

СТАТИСТИЧНІ ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ ГРЕБЕЛЬ

*Д.В. Стефанишин, д-р техн. наук
(Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України)*

Отримано оцінки живучості гребель на основі статистичного аналізу аварійності споруд. Оцінки можуть бути використані при обґрунтуванні надійності і безпеки гідроспоруд в залежності від типу та конструкції.

Получены оценки живучести плотин на основе статистического анализа их аварийности. Оценки могут использоваться при обосновании надежности и безопасности гидросооружений в зависимости от типа и конструкции.

The vitality assessment of dams on the statistical analysis of accident rate has been realized. The vitality statistical values of dams may be used for grounding of dam safety depending on type and construction mode of structures.

Під живучістю гребель далі будемо розуміти їх здатність не руйнуватися й утримувати напірний фронт при різного роду порушеннях та пошкодженнях.

Живучість гребель як властивість визначається багатьма факторами. Важливе значення при цьому може мати тип та конструкція гідроспоруди. Одні типи гребель можуть визнаватися як більш живучі гідроспоруди, інші - як менш живучі, що може впливати на остаточний вибір типу та конструкції кожної індивідуальної гідроспоруди в процесі варіантного проектування.

Важливе значення для дослідження надійності, зокрема живучості, будь-яких споруд та конструкцій має статистичний аналіз аварій. Такі дослідження проводяться в усіх галузях техніки. Слід зазначити, що статистичні оцінки аварійності гребель певною мірою можуть вказувати і на досягнутий рівень надійності й техногенної безпеки в гідротехнічній галузі [1-3].

Практичний інтерес до систематизації статистичних даних про аварії на греблях існує вже давно. Ще в 1786 р. в Німеччині вийшла книга І. Зільбершлага «Аварії на греблях» [4], в якій, очевидно, була зроблена перша спроба наукової систематизації причин аварій та статистичного аналізу аварій на греблях. Надалі спроби статистичного аналізу аварій на греблях здійснювалися неодноразово – різними фахівцями і в різних країнах. Статистичним аналізом аварій на греблях у

різні роки займалися такі всесвітньовідомі інженери-гідротехніки, як М. Хіндерлендер (США, 1933 р.), А. Гельфер (СРСР, 1936 р.), Дж. Шерард (США, 1963 р.), Е. Грунер (Швейцарія, 1963, 1967, 1973 р. р.), А. Губе (Франція, 1979 р.), Г. Маріньє (Канада, 1982 р.), Х. Блайнд (Австралія, 1983 р.), А.Ф. Сільвейра (Бразилія, 1983р., 1990 р.), Ж.Л. Серафім (Бразилія, 1989 р.), М. Раціу (Румунія, 1989 р.) та інші [1-23].

Починаючи з кінця 60-х років минулого століття, істотну роботу в області статистичного аналізу аварій на греблях проводить Міжнародна комісія з великих гребель (ICOLD). Спочатку в рамках ICOLD було створено спеціалізований Технічний Комітет з аварій. Назва Комітету в різні роки змінювалася в залежності від поставлених перед ним задач, але мета переслідувалася одна – всебічне вивчення проблем аварійності на греблях з метою підвищення їх надійності та безпеки. У 70-ті роки Комітет носив назву «Комітет зі старіння гребель та водосховищ», у 80-90-ті роки – «Комітет зі статистичного аналізу аварій на греблях», в кінці 90-х років – став називатися «Комітет з безпеки гребель».

Завдяки зусиллям ICOLD збір даних про аварії на греблях почав здійснюватися на міжнародному рівні, централізовано, через повноважних представників країн-учасниць Комісії, що були представлені в Технічному Комітеті. Одночасно зі збором даних про аварії в рамках Технічного Комітету почав створюватися міжнародний реєстр великих гребель. Це суттєво розширило можливості для формування репрезентативних статистичних вибірок даних з багатьох проблем аварійності на греблях різного типу та конструкції.

