

УДК 626/627

**Кисляк О. О., аспірант, Мозговий А. О., к.т.н., доцент** (Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків)

## **ПОБУДОВА ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ПРОТИТИСКУ ПО ПІДОШВІ БЕТОННИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ГРЕБЕЛЬ**

**Побудовано функції математичного очікування, розподілу середньоквадратичного відхилення, фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель.**

**Ключові слова:** імовірність, протитиск.

**На надійність** бетонної гравітаційної греблі на скельній основі суттєво впливає взважуючий та фільтраційний протитиски, так як профільтована по тріщинах та порах скельної основи вода утворює підйомну силу, що діє на підшву споруди. Взважуючий протитиск – гідростатичний тиск ваги стовпу води висотою, яка дорівнює глибині від рівня нижнього б'єфа до точки підшви споруди; фільтраційний – гідродинамічний тиск, який виникає у результаті створення напору на греблю.

**Згідно зі статистичними даними** більше 50% аварій гідротехнічних споруд відбувається внаслідок неврахованих при проектуванні руйнівних явищ, обумовлених фільтрацією води в самій споруді та його основи [1]. Згідно з [2] при висоті меншою за 30 метрів аварії зазнали 8% бетонних гравітаційних гребель. При висоті від 30 до 60 метрів аварії зазнали 10% бетонних гравітаційних гребель. При висоті від 60 до 100 метрів аварії зазнали 25% бетонних гравітаційних гребель.

Скельні основи майже водонепроникні унаслідок низької пористості (0,5...0,8%). У скельних породах є системи тріщин, розміри яких змінюються від декількох міліметрів, до декількох метрів. Тріщини виникають унаслідок тектонічних процесів, вивітрювання, механічних пошкоджень. Також, тріщини можуть бути заповнені уламковими матеріалами. Коефіцієнт фільтрації породи збільшується при збільшенні довжини і ширини тріщини. При дрібних тріщинах фільтраційні розрахунки виконують в припущенні, що фільтрація відбувається по закону Дарсі, тобто має ламінарний характер [3]. При цьому не враховується анізотропія породи. При значних розмірах тріщини фільтрація носить турбулентний характер.

Якщо до розв'язання задач фільтрації застосувати статистичний підхід, тоді випадковість розташування тріщин дає змогу не звертати увагу на їх форму [4].

Спостереження за фільтрацією під греблею використовують для судження о величинах фільтраційних тисків, діючих на підшву основи бетонного флютбету, об ефективності понурів, шпунтів та зуб'їв у роботі погашення фільтраційного напору, а також о роботі зворотних фільтрів.

При визначенні характеристик фільтраційного потоку необхідно враховувати вплив: дренажних і протифільтраційних пристроїв; порожнин та розширених швів у основі і потерн у тілі греблі; водопроникності бетону; напружено-деформованого стану греблі і основи; температури підземних вод і їх мінералізації.

**Досліджені експериментально** значення протитиску відрізняються від нормативних. Це пояснюється наявністю тріщин, каверн чи порожнин в основі які змінюють фільтрацію.

Засмічення дренажних приладів також деформує низову частину епюра протитиску, збільшуючи тиск на флютбет.

Унаслідок тріщинуватості порід основи гідроспород епюра протитиску інколи приймає пілкоподібний вид.

В якості протифільтраційних засобів виконують протифільтраційні зависи, цементацію, дренаж, шпунти, понур. Найбільш ефективним засобом для зменшення розвантажувальної дії протитиску є сумісне використання цементації та дренажу.

**В рамках** даної роботи було заплановано і виконано дослідження розподілу фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель, за літературними джерелами у період із 1913 по 1955, у тому числі оброблені результати сучасних робіт співробітників Укргідропроєкта на греблях Дніпровського каскаду.

Найбільш інформативний експериментальний матеріал представлений у роботі В.М. Ліпкінд [5] в якій оброблено результати за спостереженнями фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі різних країн (див. рис. 1).

Результати дослідження розподілу фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель зведені у таблиці 1 та 2.

На сьогодні для оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель використовується детерміністичний за формою, підхід заснований на методі граничних станів. В даній роботі застосовано підхід пов'язаний з використанням імовірнісних методів сучасної теорії надійності.

