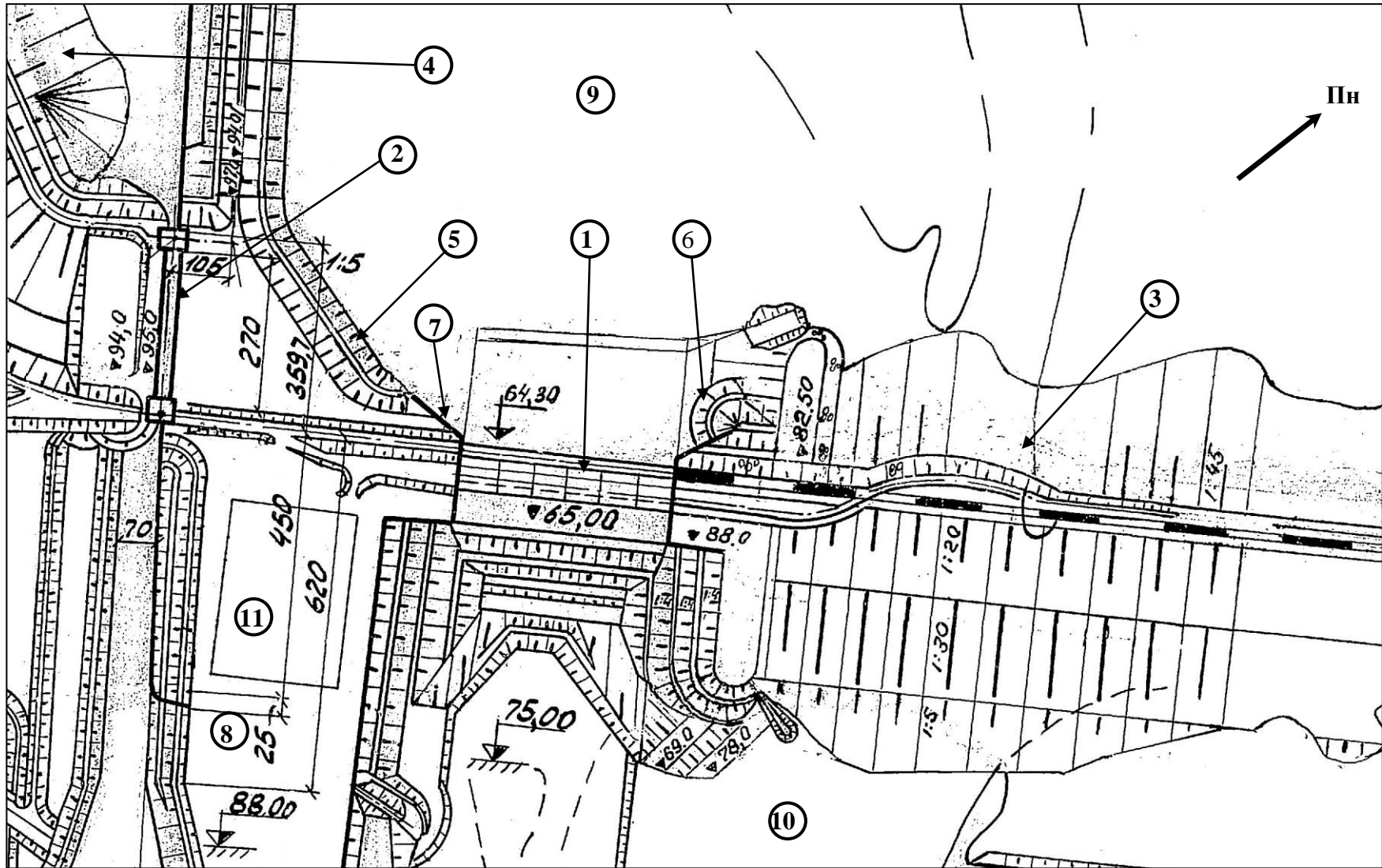


Рис. С.2. Фрагмент плану Канівського гідровузла: 1 – будівля гідроелектростанції; 2 – шлюз; 3 – лівобережна гребля; 4 – правобережна гребля; 5 – земляна вставка між шлюзом і будівлею гідроелектростанції; 6 – лівобережний стоян; 7 – правобережний стоян; 8 – роздільна дамба; 9 – Канівське водосховище; 10 – нижній б'єф; 11 – відкритий розподільний пристрій (розміри в м.)

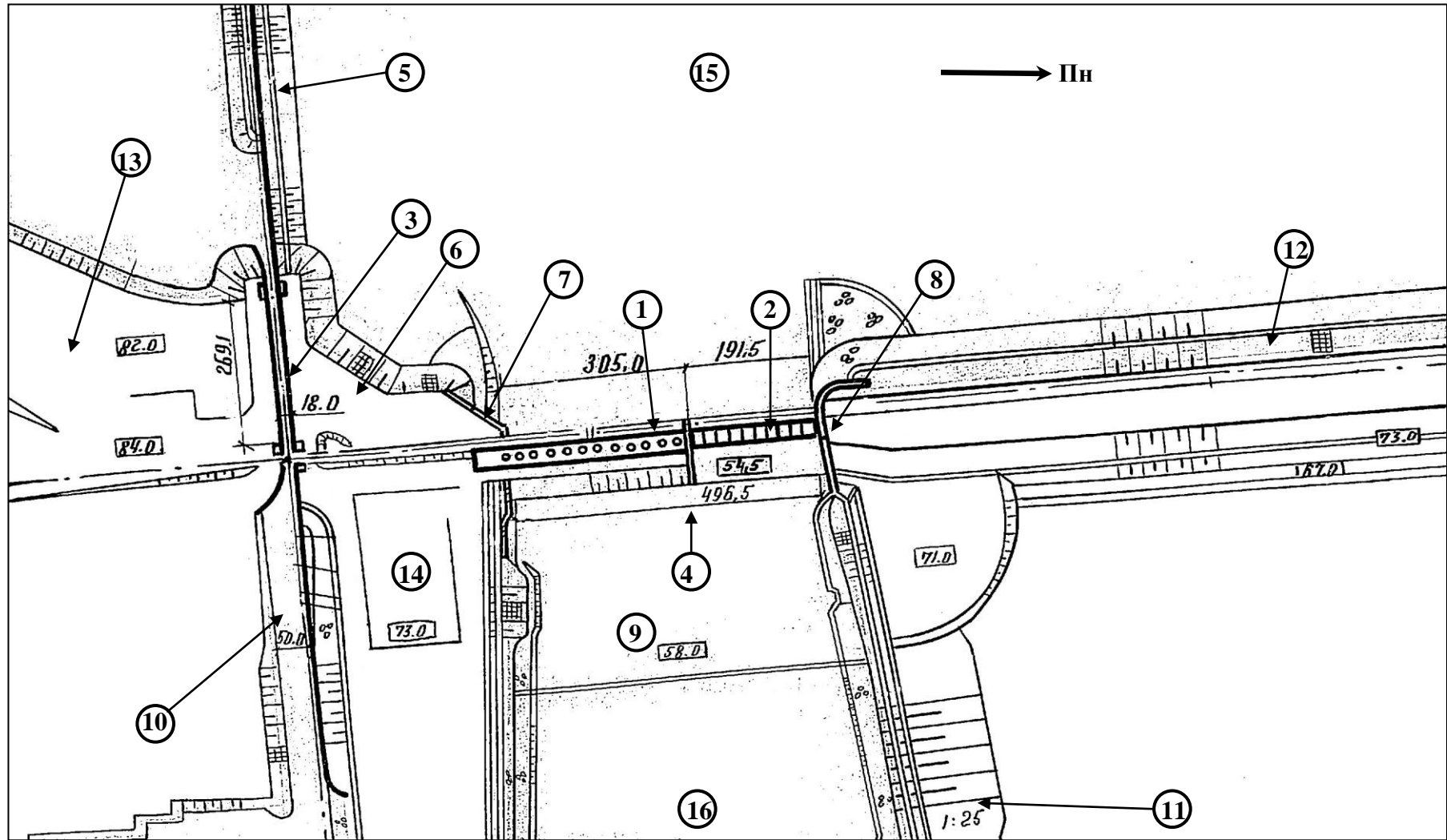


Рис. С.3. Фрагмент плану Кременчуцького гідровузла: 1 – будівля гідроелектростанції; 2 – бетонна водозливна гребля; 3 – шлюз; 4 – роздільний бик; 5 – причальна споруда верхового підходу; 6 – земляна вставка між шлюзом і будівлею гідроелектростанції; 7 – правобережний стоян; 8 – лівобережний стоян; 9 – відводящий канал гідроелектростанції і водозливної греблі; 10 – причальна споруда низового підходу; 11 – огорожуюча дамба; 12 – лівобережна гребля; 13 – правобережна гребля; 14 – відкритий розподільчий пристрій; 15 – Кременчуцьке водосховище; 16 – нижній б'єф (розміри в м.)

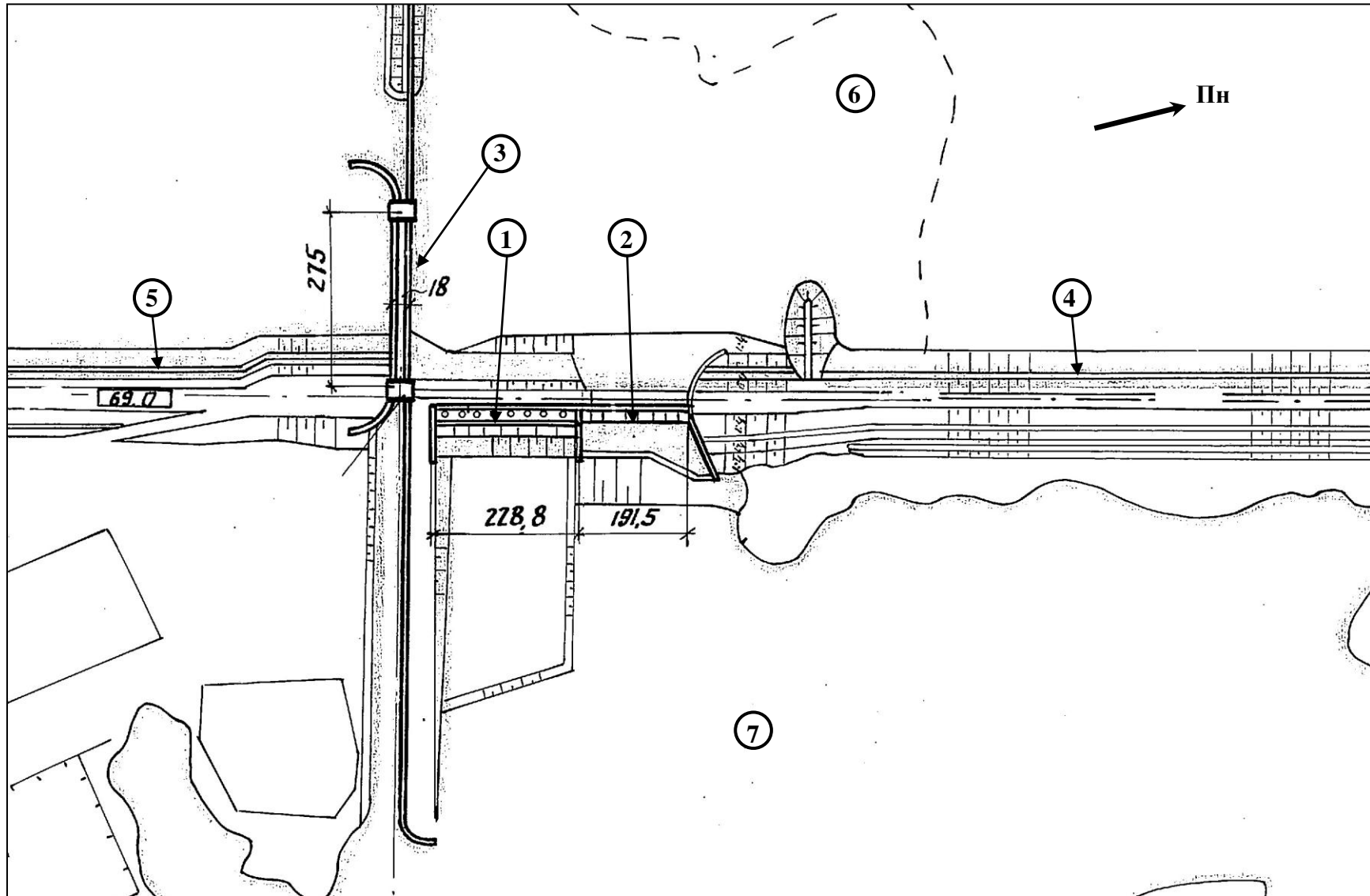


Рис. С.4. Фрагмент плану Середньодніпровського гідровузла: 1 – будівля гідроелектростанції; 2 – бетонна водозливна гребля; 3 – шлюз; 4 – руслова гребля; 5 – правобережна гребля; 6 – Кам'янське водосховище; 7 – нижній б'єф (розміри в м.)

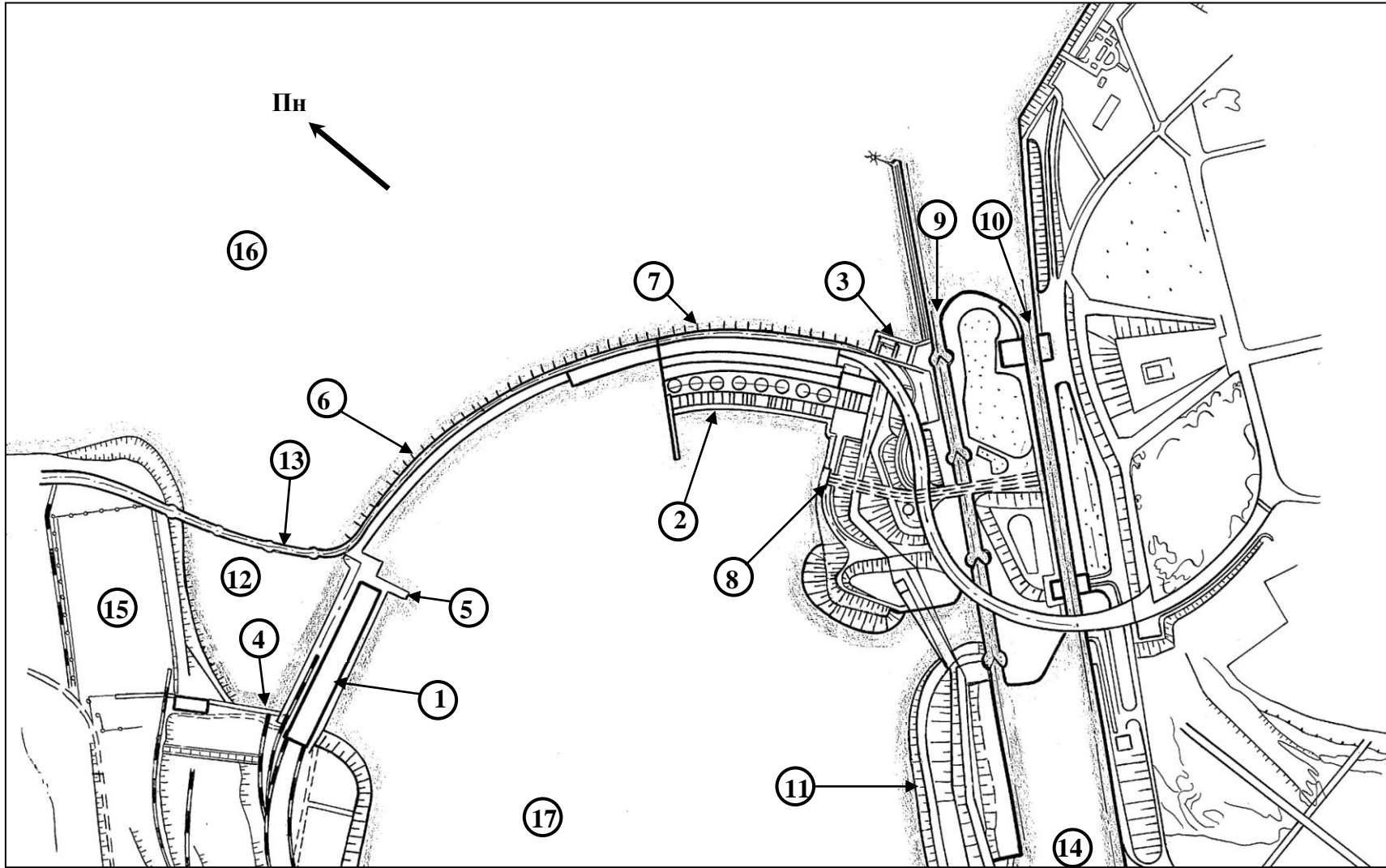


Рис. С.5. Фрагмент плану Дніпровського гідровузла: 1 – будівля гідроелектростанції 1; 2 – будівля гідроелектростанції 2; 3 – лівобережна глуха гребля; 4 – правобережна глуха гребля; 5 – стоян; 6 – водозливна гребля; 7 – щитова стінка гідроелектростанції 2; 8 – тунелі бічного водовипуску зі шлюзу; 9 – трикамерний шлюз; 10 – однокамерний шлюз; 11 – роздільна дамба; 12 – аванкамера; 13 – міст; 14 – низовий підхідний канал; 15 – відкритий розподільчий пристрій; 16 – Дніпровське водосховище; 17 – нижній б'єф



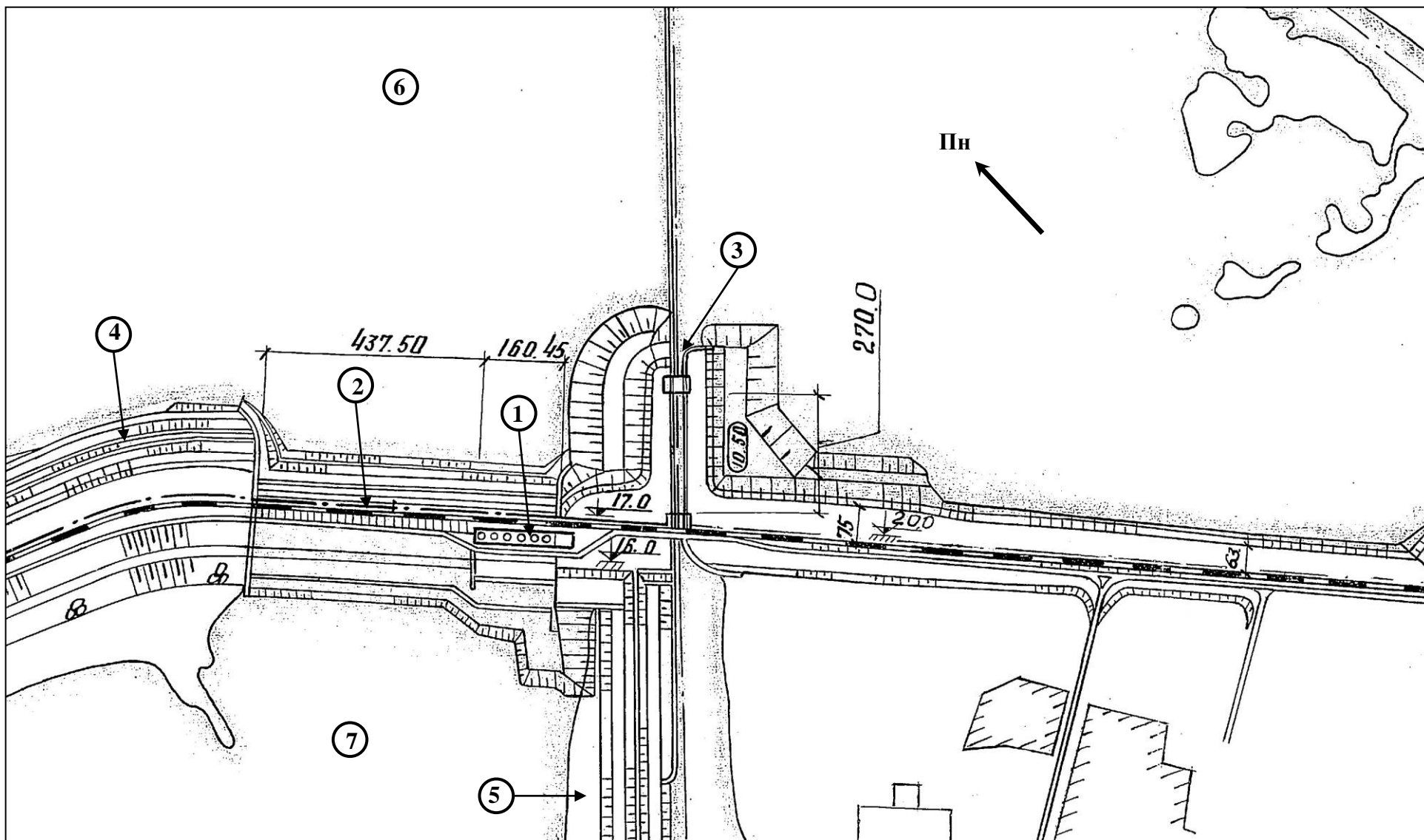


Рис. С.6. Фрагмент плану Каховського гідровузла: 1 – будівля гідроелектростанції; 2 – водозливна гребля; 3 – шлюз; 4 – руслова земляна гребля; 5 – дамба низового підходу шлюзу; 6 – Каховське водосховище; 7 – нижній б'єф (розміри в м.)