Перша доповідь Технічного Комітету «Уроки аварій на греблях» («Lecontireesdesaccidentsdebarrages») у статусі Генеральної доповіді на конгресі ICOLD була представлена в 1974 р. в Парижі [6]. У доповіді були проаналізовані зібрані на кінець 1965 р. дані про 534 випадки різного роду аварій (пошкоджень та руйнувань) на греблях різних типів.

У 1984 р. під керівництвом проф. М. Роша (Португалія) була опублікована доповідь Технічного Комітету зі старіння гребель та водосховищ («Deteriorationofdamsandreservoirs») [12]. У доповіді розглядалися 1105 випадків аварій на греблях різних типів. Статистичні дані були зібрані за участі 33 країн, що зареєстрували близько 14700 великих гребель. Вперше аналізувалася аварійність на греблях в залежності від типу, висоти, матеріалів, виду основи, періоду будівництва, тривалості експлуатації споруд тощо.

У 1995 р. Технічним комітетом з аварій ICOLD був випущений спеціалізований Бюлетень 99 «Damfailures– statisticalanalysis» [1], присвячений питанням статистичного аналізу даних про аварії на греблях. При його підготовці були використані дані щодо 17405 зареєстрованих гребель. При аналізі, зокрема, виділялись такі обставини, як тип, конструкція греблі, час, коли відбулася аварія (при будівництві, першому наповненні водосховища тощо), та можливі причини

Розділ 1. Екологічна безпека

виникнення аварії.

Наразі серед фахівців нема сумнівів щодо корисності статистичних оцінок аварійності гребель. Звичайно, статистичні оцінки ймовірностей аварій на греблях не дозволяють в повній мірі врахувати особливості окремих гідроспоруд, умов їхньої експлуатації тощо й не можуть безпосередньо використовуватися в якості оцінок надійності індивідуальних гребель у кожному конкретному випадку. Проте як вибіркові оцінки, тобто як деякі осереднені, узагальнені оцінки аварійності для сукупності гребель (оцінок аportfolio), що, наприклад, відносяться до певного типу, вони заслуговують на увагу.

У статті, що пропонується, на основі статистики аварій проаналізовано живучість гребель в залежності від виду матеріалів (бетонні та з ґрунтових матеріалів) та типу (гравітаційні, аркові, контрфорсні, земляні, кам'яно-земляні, кам'яно-накидні греблі). Живучість встановлювалася щодо так званих інцидентів (incidents), за термінологією ICOLD, під якими розуміють всі серйозні порушення, що призвели до аварій або могли призвести до аварій, і щодо аварій (accidents), що завершувалися руйнуваннями або серйозними пошкодженнями гідроспоруд, з необхідністю спрацювання водосховища, проведення ремонтно-відновлювальних робіт тощо. Використовувалися дані, що відображені в доповідях Технічного Комітету з аварій на греблях та в Бюлетені 99 ICOLD [1]. При формуванні статистичних вибірок враховувалися також рекомендації Додатку 1 до Бюлетеня 119 ICOLD «Classification of reported failures» [22], зокрема щодо типів гідроспоруд. У зв'язку з різномірністю даних розрахункові вибірки включали різну кількість гребель. Зокрема, випадки всіх зареєстрованих порушень (інцидентів) на греблях, до яких були віднесені також пошкодження і руйнування, розглядалися у вибірці з 17405 зареєстрованих гребель. Випадки серйозних пошкоджень та руйнувань розглядалися у вибірці з 17100 гребель.