Згідно методу граничних станів, урахування випадкових навантажень і впливів, показників властивостей матеріалів і ґрунтів, розраху-

нкових термінів експлуатації споруд, а також умов їх роботи здійснюється на основі системи нормативних коефіцієнтів [10].

Інтенсивність тиску води на зовнішній грані греблі приймається рівною:

$$I_p = p' (1 - \alpha_{2,d}), \quad (1)$$

де  $p'$  – гідростатичний тиск;

$\alpha_{2,d}$  – коефіцієнт корисної площі протитиску в матеріалі греблі.

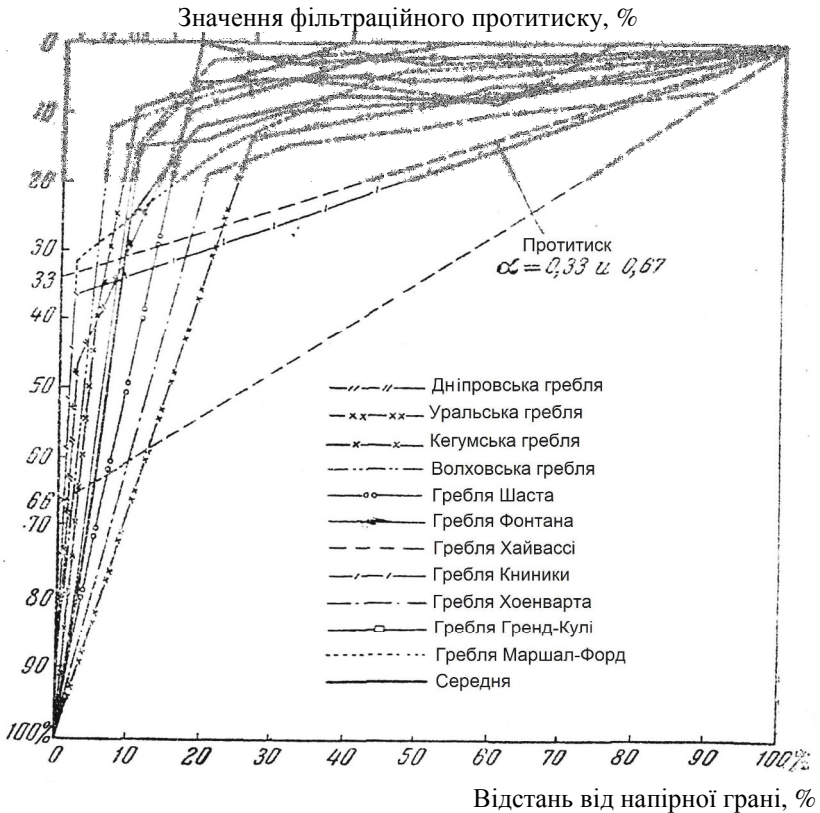


Рис. 1. Епюри протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі за даними [5]

Таблиця 1

Статистичні дані натурних вимірювань фільтраційних протитисків в основах бетонних гравітаційних гребель

№ з/п	Значення зафіксованого фільтраційного протитиску у % від повного напору (в чисельнику – напір, у знаменнику – відстань від напірної грані по довжині основи греблі), градація у %										Найменування греб- лі, країна	Період спостережень	Джерело інформації
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	80-71	81-90	91-100			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	$\frac{100}{0}$	$\frac{14}{7}$		$\frac{38}{5}$						$\frac{0}{100}$	Брал-Рівер, США	1930	[8]
2	$\frac{100}{0}$	$\frac{18}{35}$					$\frac{62}{18}$			$\frac{0}{100}$	Медина, США	1913	[8,9]
3	$\frac{100}{0}$	$\frac{12}{27}$								$\frac{0}{100}$	Піт-Рівер, США	1925	[7-9]
...													
30	$\frac{100}{0} ; \frac{0}{29} ; \frac{2}{20} ; \frac{5}{77} ; \frac{6}{38}$		$\frac{27}{12}$							$\frac{0}{100}$	Шаста, США	1947	[6-8]

Технічні показники гребель на яких виконані натурні спостереження

Таблиця 2

№ з/п	Породи основи	Висота греблі, м	Напір на греблю, м	Глибина дренажу, м	Глибина цементацийної завіси, м	Відстань дренажу від напірної грані, м (в долях)	Відстань цементацийної завіси від напірної грані, м (в долях)	Джерело інформації	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	зелений порфір	33				3,16		[8]	
2	вапняки	54	48	9,15		6,7		[8,9]	
3	вулканічний туф, базальтова лава	44	35	7,5	20-50	4,3		[7-9]	
...									
30	метаандезит	183	146	17	50	(0,21)	(0,12)	[6-8]	

Силовий вплив фільтруючої води враховується лише у вигляді протитиску і об'ємних сил в основі греблі при розрахунках гребель СС2 класу висотою більшою за 60 м, розташованих на скельній основі.