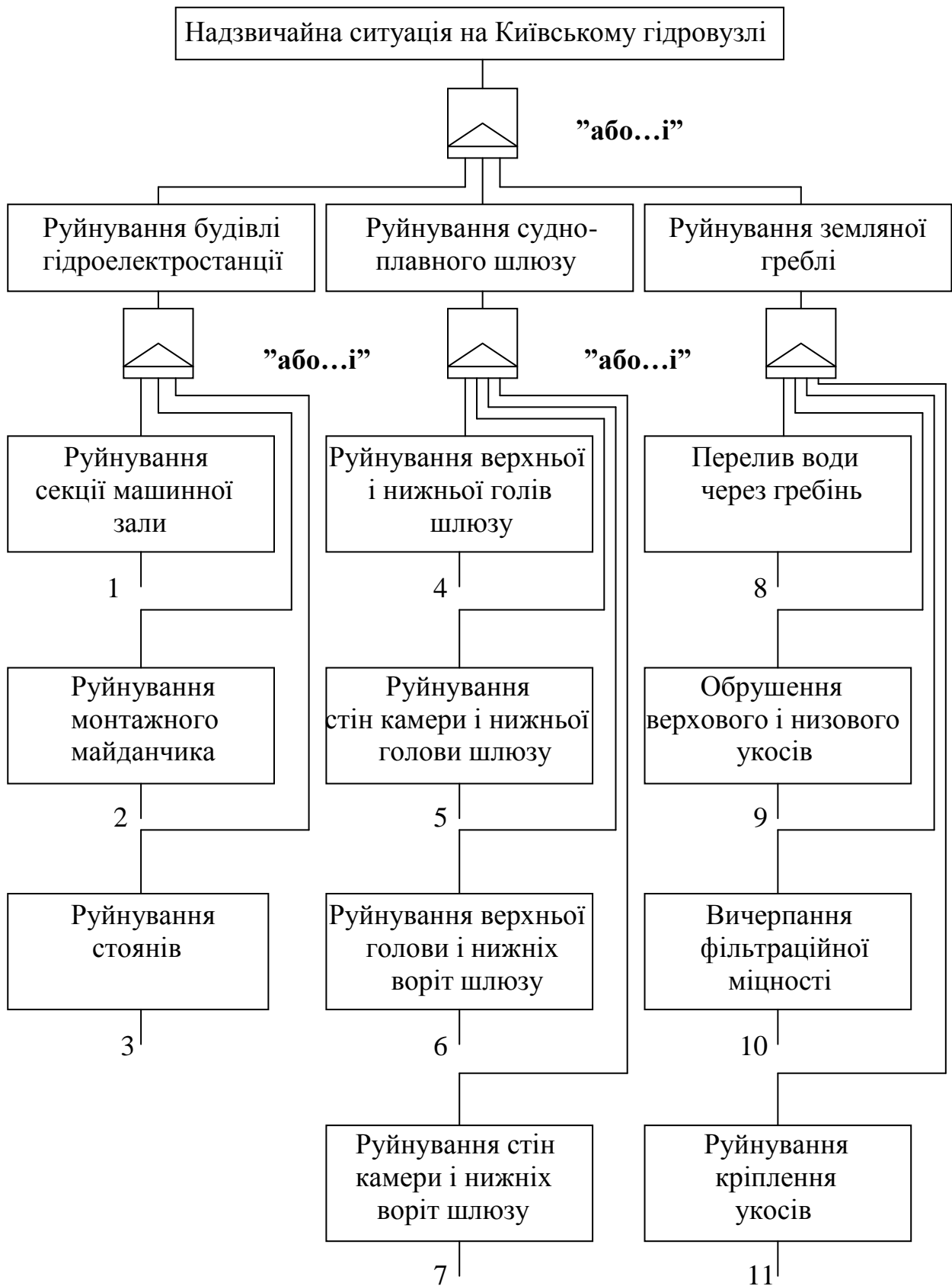


Рис. Т.1. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

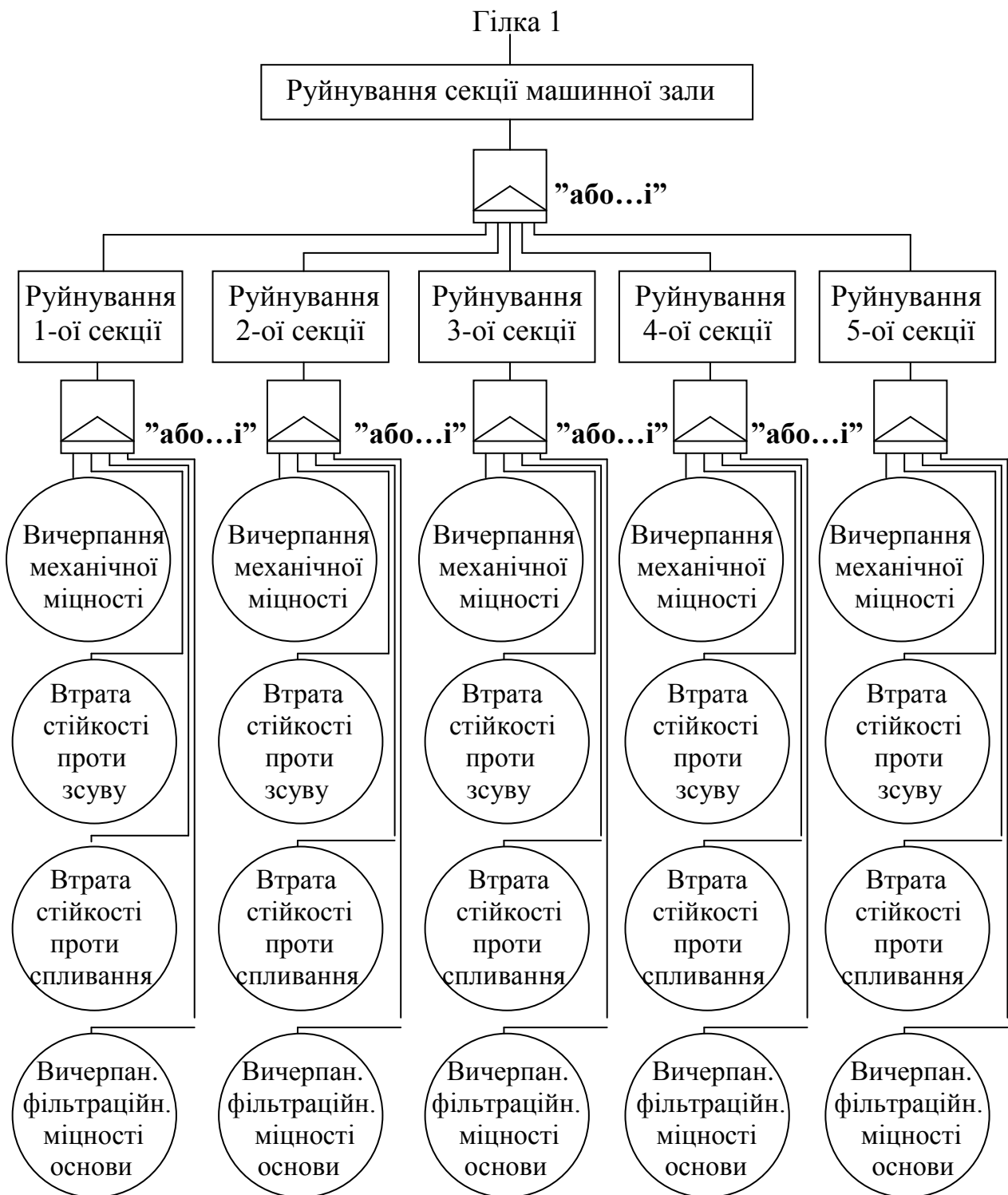


Рис. Т.2. Гілка 1-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

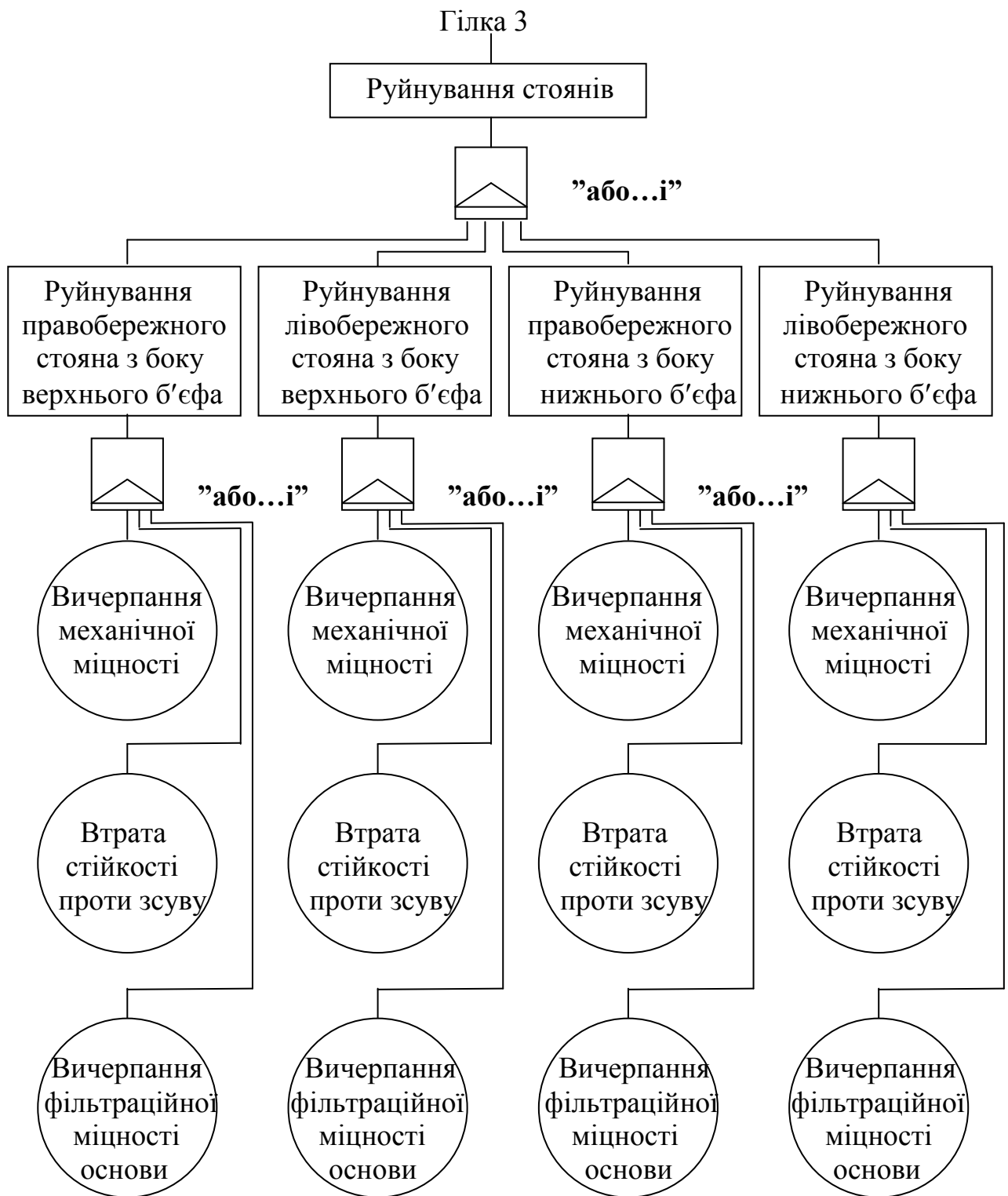


Рис. Т.3 Гілка 3-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

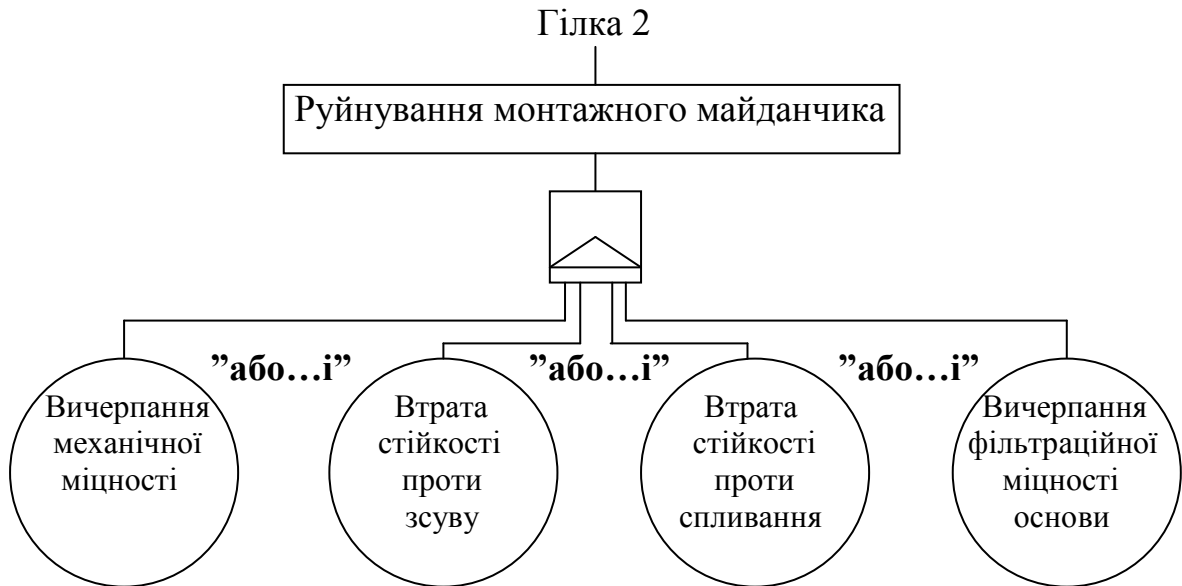


Рис. Т.4. Гілка 2-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

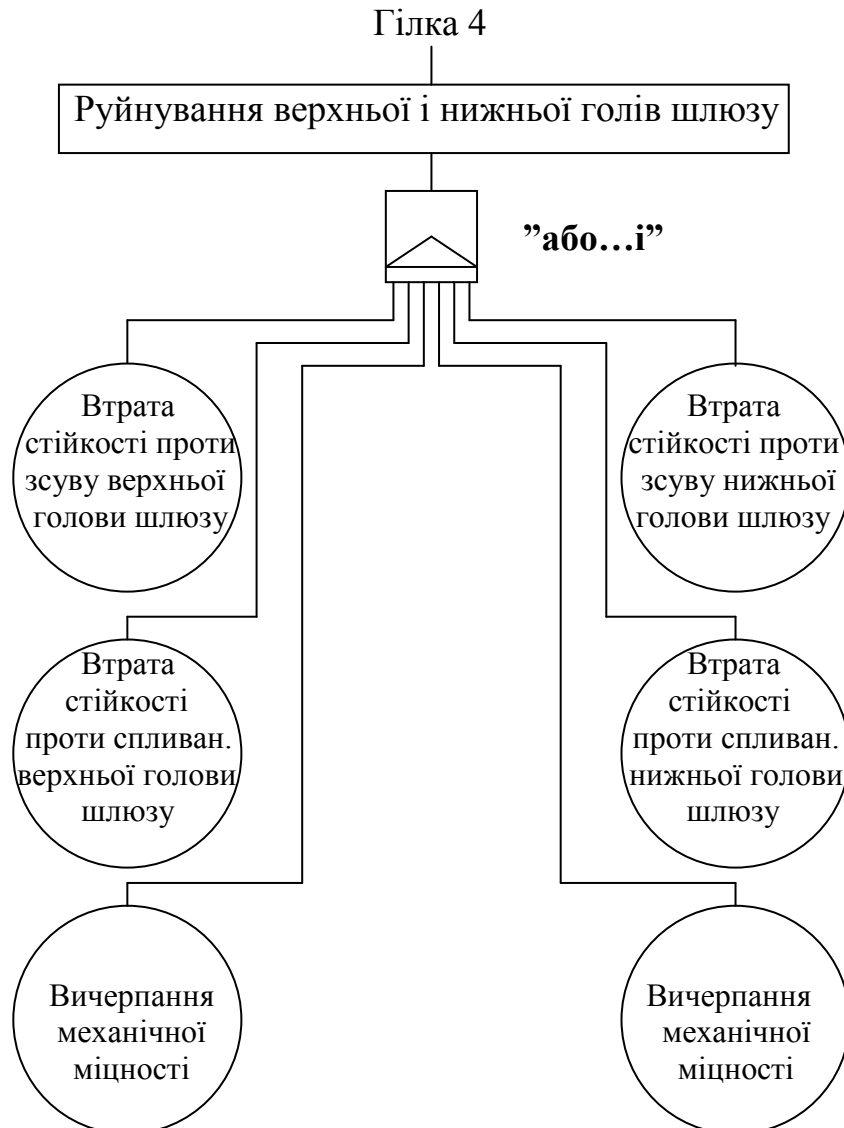


Рис. Т.5. Гілка 4-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

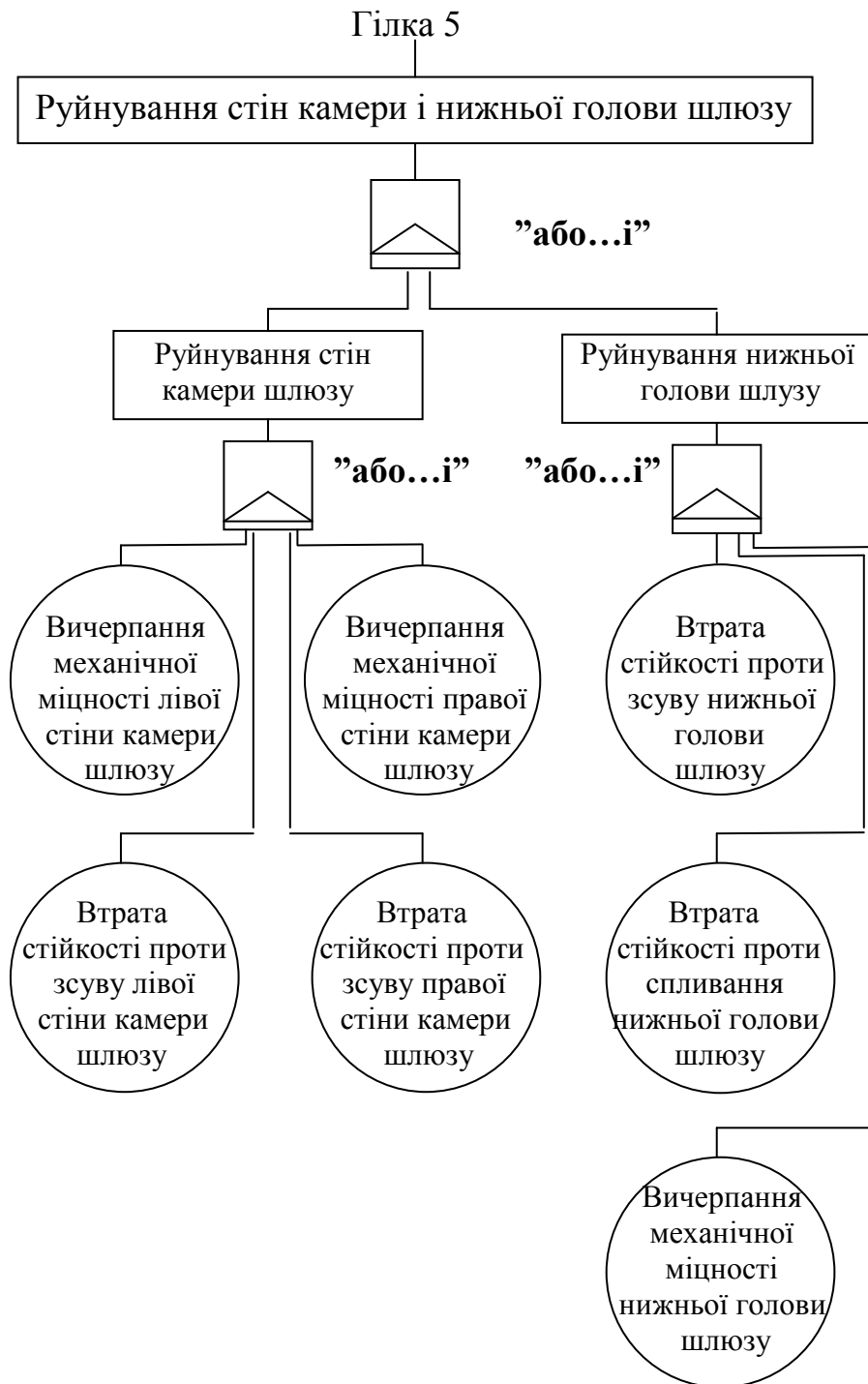


Рис. Т.6. Гілка 5-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

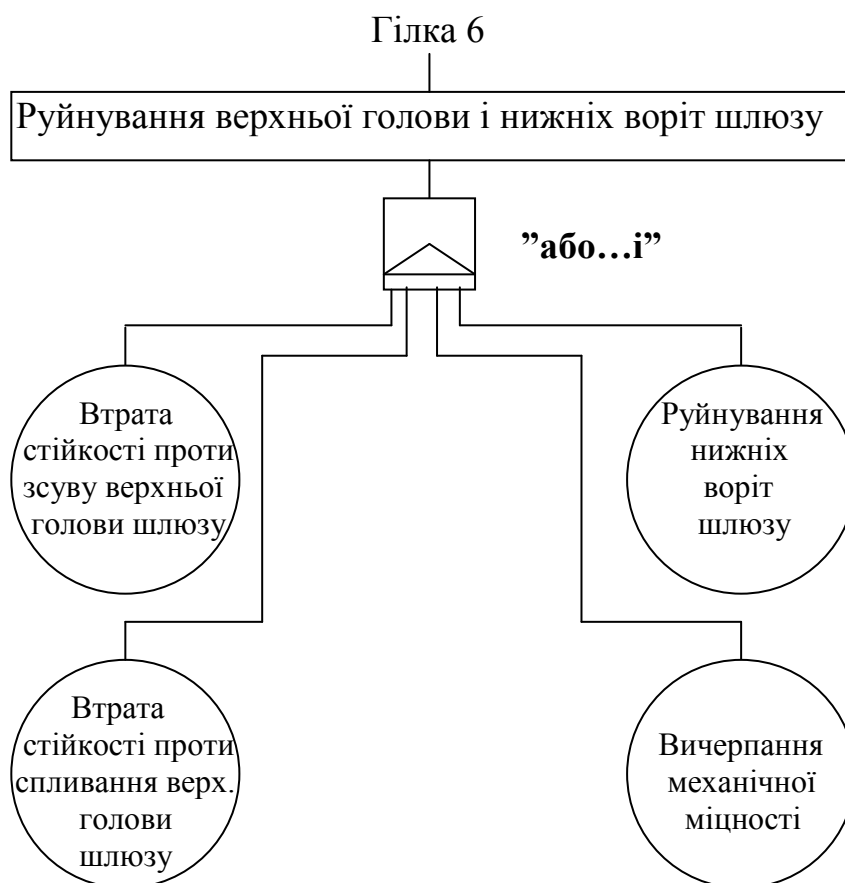


Рис. Т.7. Гілка 6-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

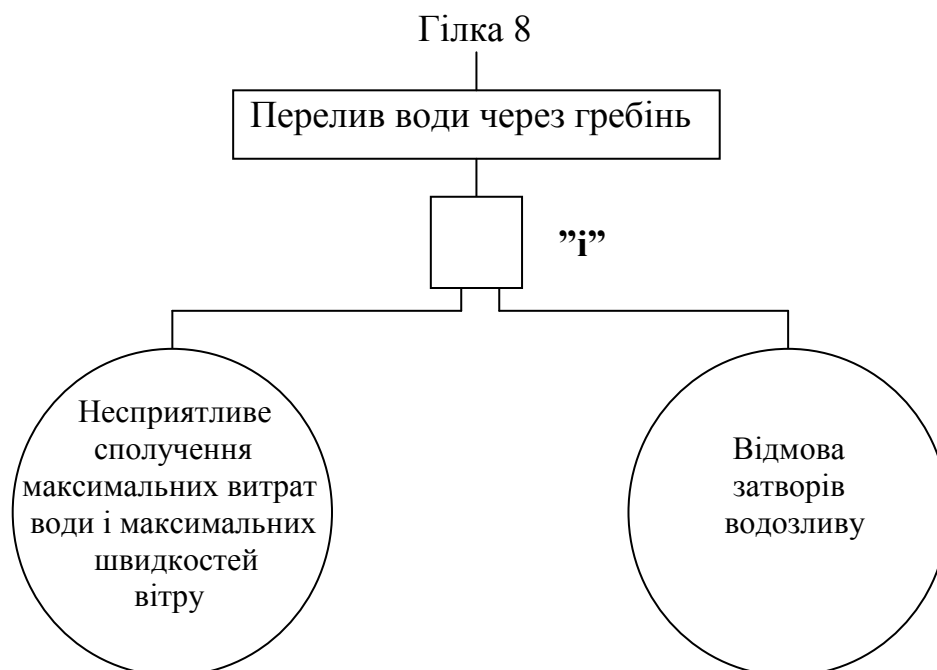


Рис. Т.8. Гілка 8-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

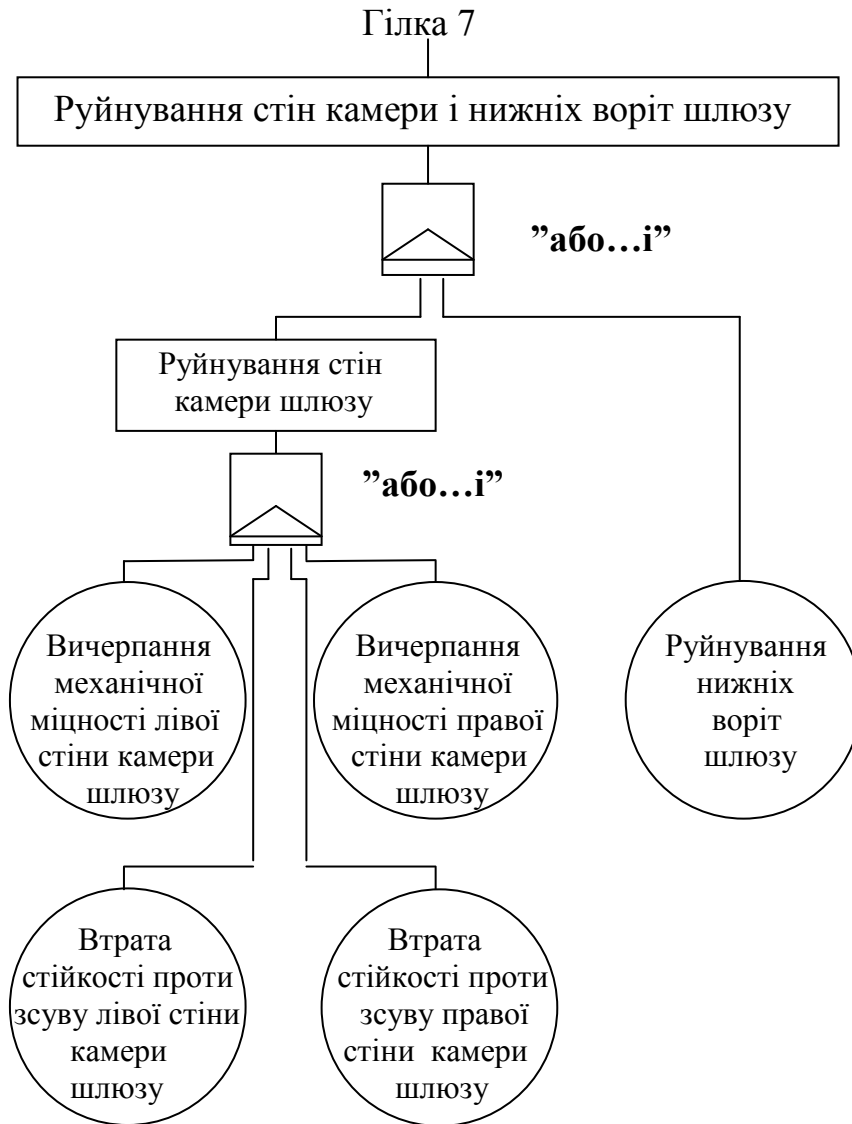


Рис. Т.9. Гілка 7-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

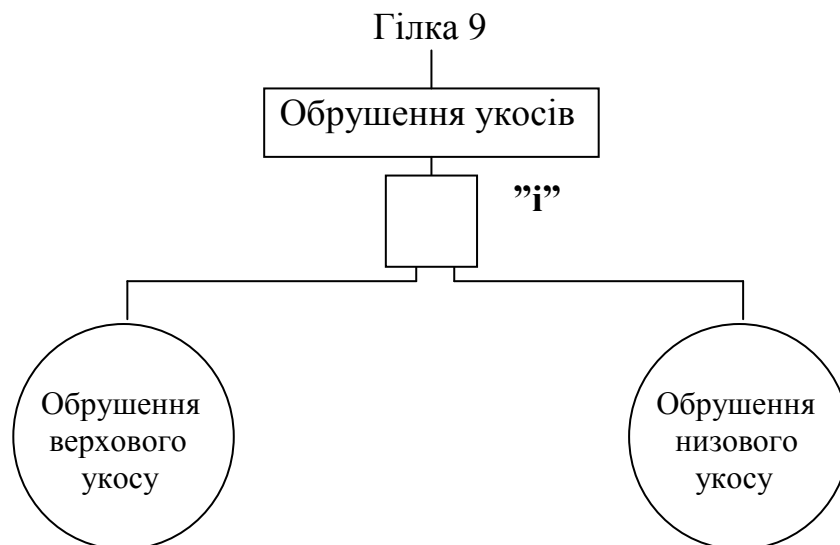


Рис. Т.10. Гілка 9-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі



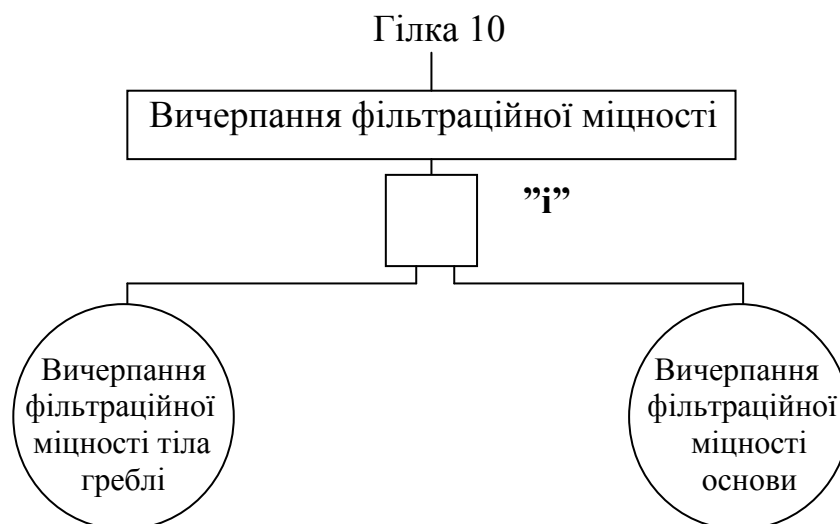


Рис. Т.11. Гілка 10-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

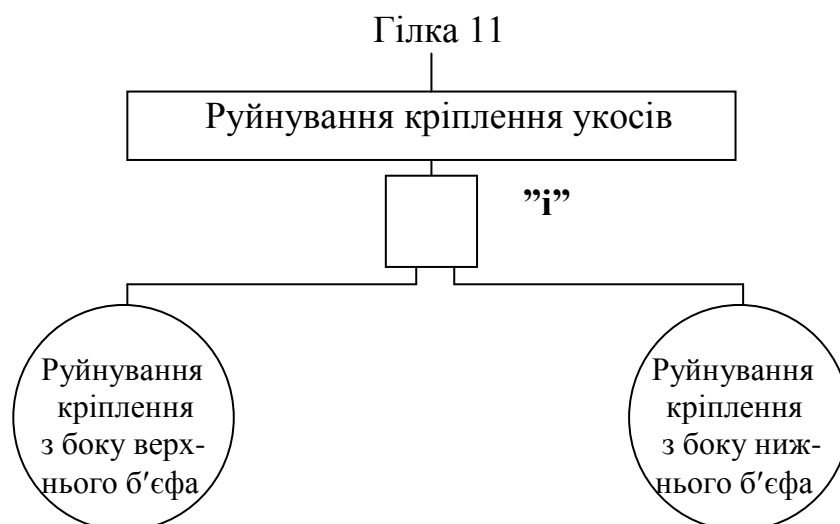


Рис. Т.12. Гілка 11-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Київському гідровузлі

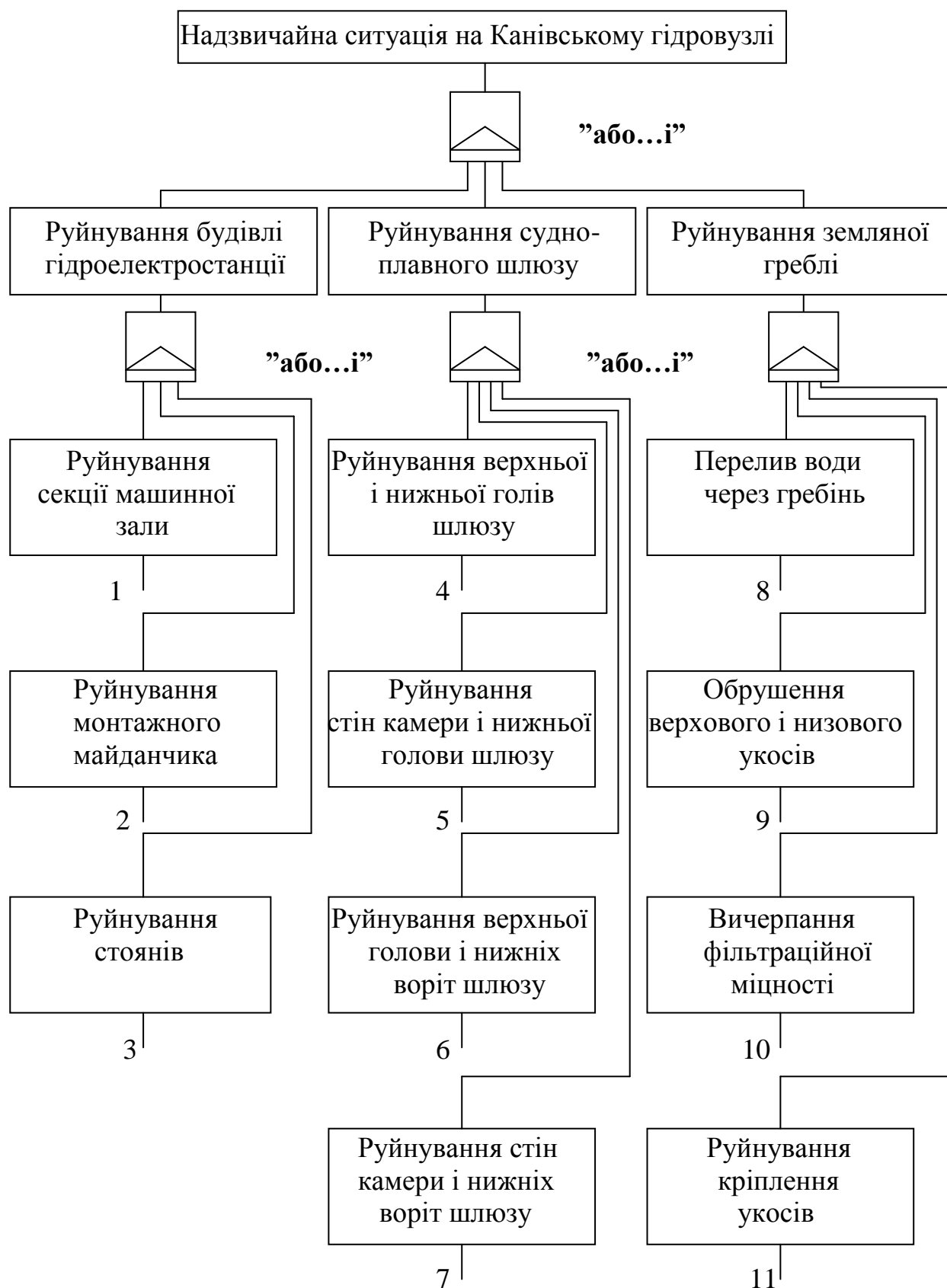


Рис. Т.13. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

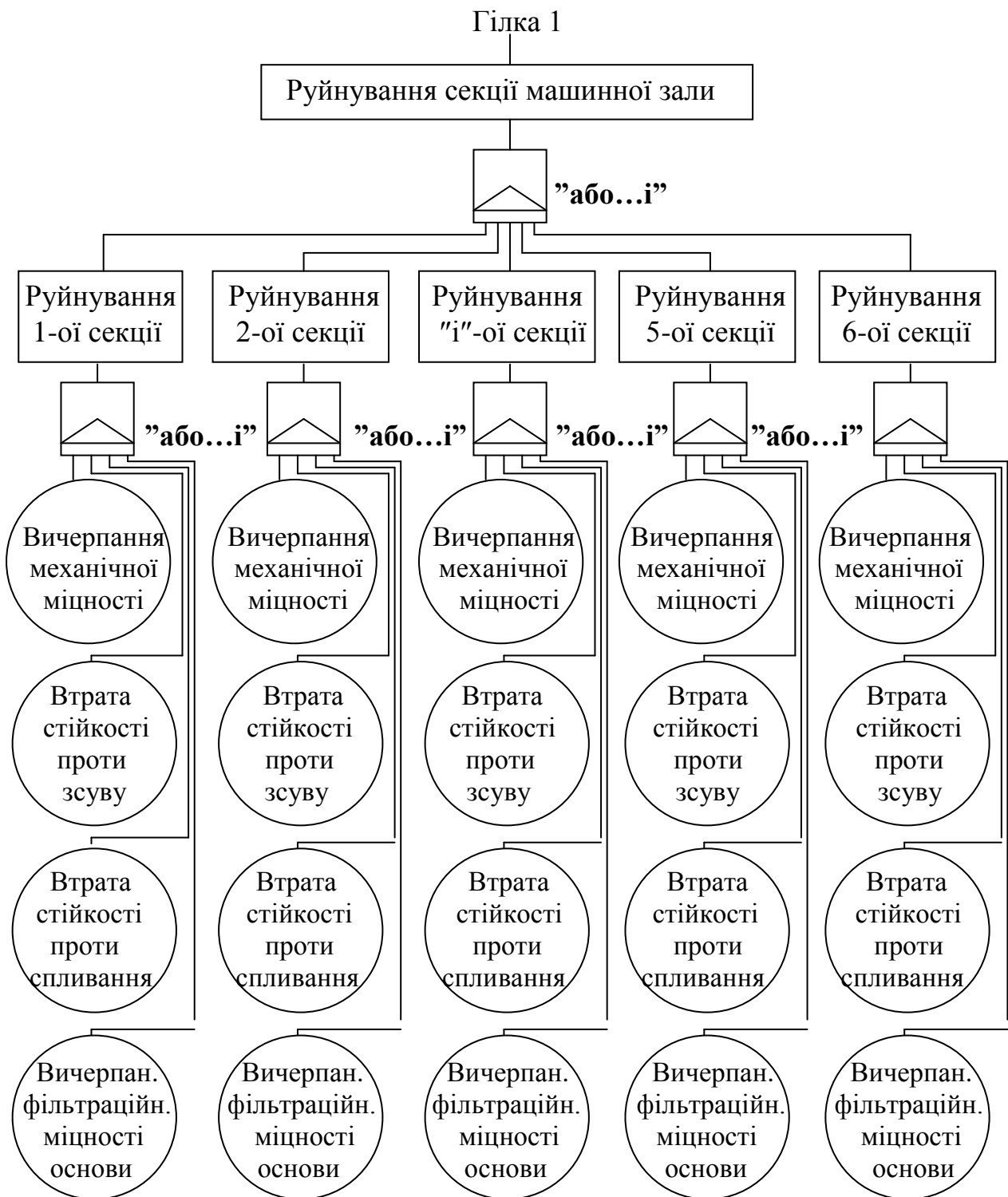


Рис. Т.14. Гілка 1-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

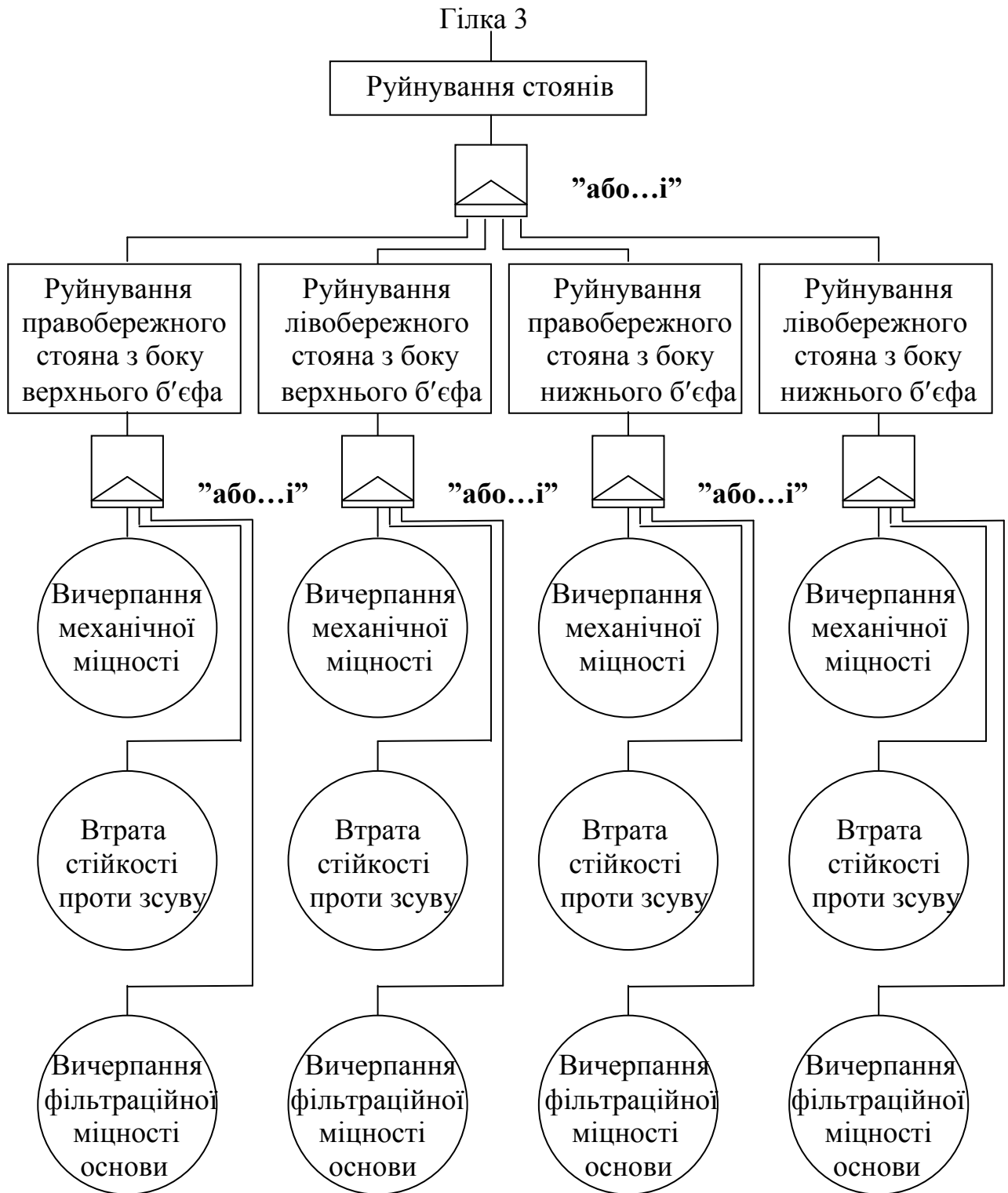


Рис. Т.15. Гілка 3-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

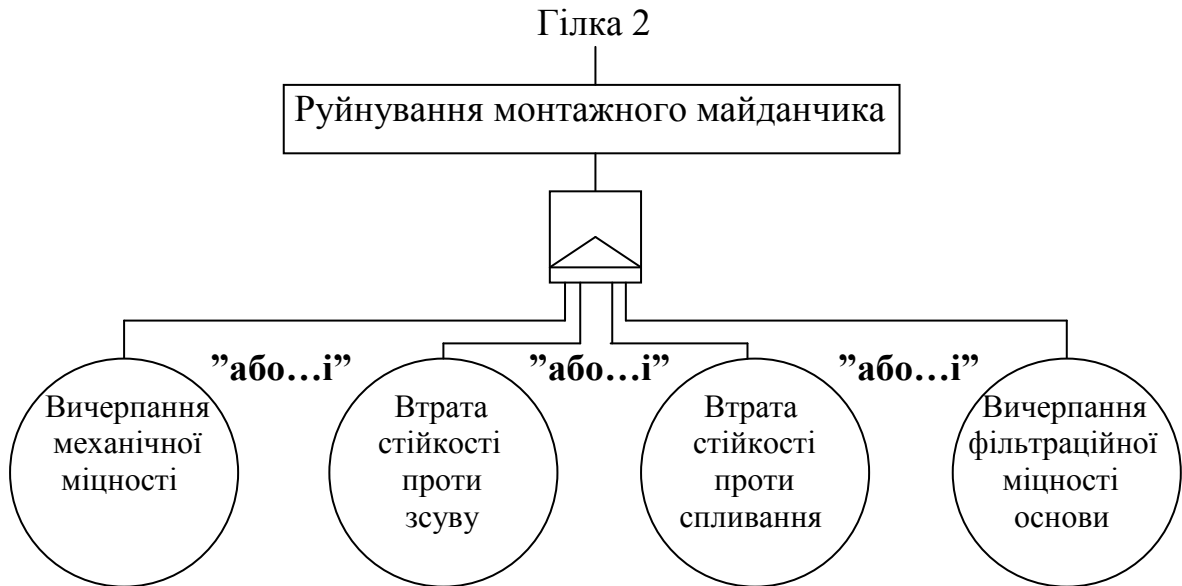


Рис. Т.16. Гілка 2-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

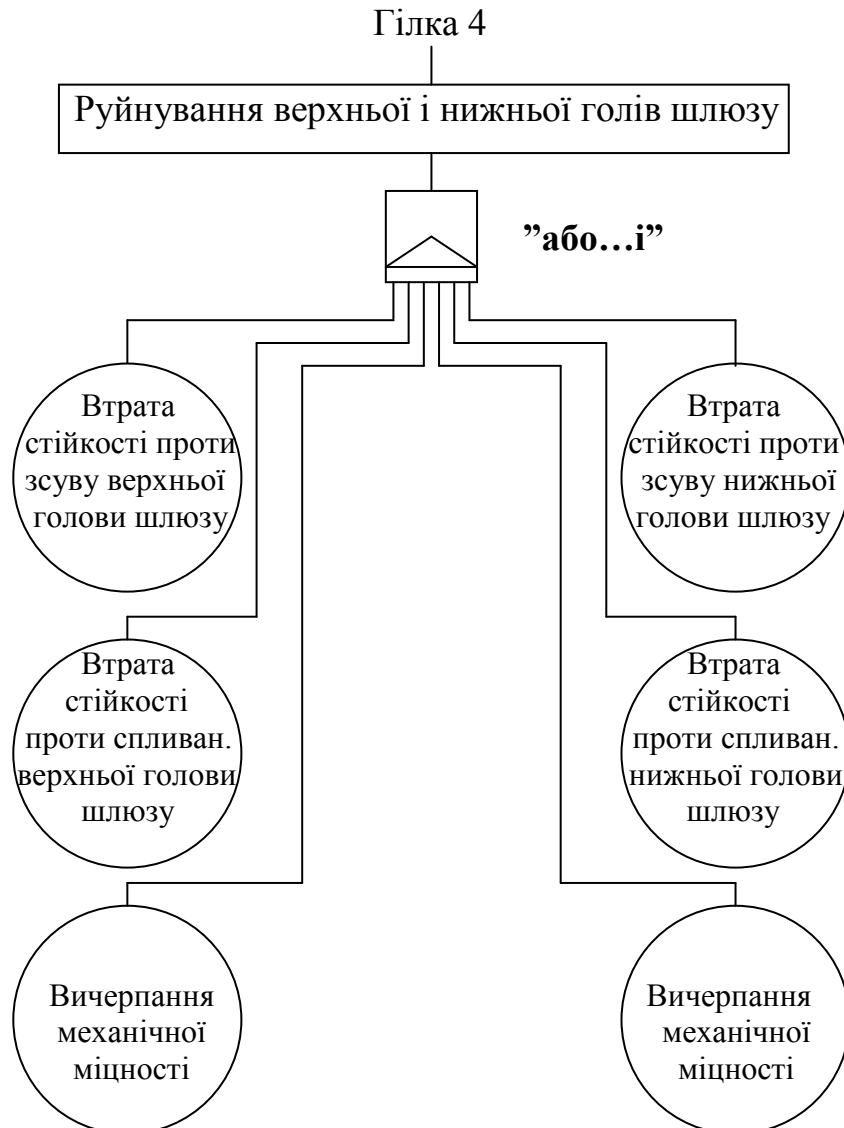


Рис. Т.17. Гілка 4-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

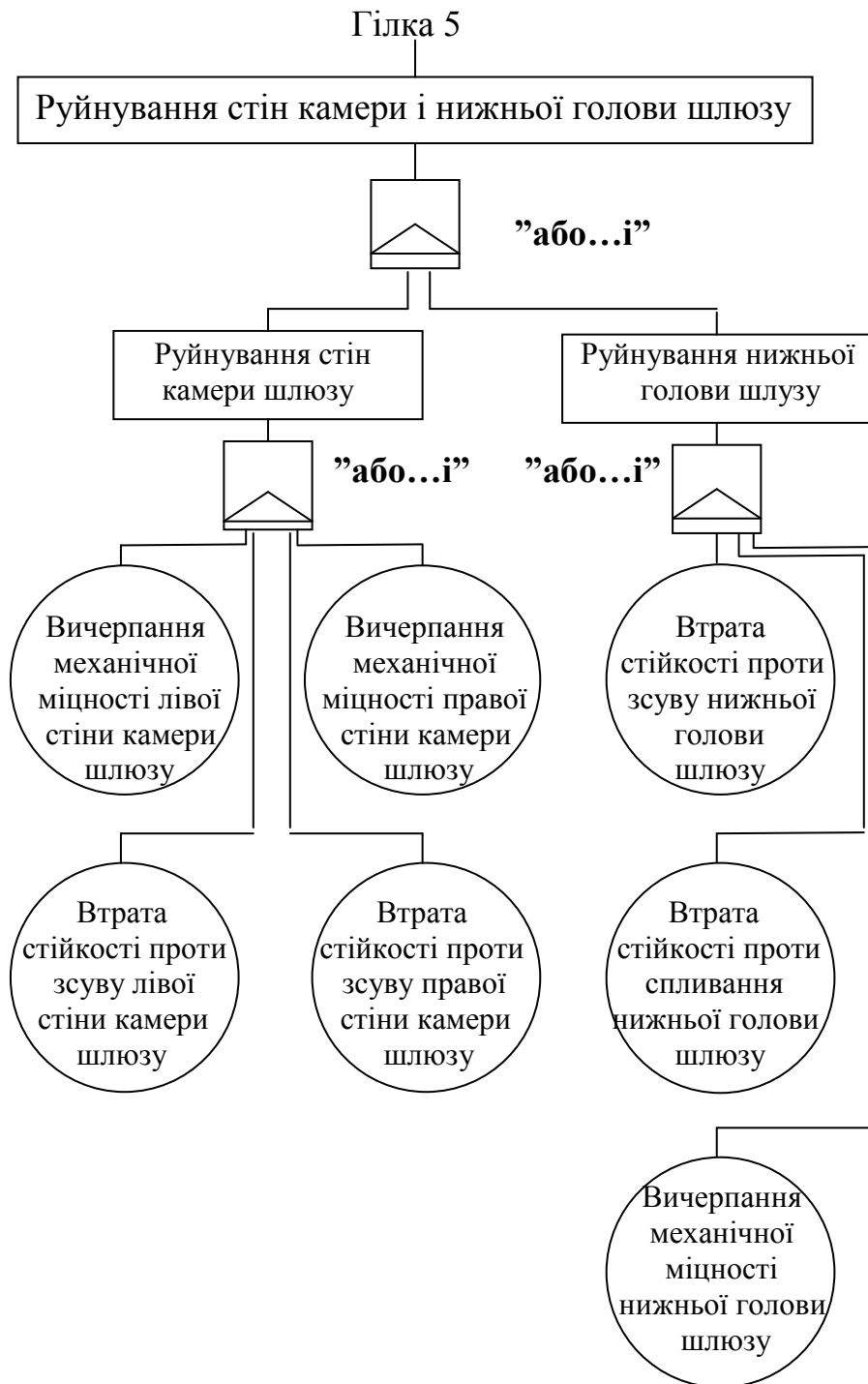


Рис. Т.18. Гілка 5-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

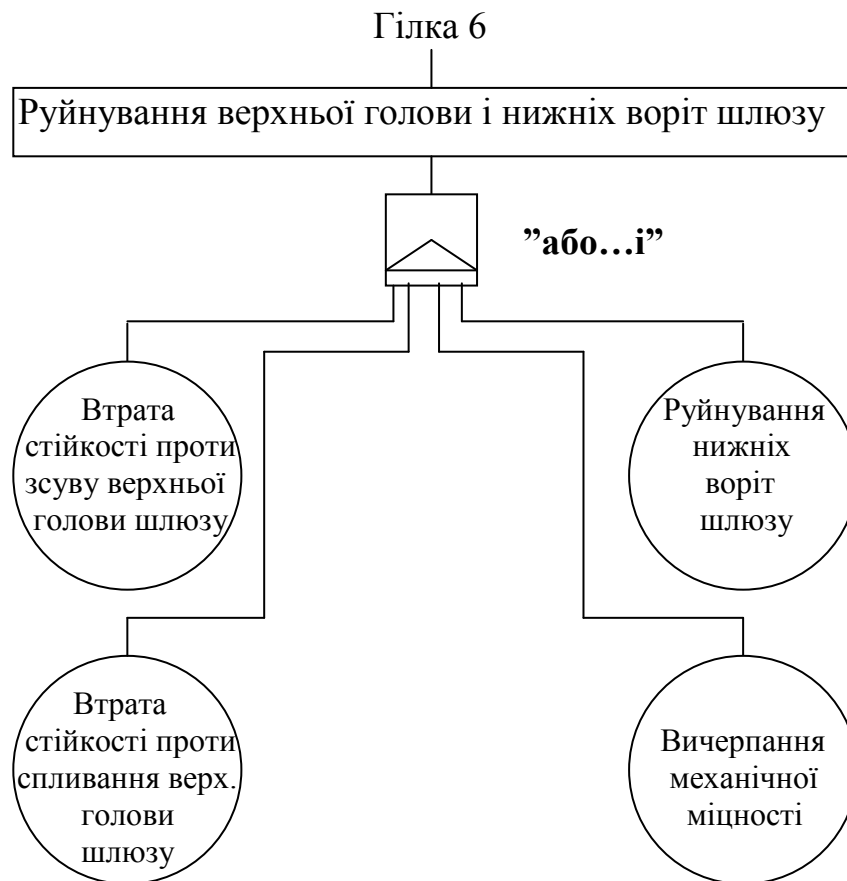


Рис. Т.19. Гілка 6-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

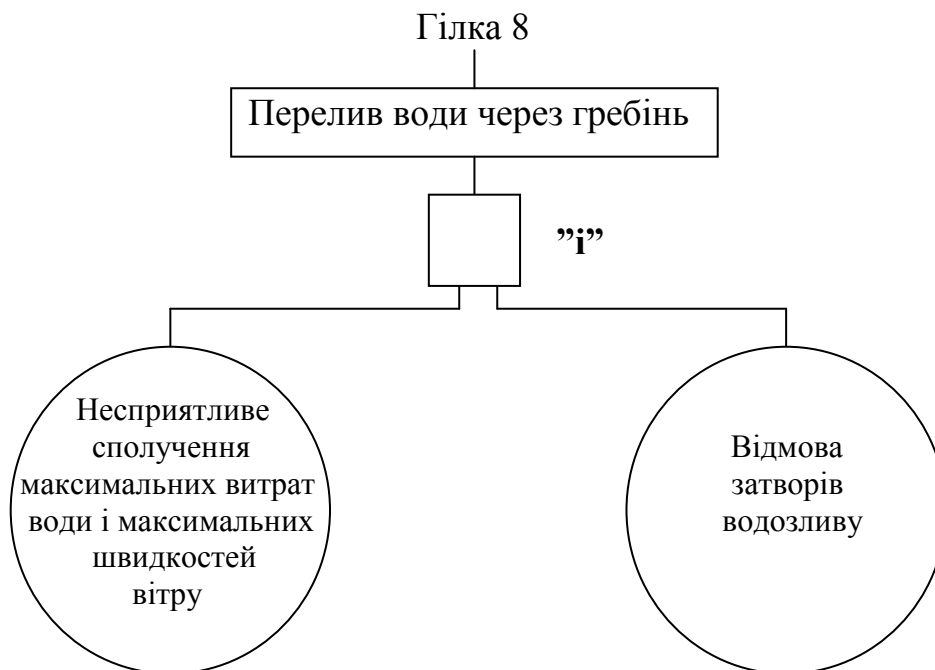


Рис. Т.20. Гілка 8-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

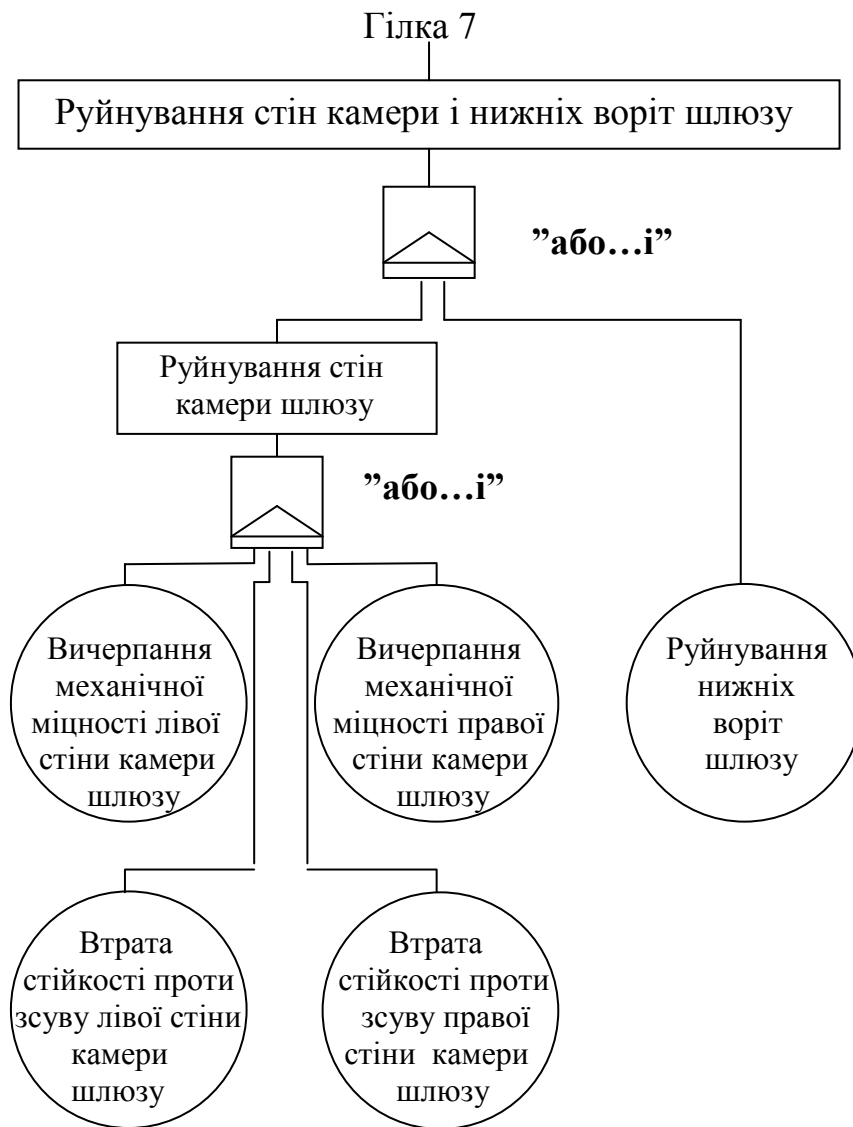


Рис. Т.21. Гілка 7-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

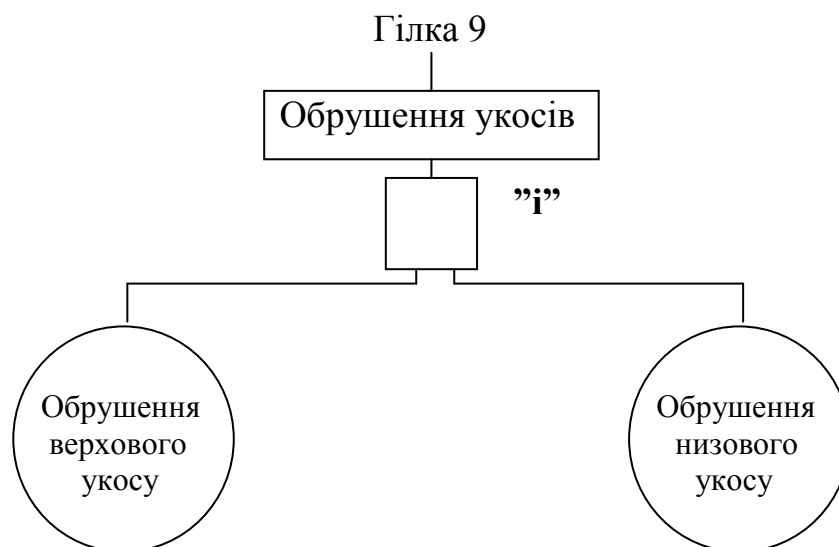


Рис. Т.22. Гілка 9-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі



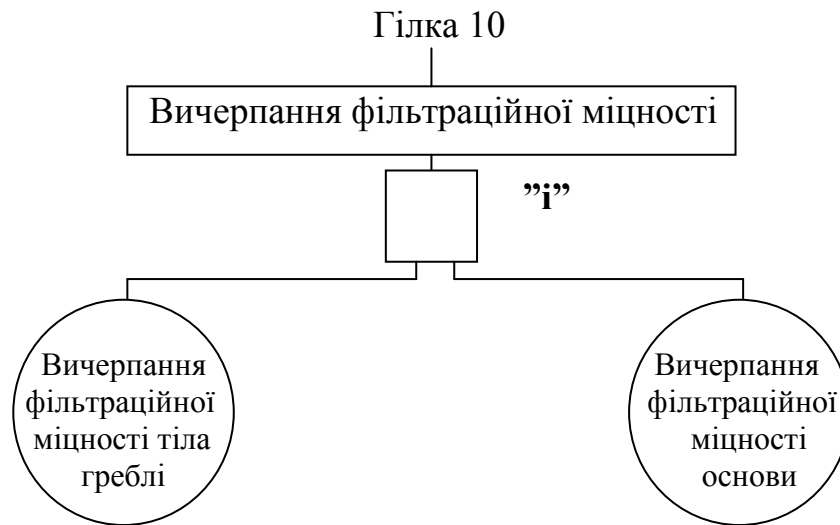


Рис. Т.23. Гілка 10-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

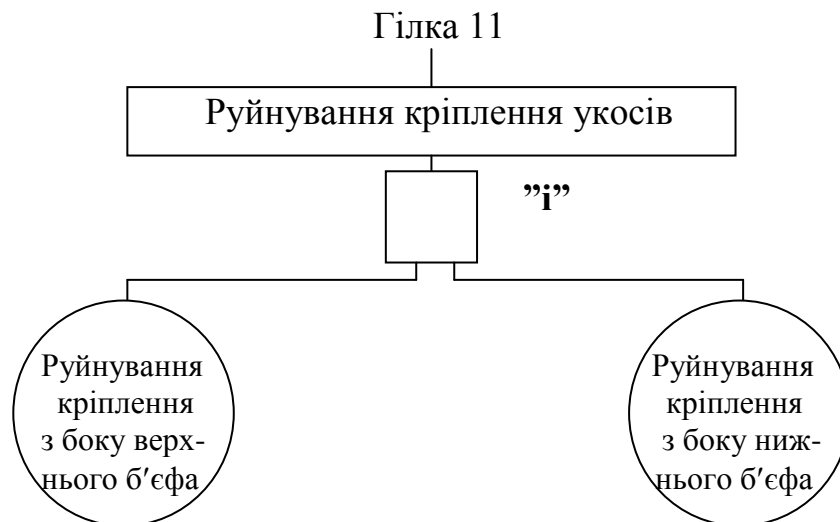


Рис. Т.24. Гілка 11-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Канівському гідровузлі