Живучість гребель в залежності від їх типу встановлювалася за статистичними даними щодо різних аварійних подій (інцидентів та руйнівних аварій), руйнівних аварій (руйнувань та пошкоджень), окремо для пошкоджень та руйнувань, що не призводили до прориву напірного фронту, руйнувань з проривом напірного фронту, у відповідності з прийнятою ICOLD класифікацією аварій (accidents) на греблях за наслідками:

Р-1 – руйнування гребель катастрофічного характеру з проривом напірного фронту, в результаті чого довелося відмовитися від відновлення гідроспоруд (враховано 84 випадки таких аварій);

Р-2 – руйнування катастрофічного характеру, після чого гідроспоруди відновлювалися (118 випадків, з яких 24 аварії з проривом напірного фронту);

П-1 – пошкодження гребель, що знаходилися в експлуатації й не зруйнувалися завдяки спорожненню водосховищ (154 випадки);

П-2 – пошкодження при введенні в експлуатацію, що не призвели до

руйнування гідроспоруд завдяки спорожненню водосховищ (70 випадків);

П-3 – пошкодження при будівництві, що не завадили відновити гідроспоруди й заповнити водосховища після ремонтів (40 випадків).

Загальні статистичні дані щодо всіх зареєстрованих порушень (інцидентів) на греблях та різних аварій за наведеною вище класифікацією ICOLD для статистичної вибірки з 17100 гребель, а також статистичні оцінки ймовірностей порушень та аварій, що були отримані автором на інтервалі в 150 років, наводяться нижче в табл. 1, 2.

Наведені в табл. 1, 2 статистичні оцінки ймовірностей різних аварійних ситуацій переконливо свідчать про те, що греблям властива живучість, оскільки не всі порушення завершувалися аваріями, і не всі аварії супроводжувалися проривом напірного фронту. При цьому більш серйозним аваріям відповідають менші ймовірності, і навпаки.

Таблиця 1

Статистичні ймовірності виникнення порушень (інцидентів) та аварій на греблях (оцінки отримані на інтервалі 150 років для вибірки з 17100 гребель)

Вид інциденту/аварії	Кількість	Повні ймовірності	Щорічні ймовірності
Порушення	1623	0,093	$6,51 \cdot 10^{-4}$
Серйозні порушення	1369	0,0785	$5,45 \cdot 10^{-4}$
Всі аварії	466	0,0273	$1,84 \cdot 10^{-4}$
Пошкодження	264	0,0154	$1,04 \cdot 10^{-4}$
Руйнування	202	0,0118	$7,92 \cdot 10^{-5}$
Руйнування з проривом напірного фронту	108	0,0063	$4,22 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 2

Статистичні ймовірності виникнення аварій на греблях (оцінки отримані на інтервалі 150 років для вибірки з 17100 гребель)

Вид аварії	Кількість аварій	Повні ймовірності	Щорічні ймовірності
Р-1	84	0,0049	$3,28 \cdot 10^{-5}$
Р-2	118	0,0069	$4,62 \cdot 10^{-5}$
П-1	154	0,0090	$6,03 \cdot 10^{-5}$
П-2	70	0,0041	$2,74 \cdot 10^{-5}$
П-3	40	0,0023	$1,56 \cdot 10^{-5}$
Всі аварії	466	0,0273	$1,84 \cdot 10^{-4}$

Чи впливає на живучість гребель тип гідроспоруд? Відповідь на це питання важлива хоча б з точки зору уникнення спекуляцій на тему, які греблі більш надійні

Розділ 1. Екологічна безпека

– з бетону чи з ґрунтових матеріалів.

Якщо проаналізувати наявну статистику порушень на греблях [1-23], то у процентному відношенні найменше інцидентів фіксувалося на бетонних греблях гравітаційного типу (невелику частину з них складають також греблі з кам'яної кладки), а саме до 3,1% із загальної кількості гідроспоруд цього типу. Далі йдуть аркові (4,4%) і контрфорсні греблі (5,1%). Серед гребель із ґрунтових матеріалів найменше технологічних порушень фіксувалося на земляних греблях (6,7%). Потім зі значним розривом слідують кам'яно-накидні греблі (10,9%). Найбільш уразливими до різного роду порушень за статистикою виявилися кам'яно-земляні греблі (до 17% із загальної кількості гребель цього типу).