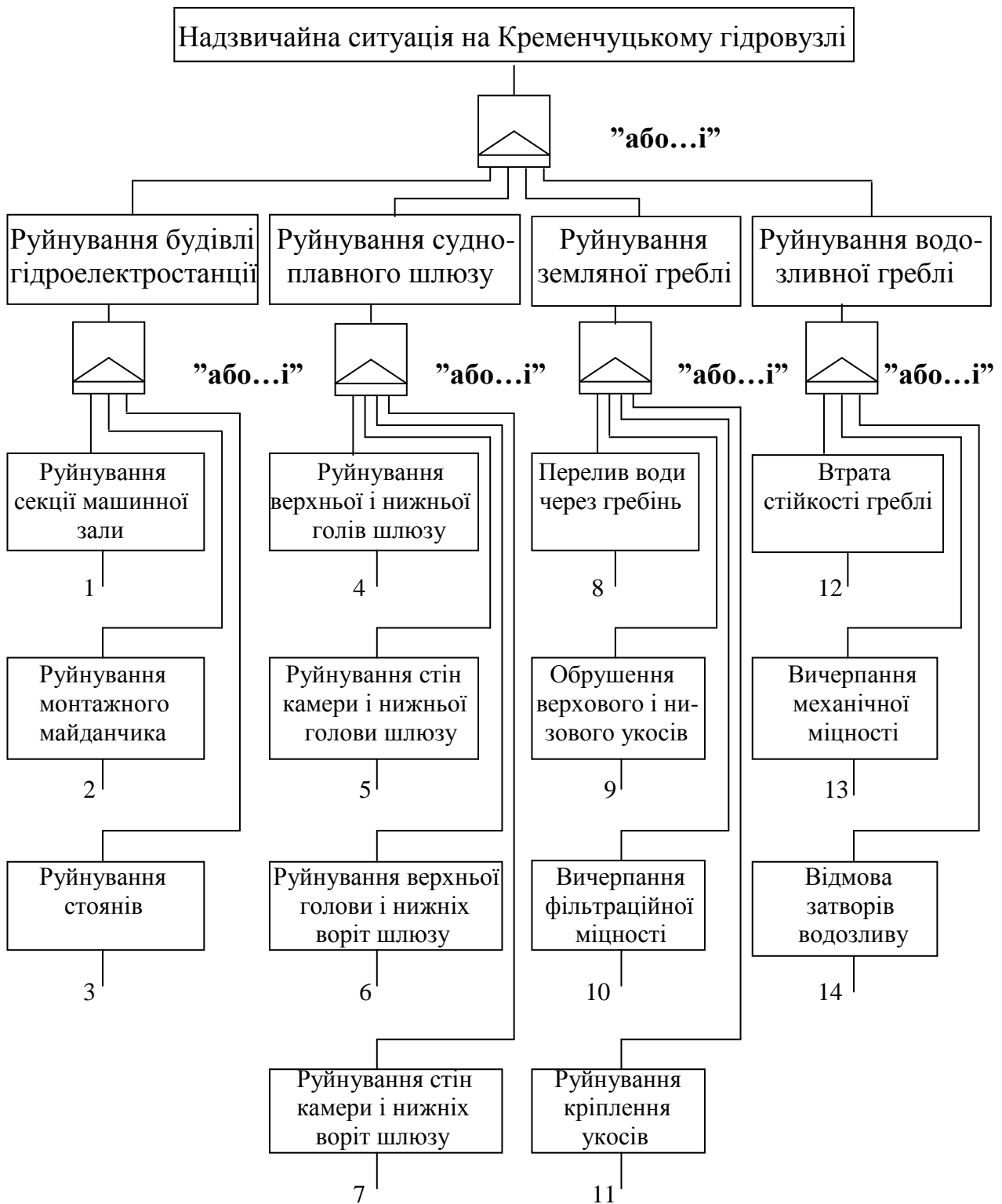


Рис. Т.25. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

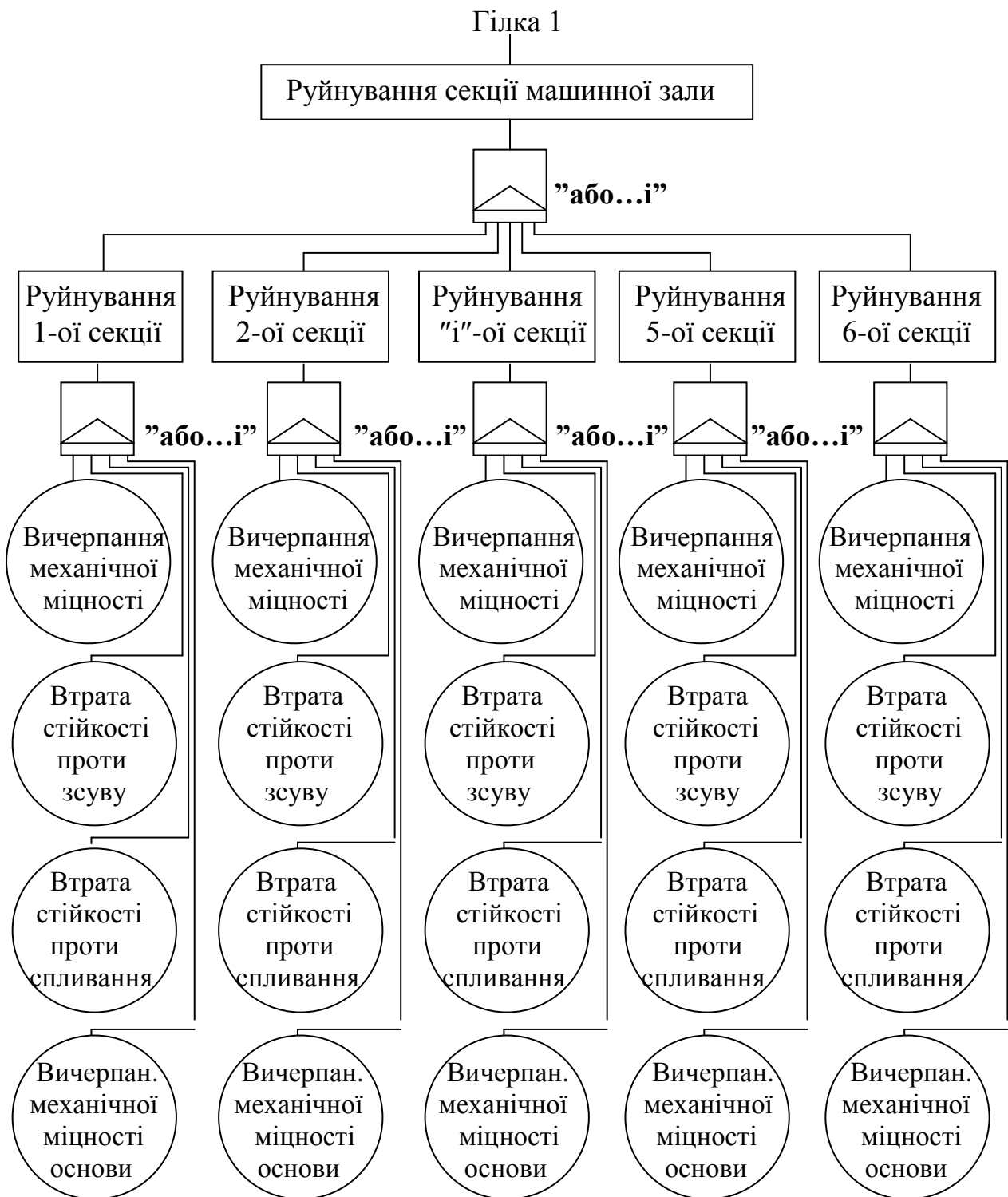


Рис. Т.26. Гілка 1-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

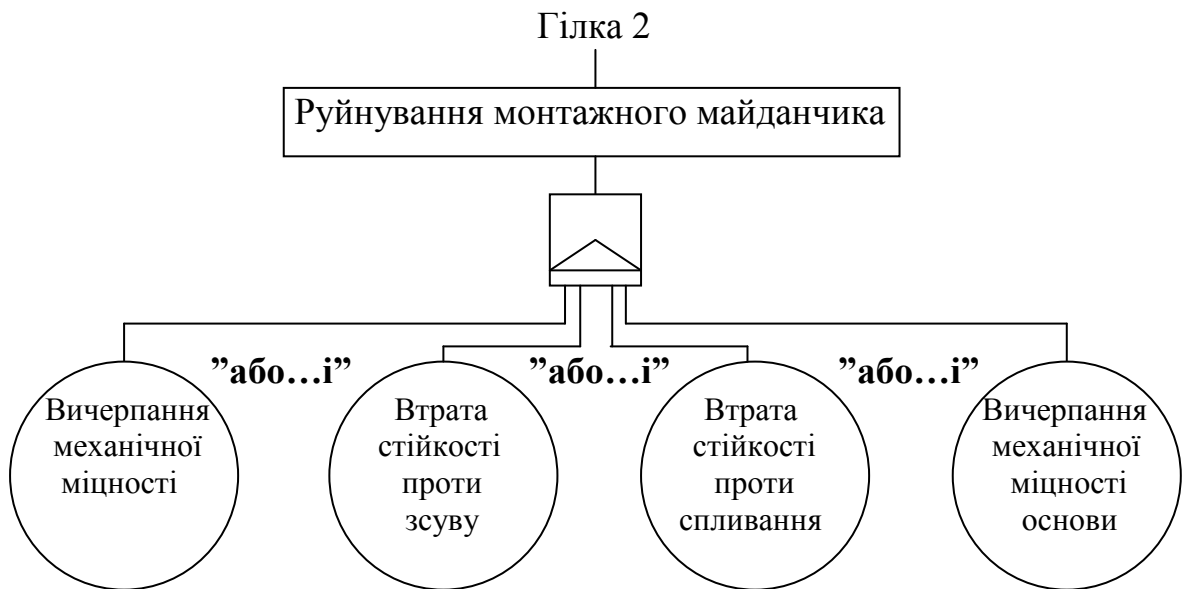


Рис. Т.27. Гілка 2-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

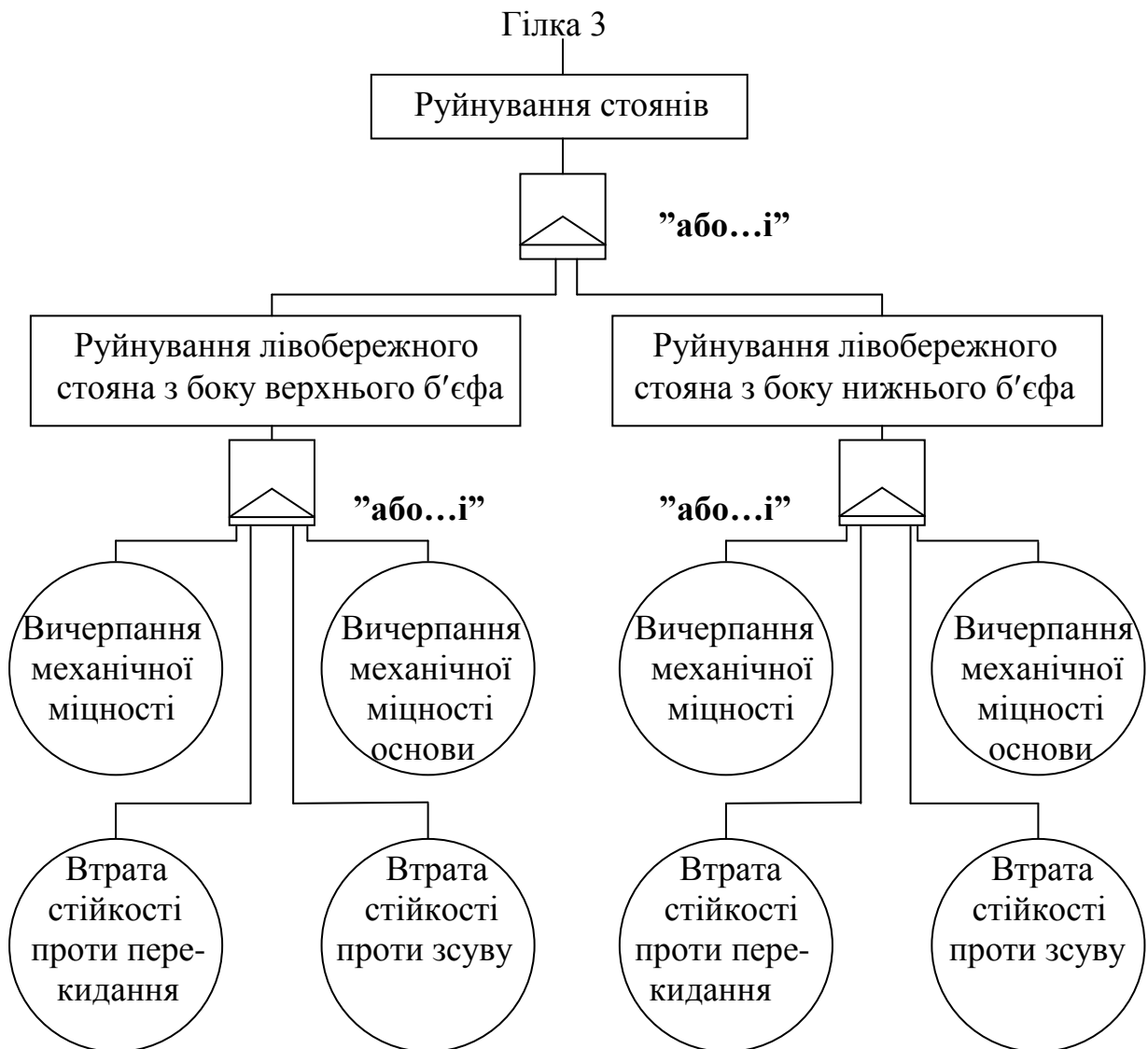


Рис. Т.28. Гілка 3-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

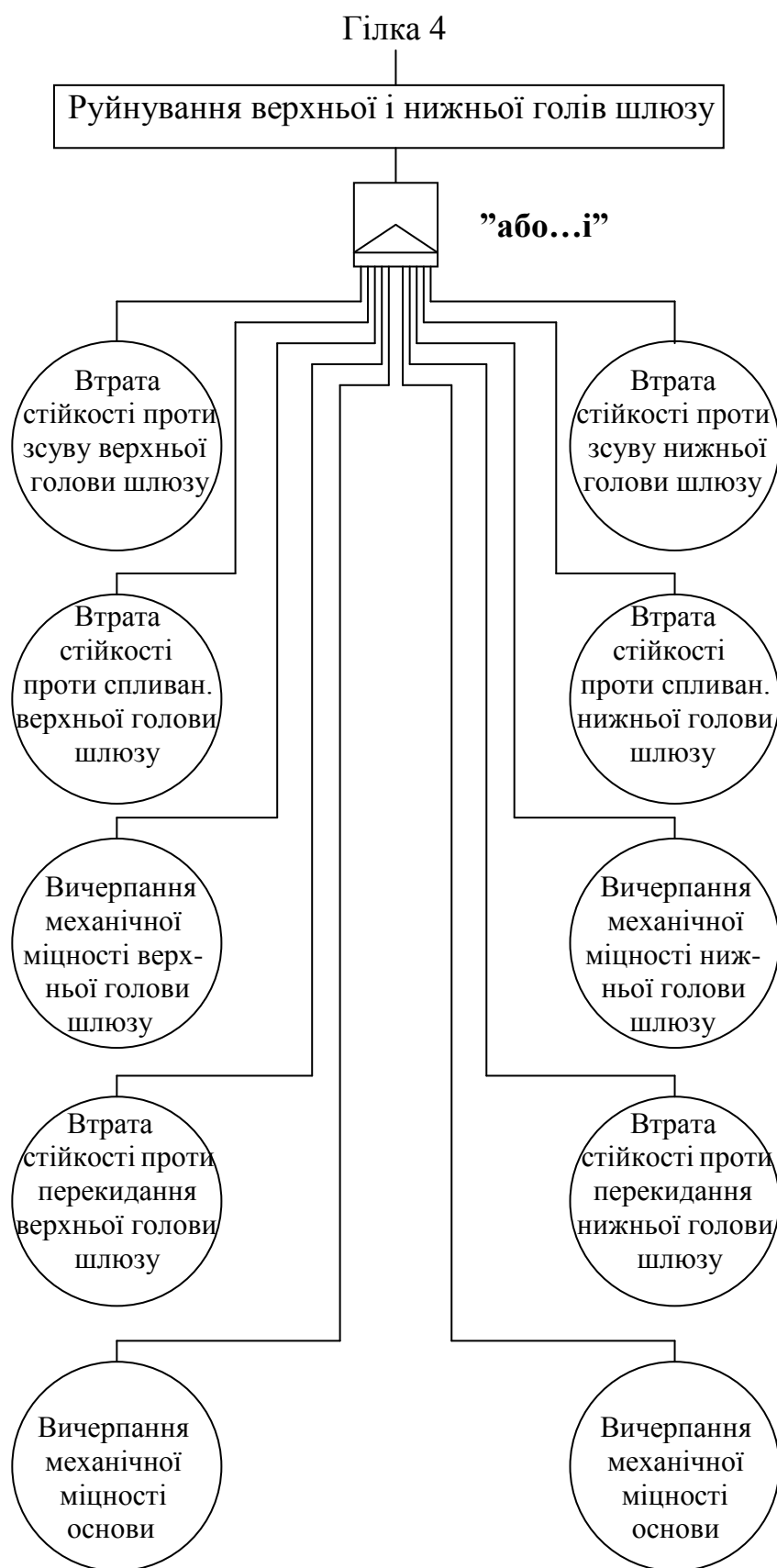


Рис. Т.29. Гілка 4-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

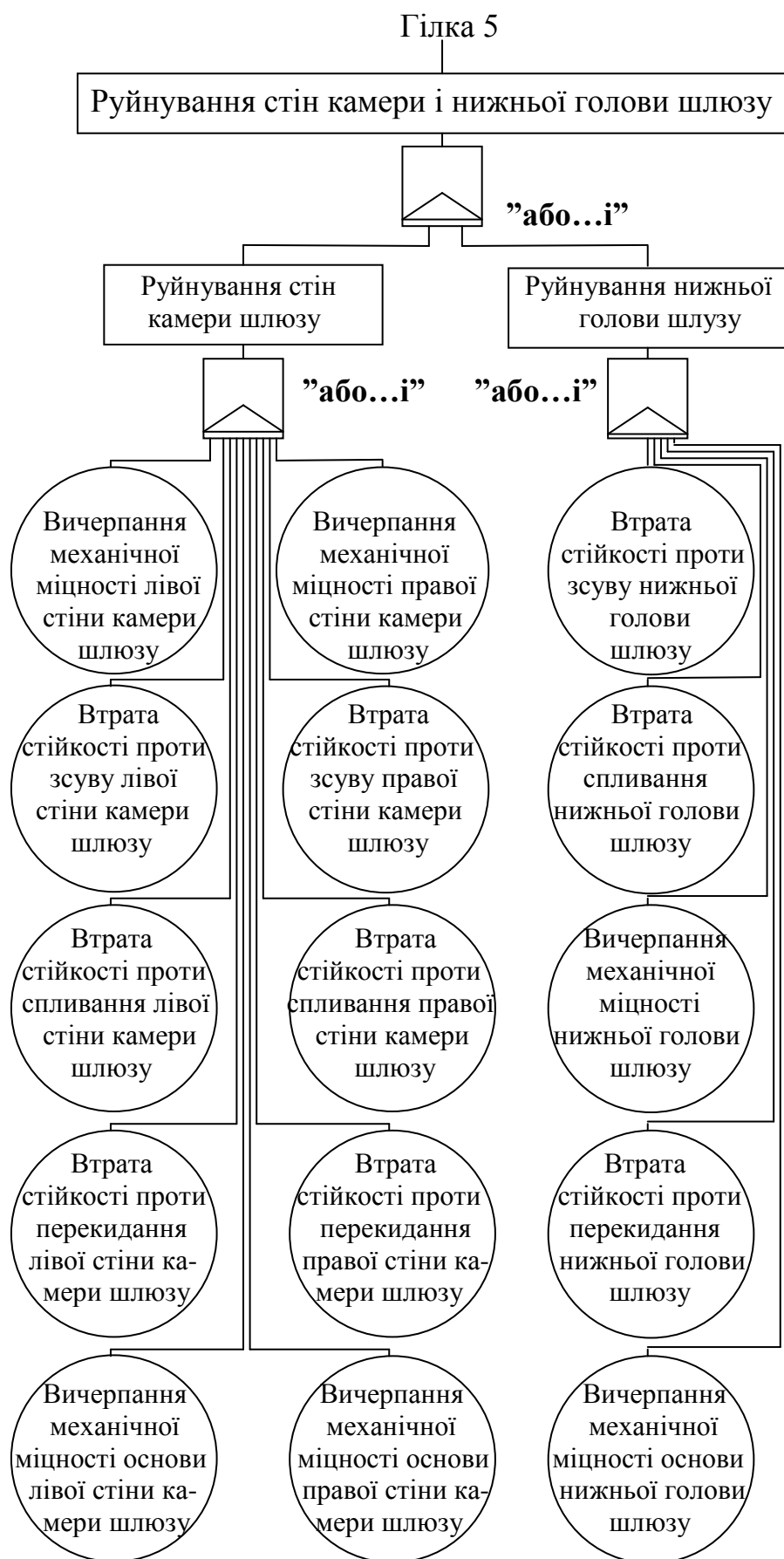


Рис. Т.30. Гілка 5-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

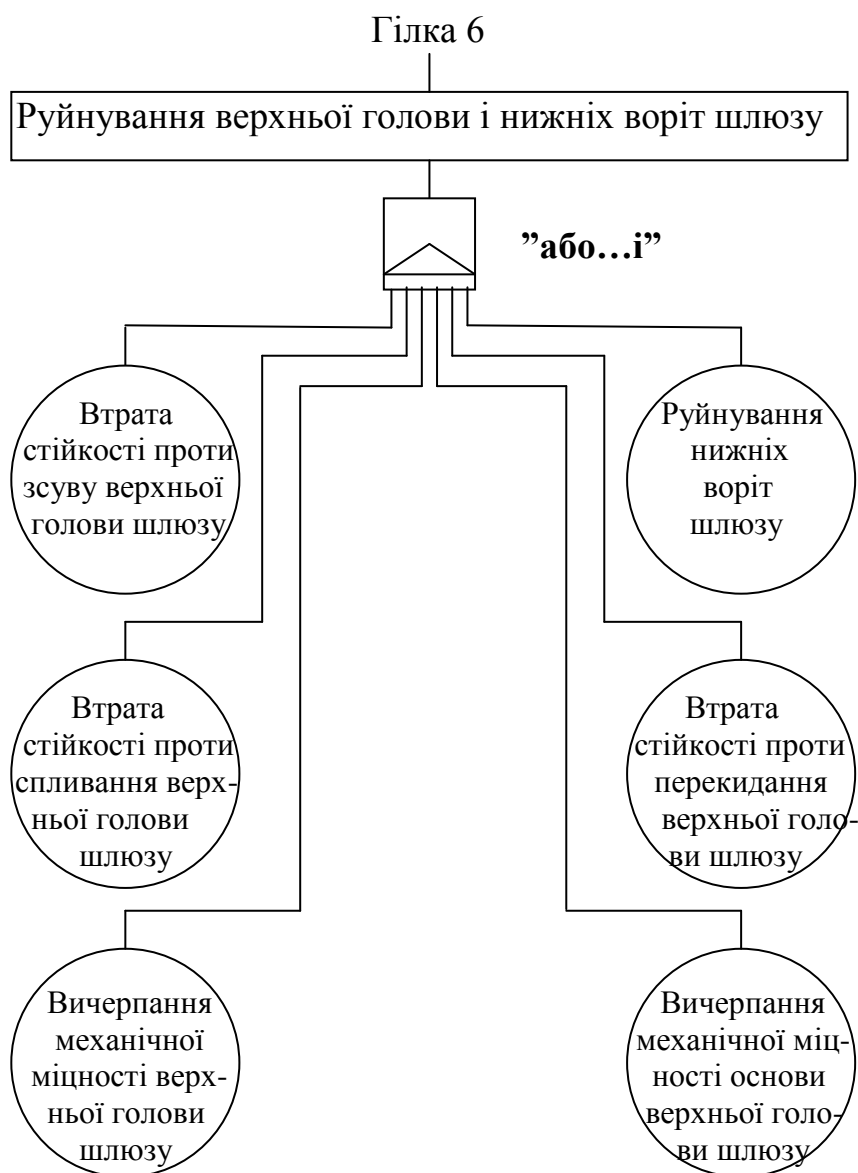


Рис. Т.31. Гілка 6-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

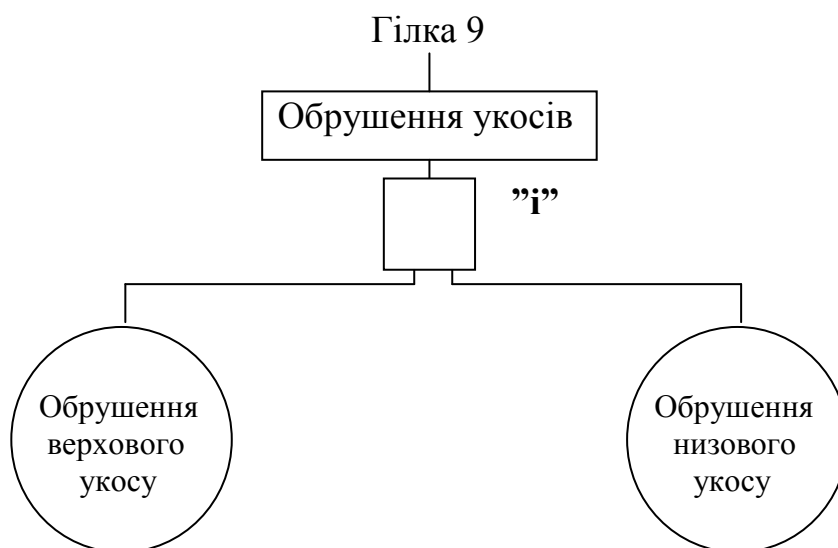


Рис. Т.32. Гілка 9-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

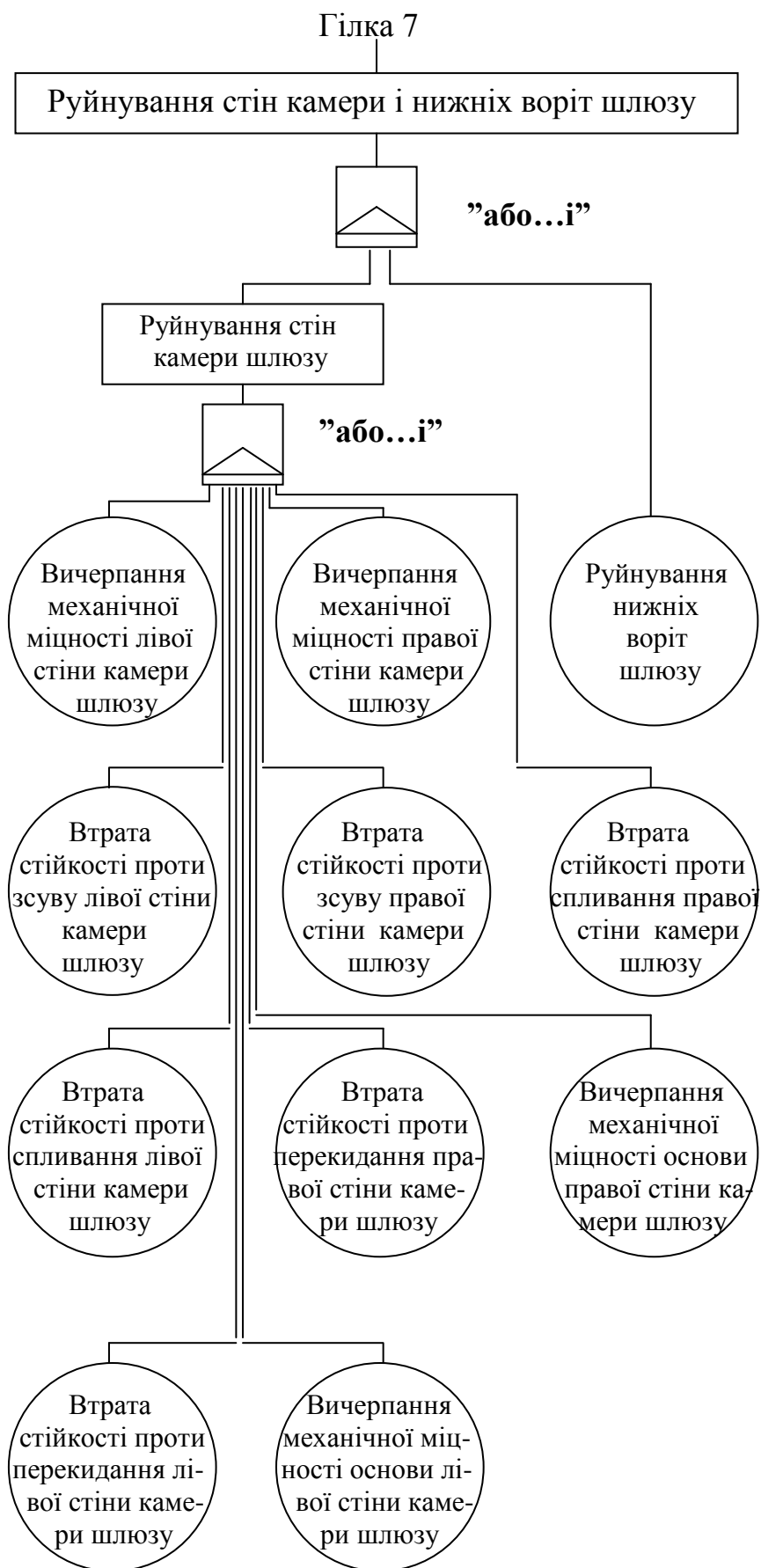


Рис. Т.33. Гілка 7-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі



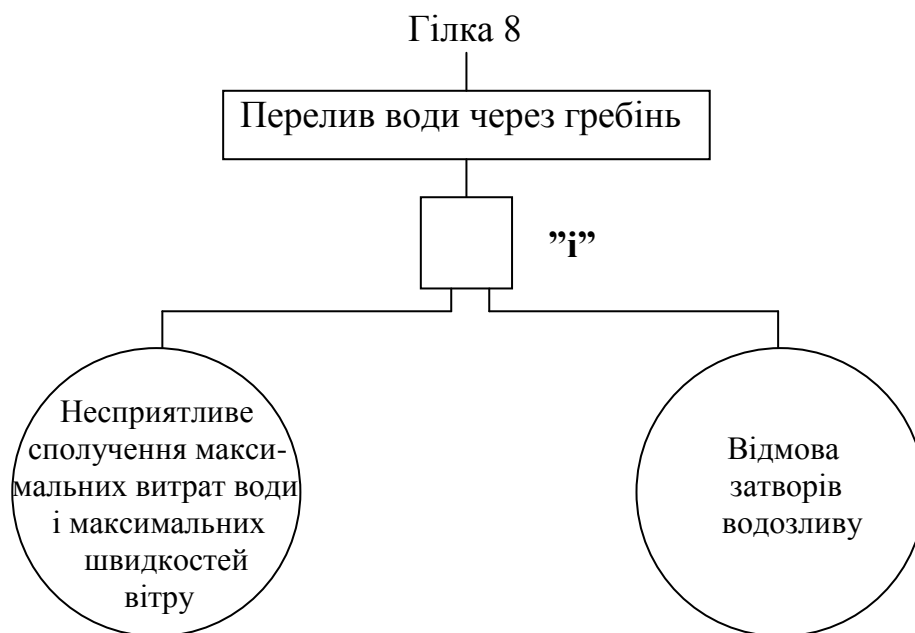


Рис. Т.34. Гілка 8-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

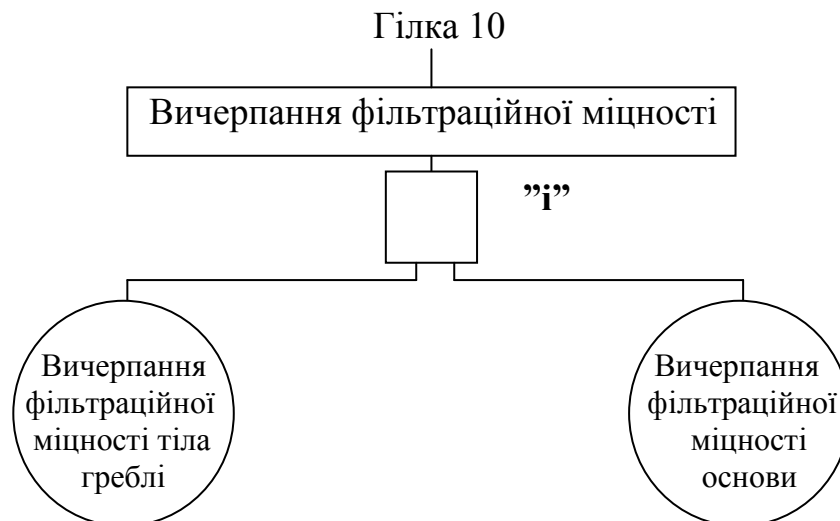


Рис. Т.35. Гілка 10-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

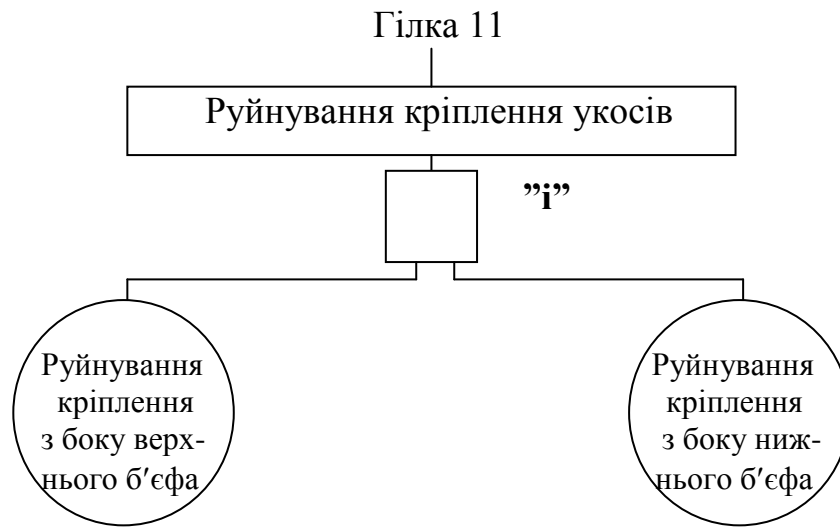


Рис. Т.36. Гілка 11-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

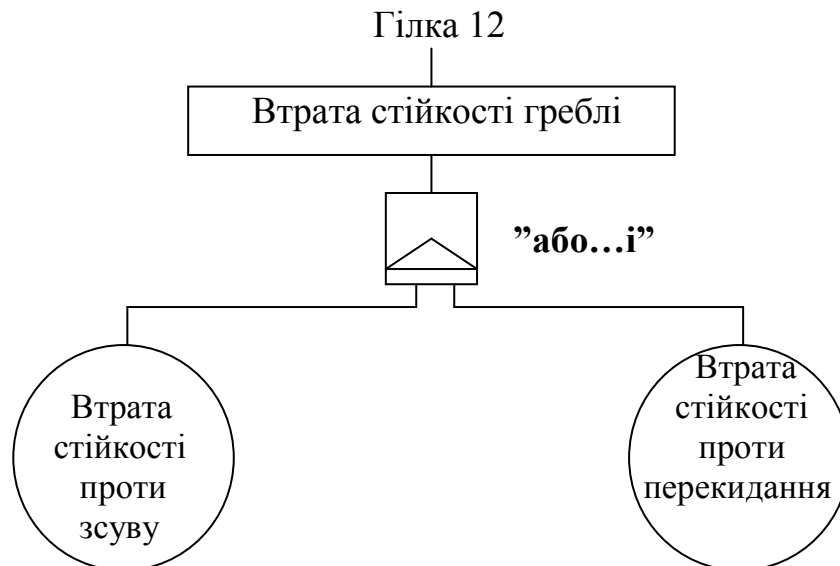


Рис. Т.37. Гілка 12-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

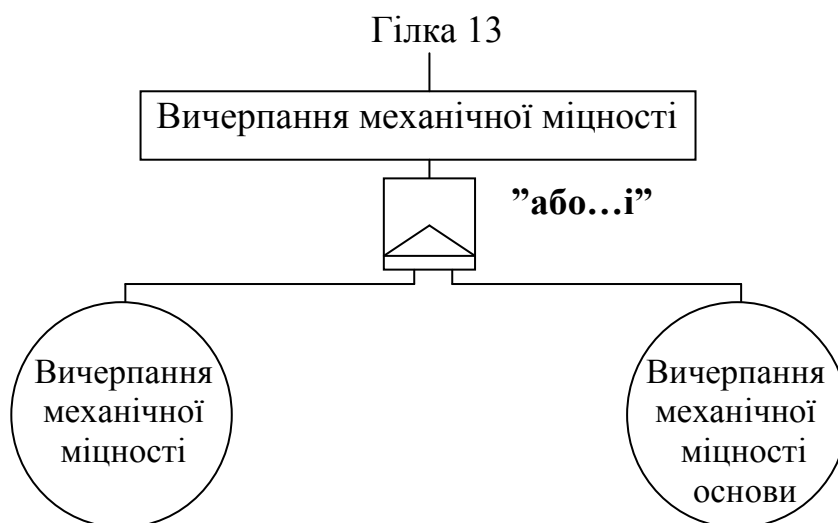


Рис. Т.38. Гілка 13-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

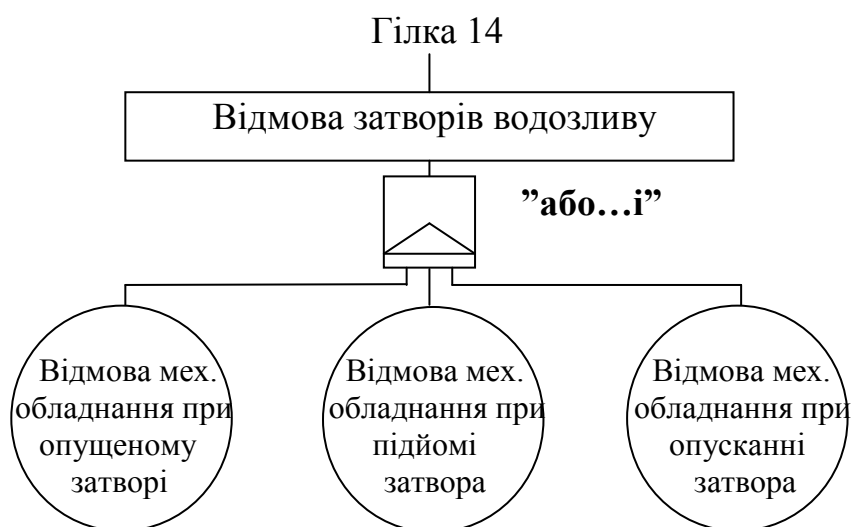


Рис. Т.39. Гілка 14-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Кременчуцькому гідровузлі