Однак ті ж кам'яно-земляні греблі за статистикою демонструють високу (у порівнянні з 17% рівнем «технологічної вразливості») живучість проти аварій, якщо врахувати те, що лише 4% серед всіх зареєстрованих ICOLD кам'яно-земляних гребель зазнали аварій.

Найбільш надійними проти аварій за статистикою слід визнати аркові греблі (1,5% аварій із загальної кількості гребель аркового типу), далі йдуть греблі гравітаційного типу (1,9%) та контрфорсні (2,2%). Найбільш схильними до аварій за статистикою виявляються кам'яно-накидні греблі (близько 5% таких, що зазнали аварій, із загальної кількості гребель даного типу). Найменше аварій серед гребель з ґрунтових матеріалів сталося на земляних греблях (2,5% із загальної кількості гребель цього типу).

Зіставимо відповідні статистичні оцінки, що відносяться до аварійності гребель різного типу, з наведеними вище статистичними оцінками порушень в залежності від типу гідроспоруд.

Для кількісної оцінки живучості гребель на основі зіставлення статистичних оцінок аварійності зі статистичними оцінками порушень пропонується використовувати наступний статистичний коефіцієнт:

$$K_v = 1 - \frac{n_{acc}}{n_{inc}}$$

де n_{acc} , n_{inc} – кількість гребель, що зазнали аварій, та загальна кількість порушень на греблях заданого типу, що передували цим аваріям, відповідно.

Тут коефіцієнт живучості K_v визначається як доповнення до одиниці статистичного коефіцієнта аварійності, що був запропонований А.Ф. Сільвейрою [20]. Назвемо K_v статистичним коефіцієнтом живучості гребель проти переходу інцидентів в аварії.

Так, за даними ICOLD [1] на 1984 р. серед $n_{inc} = 1369$ серйозних порушень на греблях з ґрунтових матеріалів $n_{acc} = 82$ випадки супроводжувалися проривом

напірного фронту. Для бетонних гребель кількість порушень і аварій відповідно становлять: $n_{inc} = 734$, $n_{acc} = 26$. Маємо статистичні коефіцієнти живучості проти прориву напірного фронту при порушеннях: для ґрунтових гребель 0,94, для бетонних гребель 0,96. Отримані оцінки можуть свідчити про дещо меншу живучість ґрунтових гребель в порівнянні з бетонними проти прориву напірного фронту.

У табл. 3 наводяться статистичні ймовірності інцидентів та аварій на греблях основних типів, а в табл. 4 – статистичні коефіцієнти живучості гідроспоруд відповідних типів проти переходу інцидентів в аварії.

Таблиця 3

Статистичні ймовірності інцидентів (порушень та аварій) на греблях (оцінки отримані на інтервалі 150 років)

Греблі	Кількість інцидентів, %	Ймовірності інцидентів	
		Повні	Щорічні
Гравітаційні	3,1	0,031	0,00021
Аркові	4,4	0,044	0,0003
Контрфорсні	5,1	0,051	0,000349
Земляні	6,7	0,067	0,000462
Кам'яно-земляні	17	0,17	0,001241
Кам'яно-накидні	10,9	0,109	0,000769

Таблиця 4

Статистичні ймовірності аварій на греблях різних типів та статистичні коефіцієнти живучості κ_v проти переходу інцидентів в аварії

Греблі	Кількість аварій, %	Ймовірності аварій		κ_v
		Повні	Щорічні	
Гравітаційні	1,9	0,019	0,000128	0,39
Аркові	1,5	0,015	0,000101	0,66
Контрфорсні	2,2	0,022	0,000148	0,57
Земляні	2,5	0,025	0,000169	0,63
Кам'яно-земляні	4	0,04	0,000272	0,77
Кам'яно-накидні	5	0,05	0,000342	0,54

Далі в табл. 5 наводяться результати розрахунків щорічних статистичних ймовірностей виникнення порушень (інцидентів), аварій та руйнівних аварій на бетонних греблях, в табл. 6 – статистичні коефіцієнти живучості бетонних гребель проти переходу порушень в аварії $\kappa_{v(F|I)}$, переходу порушень в руйнівні аварії $\kappa_{v(A|I)}$, аварій – в руйнівні аварії $\kappa_{v(A|F)}$, а в табл. 7 – осереднених статистичних характеристик аварійності ґрунтових гребель. Всі оцінки були отримані на інтервалі

Розділ 1. Екологічна безпека

150 років. Використовувались дані [1, 22, 23].

Таблиця 5

Щорічні ймовірності порушень, аварій та руйнівних аварій на бетонних греблях

Типи гребель	Всі порушення	Всі аварії	Руйнівні аварії
Гравітаційні	0,00021	0,000128	0,000041
Аркові	0,0003	0,000101	0,000022
Контрфорсні	0,000349	0,000148	0,00012
Всі бетонні греблі	0,000239	0,000125	$4,54 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 6

Статистичні коефіцієнти живучості бетонних гребель проти переходу порушень в аварії $\kappa_{v(F/I)}$, переходу порушень в руйнівні аварії $\kappa_{v(A/I)}$, аварій – в руйнівні аварії $\kappa_{v(A/F)}$

Типи гребель	$\kappa_{v(F/I)}$	$\kappa_{v(A/I)}$	$\kappa_{v(A/F)}$
Гравітаційні	0,39	0,80	0,67
Аркові	0,66	0,92	0,78
Контрфорсні	0,57	0,65	0,18
Всі бетонні греблі	0,45	0,81	0,65

Таблиця 7

Щорічні статистичні ймовірності виникнення аварій та статистичні коефіцієнти живучості ґрунтових гребель проти переходу порушень в аварії $\kappa_{v(F/I)}$, переходу порушень в руйнівні аварії $\kappa_{v(A/I)}$, аварій – в руйнівні аварії $\kappa_{v(A/F)}$

Всі порушення	Всі аварії	Руйнівні аварії	$\kappa_{v(F/I)}$	$\kappa_{v(A/I)}$	$\kappa_{v(A/F)}$
0,000824	0,000261	$7,78 \cdot 10^{-5}$	0,68	0,90	0,70

За результатами проведених досліджень можна стверджувати, що статистичні оцінки живучості гребель залежать від виду матеріалів й типу гідроспоруд, а також від характеру аварій. Слід відзначити більш високу живучість бетонних гребель в порівнянні з греблями з ґрунтових матеріалів, коли мова йде про аварії, пов'язані з проривом напірного фронту. Однак у контексті аварійності загалом, із врахуванням заходів, що зазвичай реалізуються у випадку виникнення аварійних ситуацій на греблях, ґрунтові греблі в порівнянні з греблями з бетону виявляються більш живучими. Так, статистичні коефіцієнти живучості ґрунтових гребель при порушеннях проти переходу в аварії в залежності від типу гідроспоруд

знаходяться в межах 0,54÷0,77, тоді як для бетонних – в межах 0,39÷0,66.

Найменша живучість при порушеннях властива бетонним гравітаційним греблям (статистичний коефіцієнт живучості 0,39). При цьому характерно, що за статистикою порушення на гравітаційних греблях траплялись в найменшій кількості серед всіх типів гребель, а аварії – лише трохи частіше, ніж на аркових греблях. Однак отримані нами результати вказують на те, що хоча порушення на бетонних гравітаційних греблях траплялися найрідше, вони мали найбільш серйозні наслідки.

В той же час, саме кам'яно-земляні греблі, які за статистикою найчастіше пошкоджувалися, слід визнати найбільш живучим типом гребель при технологічних порушеннях. Наразі успішно будуються надвисокі греблі (висотою до 300 і більше метрів) цього типу, в тому числі в надзвичайно складних інженерно-геологічних умовах.