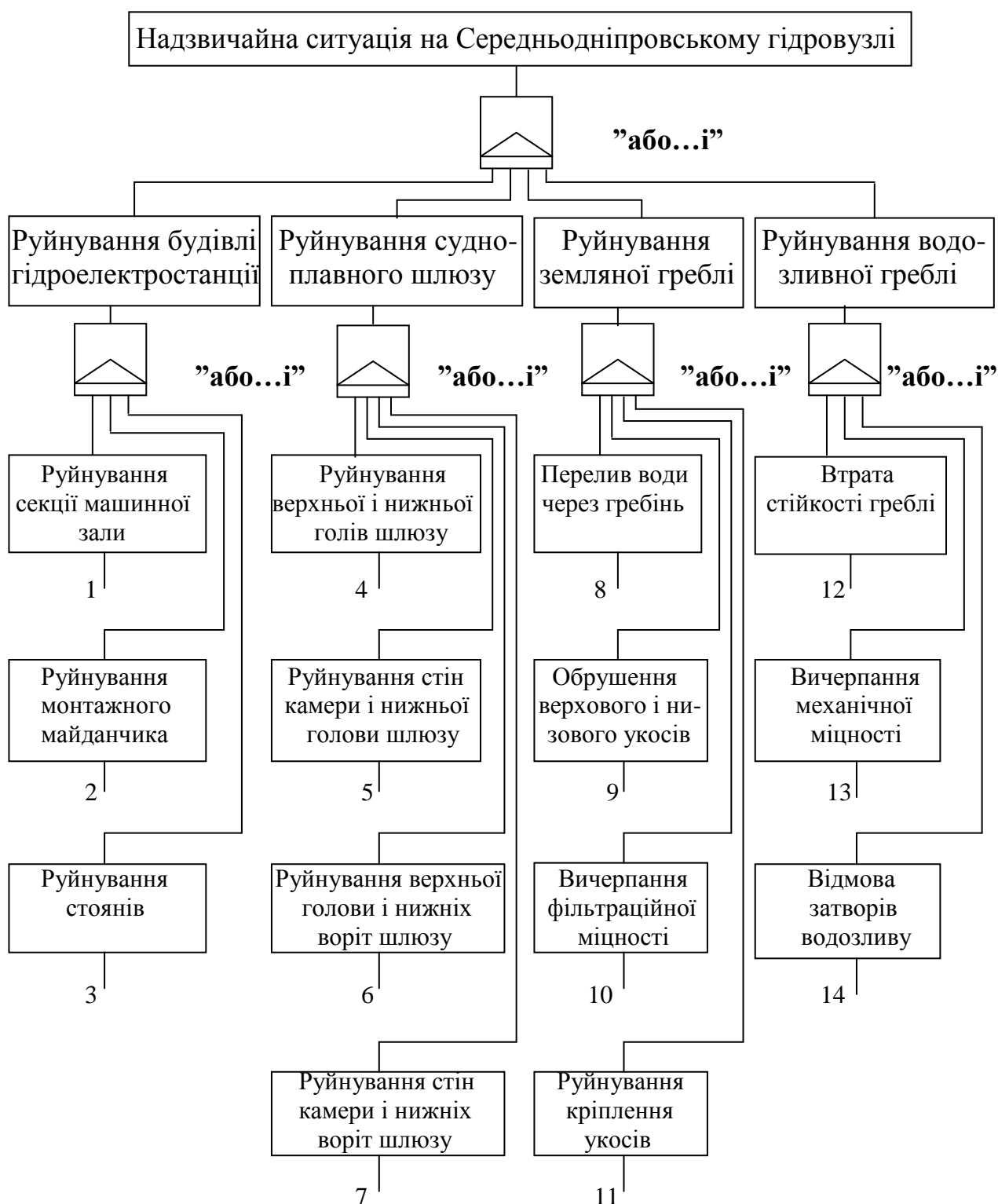


Рис. Т.40. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

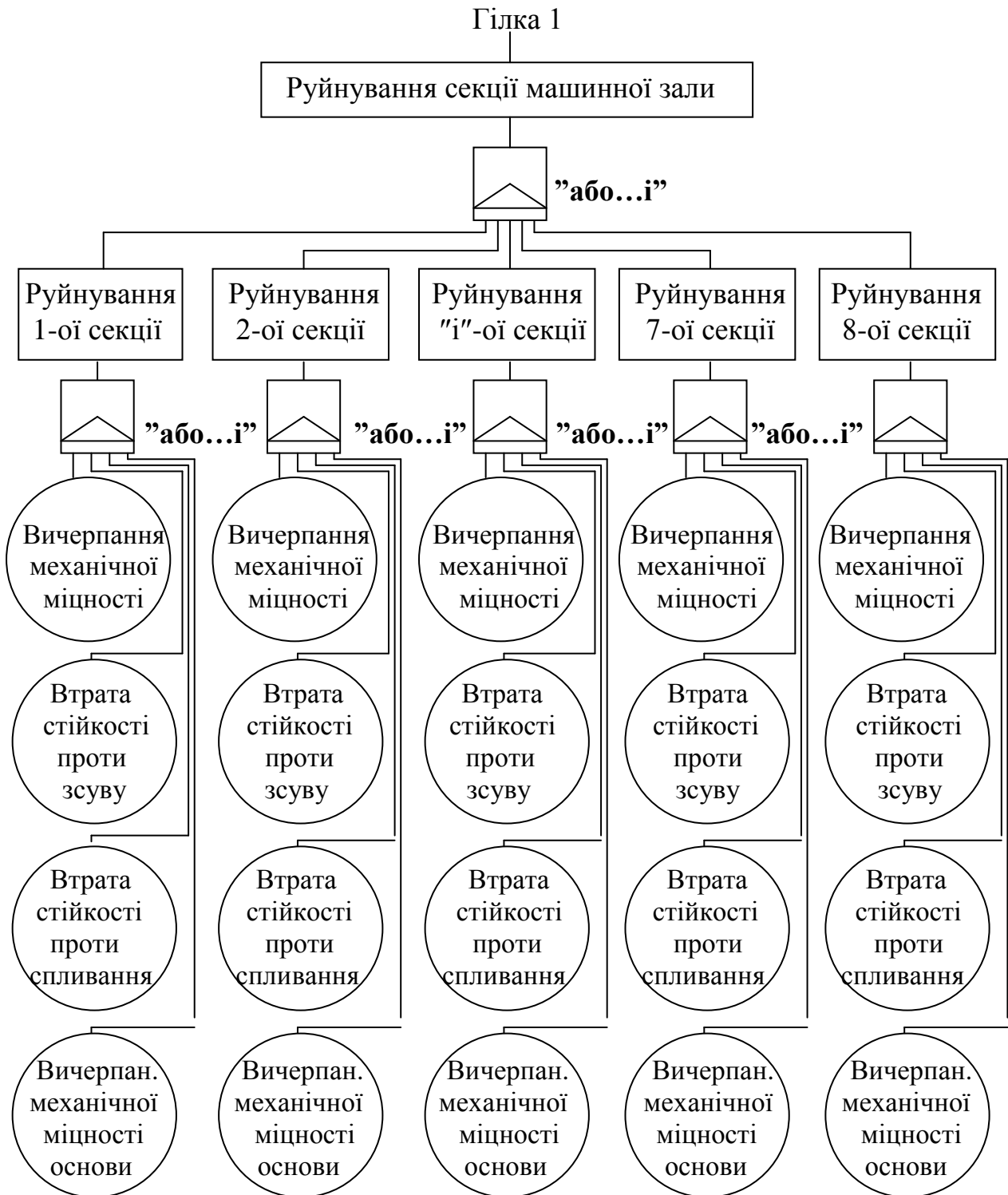


Рис. Т.41. Гілка 1-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

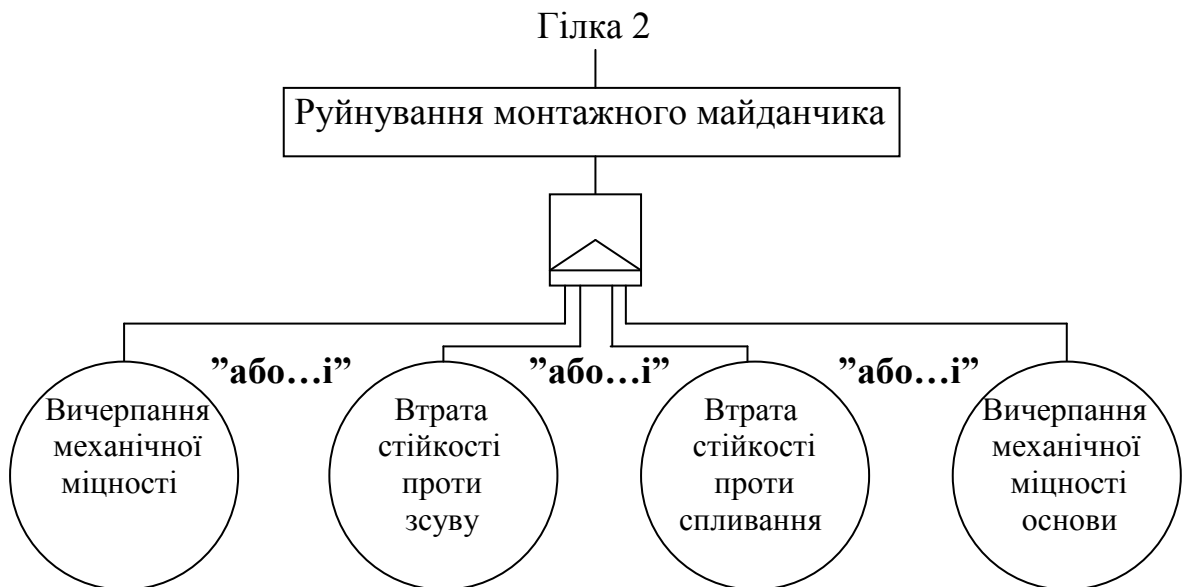


Рис. Т.42. Гілка 2-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

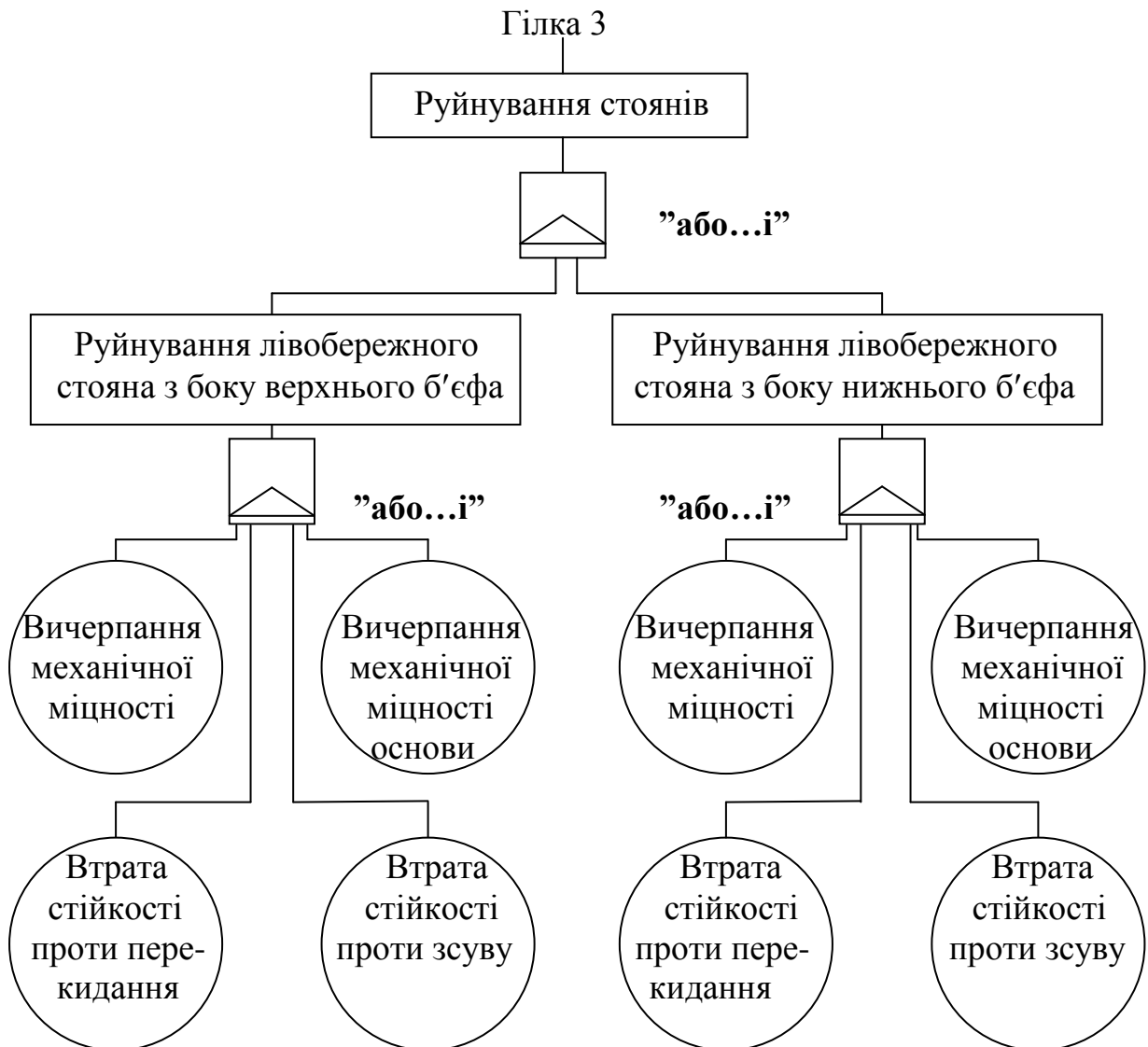


Рис. Т.43. Гілка 3-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

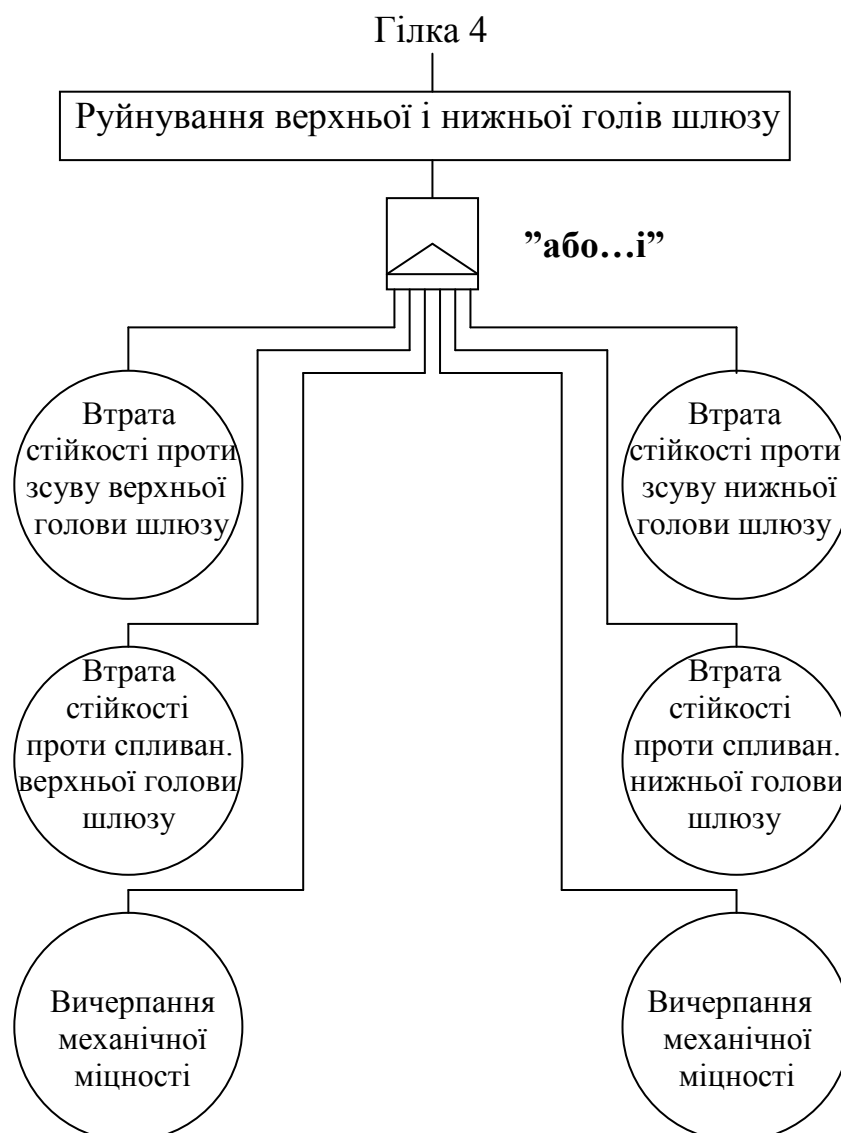


Рис. Т.44. Гілка 4-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі





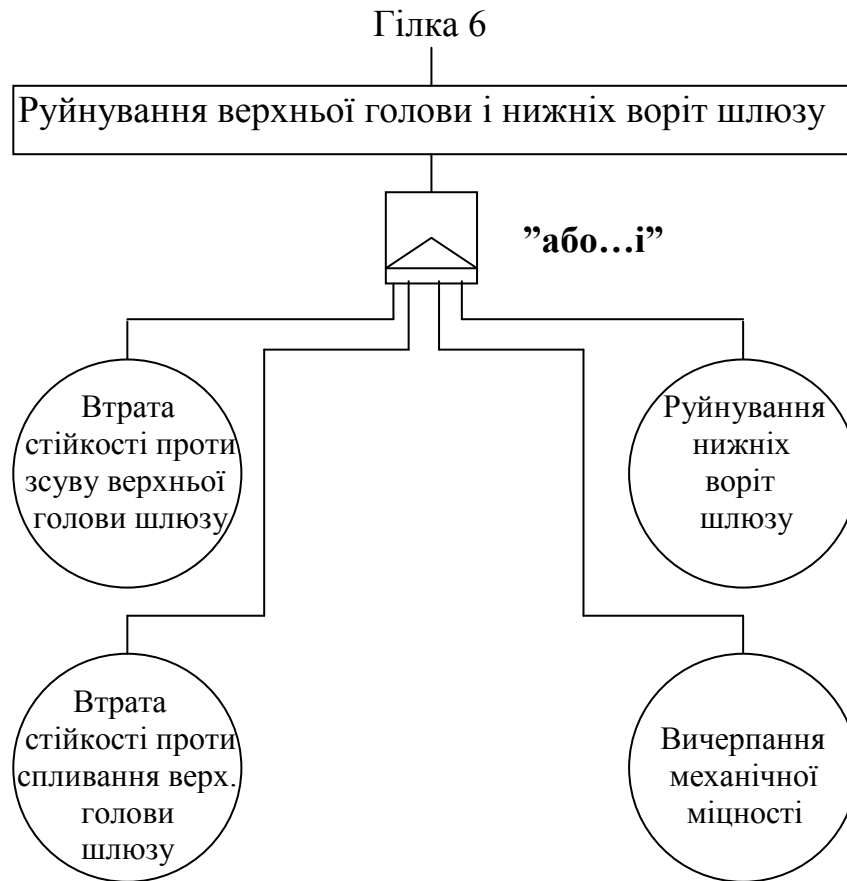


Рис. Т.46. Гілка 6-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

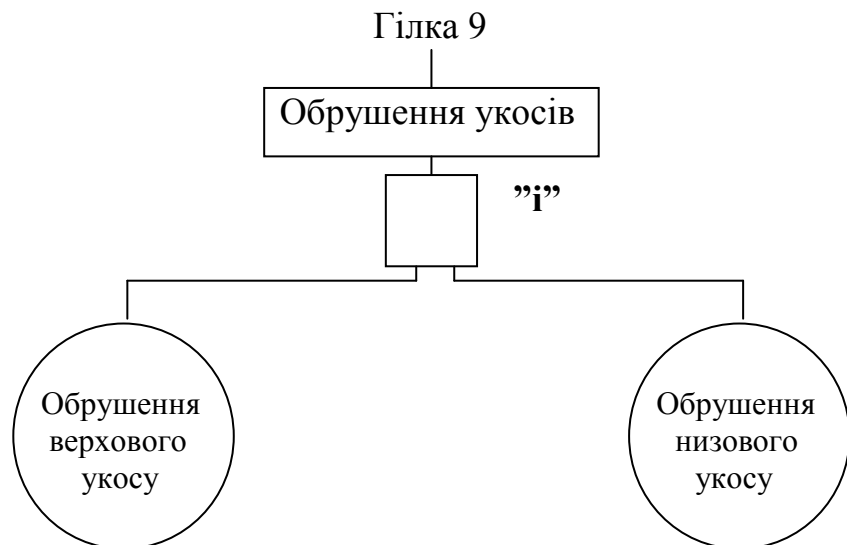


Рис. Т.47. Гілка 9-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

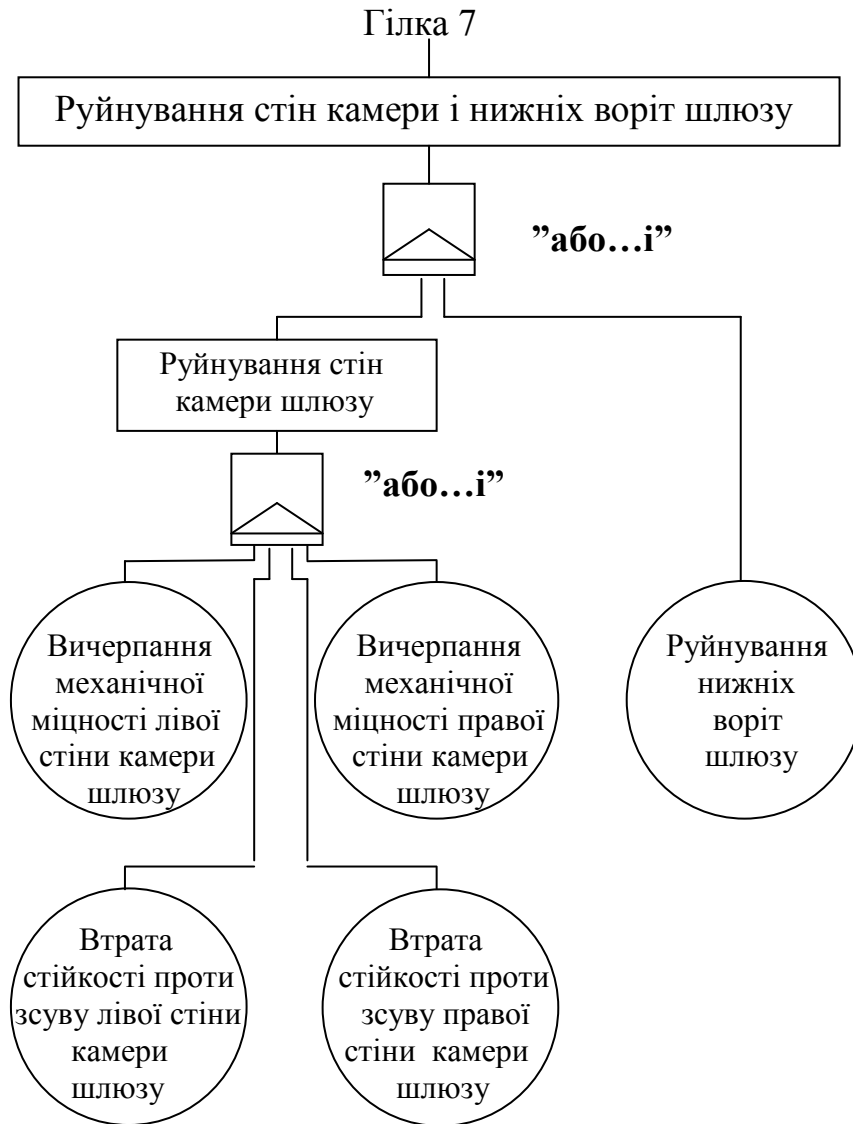


Рис. Т.48. Гілка 7-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

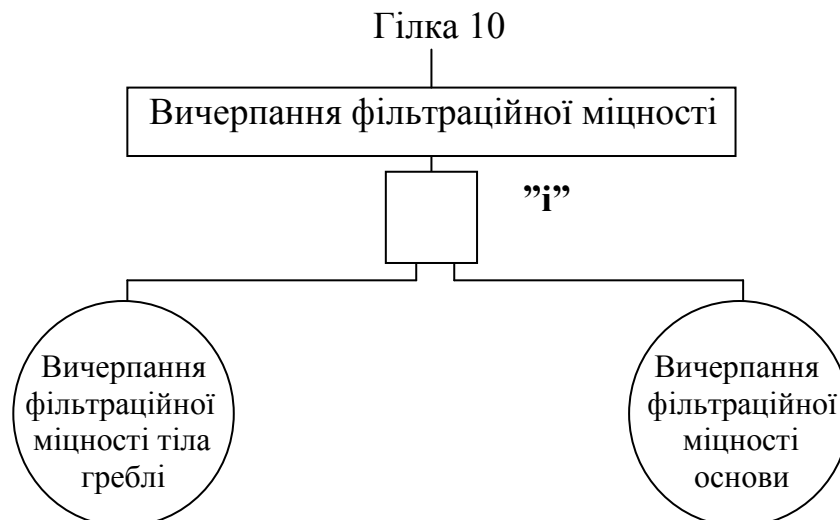


Рис. Т.49. Гілка 10-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

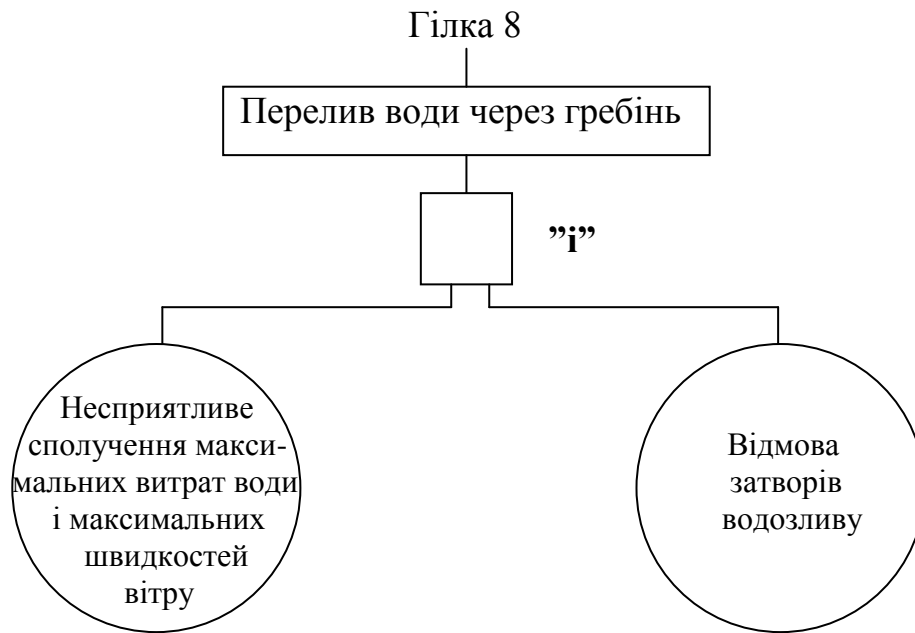


Рис. Т.50. Гілка 8-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

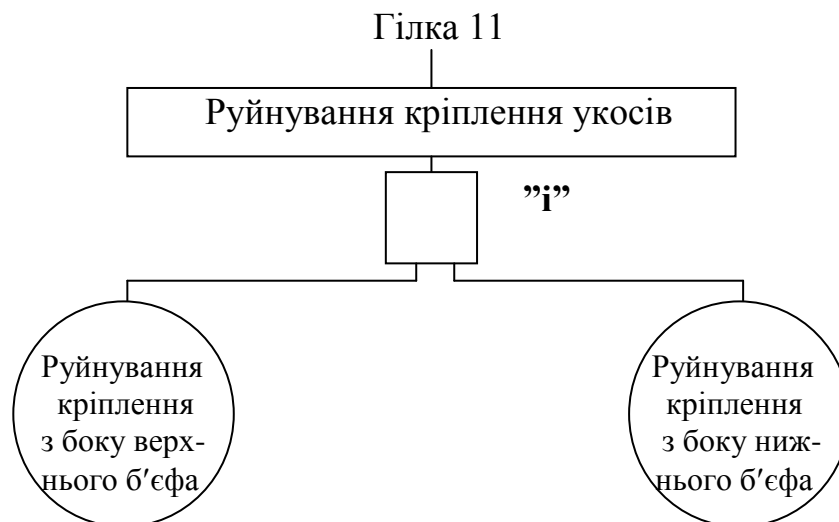


Рис. Т.51. Гілка 11-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

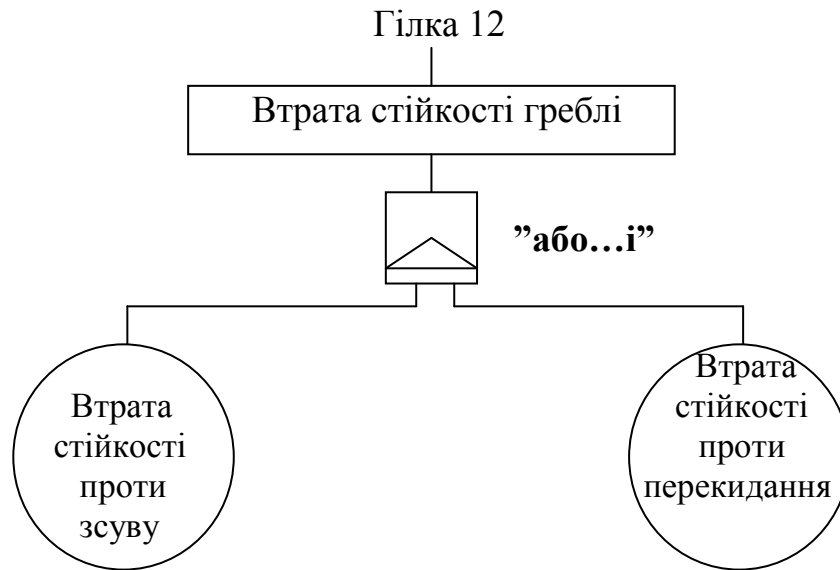


Рис. Т.52. Гілка 12-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

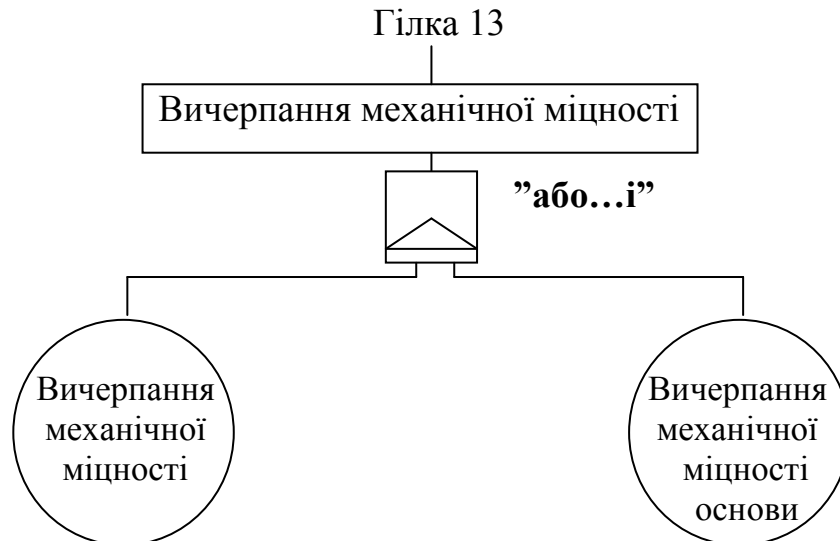


Рис. Т.53. Гілка 13-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

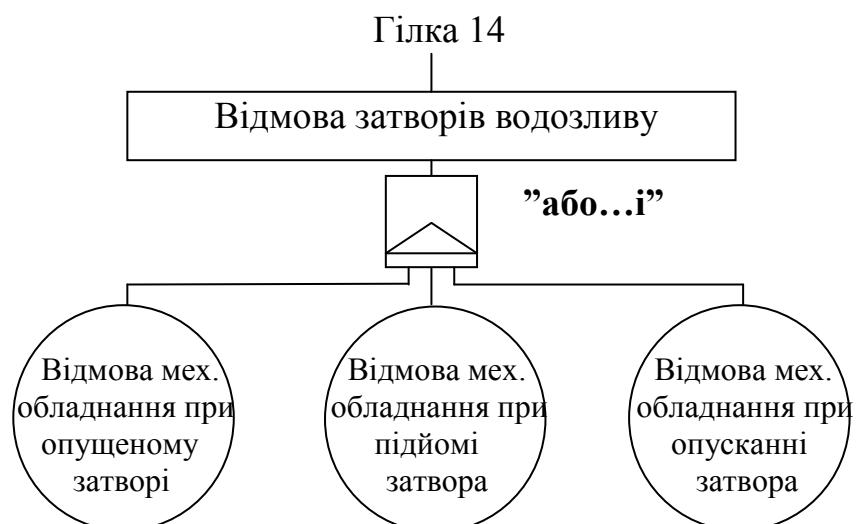


Рис. Т.54. Гілка 14-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Середньодніпровському гідровузлі