Досить високу живучість при порушеннях демонструють також земляні греблі, що є найбільш поширеним типом серед ґрунтових гребель, зокрема в Україні. Останнім часом в інформаційному просторі країни часто поширюється неперевірена, інколи відверто спекулятивна інформація про недостатню надійність гідроспоруд в Україні, причому в якості основного аргументу часто використовують тезу, що оскільки більшість гребель в країні є земляними, то вони – недостатньо надійні. Однак статистичні дані про аварії на греблях, зокрема отримані нами статистичні коефіцієнти живучості, свідчать про інше. Земляні греблі були і є одними з найбільш надійних гідроспоруд у світі.

* * *

1. ICOLD. Dam failures – statistical analysis. Bull. No. 99. Paris. 1995. –73 p.
2. ICOLD. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 1. Q. 76. 19-22 September. Beijing-China. 2000. –896 p.
3. Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. –СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. –591 с.
4. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. –СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003, 2004. Вдвухтомах. Т. 1. –553 с.
5. Gruner E. Dam disaster. Proc. ICE. Vol. 24. London, 1963. P. 47-60.
6. ICOLD. Lecon tirees des accidents de barrages// Gen. Rep. ICOLD. Paris, 1974.
7. Goubet A. Risques associes aux barrages// La Houille Blanche. 1979. N.8. P. 475-490.
8. Rißler P. Zur Sicherheitsdiskussion uber Talsperrendamme// Wasserwirtschaft. 1981. V.71. №7/6. S. 200-205.

Розділ 1. Екологічна безпека

9. Marinier G. Safety of dams in operation.// Trans. of the 14-th Cong. on Large Dams. 1982. Rio de Janeiro. Vol.1. Gen. Rep. Q52. P. 1471-1510.
10. Blind H. The Safety of Dams// Int. Water Power & Dam Construction. 1983. Vol. 35. No. 5. P. 17-21.
11. Silveira A.F. Deterioration in dams and reservoirs// Proc. of the 20-th IAHR Congress. Moscow. 1983. Vol. 2. P. 443-456.
12. ICOLD. Deterioration of dams and reservoirs. A.A. Balkema, 1984. –357 p.
13. Kalystyan E.S. Statistical analysis of distribution of concrete dam foundation failures// Proc. of the Int. Conf. on Safety of Dams/ Coimbra. 1984. P. 311-319.
14. Гогоберидзе М.И., Микашвили Ю.Н. и др. Риск повреждения и разрушения грунтовых плотин// Гидротехническое строительство. 1984. №4. С. 35-38.
15. Lebreton A. Les ruptures et accidents graves de barrages// La Houille Blanches. 1985. 6/7. P. 529-544.
16. Bury K.V., Kreuzer H. The assessment of risk for a gravity dam// Int. Water Power & Dam Construction. 1986. Vol. 38. No.12. P. 36-40.
17. Розанов Н.С., Царев А.И., Михайлов Л.П. и др. Аварии и повреждения больших плотин/ Под ред. А.А. Борового. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –126 с.
18. Ratiu M., Constantinescu C. Comportanea constructiilor si amenajarilor hidrotehnice. Editura Tehnica. Bucuresti. 1989.
19. Serafim J.L., Coutinho-Rodrigues J.M. Statistics of dam failures: a preliminary report// Int. Water Power & Dam Construction. 1989. Vol. 41. No. 4. P. 30-34.
20. Silveira A.F. Some considerations on the durability of dams// Int. Water Power & Dam Construction. 1990. Vol. 42. No. 2. P. 20-27.
21. ICOLD. Ageing of dams and appurtenant works. Bull. No. 93. Paris. 1994.–237 p.
22. ICOLD. Rehabilitation of dams and appurtenant works – State of the art and case histories. Bulletin 119. Appendix 1. Classification of reported failures. Paris, 2001. – 245 p.
23. Стефанишин Д.В. Статистичні оцінки аварійності гребель// Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. Вип. 3 (35). Рівне: НУВГП. 2006. С.111-117.

Отримано: 14.08.2012 р.