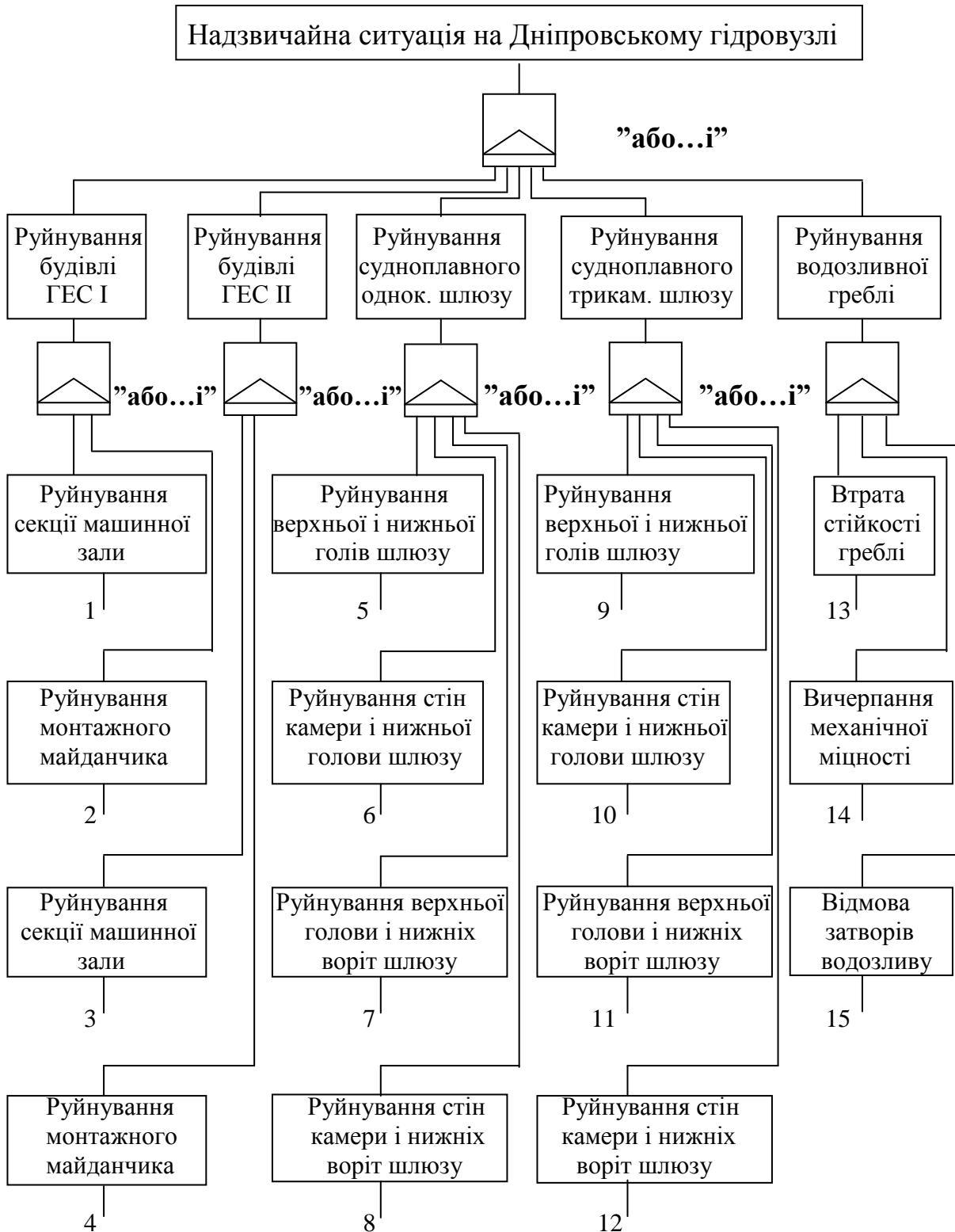


Рис. Т.55. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

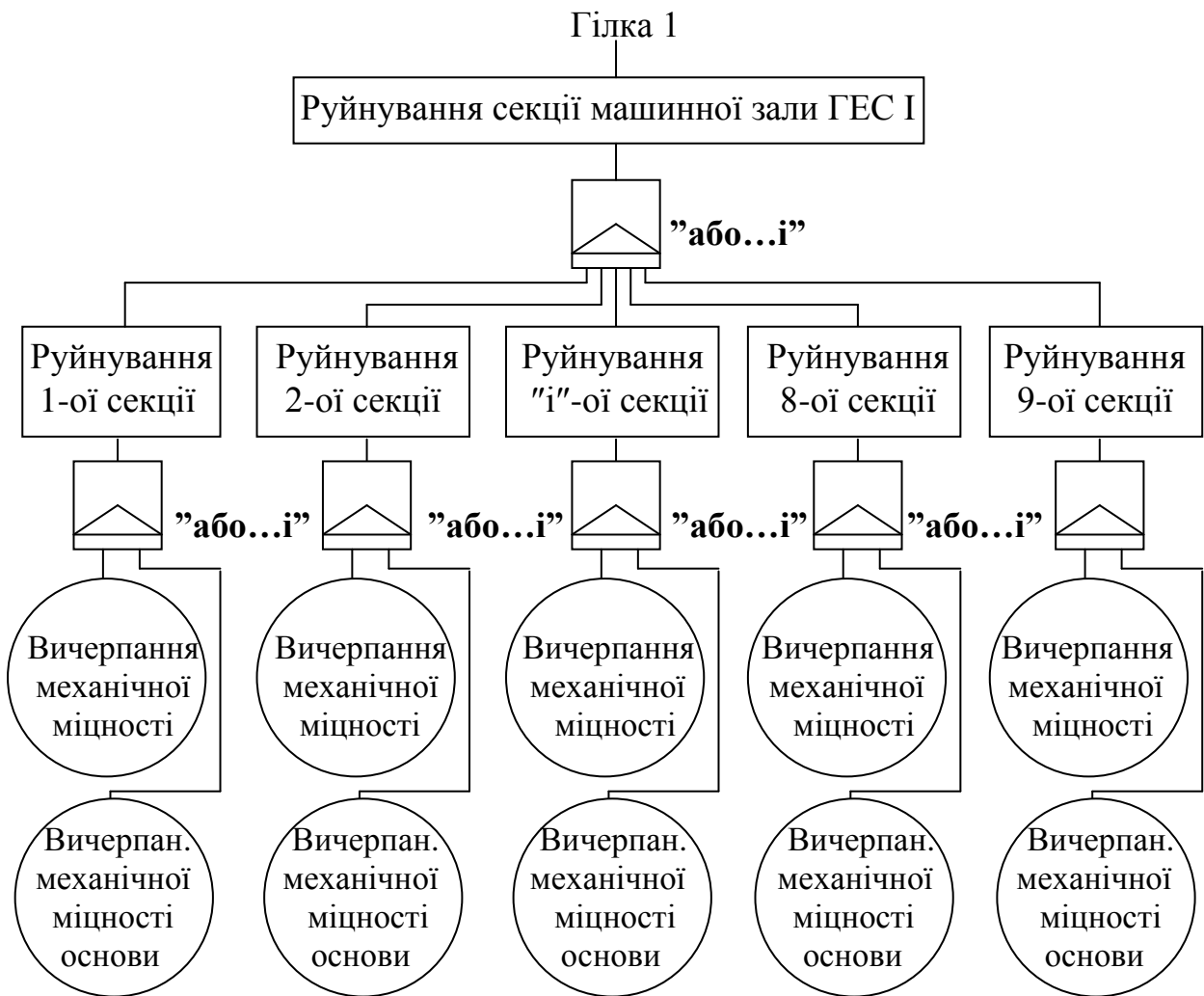


Рис. Т.56. Гілка 1-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

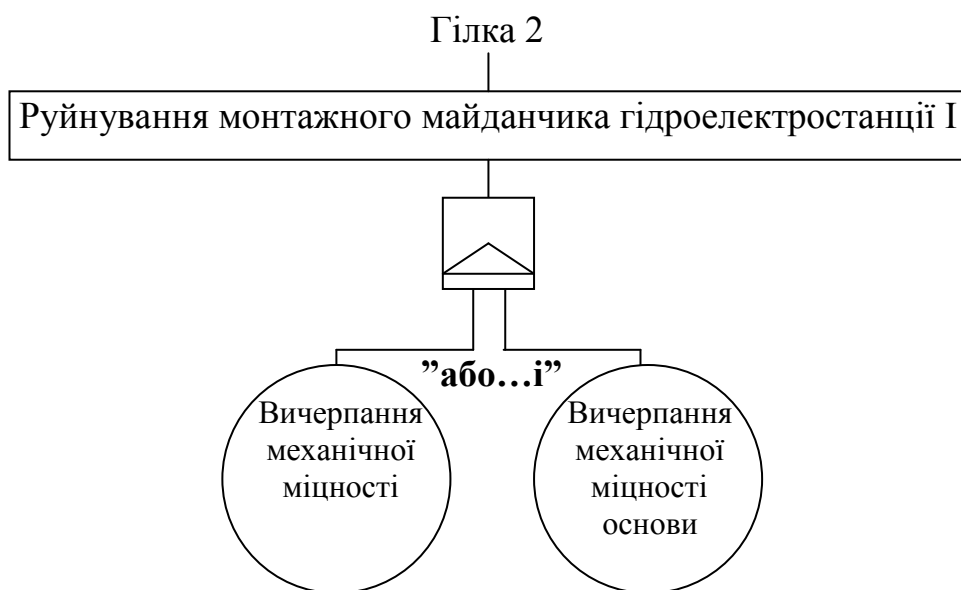


Рис. Т.57. Гілка 2-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

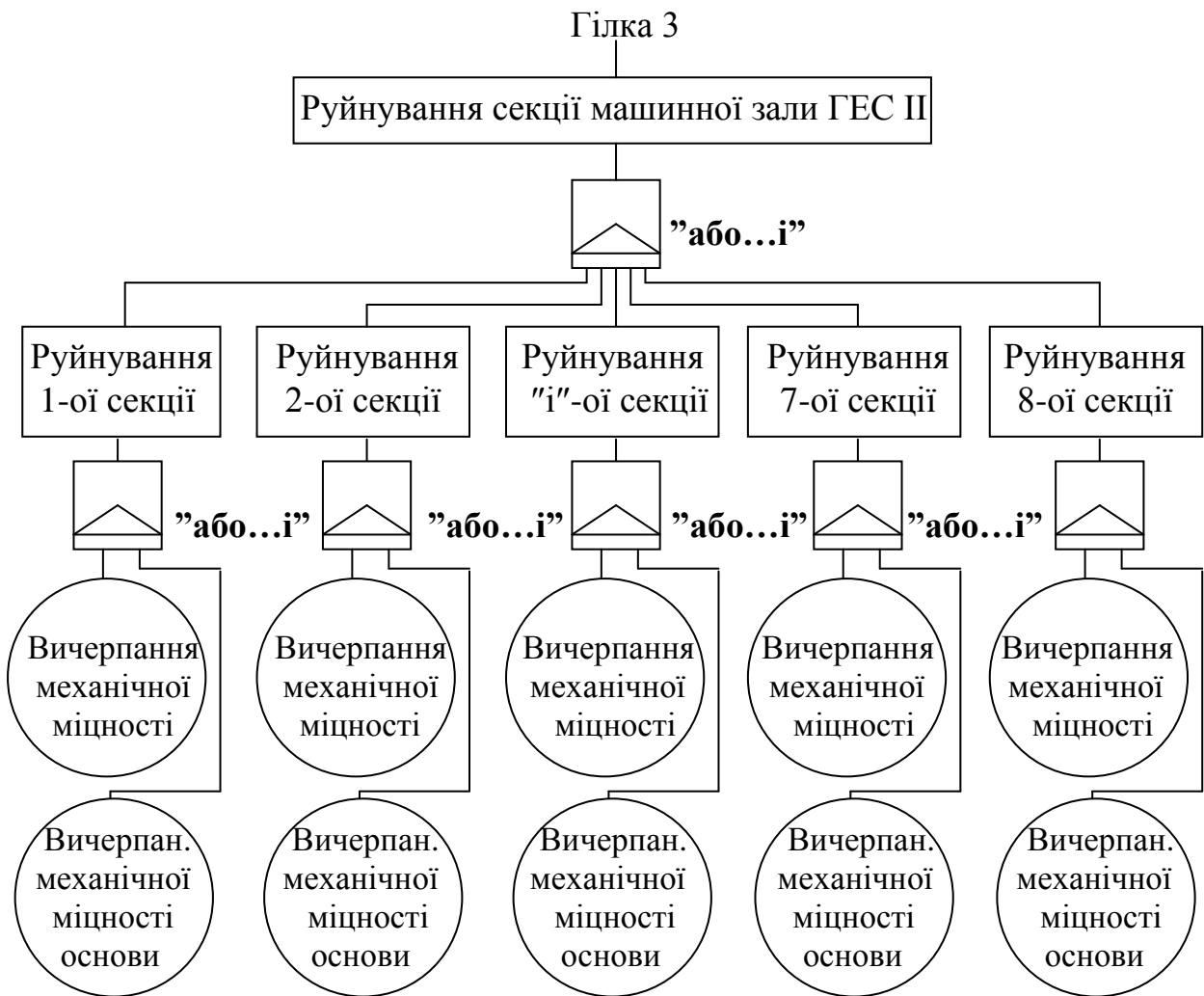


Рис. Т.58. Гілка 3-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

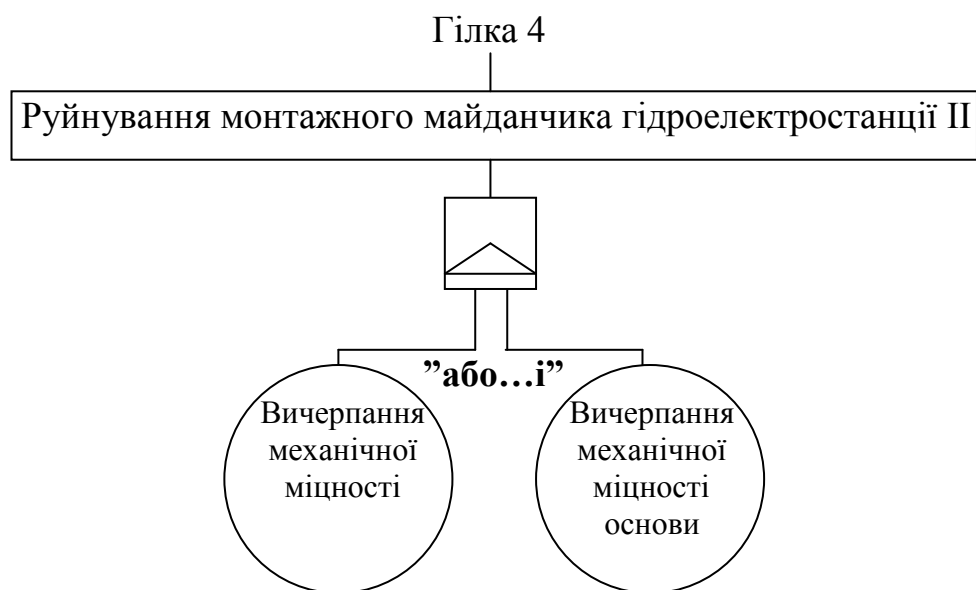


Рис. Т.59. Гілка 4-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі



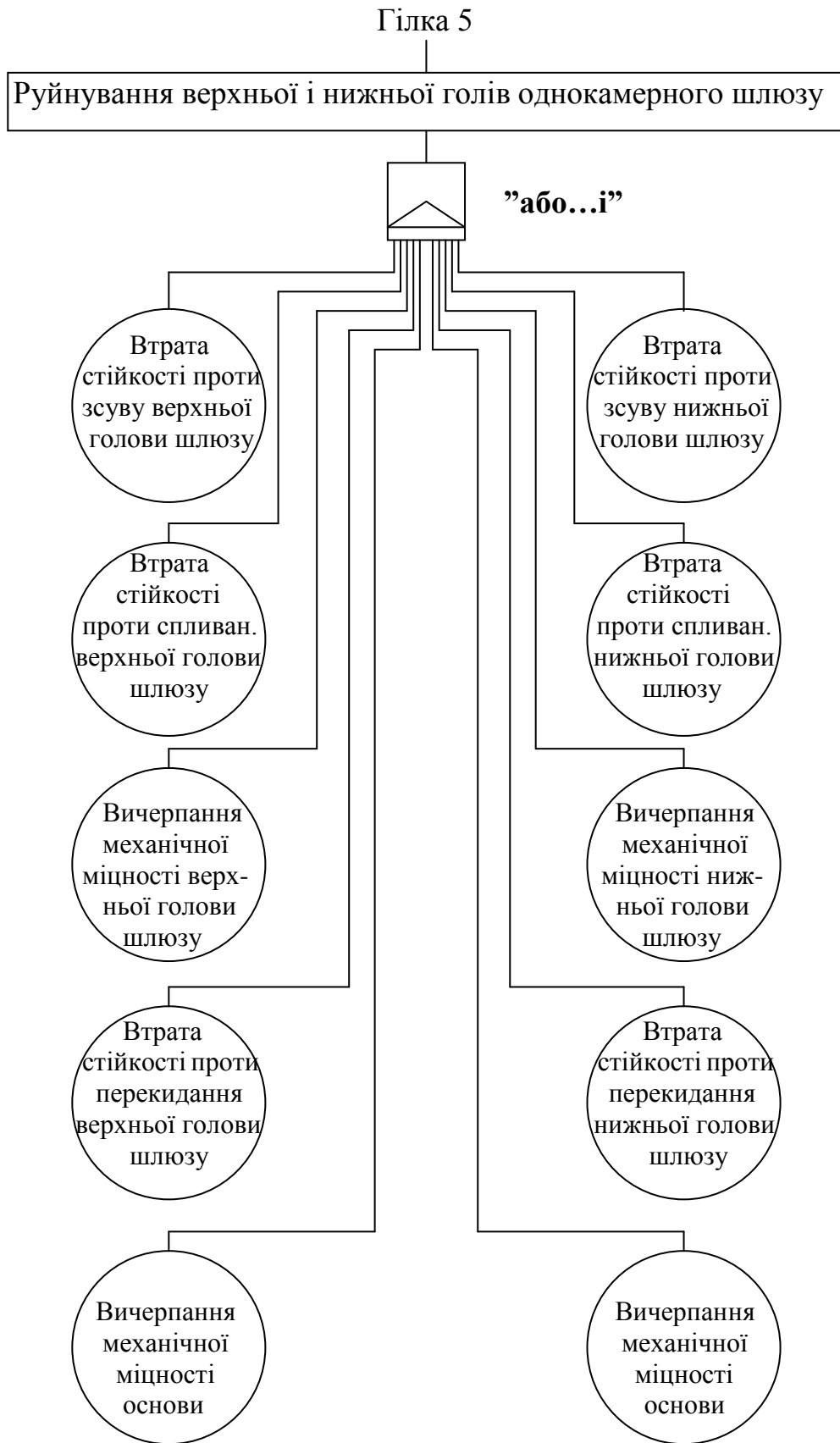


Рис. Т.60. Гілка 5-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

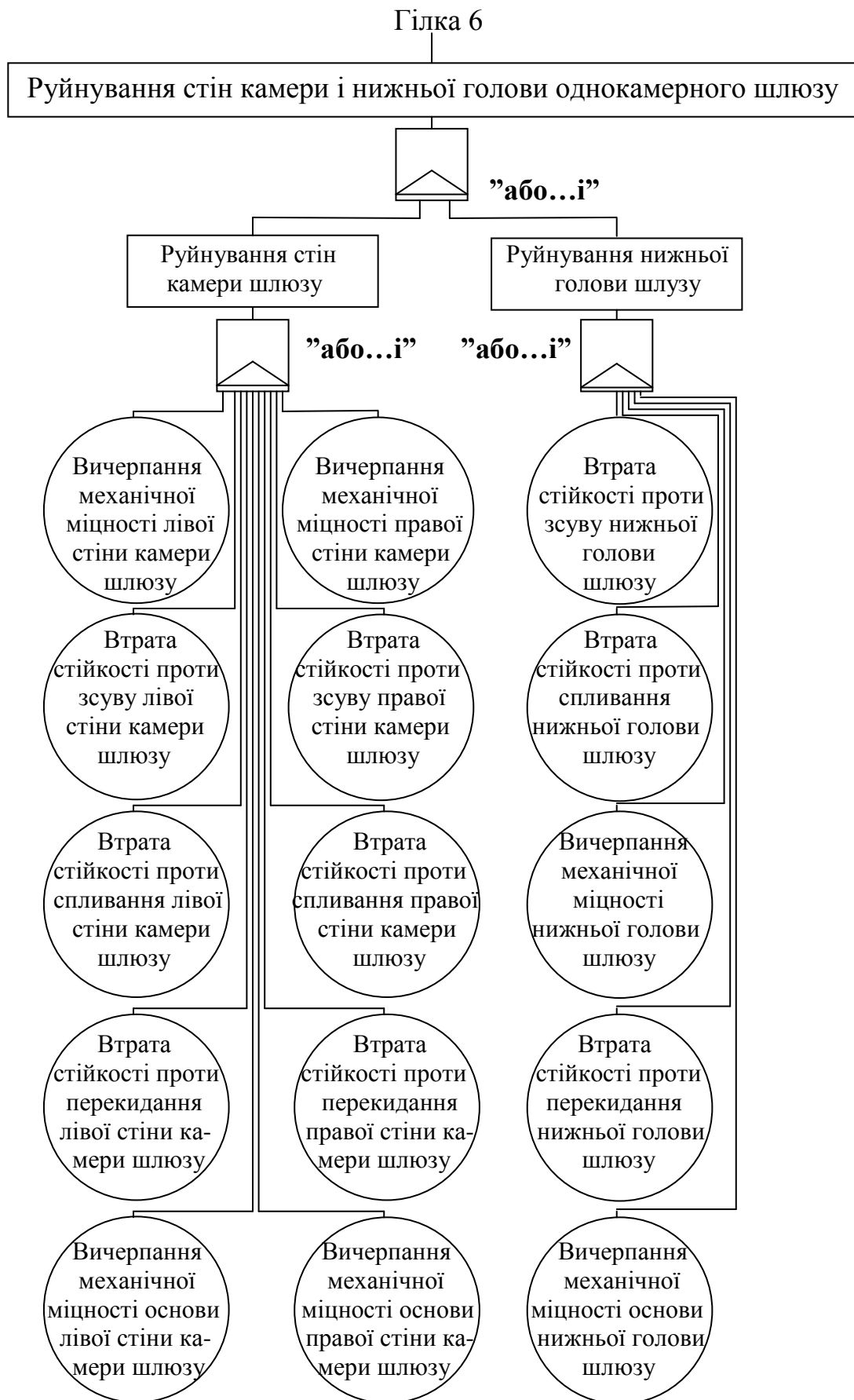


Рис. Т.61. Гілка 6-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі



Рис. Т.62. Гілка 7-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

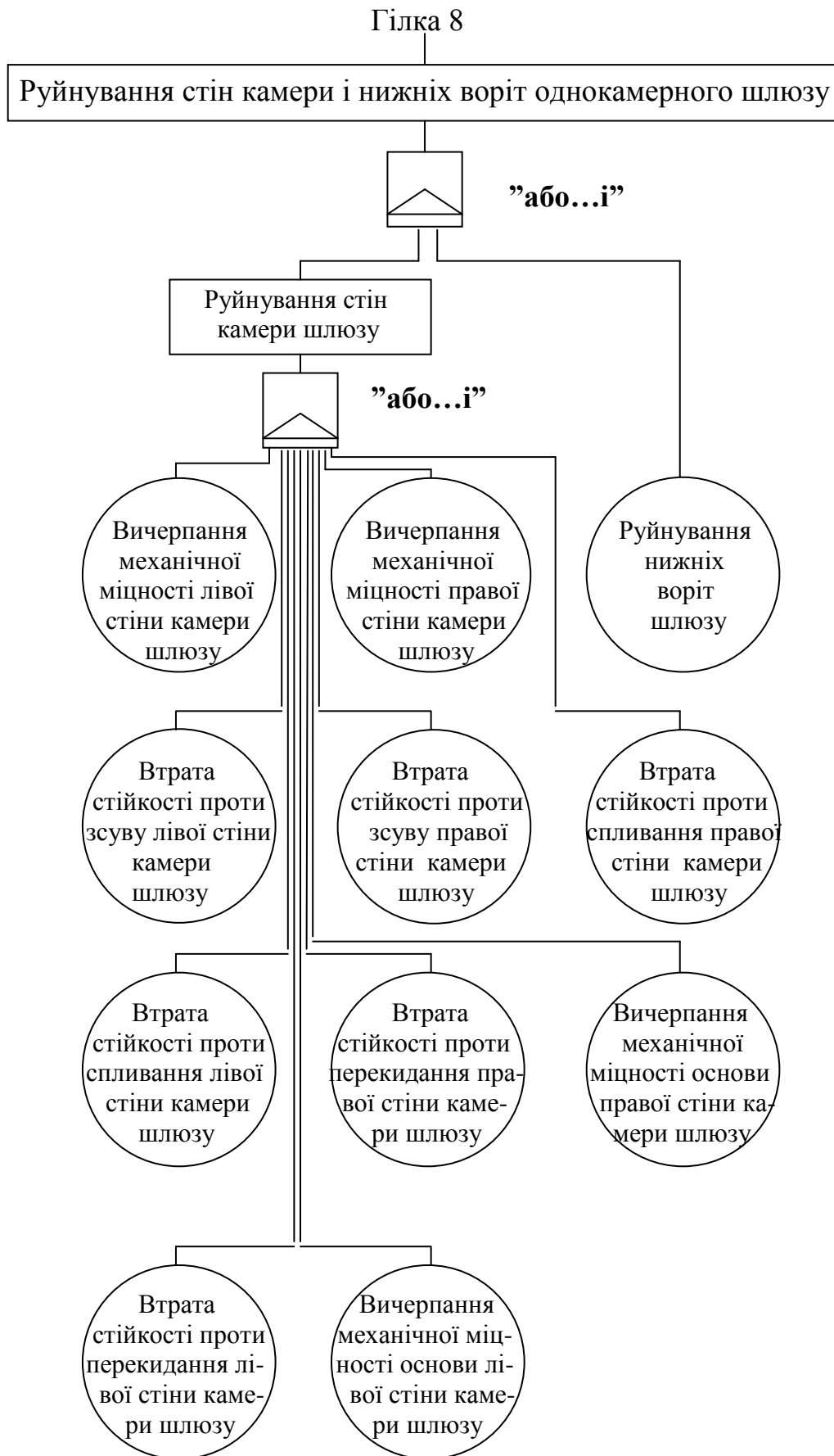


Рис. Т.63. Гілка 8-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

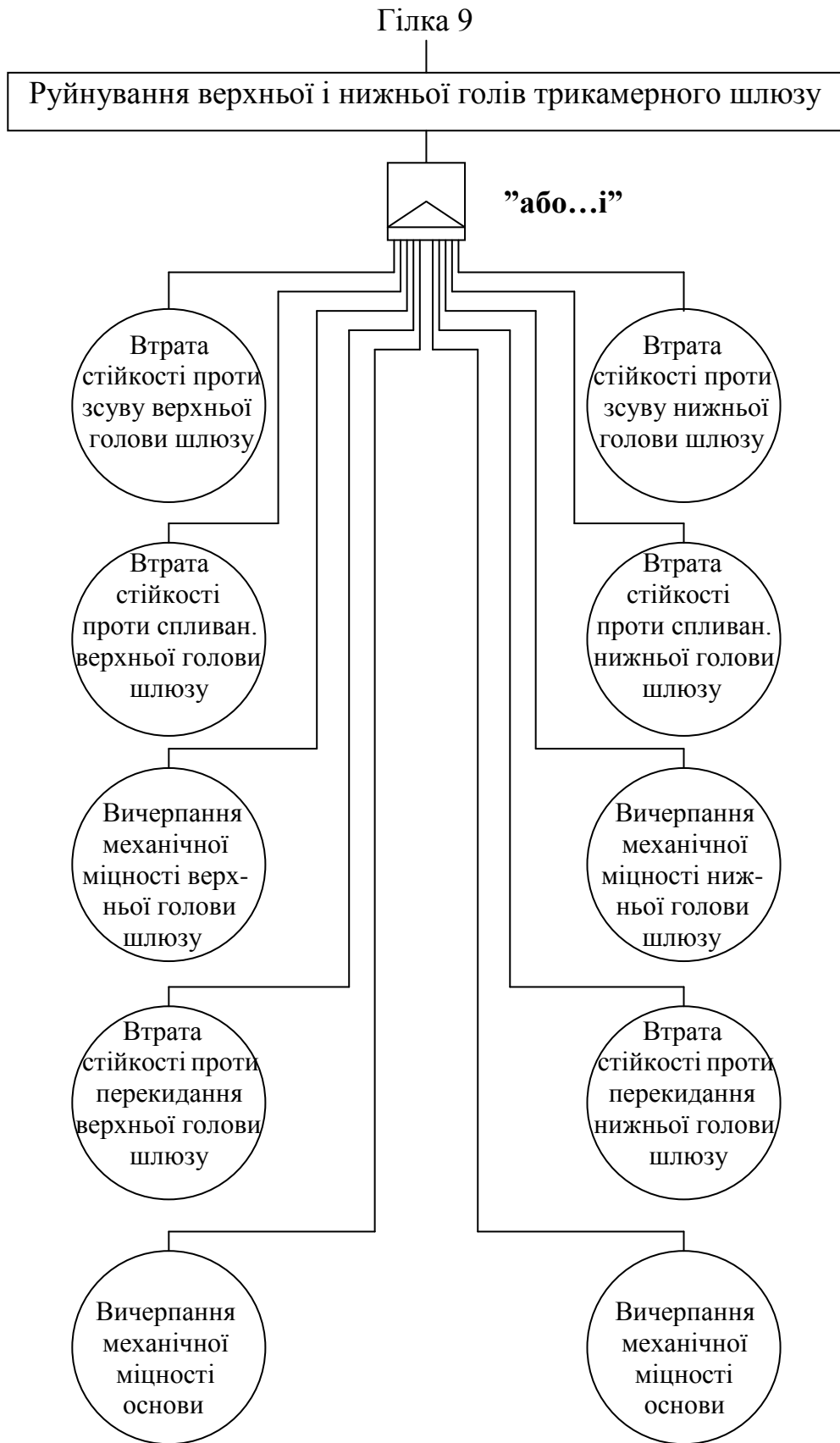


Рис. Т.64. Гілка 9-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

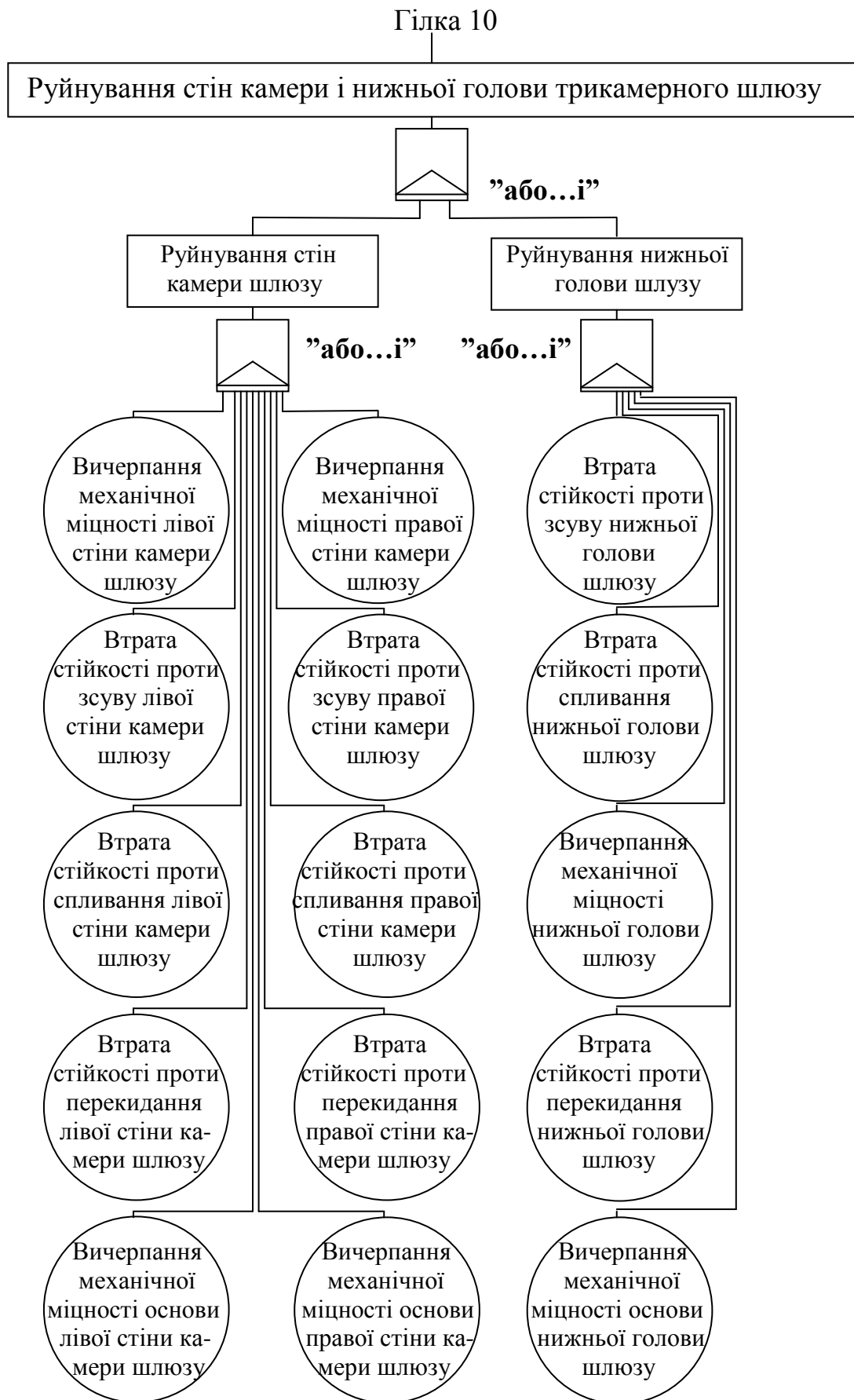


Рис. Т.65. Гілка 10-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі



Рис. Т.66. Гілка 11-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

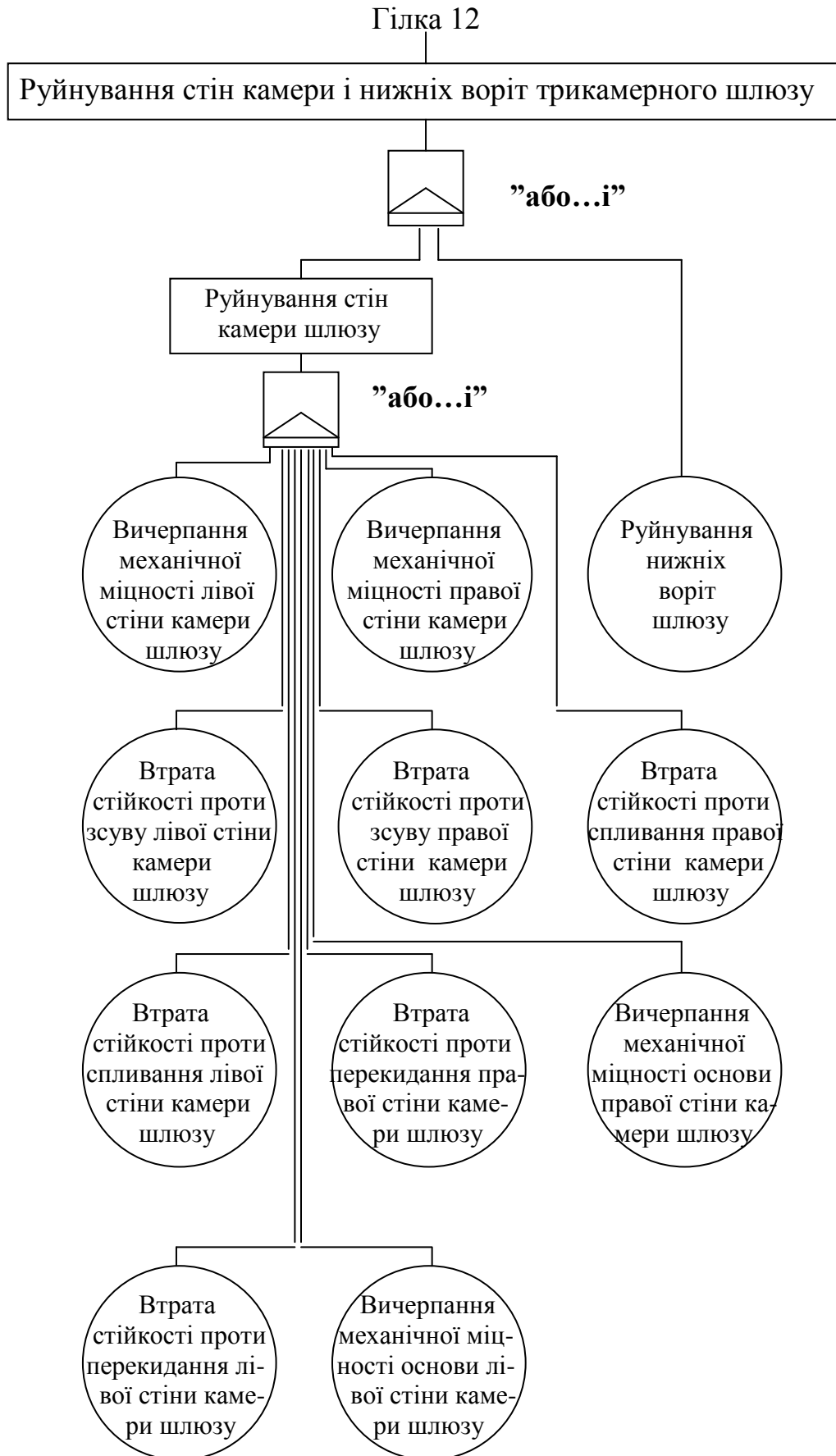


Рис. Т.67. Гілка 12-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі



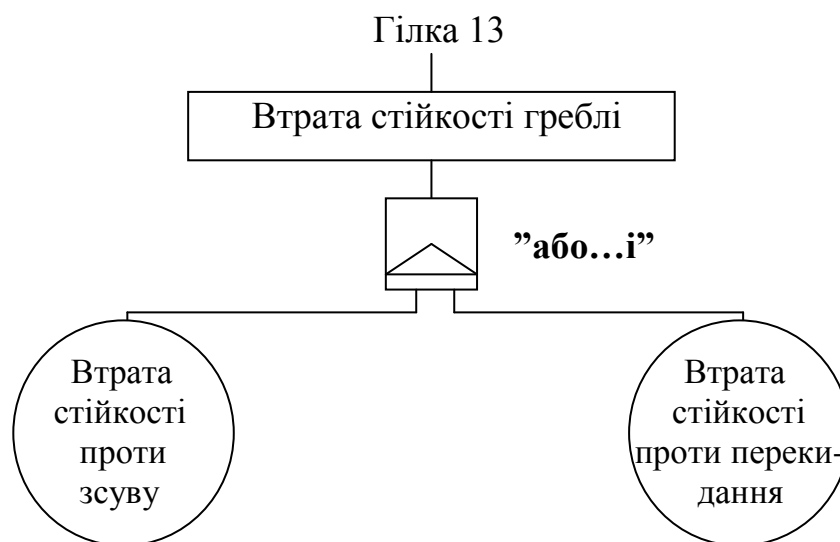


Рис. Т.68. Гілка 13-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

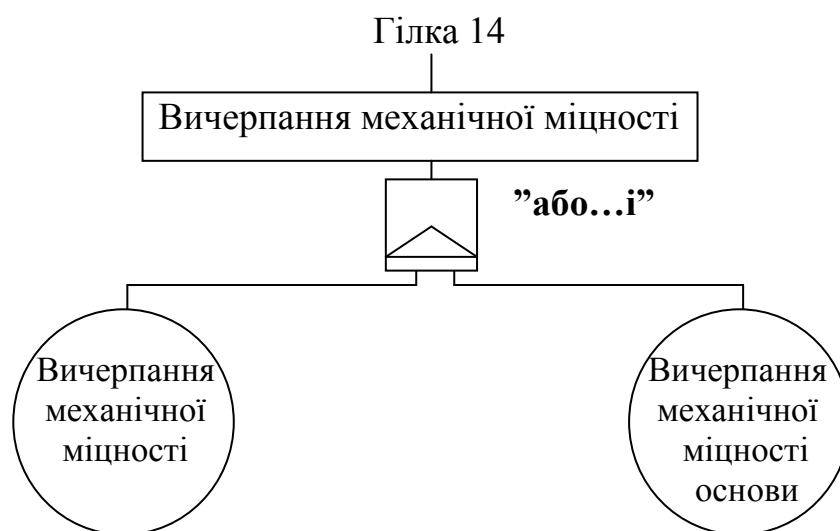


Рис. Т.69. Гілка 14-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

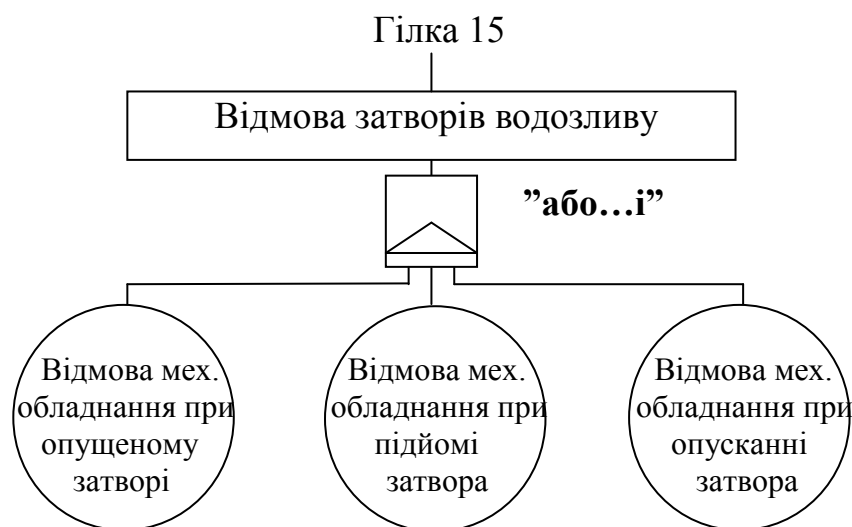


Рис. Т.70. Гілка 15-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському гідровузлі

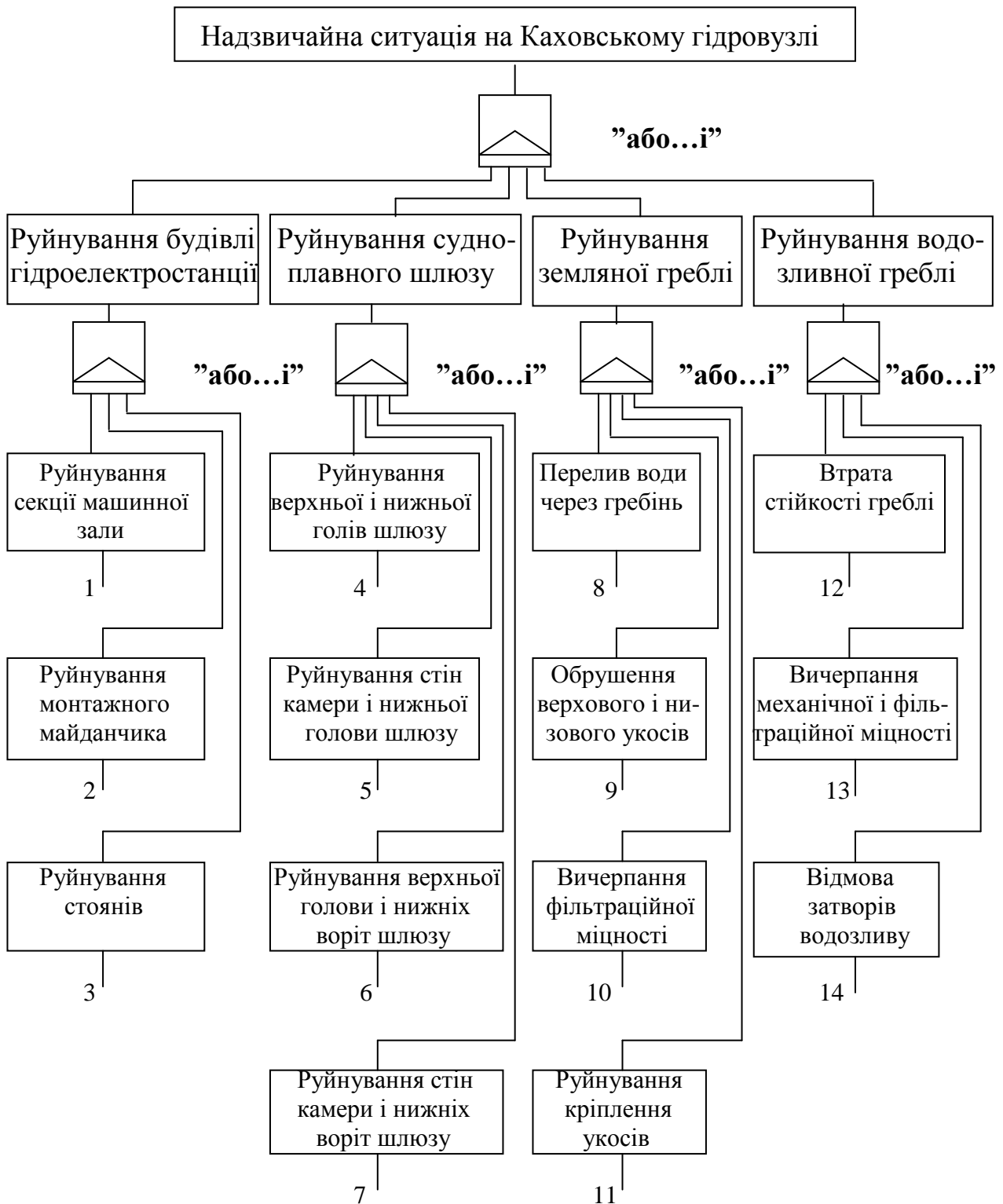


Рис. Т.71. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

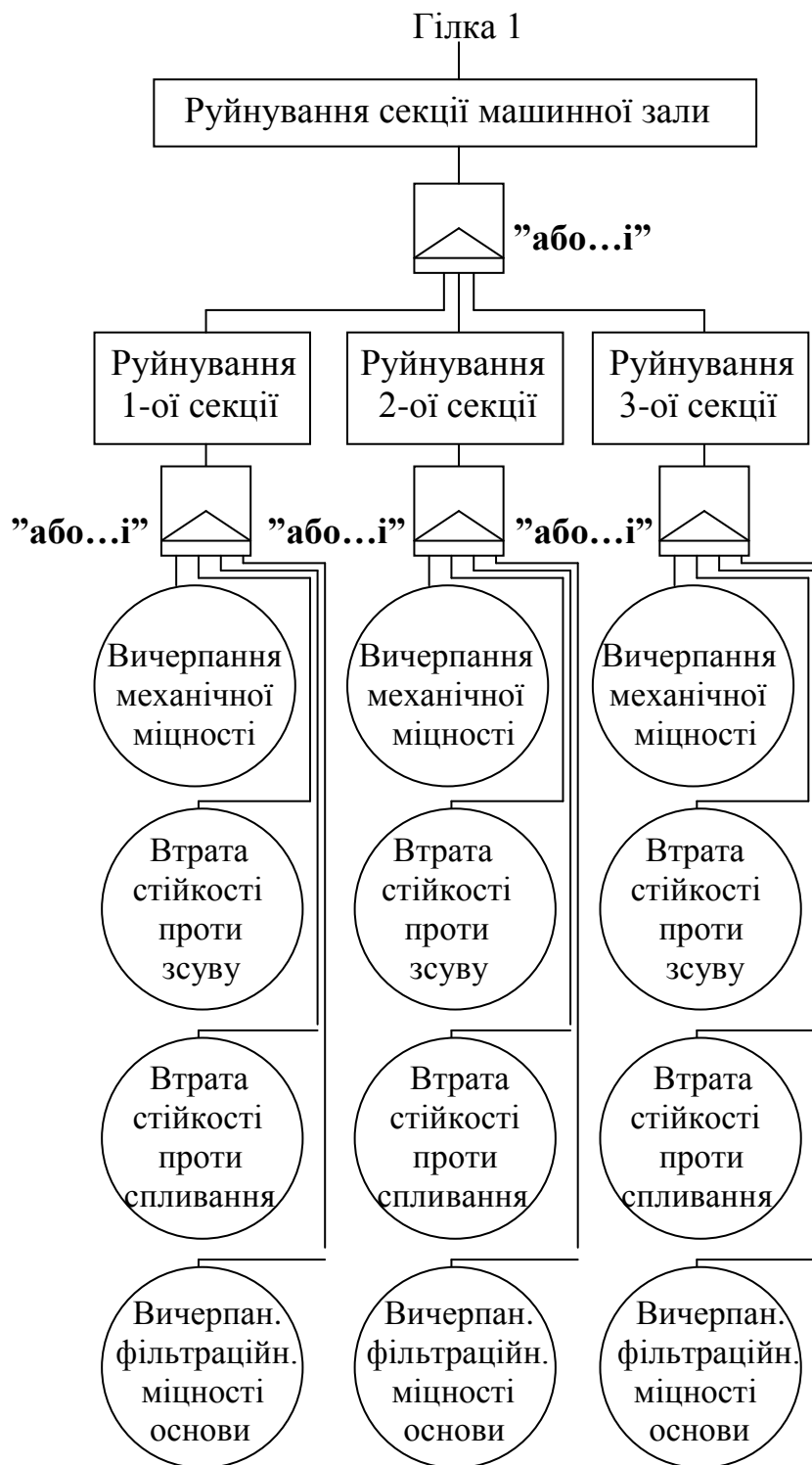


Рис. Т.72. Гілка 1-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

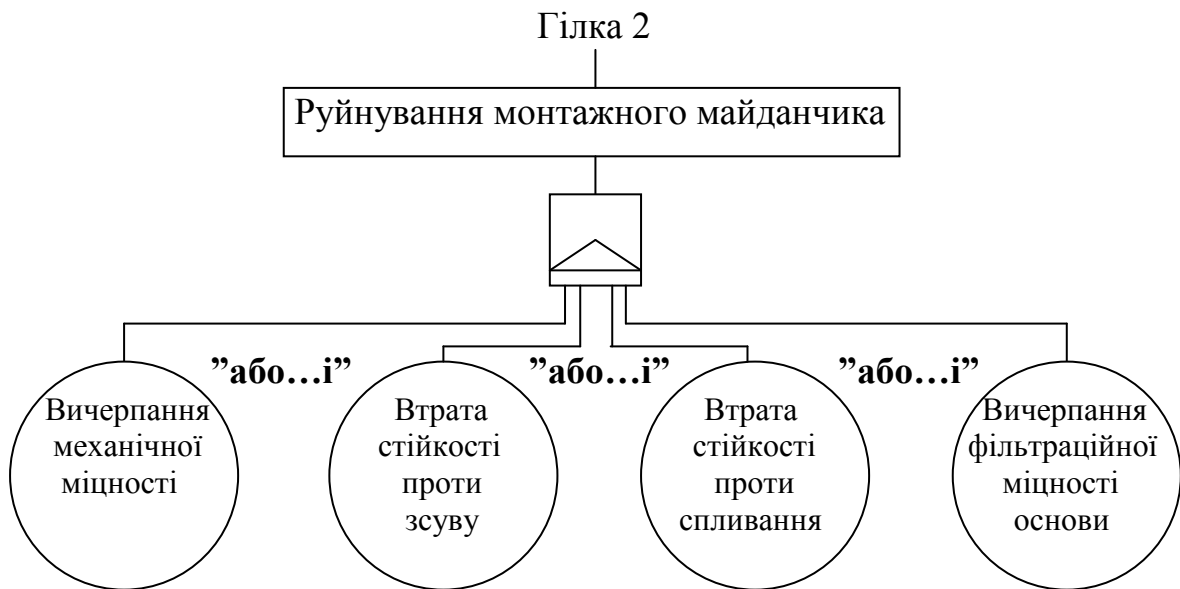


Рис. Т.73. Гілка 2-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

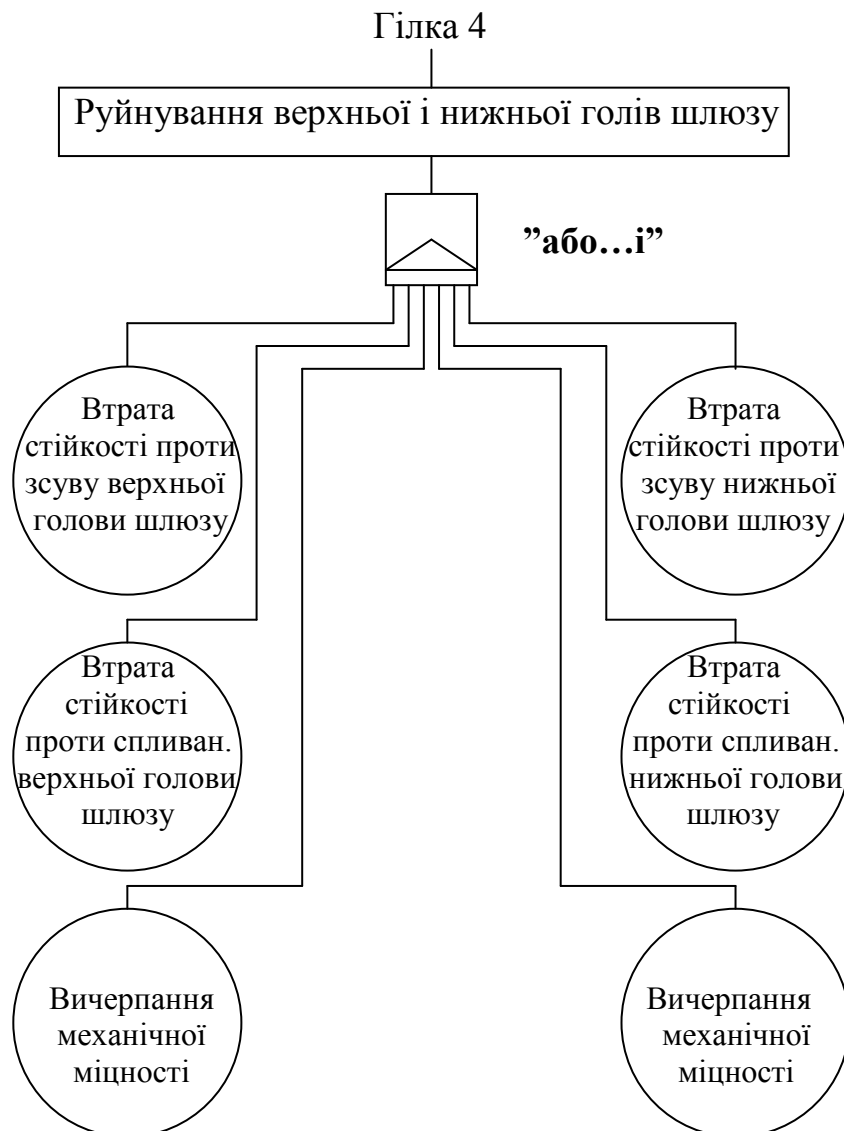


Рис. Т.74. Гілка 4-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі



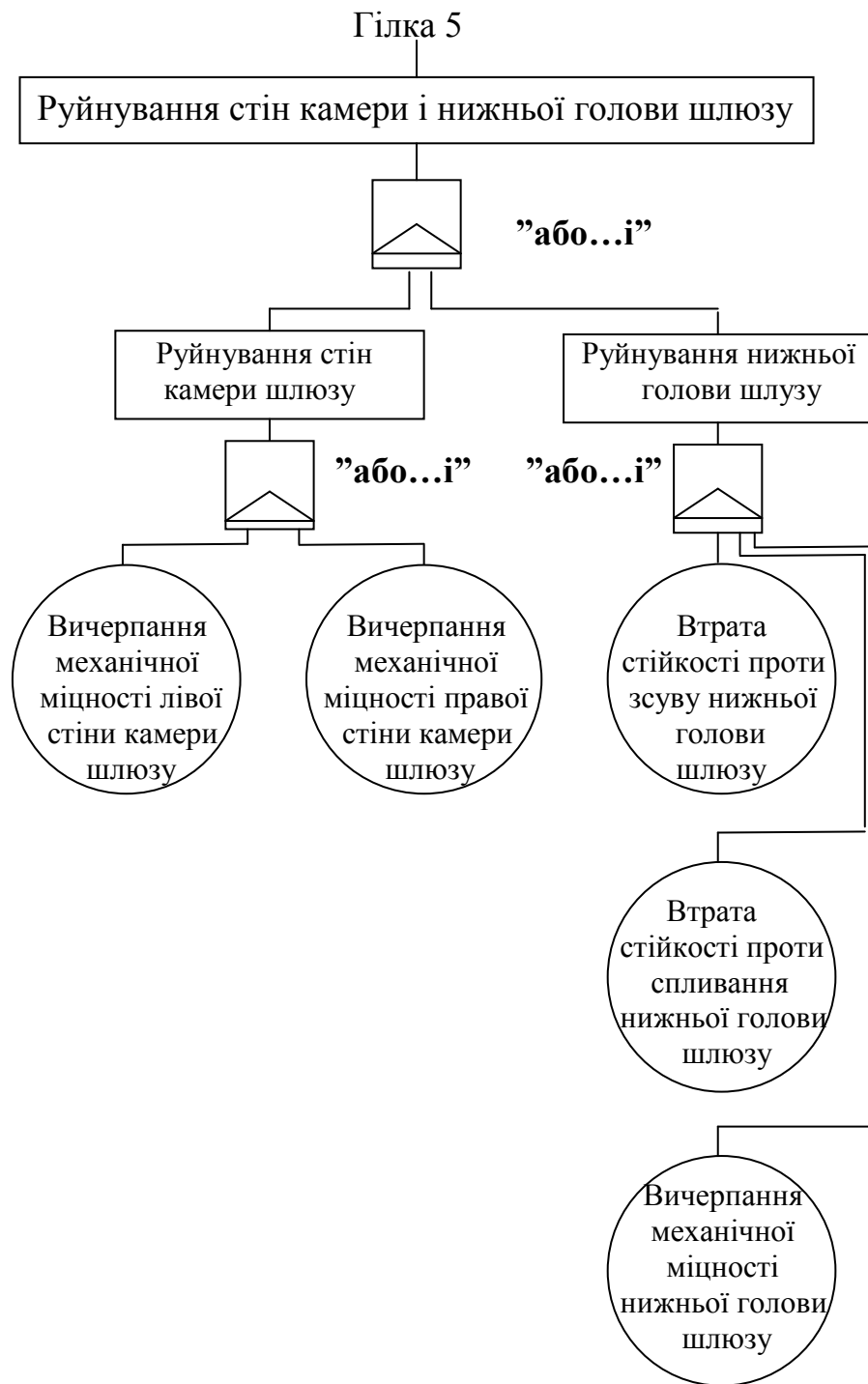


Рис. Т.76. Гілка 5-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

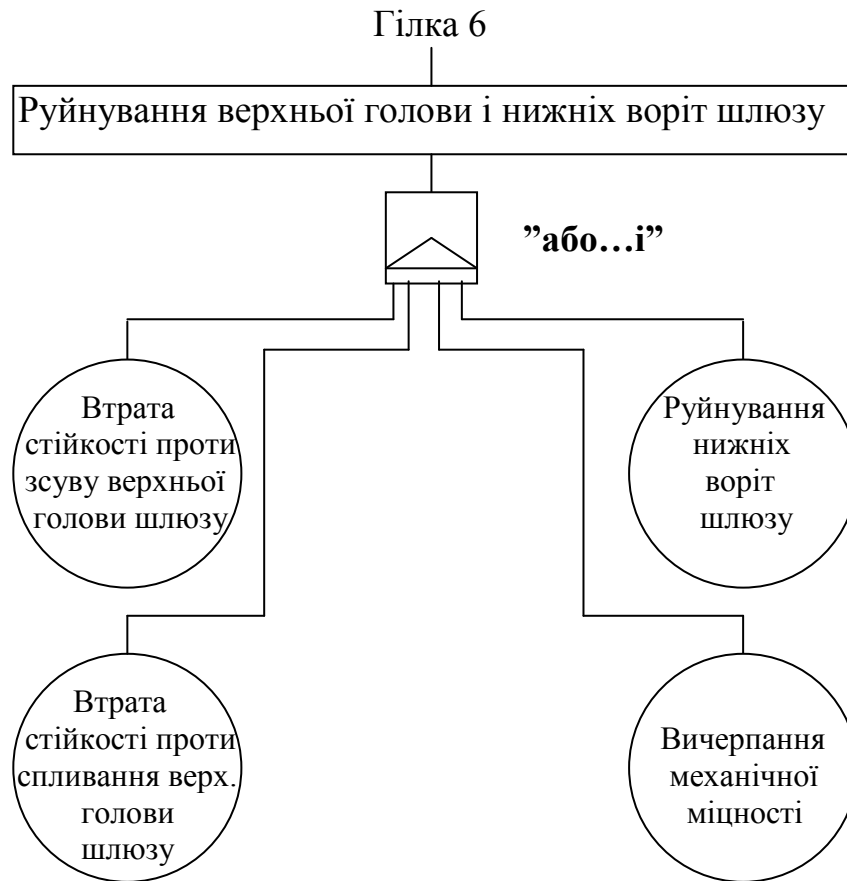


Рис. Т.77. Гілка 6-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

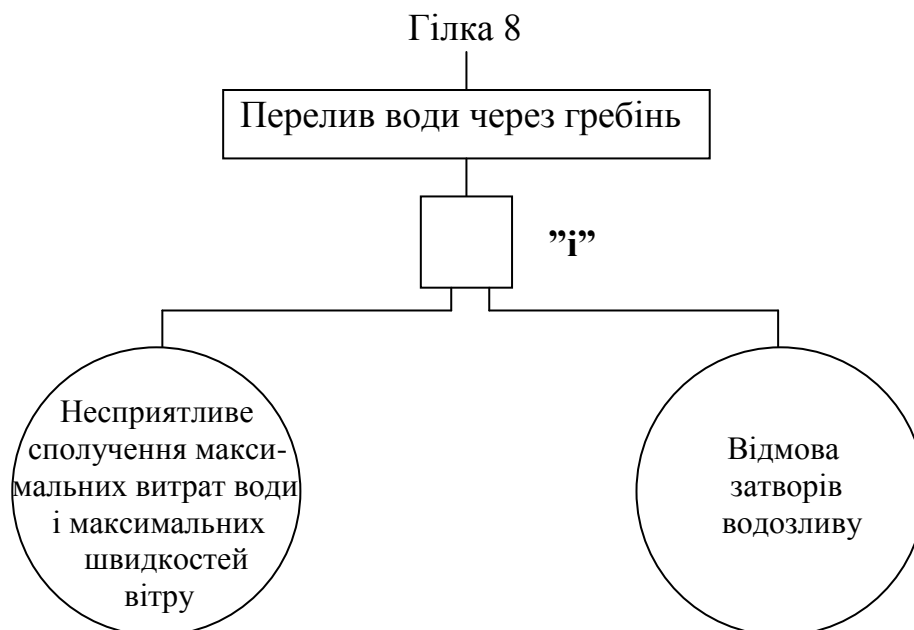


Рис. Т.78. Гілка 8-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

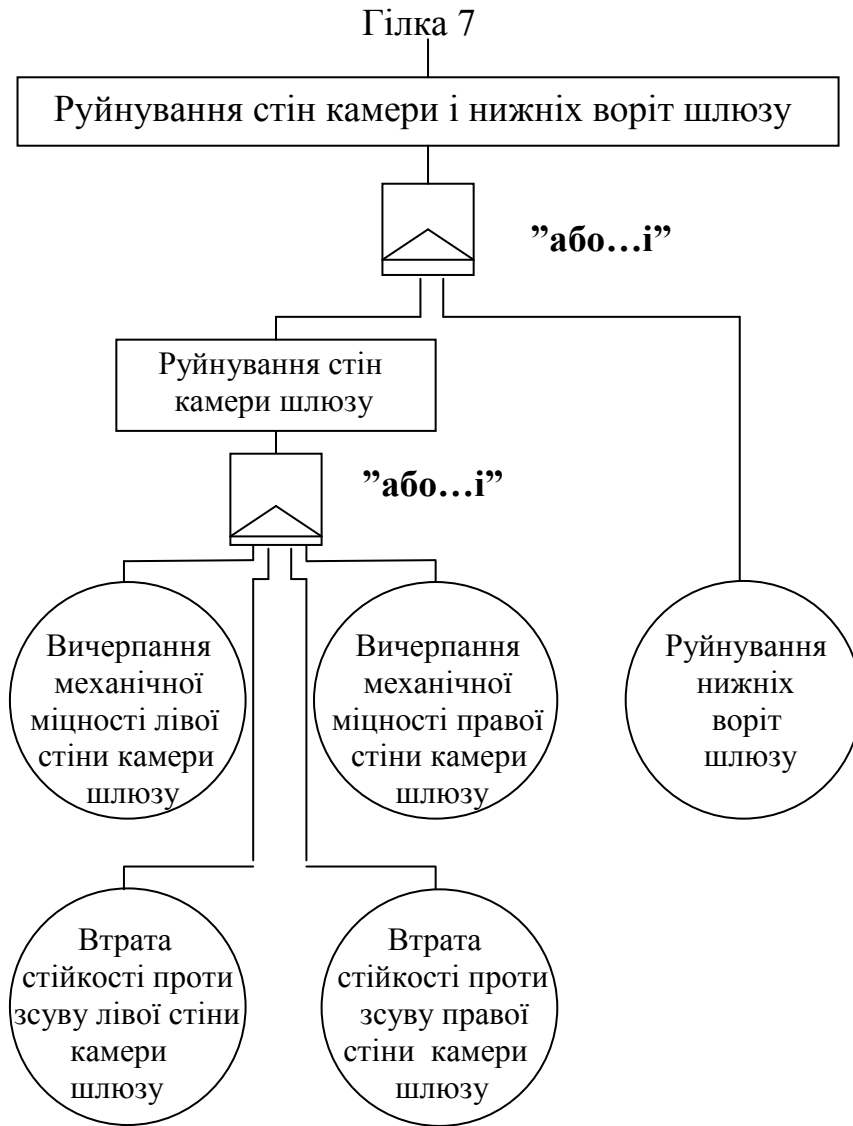


Рис. Т.79. Гілка 7-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

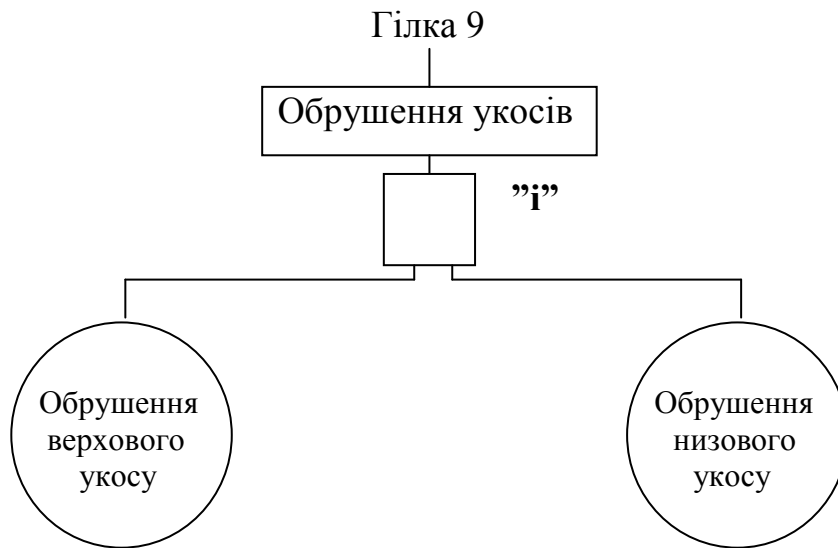


Рис. Т.80. Гілка 9-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі



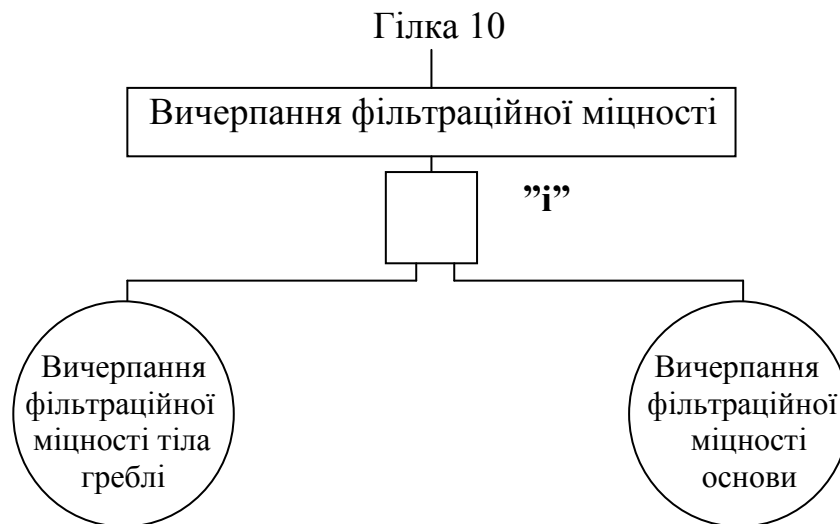


Рис. Т.81. Гілка 10-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

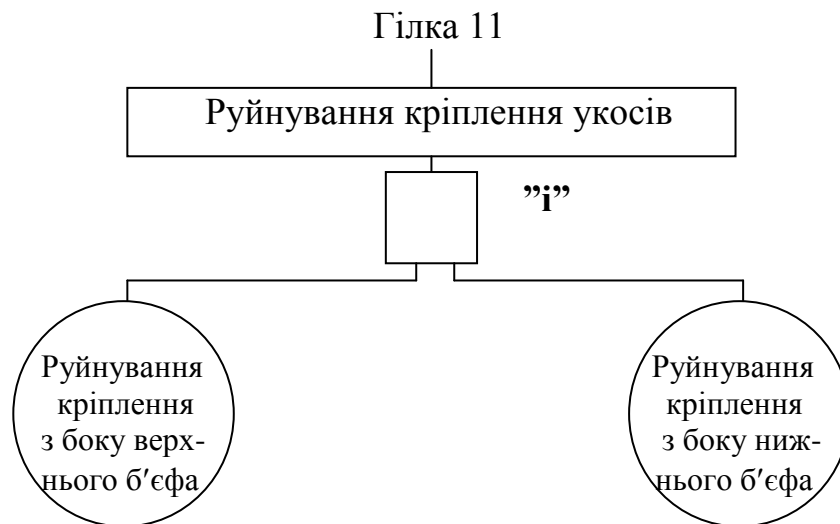


Рис. Т.82. Гілка 11-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

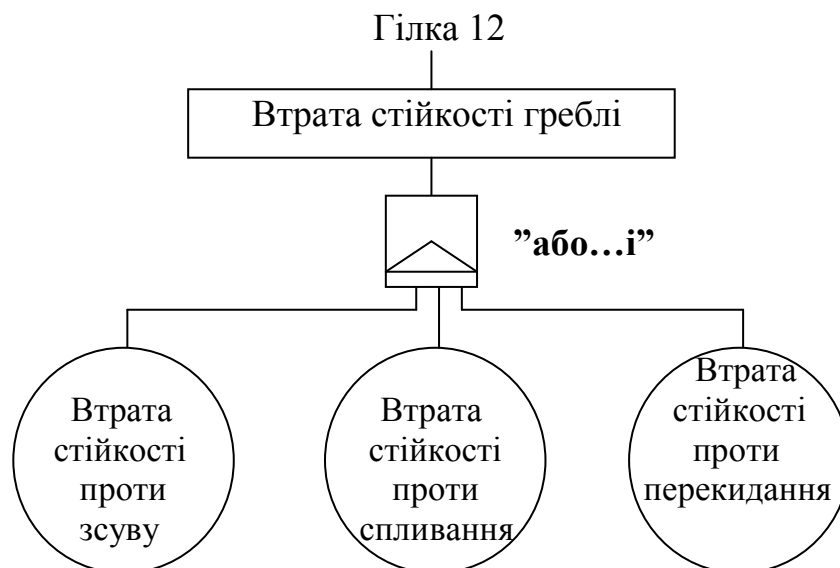


Рис. Т.83. Гілка 12-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

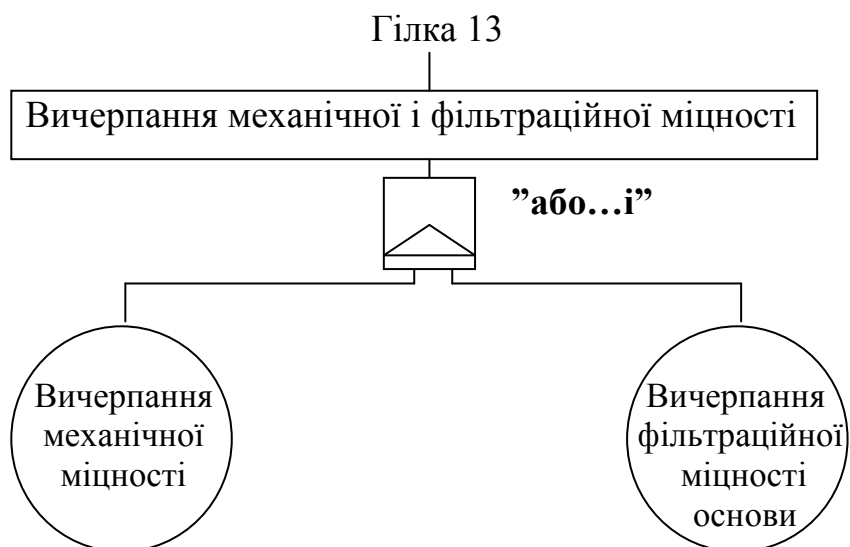


Рис. Т.84. Гілка 13-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

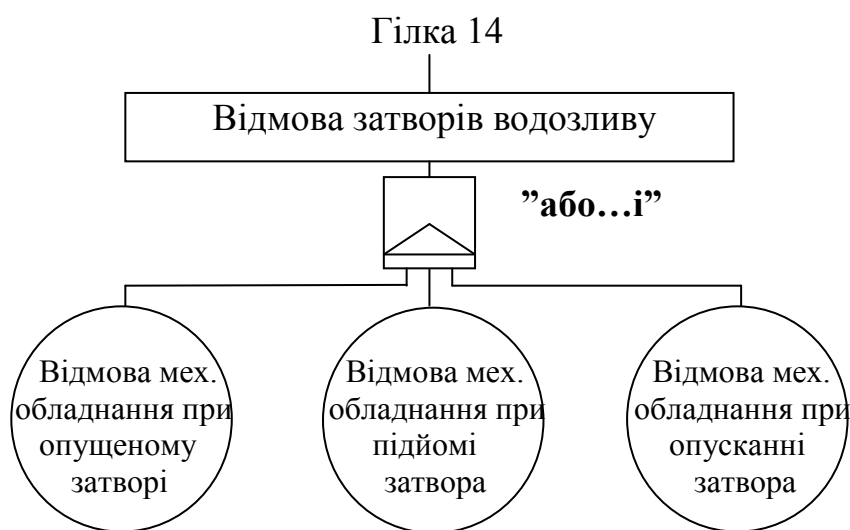


Рис. Т.85. Гілка 14-го розрахункового дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Каховському гідровузлі

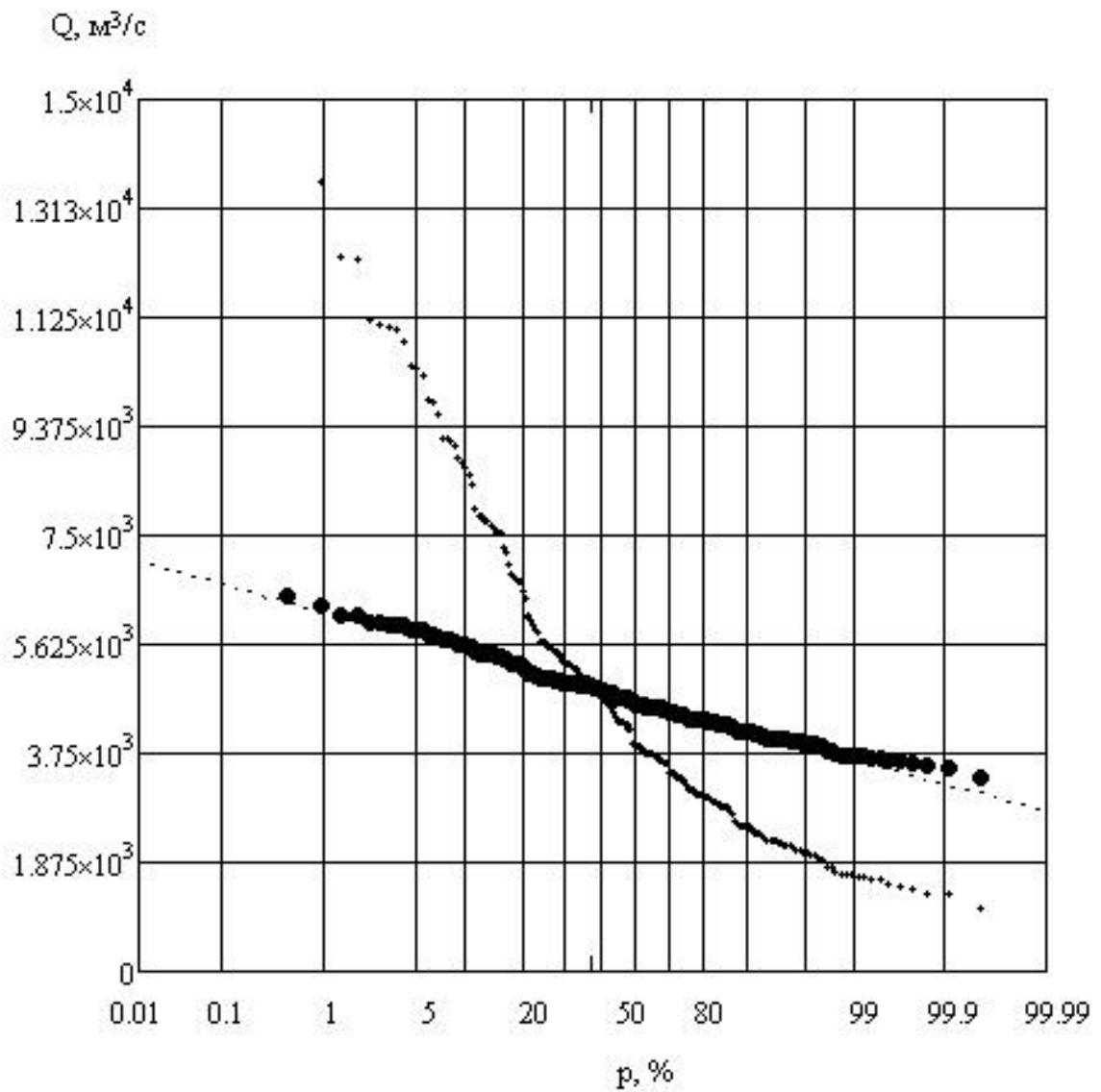


Рис. У.1. Криві забезпеченості щорічних максимальних витрат води р. Дніпро у пункті спостереження (м. Вишгород) у координатах  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$  – витрати,  $p$ , % – імовірність: + – спостережені витрати  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ ; • – витрати  $Q_{\text{ум}}$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ , перетворені до умовного нормального закону розподілу

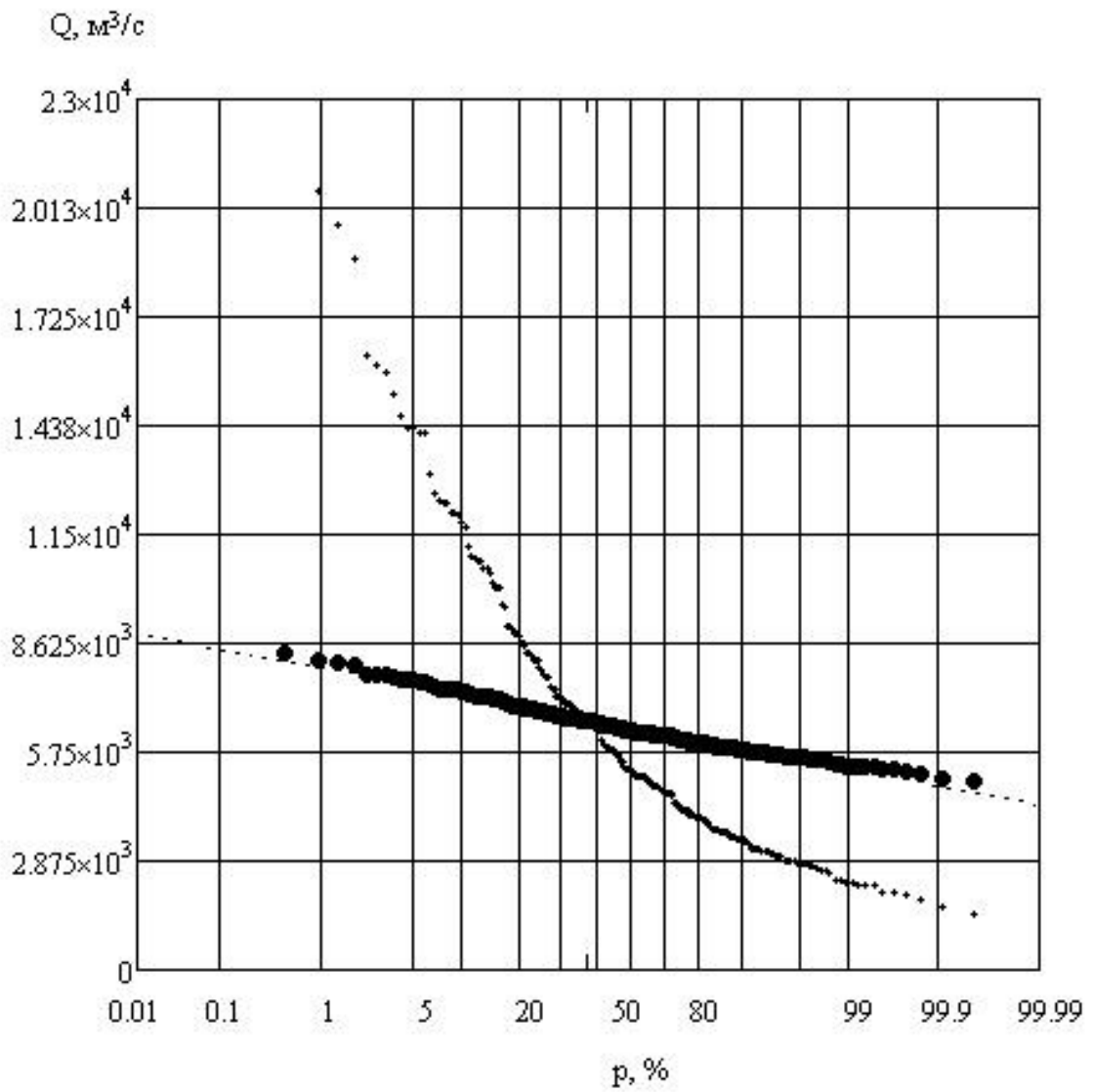


Рис. У.2. Криві забезпеченості щорічних максимальних витрат води р. Дніпро у пункті спостереження (м. Київ) у координатах  $Q, \text{m}^3/\text{s}$  – витрати,  $p, \%$  – імовірність: + – спостережені витрати  $Q, \text{m}^3/\text{s}$ ; • – витрати  $Q_{ум}, \text{m}^3/\text{s}$ , перетворені до умовного нормального закону розподілу

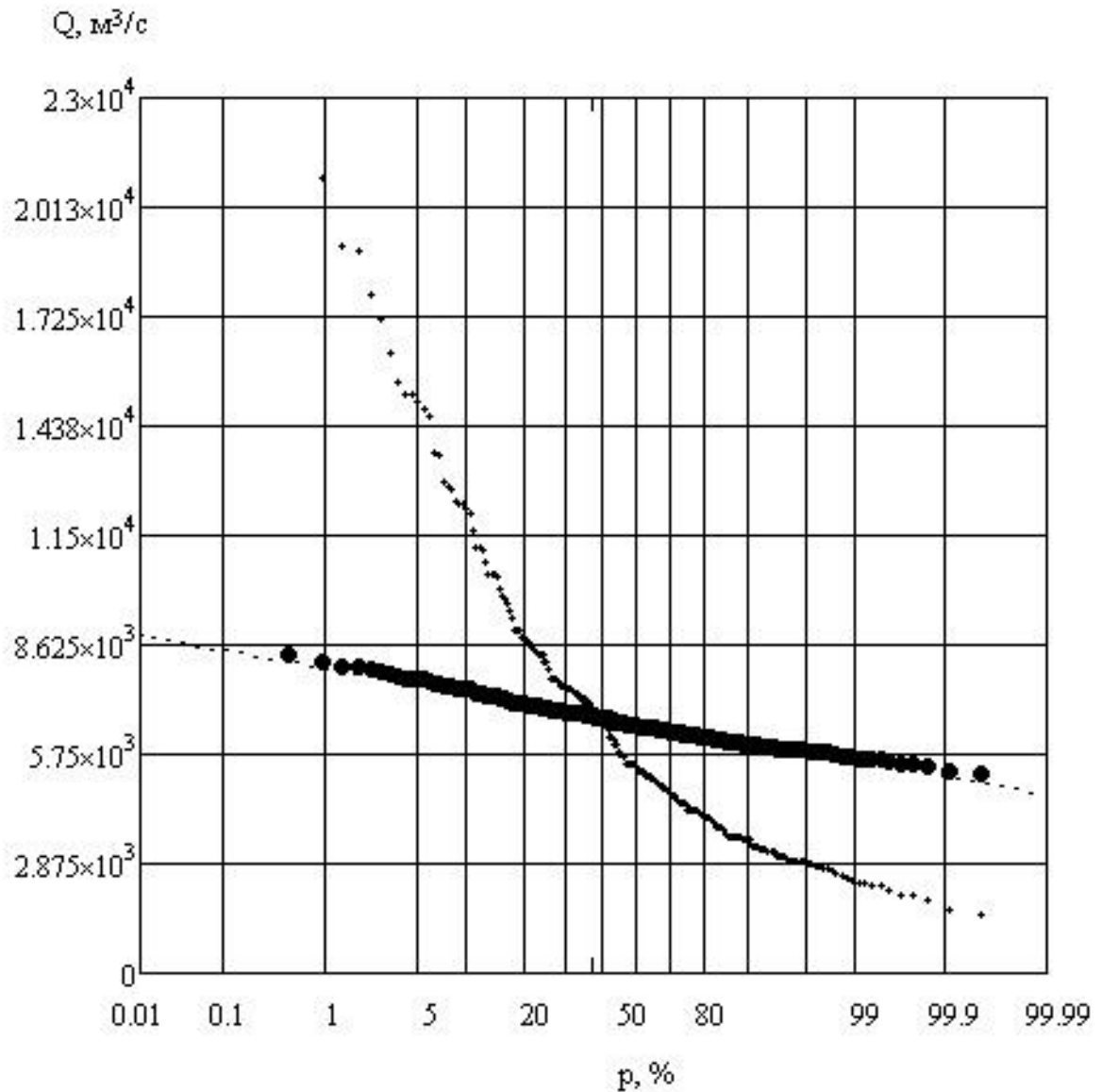


Рис. У.3. Криві забезпеченості щорічних максимальних витрат води р. Дніпро у пункті спостереження (м. Кремнчук) у координатах  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$  – витрати,  $p$ , % – імовірність: + – спостережені витрати  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ ; • – витрати  $Q_{\text{ум}}$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$  перетворені до умовного нормального закону розподілу

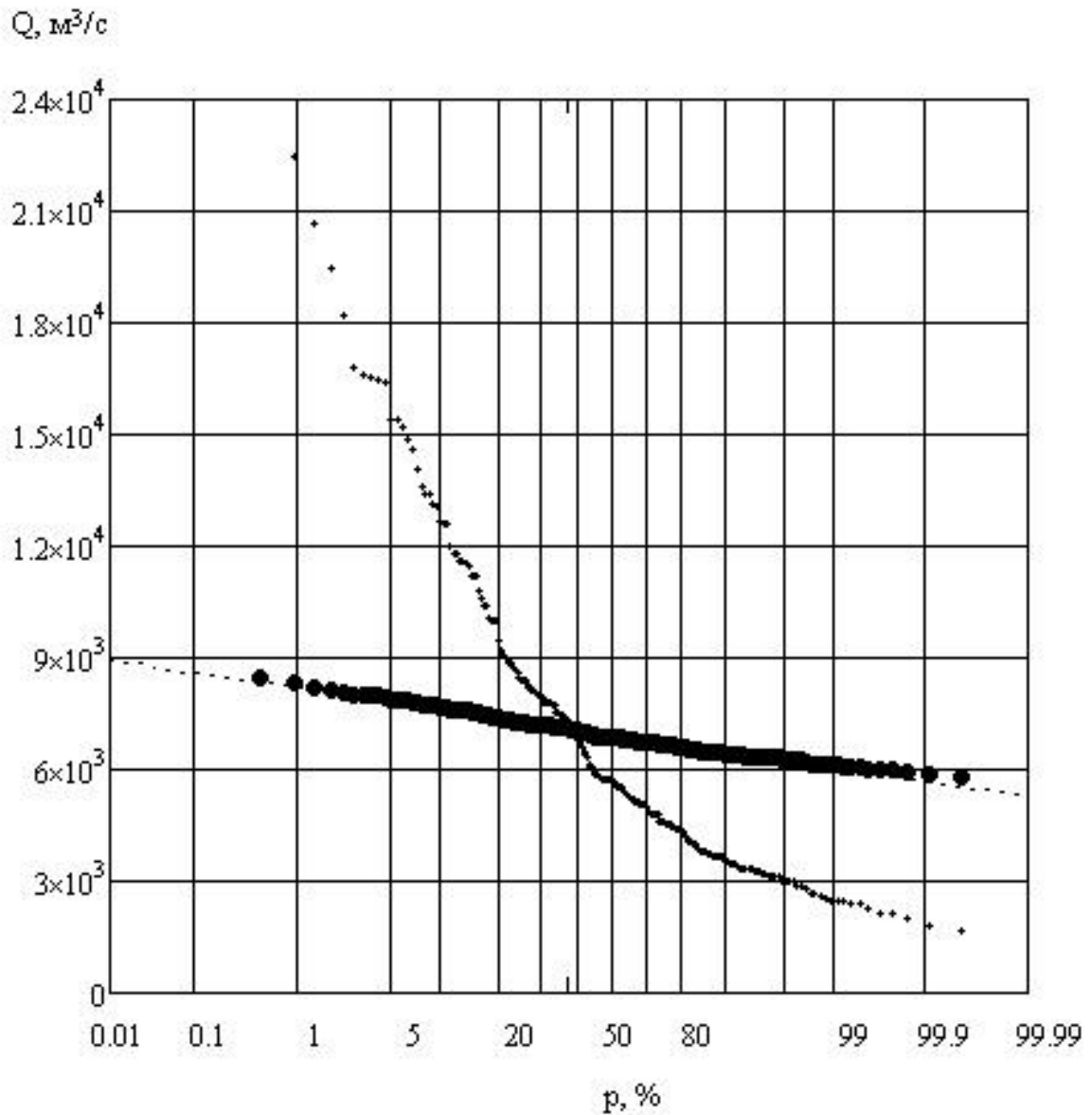


Рис. У.4. Криві забезпеченості щорічних максимальних витрат води р. Дніпро у пункті спостереження (п.г.т. Лоцманська Кам'янка) у координатах  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$  – витрати,  $p$ , % – імовірність: + – спостережені витрати  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ ; • – витрати  $Q_{ум}$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ , перетворені до умовного нормального закону розподілу

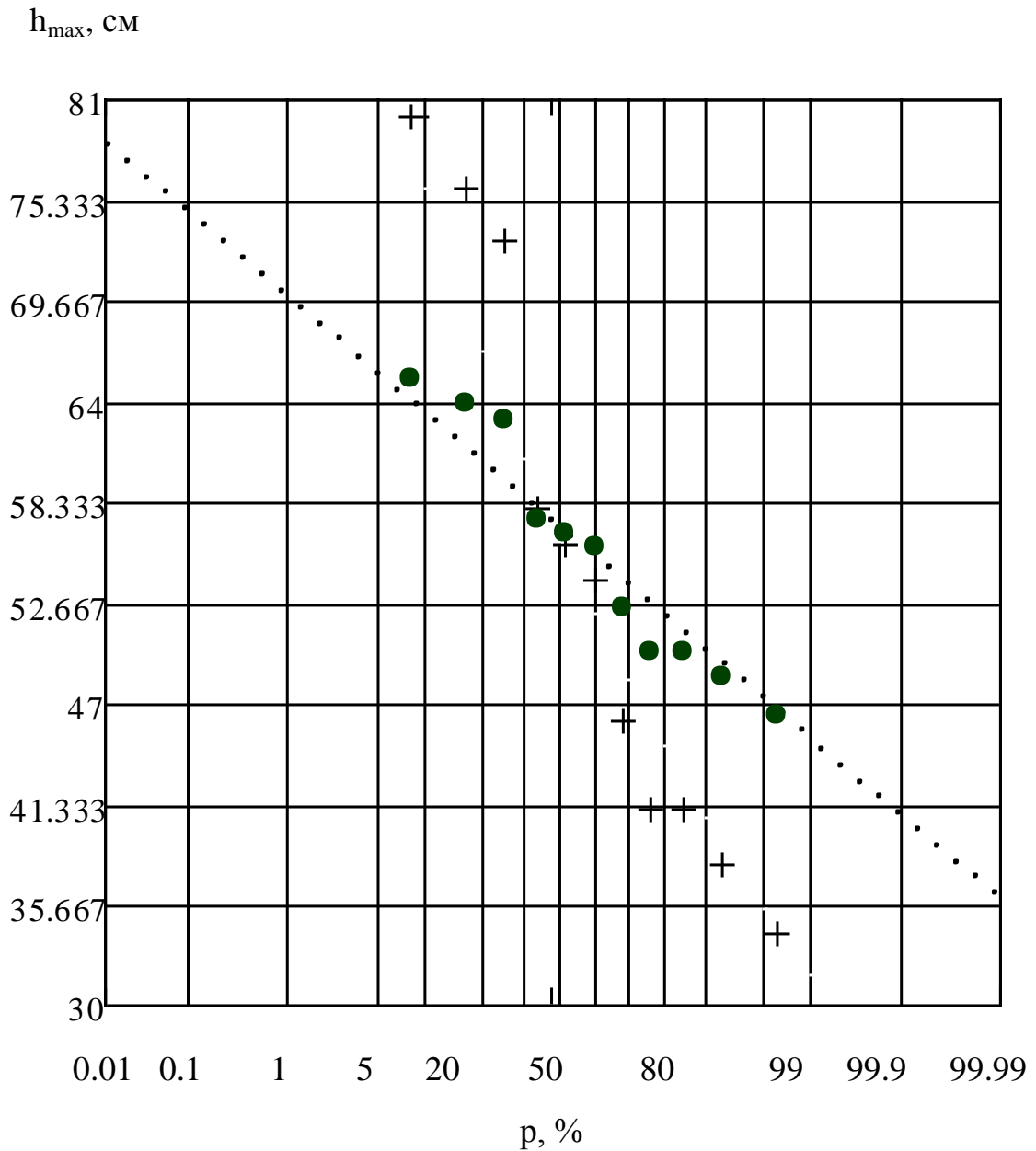


Рис. Ф.1. Криві забезпеченості щорічної максимальної товщини льоду у створі Київського гідровузла (м. Вишгород) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $h_{max}$ , см – щорічна максимальна товщина льоду,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимальна товщина льоду  $h_{max}$ , см; • – максимальна товщина льоду  $h_{max\text{ ум}}$ , см, перетворена до умовного нормального закону розподілу

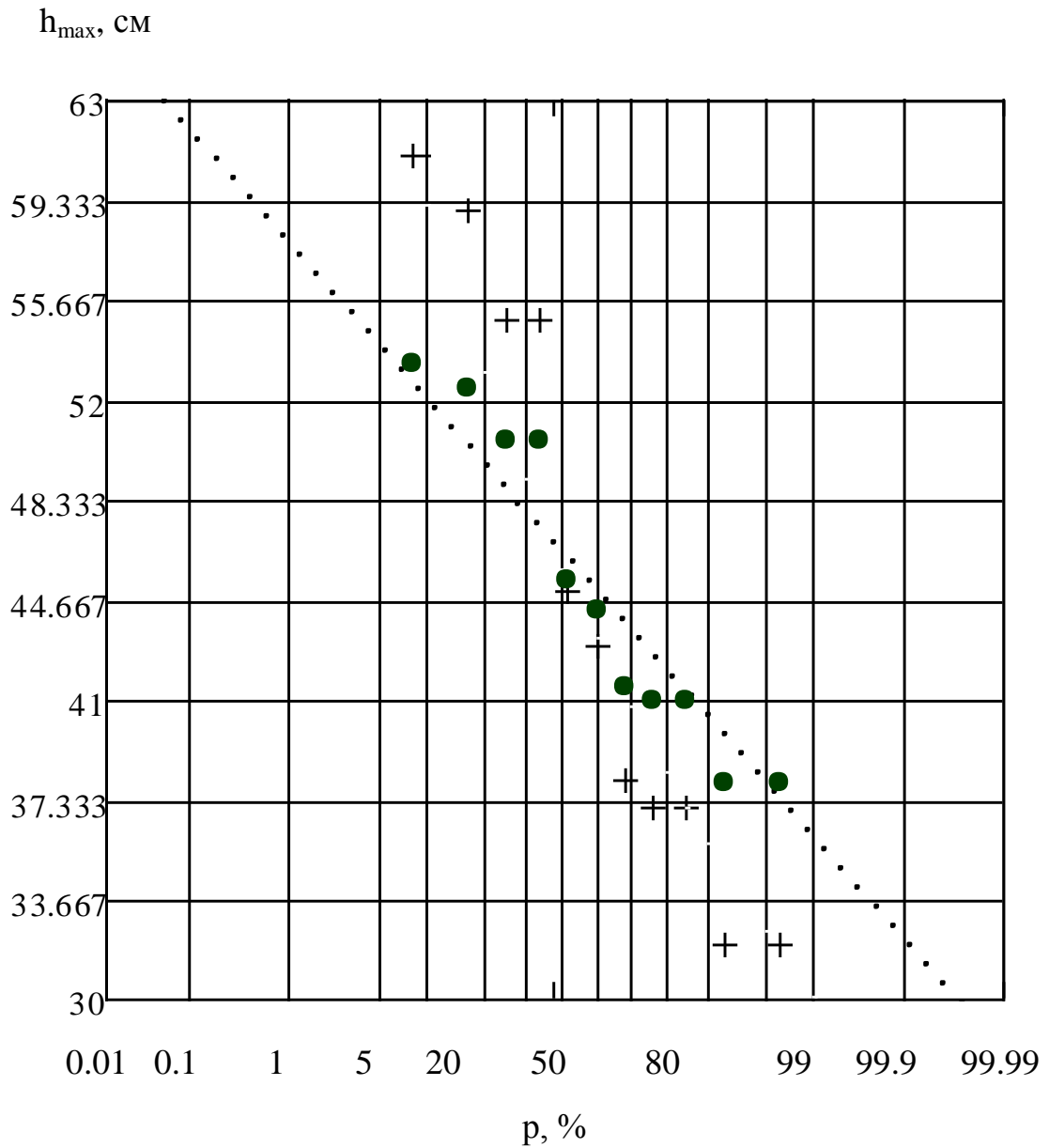


Рис. Ф.2. Криві забезпеченості щорічної максимальної товщини льоду у створі Канівського гідровузла (м. Канів) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $h_{max}$ , см – щорічна максимальна товщина льоду,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимальна товщина льоду  $h_{max}$ , см; • – максимальна товщина льоду  $h_{max\text{ ум}}$ , см, перетворена до умовного нормального закону розподілу



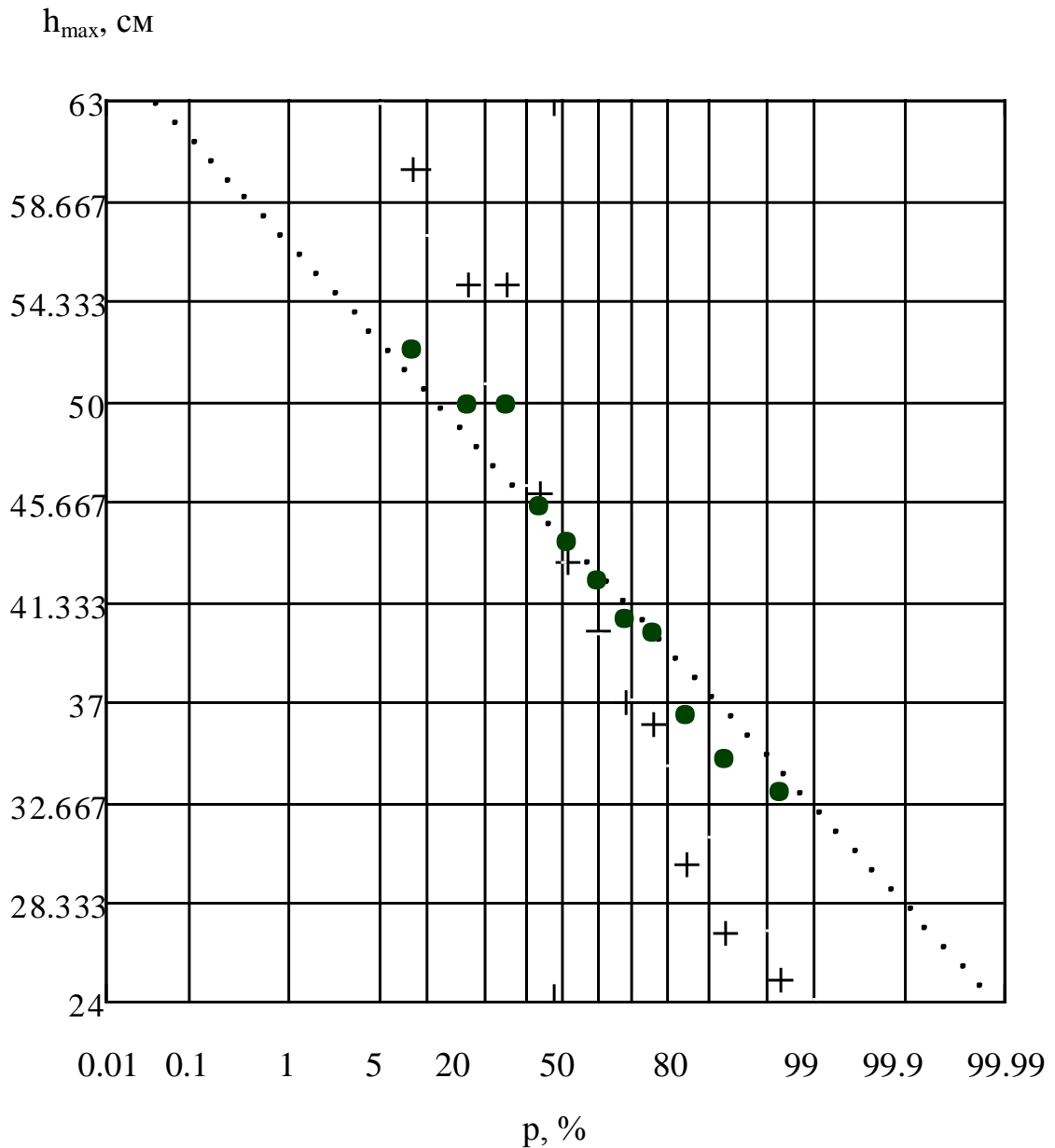


Рис. Ф.3. Криві забезпеченості щорічної максимальної товщини льоду у створі Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $h_{max}$ , см – щорічна максимальна товщина льоду,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимальна товщина льоду  $h_{max}$ , см; • – максимальна товщина льоду  $h_{max_{ум}}$ , см, перетворена до умовного нормального закону розподілу

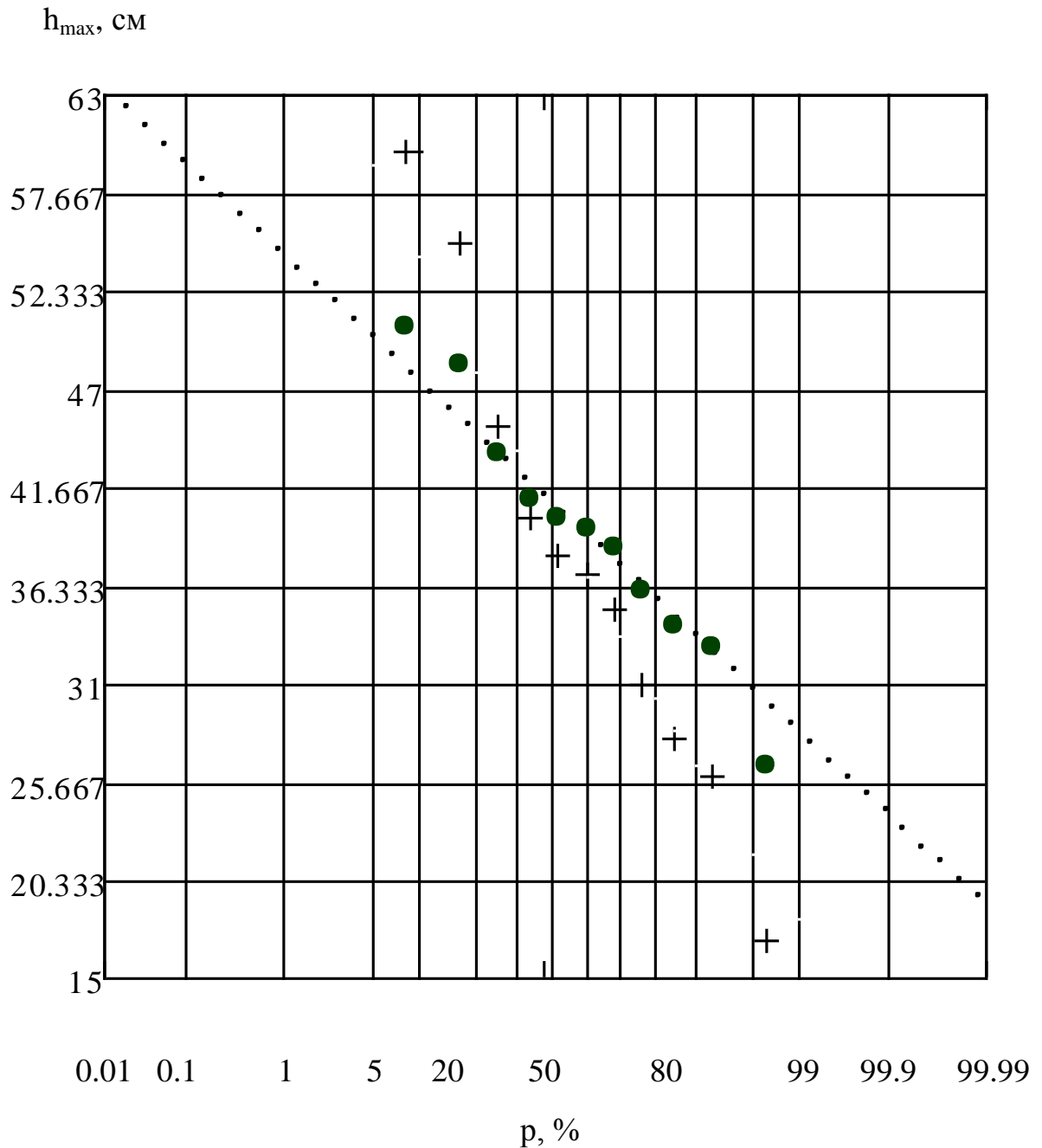


Рис. Ф.4. Криві забезпеченості щорічної максимальної товщини льоду у створі Середньодніпровського гідровузла (м. Кам'янське) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $h_{max}$ , см – щорічна максимальна товщина льоду,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимальна товщина льоду  $h_{max}$ , см; • – максимальна товщина льоду  $h_{max\text{ ум}}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу

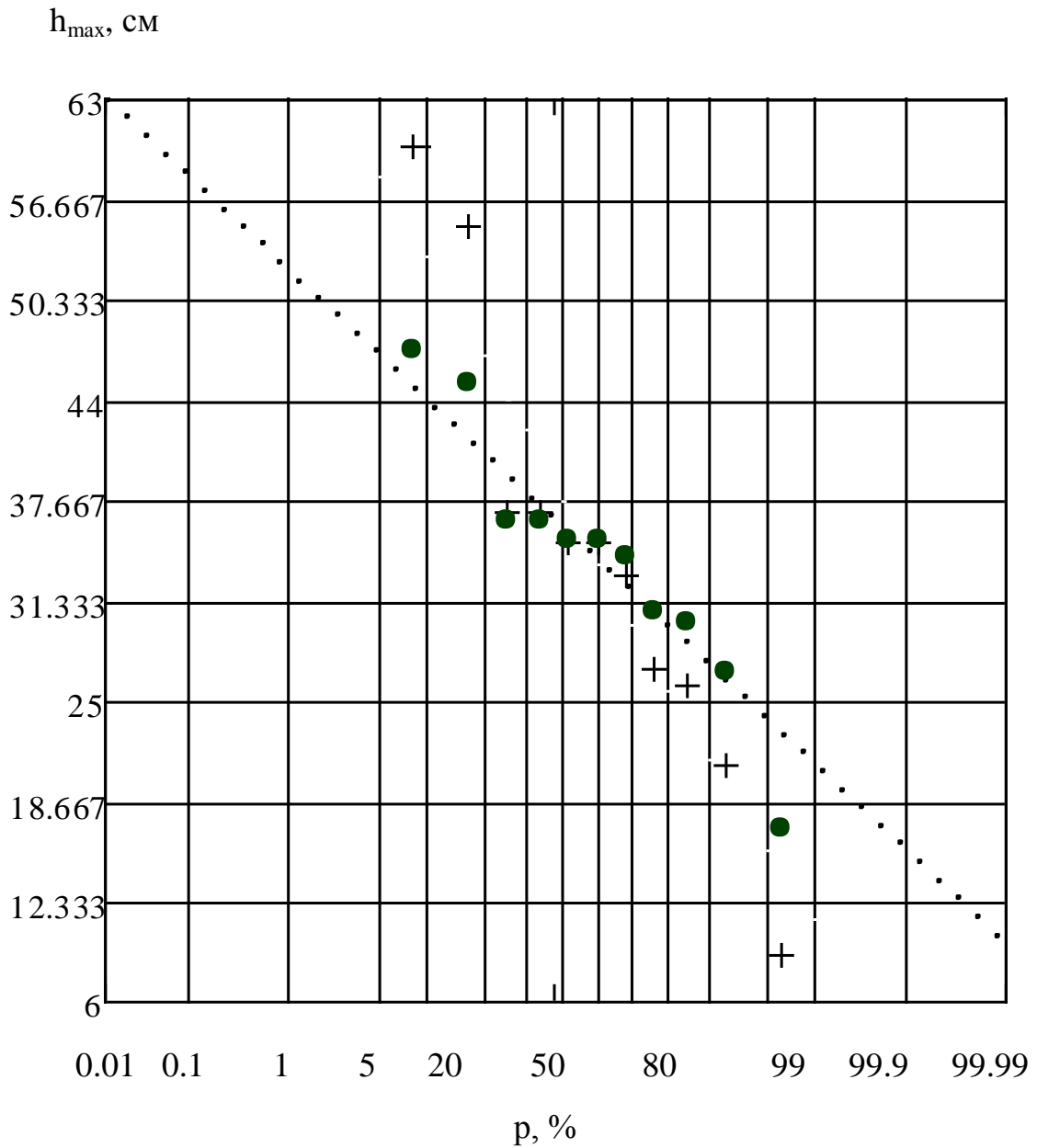


Рис. Ф.5. Криві забезпеченості щорічної максимальної товщини льоду у створі Дніпровського гідровузла (м. Запоріжжя) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $h_{max}$ , см – щорічна максимальна товщина льоду,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимальна товщина льоду  $h_{max}$ , см; • – максимальна товщина льоду  $h_{max\text{ ум}}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу

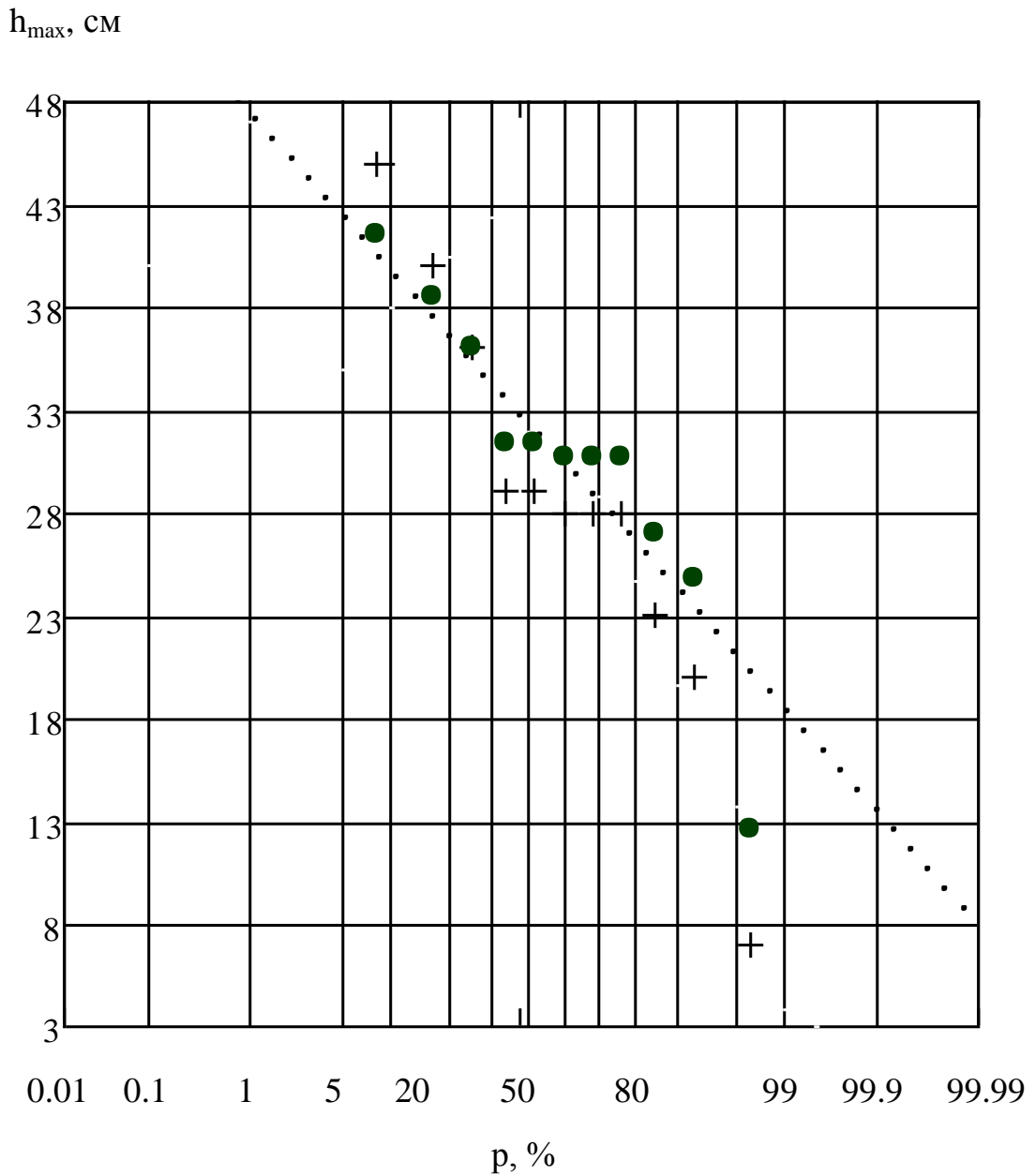


Рис. Ф.6. Криві забезпеченості щорічної максимальної товщини льоду у створі Каховського гідровузла (м. Нова Каховка) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $h_{max}$ , см – щорічна максимальна товщина льоду,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимальна товщина льоду  $h_{max}$ , см; • – максимальна товщина льоду  $h_{max\text{ ум}}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу

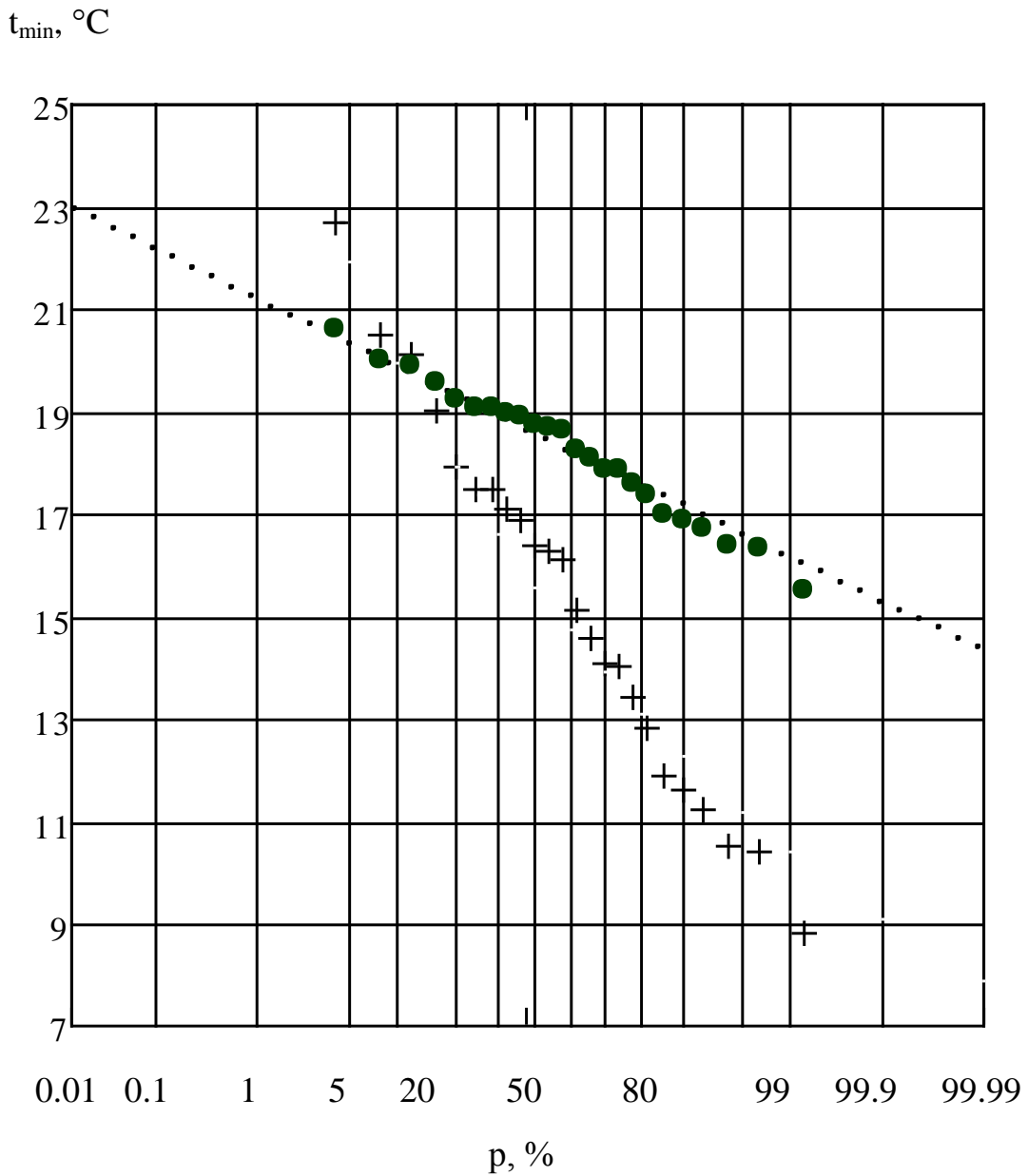


Рис. X.1. Криві забезпеченості щорічної максимально низької середньомісячної температури (збільшеної на  $+20^{\circ}\text{C}$ ) у створі Канівського гідровузла (м. Канів) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $t_{min}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  – щорічна максимально низька середньомісячна температура,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимально низька середньомісячна температура  $t_{min}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ; • – максимально низька середньомісячна температура  $t_{min, ум}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу

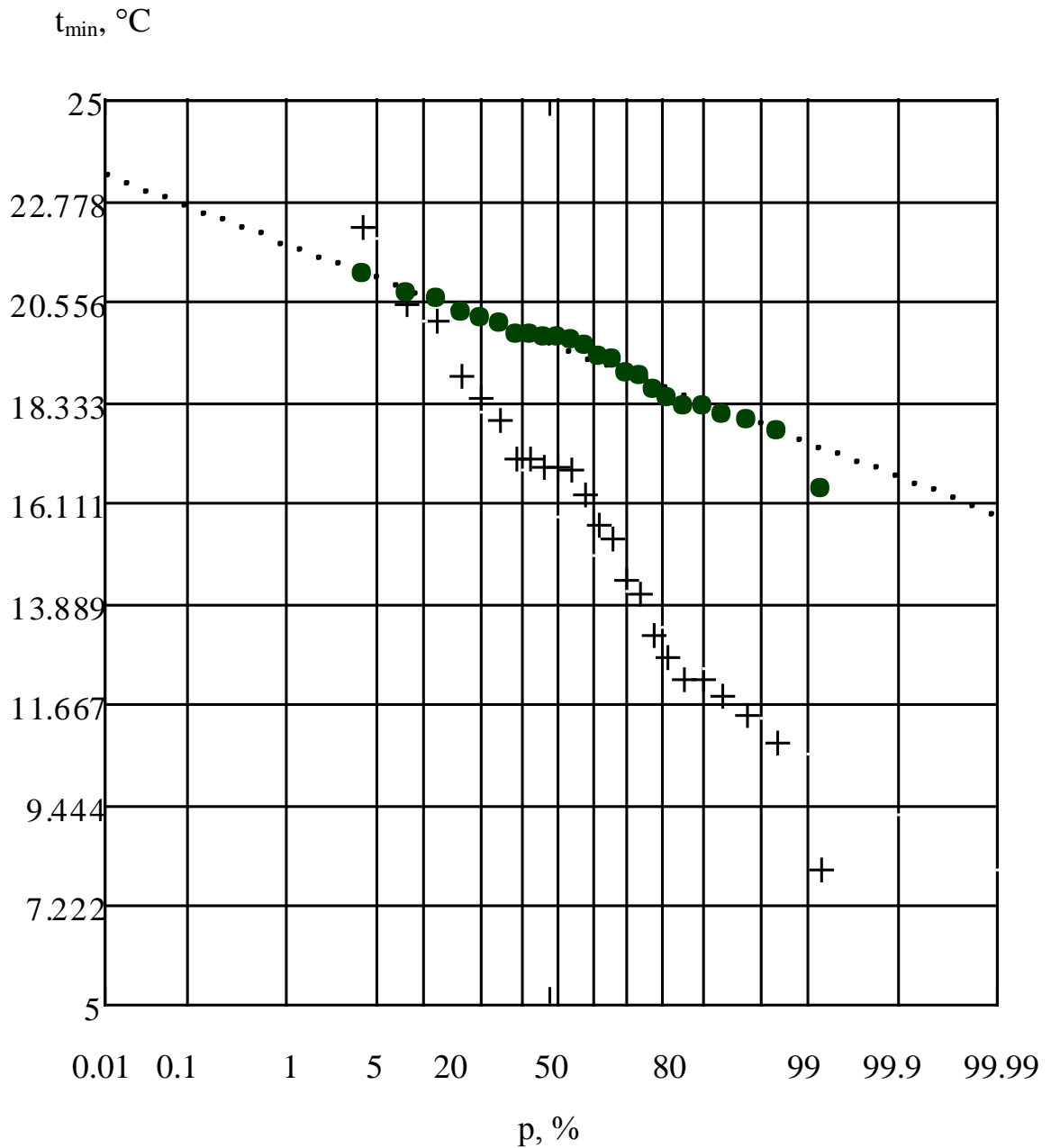


Рис. X.2. Криві забезпеченості щорічної максимально низької середньомісячної температури (збільшеної на  $+20^{\circ}\text{C}$ ) у створі Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $t_{min}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  – щорічна максимально низька середньомісячна температура,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена максимально низька середньомісячна температура  $t_{min}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 • – максимально низька середньомісячна температура  $t_{min, ум}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу

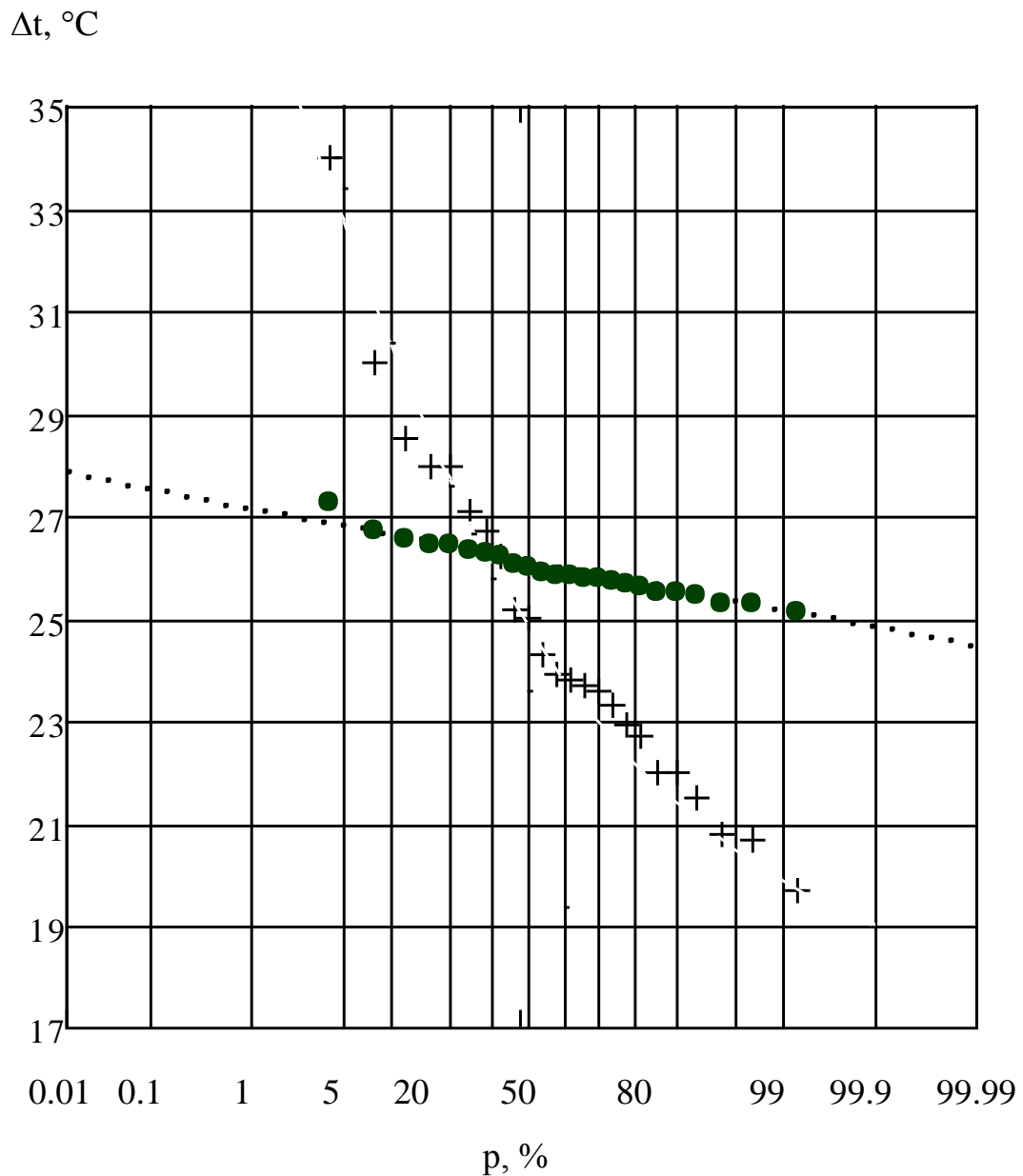


Рис. X.3. Криві забезпеченості щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у створі Канівського гідровузла (м. Канів) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $\Delta t$ , °C – щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур,  $p$ , % – імовірність: + – спостережена амплітуда середньомісячних температур  $\Delta t$ , °C; • – амплітуда середньомісячних температур  $\Delta t_{ум}$ , °C, перетворена до умовного нормального закону розподілу

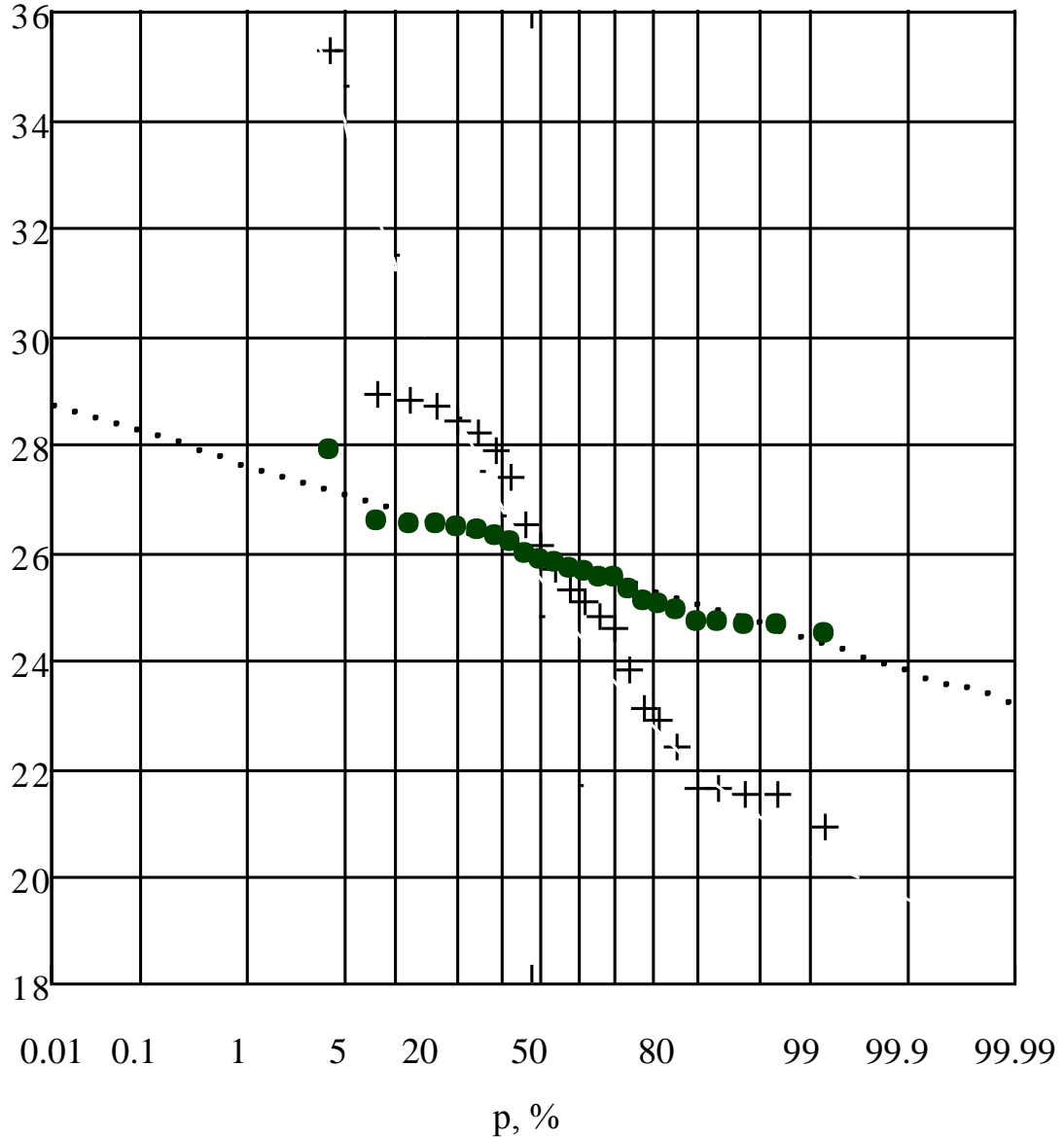
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. X.4. Криві забезпеченості щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у створі Кременчуцького гідровузла (м. Кременчук) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $\Delta t, ^\circ\text{C}$  – щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур,  $p, \%$  – імовірність: + – спостережена амплітуда середньомісячних температур  $\Delta t, ^\circ\text{C}$ ; • – амплітуда середньомісячних температур  $\Delta t_{ум}, ^\circ\text{C}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу



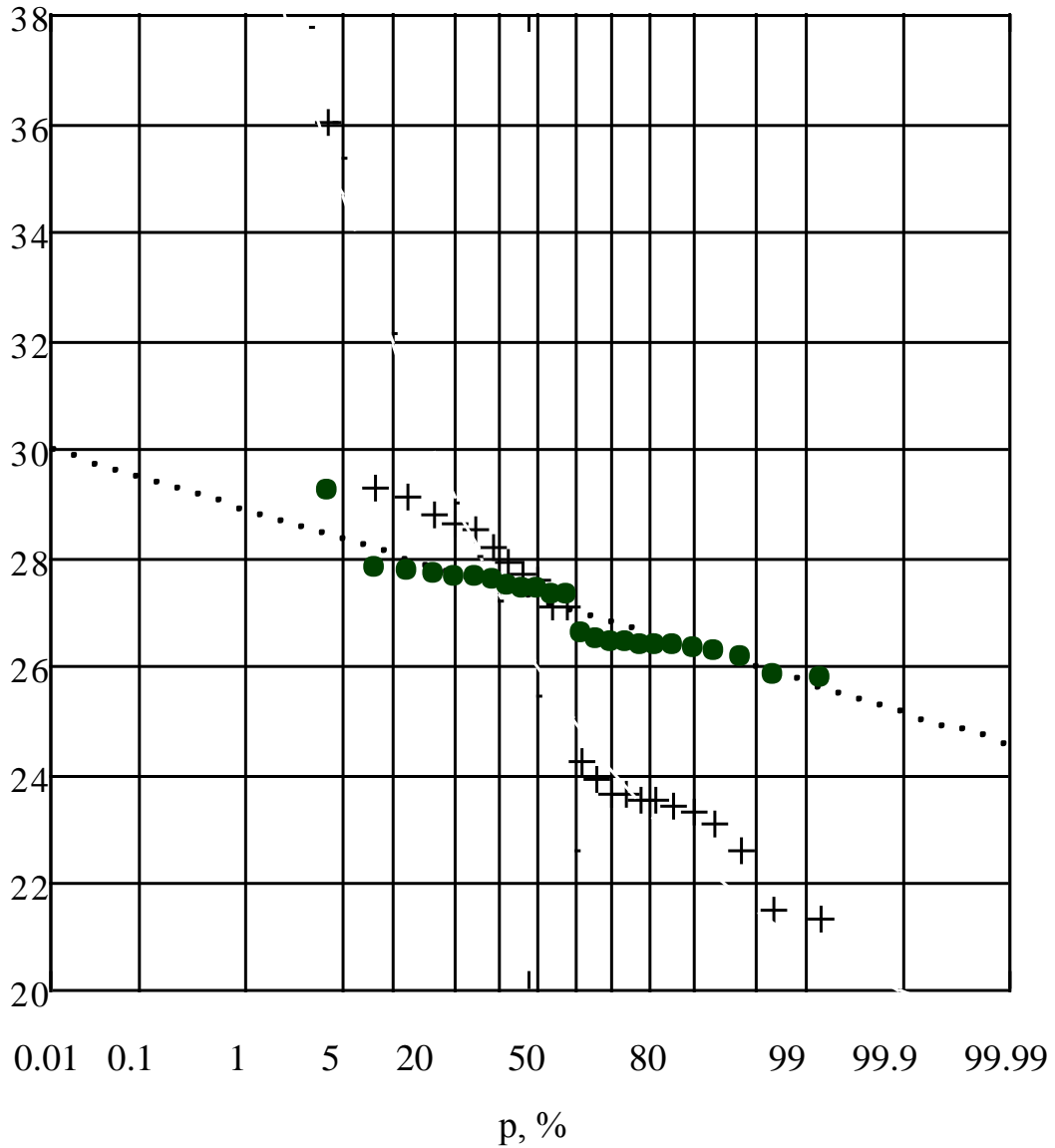
$\Delta t, ^\circ\text{C}$ 

Рис. X.5. Криві забезпеченості щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур у створі Дніпровського гідровузла (м. Запоріжжя) в умовні нормальні закони розподілу у координатах  $\Delta t, ^\circ\text{C}$  – щорічна максимальна амплітуда середньомісячних температур,  $p, \%$  – імовірність: + – спостережена амплітуда середньомісячних температур  $\Delta t, ^\circ\text{C}$ ; • – амплітуда середньомісячних температур  $\Delta t_{\text{ум}}, ^\circ\text{C}$ , перетворена до умовного нормального закону розподілу

Результати оцінки імовірнісної надійності гребель із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі гідровузлів

Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			перелив води через гребінь	стійкість верхового укосу	стійкість низового укосу	фільтраційна міцність тіла греблі	фільтраційна міцність основи	руйнування кріплення укосу	
1	Гребля із ґрунтових матеріалів Київського гідровузла	СС2-1	$1,58 \times 10^{-4}$	$8,49 \times 10^{-7}$	$1,132 \times 10^{-6}$	$1,22 \times 10^{-9}$	$9,27 \times 10^{-10}$	$4,75 \times 10^{-22}$	$5 \times 10^{-4}$
2	Гребля із ґрунтових матеріалів Канівського гідровузла	СС2-1	$8,55 \times 10^{-5}$	$1,217 \times 10^{-5}$	$1,576 \times 10^{-5}$	$7,67 \times 10^{-10}$	$8,39 \times 10^{-10}$	$5,12 \times 10^{-24}$	$5 \times 10^{-4}$
3	Гребля із ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла	СС3	$2,25 \times 10^{-5}$	$4,717 \times 10^{-7}$	$1,415 \times 10^{-6}$	$4,29 \times 10^{-9}$	$2,64 \times 10^{-9}$	$4,01 \times 10^{-19}$	$5 \times 10^{-5}$
4	Гребля із ґрунтових матеріалів Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$4,46 \times 10^{-4}$	$9,436 \times 10^{-6}$	$3,773 \times 10^{-6}$	$7,63 \times 10^{-9}$	$5,32 \times 10^{-9}$	$6,13 \times 10^{-18}$	$5 \times 10^{-4}$
5	Гребля із ґрунтових матеріалів Каховського гідровузла	СС3	$3,19 \times 10^{-5}$	$1,82 \times 10^{-7}$	$2,93 \times 10^{-7}$	$9,35 \times 10^{-10}$	$1,15 \times 10^{-9}$	$2,34 \times 10^{-20}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.2

Результати оцінки імовірнісної надійності бетонної водозливної греблі на нескельовій основі Каховського гідровузла

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність тіла греблі	стійкість проти зсуву	стійкість проти перекидання	стійкість проти спливання	фільтраційна міцність основи	відмова затвору водозливу	
1	Бетонна водозливна гребля Каховського гідровузла	СС3	$4,65 \times 10^{-7}$	$4,58 \times 10^{-6}$	$4,87 \times 10^{-10}$	$4,46 \times 10^{-10}$	$2,52 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.3

Результати оцінки імовірнісної надійності бетонної водозливних гребель на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм					Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність тіла греблі	стійкість проти зсуву	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	відмова затвору водозливу	
1	Бетонна водозливна гребля Кременчуцького гідровузла	СС3	$6,48 \times 10^{-7}$	$8,82 \times 10^{-7}$	$8,12 \times 10^{-10}$	$2,65 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
2	Бетонна водозливна гребля Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$1,15 \times 10^{-8}$	$3,71 \times 10^{-7}$	$1,09 \times 10^{-9}$	$7,19 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
3	Бетонна щитова стінка ГЕС I Дніпровського гідровузла	СС3	$1,02 \times 10^{-6}$	$1,51 \times 10^{-6}$	$2,44 \times 10^{-9}$	$5,69 \times 10^{-8}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
4	Бетонна гравітаційна глуха гребля Дніпровського гідровузла	СС3	$6,7 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^{-7}$	$9,3 \times 10^{-10}$	$4,1 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
5	Бетонний бик гравітаційної водозливної греблі Дніпровського гідровузла	СС3	$7,7 \times 10^{-8}$	$9,5 \times 10^{-8}$	$4,8 \times 10^{-10}$	$5,21 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
6	Бетонна щитова стінка ГЕС II Дніпровського гідровузла	СС3	$7,4 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-10}$	$3,3 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.4

Результати оцінки імовірнісної надійності будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків на нескельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	фільтраційна міцність основи	
1	Будівля гідроелектростанції Київського гідровузла	СС2-1	$4,80 \times 10^{-5}$	$2,11 \times 10^{-6}$	$8,45 \times 10^{-9}$	$3,02 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-4}$
2	Будівля гідроелектростанції Канівського гідровузла	СС2-1	$5,04 \times 10^{-5}$	$1,73 \times 10^{-5}$	$4,76 \times 10^{-9}$	$4,59 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
3	Будівля гідроелектростанції Каховського гідровузла	СС3	$9,12 \times 10^{-6}$	$2,76 \times 10^{-5}$	$6,88 \times 10^{-9}$	$7,22 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-5}$
4	Монтажний майданчик гідроелектростанції Київського гідровузла	СС2-1	$5,09 \times 10^{-6}$	$4,83 \times 10^{-5}$	$1,14 \times 10^{-8}$	$5,27 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
5	Монтажний майданчик гідроелектростанції Канівського гідровузла	СС2-1	$3,48 \times 10^{-6}$	$2,52 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-8}$	$2,38 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
6	Монтажний майданчик гідроелектростанції Каховського гідровузла	СС3	$7,64 \times 10^{-6}$	$1,77 \times 10^{-5}$	$6,28 \times 10^{-10}$	$1,36 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.5

Результати оцінки імовірнісної надійності будівель гідроелектростанцій і монтажних майданчиків на скельовій основі  
гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	механічна міцність основи	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Будівля гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла	СС3	$2,97 \times 10^{-5}$	$1,22 \times 10^{-7}$	$7,31 \times 10^{-9}$	$2,12 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-5}$
2	Будівля гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$5,21 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-7}$	$6,22 \times 10^{-9}$	$5,44 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
3	Будівля гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла	СС3	$3,49 \times 10^{-5}$	–	–	–	$5 \times 10^{-5}$
4	Будівля гідроелектростанції II Дніпровського гідровузла	СС3	$4,87 \times 10^{-5}$	–	–	–	$5 \times 10^{-5}$

Продовження таблиці Ц.5

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Монтажний майданчик гідроелектростанції Кременчуцького гідровузла	СС3	$5,10 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-5}$	$4,38 \times 10^{-9}$	$6,11 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-5}$
6	Монтажний майданчик гідроелектростанції Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$3,29 \times 10^{-5}$	$4,84 \times 10^{-5}$	$8,29 \times 10^{-10}$	$8,22 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
7	Монтажний майданчик гідроелектростанції I Дніпровського гідровузла	СС3	$5,11 \times 10^{-5}$	–	–	–	$5 \times 10^{-5}$
8	Монтажний майданчик гідроелектростанції II Дніпровського гідровузла	СС3	$1,57 \times 10^{-5}$	–	–	–	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.6

Результати оцінки імовірнісної надійності голів і камер шлюзів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	руйнування нижніх воріт	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Верхня голова шлюзу Київського гідровузла	СС2-1	$2,44 \times 10^{-5}$	$8,47 \times 10^{-5}$	$5,48 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
2	Нижня голова шлюзу Київського гідровузла	СС2-1	$3,41 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$2,32 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
3	Верхня голова шлюзу Канівського гідровузла	СС3	$5,21 \times 10^{-5}$	$1,13 \times 10^{-4}$	$7,53 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
4	Нижня голова шлюзу Канівського гідровузла	СС2-1	$1,98 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-4}$	$6,62 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
5	Верхня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$3,47 \times 10^{-5}$	$2,01 \times 10^{-7}$	$7,18 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
6	Нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$5,02 \times 10^{-5}$	$6,03 \times 10^{-8}$	$5,15 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
7	Верхня голова шлюзу Каховського гідровузла	СС3	$4,78 \times 10^{-5}$	$7,73 \times 10^{-6}$	$6,44 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
8	Нижня голова шлюзу Каховського гідровузла	СС3	$3,13 \times 10^{-5}$	$2,38 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
9	Камера шлюзу Київського гідровузла	СС2-1	$1,81 \times 10^{-5}$	$1,829 \times 10^{-4}$	–	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$



Продовження таблиці Ц.6

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Камера шлюзу Канівського гідровузла	CC2-1	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,909 \times 10^{-4}$	–	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
11	Камера шлюзу Середньодніпровського гідровузла	CC2-1	$5,327 \times 10^{-5}$	$5,143 \times 10^{-5}$	$6,15 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-4}$
12	Камера шлюзу Каховського гідровузла	CC3	$1,33 \times 10^{-7}$	$2,487 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.7

Результати оцінки імовірнісної надійності голів і камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм						Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти спливання	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	руйнування нижніх воріт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Верхня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла	СС3	$4,29 \times 10^{-5}$	$1,91 \times 10^{-7}$	$4,25 \times 10^{-8}$	$6,16 \times 10^{-9}$	$5,23 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
2	Нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла	СС3	$1,07 \times 10^{-6}$	$7,08 \times 10^{-8}$	$6,15 \times 10^{-7}$	$5,81 \times 10^{-9}$	$4,07 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
3	Верхня голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла	СС3	$8,23 \times 10^{-6}$	$5,44 \times 10^{-9}$	$4,82 \times 10^{-9}$	$1,85 \times 10^{-6}$	$2,12 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
4	Нижня голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла	СС3	$4,72 \times 10^{-5}$	$6,35 \times 10^{-9}$	$6,87 \times 10^{-9}$	$9,72 \times 10^{-7}$	$7,35 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
5	Верхня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла	СС3	$6,94 \times 10^{-6}$	$1,10 \times 10^{-8}$	$4,21 \times 10^{-7}$	$6,64 \times 10^{-9}$	$1,03 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Результати оцінки імовірнісної надійності голів і камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	Нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла	ССЗ	$3,95 \times 10^{-5}$	$5,53 \times 10^{-6}$	$3,07 \times 10^{-8}$	$5,77 \times 10^{-9}$	$4,48 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
7	Камера шлюзу Кременчуцького гідровузла	ССЗ	$5,04 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-6}$	$6,74 \times 10^{-8}$	$1,78 \times 10^{-5}$	$6,14 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
8	Камера трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла	ССЗ	$7,14 \times 10^{-6}$	$2,11 \times 10^{-5}$	$6,28 \times 10^{-7}$	$5,10 \times 10^{-7}$	$5,08 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
9	Камера однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла	ССЗ	$3,39 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-5}$	$9,60 \times 10^{-7}$	$4,42 \times 10^{-6}$	$2,23 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Результати оцінки імовірнісної надійності гравітаційних стоянів на нескельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм			Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність	стійкість проти зсуву	фільтраційна міцність основи	
1	Верховий правобережний стоян Київського гідровузла	СС2-1	$1,22 \times 10^{-5}$	$4,38 \times 10^{-6}$	$5,71 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-4}$
2	Низовий правобережний стоян Київського гідровузла	СС2-1	$4,13 \times 10^{-5}$	$2,03 \times 10^{-4}$	$4,32 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-4}$
3	Верховий правобережний стоян Канівського гідровузла	СС3	$5,11 \times 10^{-5}$	$3,17 \times 10^{-6}$	$6,11 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-5}$
4	Низовий правобережний стоян Канівського гідровузла	СС2-1	$2,02 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-4}$	$2,23 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
5	Верховий лівобережний стоян Каховського гідровузла	СС3	$4,16 \times 10^{-5}$	$2,33 \times 10^{-6}$	$1,71 \times 10^{-10}$	$5 \times 10^{-5}$
6	Низовий лівобережний стоян Каховського гідровузла	СС3	$3,22 \times 10^{-5}$	$2,76 \times 10^{-5}$	$4,50 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-5}$

Таблиця Ц.9

Результати оцінки імовірнісної надійності гравітаційних стоянів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

№	Назва споруди або частини споруди	Клас споруди	Розрахункове значення імовірності ризику виникнення аварії, рік <sup>-1</sup> за критерієм				Допустиме значення ризику настання граничного стану, рік <sup>-1</sup>
			механічна міцність	стійкість проти зсуву	стійкість проти перекидання	механічна міцність основи	
1	Верховий лівобережний стоян Кременчуцького гідровузла	СС3	$3,34 \times 10^{-5}$	$9,01 \times 10^{-8}$	$5,23 \times 10^{-10}$	$6,27 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-5}$
2	Низовий лівобережний стоян Кременчуцького гідровузла	СС3	$5,14 \times 10^{-6}$	$6,80 \times 10^{-7}$	$6,74 \times 10^{-10}$	$4,19 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-5}$
3	Верховий лівобережний стоян Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$5,07 \times 10^{-5}$	$4,42 \times 10^{-8}$	$5,24 \times 10^{-10}$	$7,08 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$
4	Низовий лівобережний стоян Середньодніпровського гідровузла	СС2-1	$3,81 \times 10^{-5}$	$8,05 \times 10^{-7}$	$7,33 \times 10^{-11}$	$4,57 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-4}$

## Додаток Ш

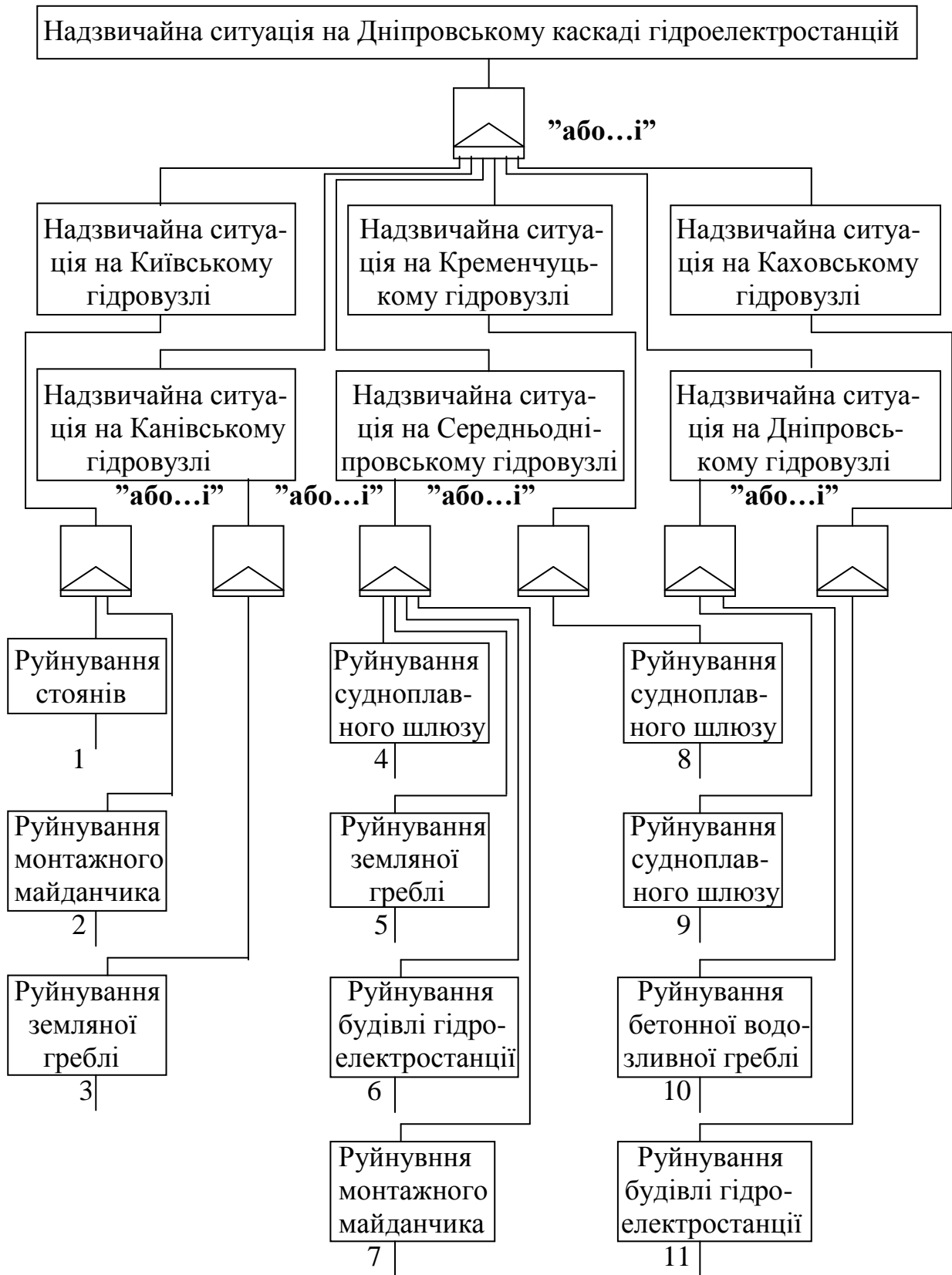


Рис. Ш.1. Навколовершинні події і стани узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

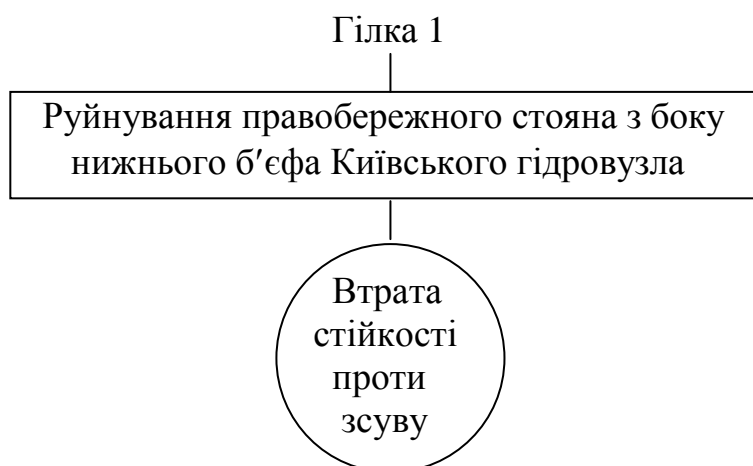


Рис. Ш.2. Гілка 1-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій



Рис. Ш.3. Гілка 2-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

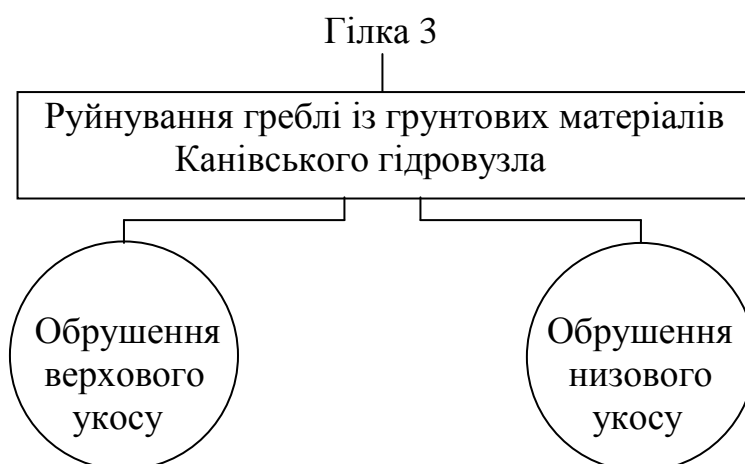


Рис. Ш.4. Гілка 3-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

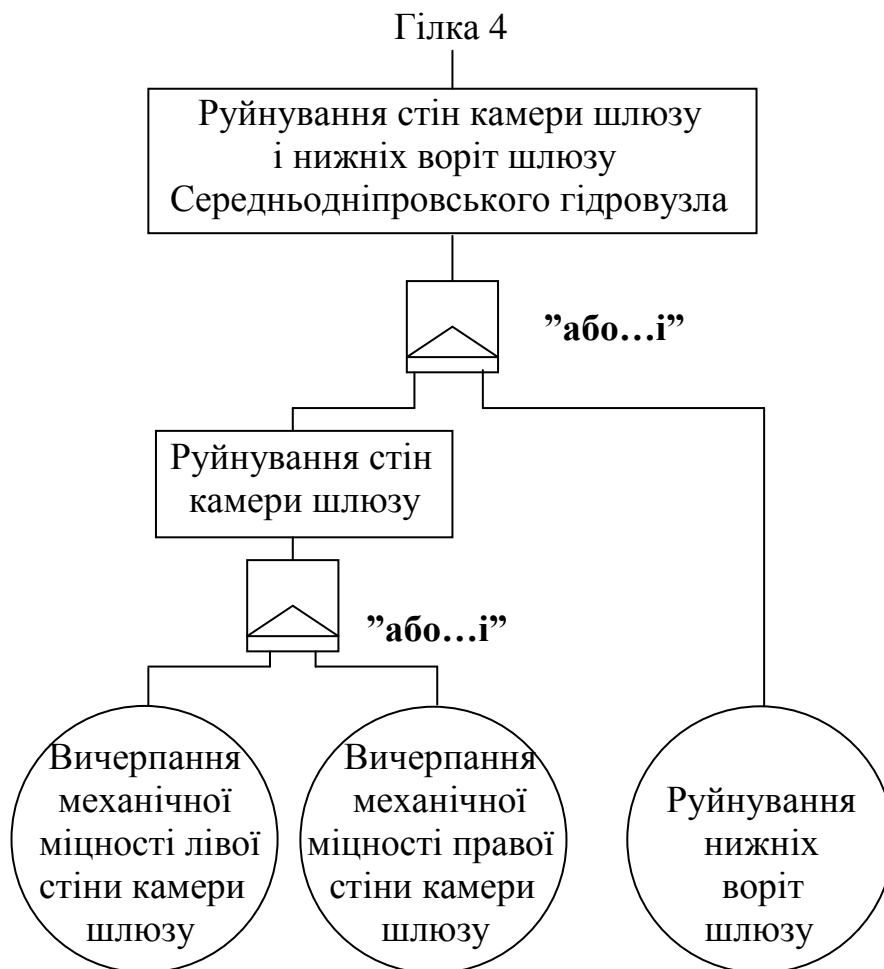


Рис. Ш.5. Гілка 4-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій



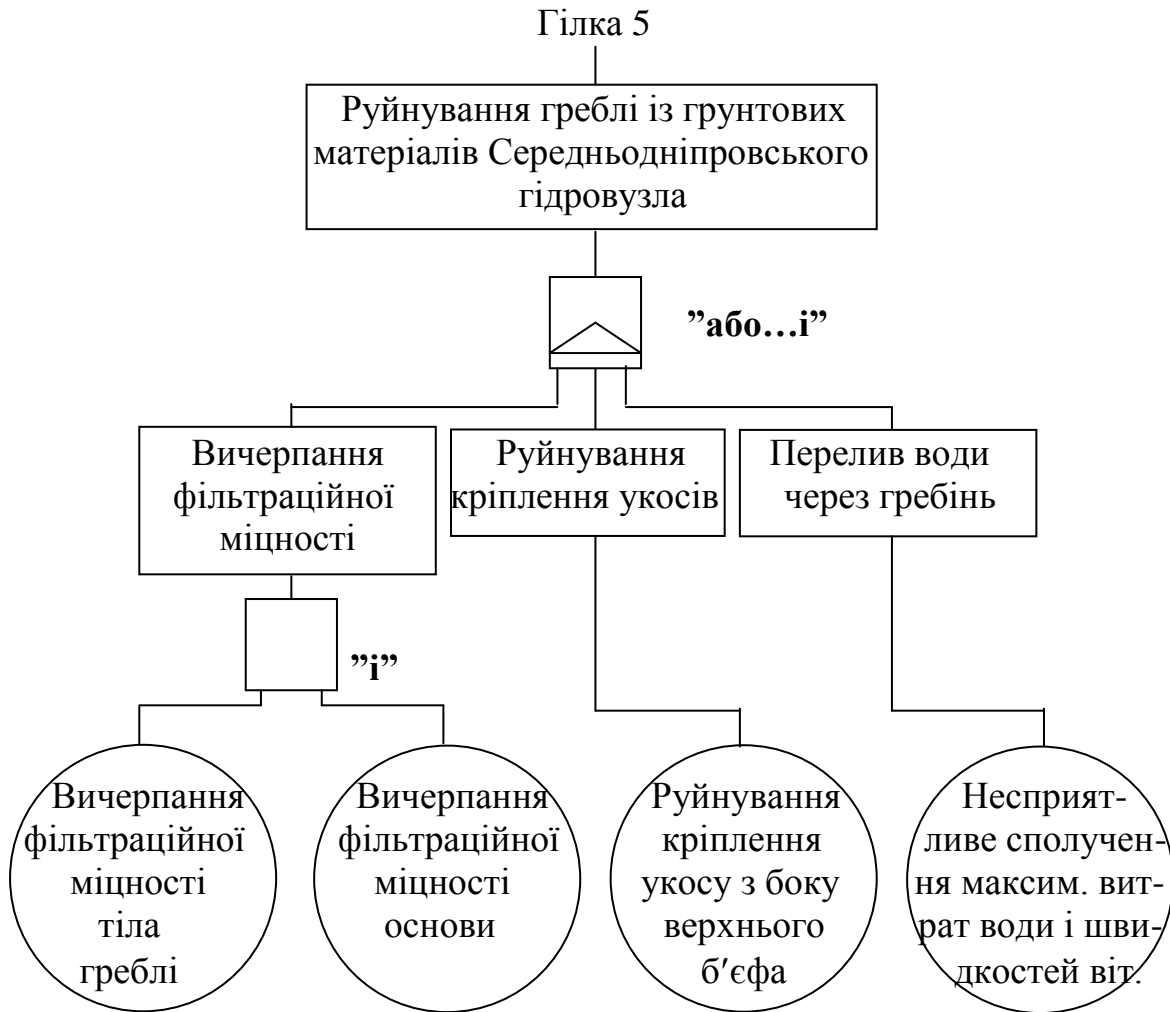


Рис. Ш.6. Гілка 5-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

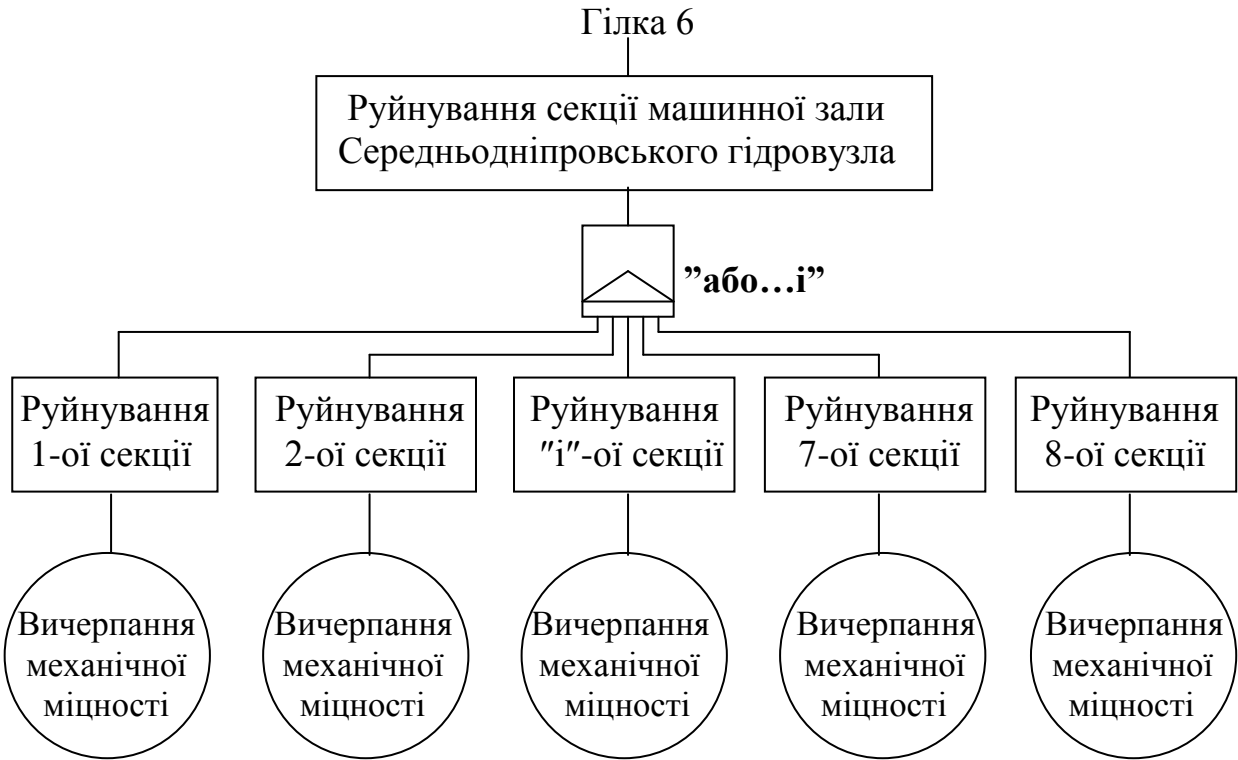


Рис. Ш.7. Гілка 6-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

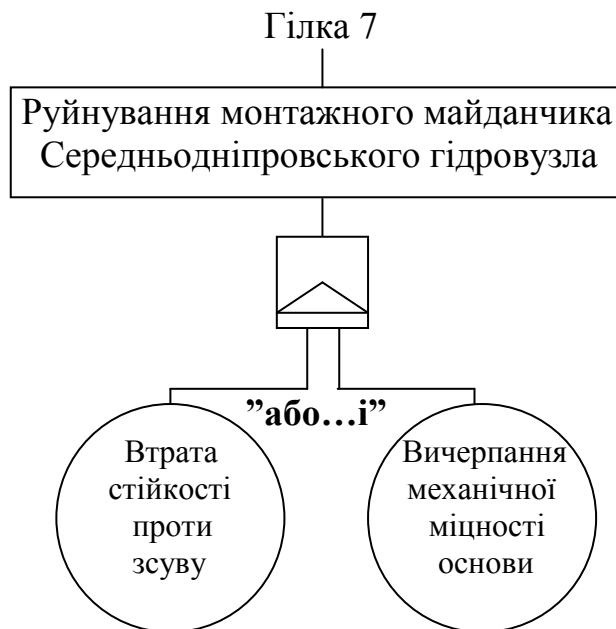


Рис. Ш.8. Гілка 7-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

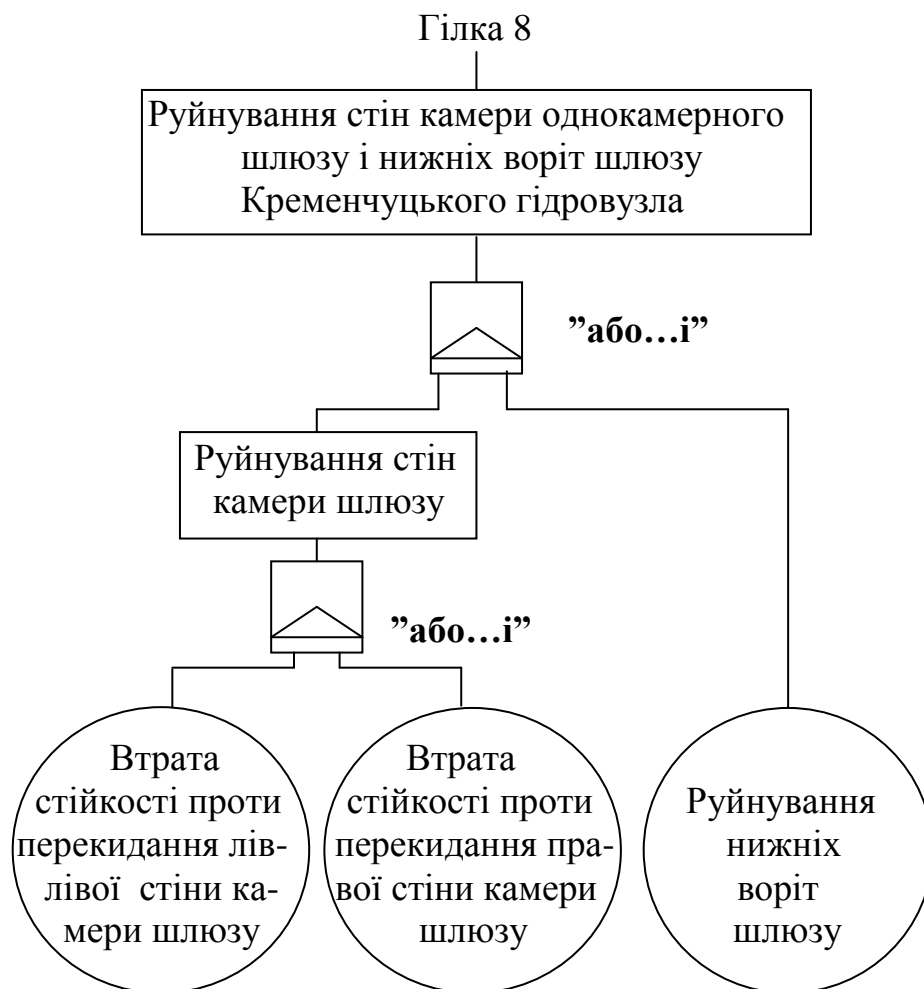


Рис. Ш.9. Гілка 9-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

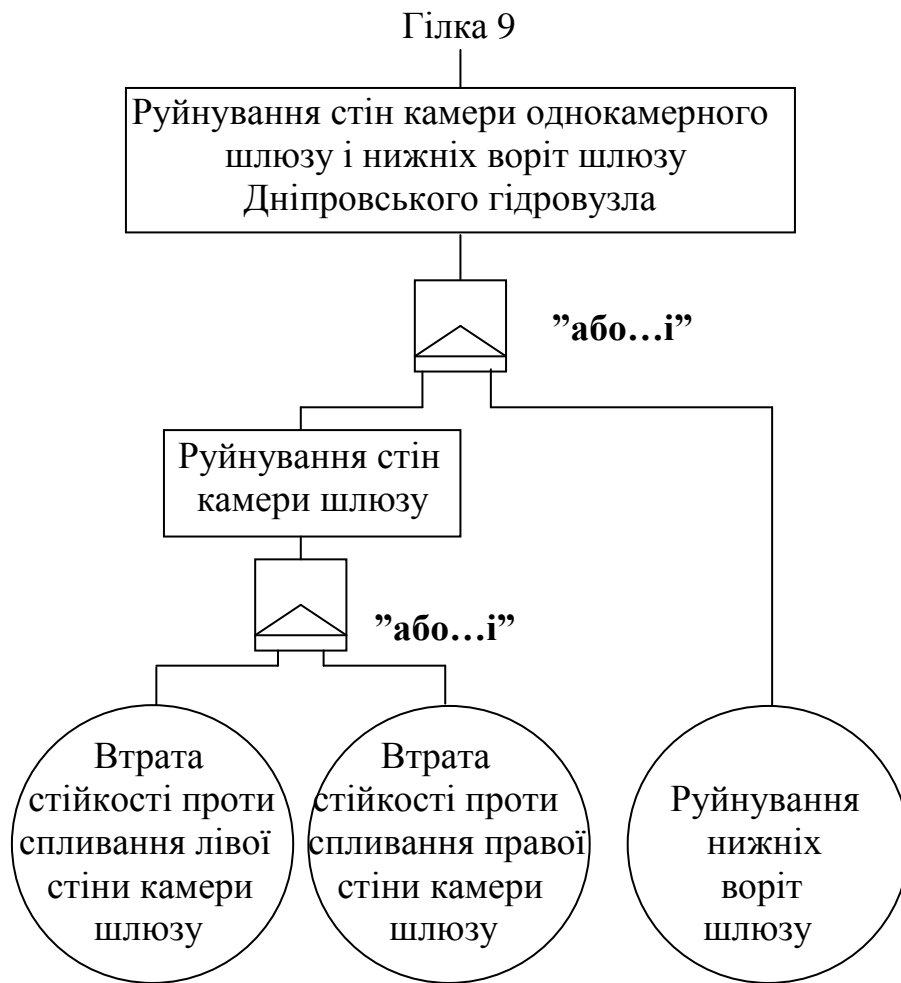


Рис. Ш.10. Гілка 9-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

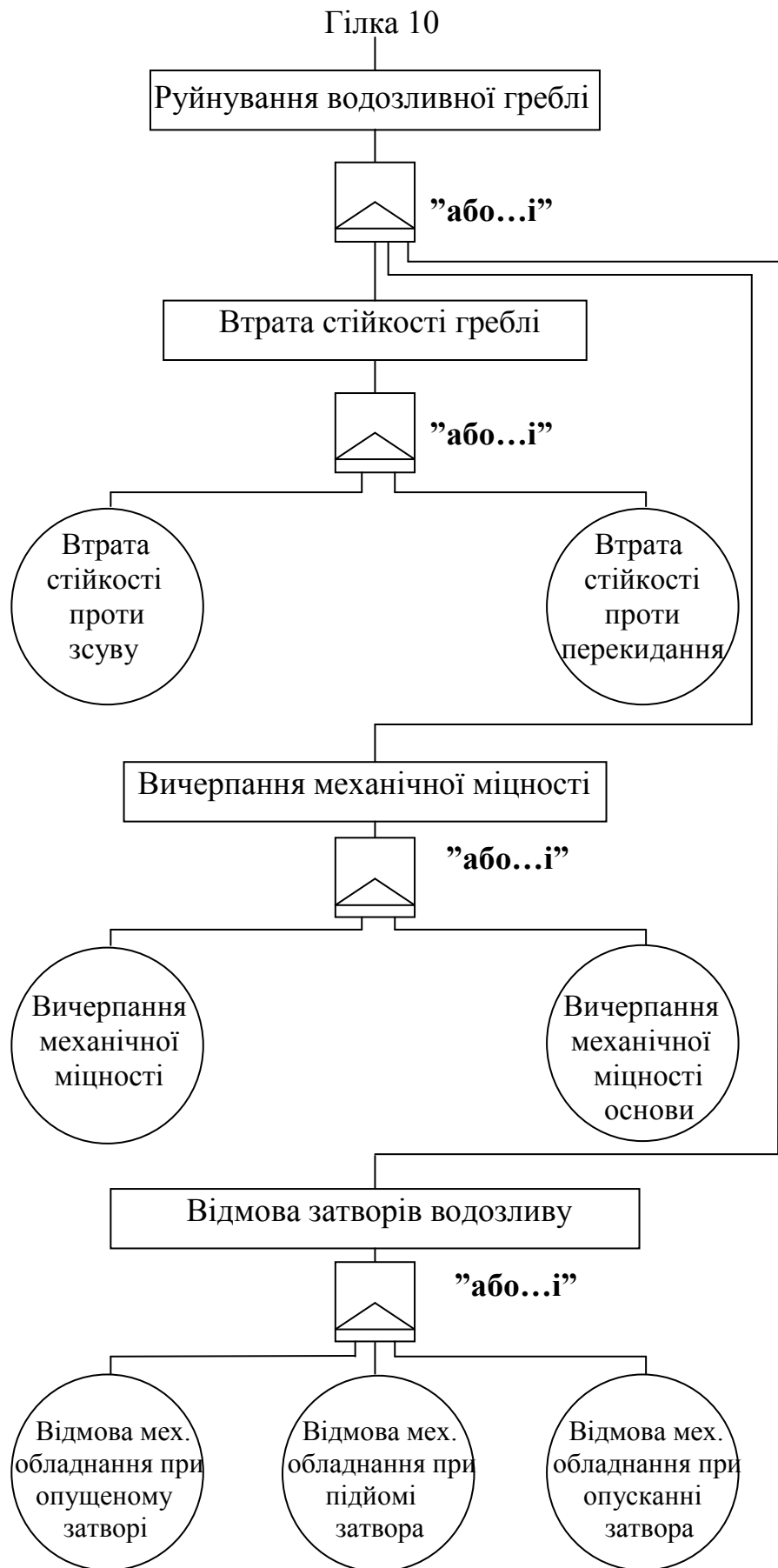


Рис. Ш.11. Гілка 10-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

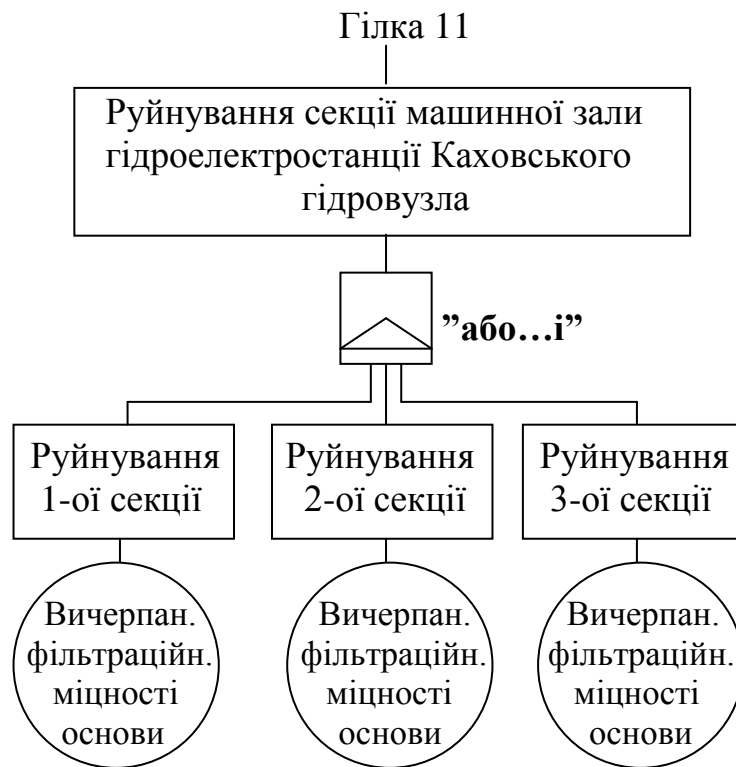


Рис. Ш.12. Гілка 11-го узагальненого дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
"УКРГІДРОПРОЕКТ"



UKRHYDROPROJECT  
PRIVATE JOINT-STOCK COMPANY

61166, Україна, м. Харків, пр. Науки, 9  
Телефон +38 (057) 717-57-05  
Факс +38 (057) 719-47-30  
E-mail water@uhp.kharkov.ua  
http www.uhp.kharkov.ua



9 Nauky Avenue, Kharkiv, 61166 Ukraine  
Telephone +38 (057) 717-57-05  
Fax +38 (057) 719-47-30  
E-mail water@uhp.kharkov.ua  
http www.uhp.kharkov.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

ПрАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»



С. Д. Осадчий

АКТ  
05.03.2019

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Мозгового Андрія Олексійовича

«Імовірнісна оцінка надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів  
гідроелектростанцій»

Комісія у складі:

голова комісії Галат В.В. – технічний директор ПрАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»;

члени комісії:

Погосян С.М. – заступник технічного директора ПрАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»;

Мозговий А.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки та підземних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури

склали відповідний акт про те, що результати дисертаційної роботи Мозгового Андрія Олексійовича на тему «Імовірнісна оцінка надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій» були використані упродовж 2016–2018 років при виконанні розрахунків надійності і безпеки споруд Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках роботи «Відповідність споруд ГЕС ПрАТ «Укргідроенерго» вимогам сучасних норм проектування, у тому числі з урахуванням сейсмічних впливів», що виконується в ПрАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ».

При виконанні розрахунків використовувались підходи і методики, розроблені у дисертаційній роботі канд. техн. наук, доцента Мозгового А.О.

Голова комісії:

В.В. Галат

Члени комісії:

С.М. Погосян

А.О. Мозговий



ПРОЕКТНО-ІНЖИНИРИНГОВИЙ КОМПЛЕКС "ГРАНТ"  
ТОВ "ГІДРОТЕХПРОЕКТ"  
ПрАТ "УКРГІДРОПРОЕКТ"  
ТОВ "УКРАТОМЕНЕРГОПРОЕКТ"  
ТОВ "МЕЖВІДОМЧИЙ ЦЕНТР ІНЖЕНЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ"

ХНУБА  
Дата 05.03.2019  
Вхідний № 03-395

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет будівництва та архітектури

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Перший проректор університету

  
Терелицький Д.Л.

«05» березня 2019 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

дисертаційної роботи кандидата технічних наук, доцента кафедри геотехніки та підземних споруд Мозгового А.О. на тему: «Імовірнісна оцінка надійності і безпеки гідротехнічних споруд каскадів гідроелектростанцій», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди (19 – Архітектура та будівництво) у навчальний процес університету

Даним актом підтверджується, що з 2013 року і по теперішній час при підготовці студентів денної форми навчання кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» при викладанні навчальної дисципліни «Особливості проектування сучасних гідротехнічних споруд», при виконанні курсової роботи на тему «Імовірнісна оцінка ризику переливу води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів» використовуються підходи, реалізовані в дисертаційному дослідженні канд. техн. наук, доц. кафедри геотехніки та підземних споруд Мозгового А.О. Під час виконання дипломних проектів магістрів використовуються підходи щодо оцінки надійності таких гідротехнічних споруд, як бетонні гравітаційні греблі, будівлі гідроелектричних станцій. Щорічно за вказаною тематикою проводилась підготовка студентських наукових робіт для участі у Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт. Підготовані студентами наукові роботи за вказаною тематикою дозволили їм посісти призові місця за спеціальністю «Гідротехнічне будівництво» у 2014-2015 рр., наказ Міністерства освіти і науки України від 13.07.2015 р., № 756; у 2015-2016 рр., наказ Міністерства освіти і науки України від 20.07.2016 р., № 859.

Декан будівельного факультету,  
к.е.н., доц.



Савченко О.І.

Зав. кафедри геотехніки  
та підземних споруд,  
д.т.н., проф.



Самородов О.В.



**Список публікацій здобувача за темою дисертації*****Статті у наукових фахових виданнях України:***

1. Мозговий А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2009. Вип. 54. С. 272–277.
2. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2010. Вип. 58. С. 264–270.
3. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 65. С. 364–370.
4. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними. *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2011. Вип. 127. С. 171–175.
5. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і вибір параметрів функції розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 2011. Вип. 101. С. 123–127.
6. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2011. Вип. 1 (53). С. 119–126.
7. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних аварій гідротехнічних споруд. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 66. С. 192–196.
8. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву бетонних гребель гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 154–165.

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

16. Оценка напряженно-деформированного состояния агрегатной шахты первой очереди Днестровской гидроаккумулирующей электростанции / А. А. Мозговой и др. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2008. Вип. 48. С. 106–112.

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

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

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

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

18. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 161. С. 90–101.

19. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2016. Вип. 165. С. 99–109.

20. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 168. С. 62–70.

21. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2017. Вип. 174. С. 70–80.

22. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності температурних впливів за статистичними даними по гідровузлах Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської*

*державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць. Одеса, 2018. Вип. 72. С. 135–145.*

23. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків, 2018. Вип. 181. С. 81–91.*

24. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм стійкості укосів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 113–126.*

25. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності голів шлюзів за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків, 2018. Вип. 182. С. 6–17.*

26. Мозговий А. О. Узагальнена оцінка ризику виникнення надзвичайної ситуації на гідротехнічних спорудах каскаду гідроелектростанцій. *Східно-Європейський науковий журнал. Варшава, республіка Польща, 2019. Т. 2 (42), ч. 1. С. 31–40.*

27. Мозговий А. О., Балабай О. О. Комплексна ймовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на прикладі бетонної греблі Дніпровської ГЕС. *Східно-Європейський науковий журнал. Варшава, республіка Польща, 2017. Т. 1 (17), ч. 1. С. 117–126.*

*Особистий внесок: чисельне моделювання, аналіз результатів.*

#### **Додаткова публікація:**

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

#### **Публікації апробаційного характеру:**

29. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Імовірнісний спосіб комплексної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельовій основі за нормативною методикою. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур, присвячено 100-річчю створення Харківської каналізації : тези за матеріалами VI*

Всеукраїнського наукового семінару, 15–16 жовтня 2014 р. Харків : ХНУБА, 2014. С. 139–141.

*Особистий внесок: чисельне моделювання, аналіз результатів.*

30. Мозговий А. О., Кисляк О. О. Умови формування замулювання водосховищ річкових гідровузлів. *Будівництво, реконструкція і відновлення будівель міського господарства* : матеріали IV міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 25 листопада–25 грудня 2014 р. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. С. 117–120.

*Особистий внесок: постановка проблеми, аналіз результатів.*

31. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер і голів шлюзів. *70-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 17–19 березня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 12.

32. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву монтажних майданчиків будівель ГЕС гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VII Міжнародної наукової конференції, 20–21 жовтня 2015 р. Харків : ХНУБА, 2015. С. 78–80.

33. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур* : тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару, 11–12 жовтня 2016 р. Харків : ХНУБА, 2016. С.56–58.

34. Мозговий А. О. Метод розв'язання задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи. *72-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури* : тези доповідей за матеріалами конференції, 14–17 березня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 38–39.

35. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі

гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VI Міжнародної науково-технічної конференції, 19–21 квітня 2017 р. Харків : УкрДУЗТ, 2017. С. 140–141.

36. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд* : тези за матеріалами VIII Міжнародної наукової конференції, 18–19 жовтня 2017 р. Харків : ХНУБА, 2017. С. 119–122.

37. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доповідей за матеріалами VII-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 14–16 листопада 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 164–165.

38. Mozgovyy A. O., Butnik S. V. Probable reliability prediction of the dam constructed by ground materials of the hydraulic power system Nam Chien in Vietnam using Monte–Carlo method. *Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings* : 7th International Scientific Conference. Transbud-2018. MATEC Web of Conferences, November 14-16, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. Volume 230, 02019 (2018). P. 1–7.

*Особистий внесок: постанова проблеми, чисельне моделювання, аналіз результатів.*

39. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності каскадів гідроелектростанцій. 74-а науково-технічна конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури : тези доповідей за матеріалами конференції, 5–6 березня 2019 р. Харків : ХНУБА, 2019. С. 73–74.

## Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на таких конференціях:

- Науково-технічних конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури – Харківського національного університету будівництва та архітектури (м. Харків, 2009–2019 рр.) (Особиста участь);
- IV-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХДТУБА, 20–22 жовтня 2009 р.) (Особиста участь);
- Міжнародній науково-практичній конференції "Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві" (м. Харків, ХДТУБА, 27–28 жовтня 2011 р.) (Особиста участь);
- Науково-технічній конференції "Гідротехнічні та гідроенергетичні об'єкти України" (м. Рівне, НУВГП, 5–6 квітня 2011 р.) (Особиста участь);
- V-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХДТУБА, 18–19 жовтня 2011 р.) (Особиста участь);
- 6-й Міжнародній науково-практичній конференції гідроенергетиків "Світові тенденції й перспективи розвитку гідроенергетики України" (м. Рівне, Асоціація "УКРГІДРОЕНЕРГО", 14–15 березня 2013 р.) (Особиста участь);
- Міжнародній науково - технічній конференції, присвяченій 100-річчю з дня народження професора І. Є. Прокоповича "Проблеми теорії і практики будівельних конструкцій" (м. Одеса, ОДАБА, 15–17 квітня 2013 р.) (Особиста участь);
- VI-й Міжнародній науковій конференції "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд" (м. Харків, ХНУБА, 15–17 жовтня 2013 р.) (Особиста участь);
- VI-му Всеукраїнському науковому семінарі "Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур" присвяченому 100-річчю створення Харківської каналізації (м. Харків, ХНУБА, 15–16 жовтня 2014 р.) (Особиста участь);

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

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