Силовий вплив фільтруючої води слід враховувати тільки у вигляді протитиску: при розрахунках гребель усіх класів висотою меншою за 60 м розташованих на скельній основі; при розрахунках гребель СС3 і СС2 класів висотою більшою за 60 м розташованих на скельній основі.

На підшві греблі гідродинамічний тиск визначається за формулою:

$$p = (h_v + h_f) \gamma_w, \quad (2)$$

де  $h_v$  – ордината п'єзометричного напору у точці що розглядається під взаємодією впливом нижнього б'єфу;

$h_f$  – ордината п'єзометричного напору у точці що розглядається, при фільтрації під дією розрахункового напору  $H_{\text{д}}$ ;

$\gamma_w$  – питома вага води.

Для гребель висотою меншою за 60 м на скельних основах значення  $h_f$  припускається знаходити по епюрам, при цьому величину  $h_f$  по висі цементаційної завіси і по висі дренажних приладів потрібно приймати за даними [10].

Розрахунки загальної фільтраційної міцності ґрунтів основи слід виконувати при осереднених градієнтах напору у розрахунковій області фільтрації відповідно до [10].

Розрахунки місцевої міцності протифільтраційних елементів греблі (понуру, зуб'ів, ін'єкційної завіси) та ґрунту основи слід виконувати у відповідності до [10] при критичних градієнтах напору: на ділянці виходу фільтраційного потоку у нижній б'єф і у дренажні прилади; у місцях розташування великих тріщин.

При визначенні характеристик фільтраційного потоку необхідно враховувати вплив: дренажних і протифільтраційних пристроїв; порожнин та розширених швів у основі і потерн у тілі греблі; водопроникності бетону; напружено-деформованого стану греблі і основи; температури підземних вод і їх мінералізації.

Імовірнісна оцінка надійності бетонних гравітаційних гребель може бути отримана імовірнісними методами сучасної теорії надійності.

Фільтраційний протитиск в основі греблі можливо представити нормальним законом розподілу випадкової функції [11, 12]. Параметрами якого є математичне очікування та середньоквадратичне відхилення, функція розподілу фільтраційного протитиску по довжині греблі.

Експериментально отримано більш 120 точок значень фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній

основі, було підбрано декілька функцій розподілу фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі. Методом найменших квадратичних відхилень обрано криву з найменшим квадратичним відхиленням. Дані наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Значення середньоквадратичних відхилень для функцій розподілу

№ з/п	Рівняння функції	Значення параметрів	Значення середньоквадратичних відхилень
1	$y = \left(1 - \frac{a}{x}\right)^b$	$a = 0,425$ $b = 2,041$	0,02
2	$y = a^x \cdot (1-x)^{1 \cdot b}$	$a = 4,741 \cdot 10^{-4}$ $b = 0,989$	0,025
3	$y = \frac{(1-x)^a}{(1+x)^b}$	$a = 2,573$ $b = 6,174$	0,025

В табл. 3  $y$  – значення протитиску, м;  $x$  – відстань від напірної грані, м;  $a, b$  – константи,  $a = 0,425, b = 2,041$ .

Таким чином рівняння наведене у рядку 1 у табл. 3 найкраще описує характер розподілу протитиску по довжині основи греблі.

Отримані результати представлені на рис. 2.

Характер розподілу математичного очікування фільтраційного протитиску отримано на основі результатів натурних спостережень в основі бетонних гребель. Імовірнісна модель фільтраційного протитиску представляє собою функцію випадкових величин, яка характеризується функцією математичного очікування  $y$  та функцією середньоквадратичних відхилень  $s$  по довжині основи греблі.

Графік функції середньоквадратичних відхилень представлено на рис. 3.

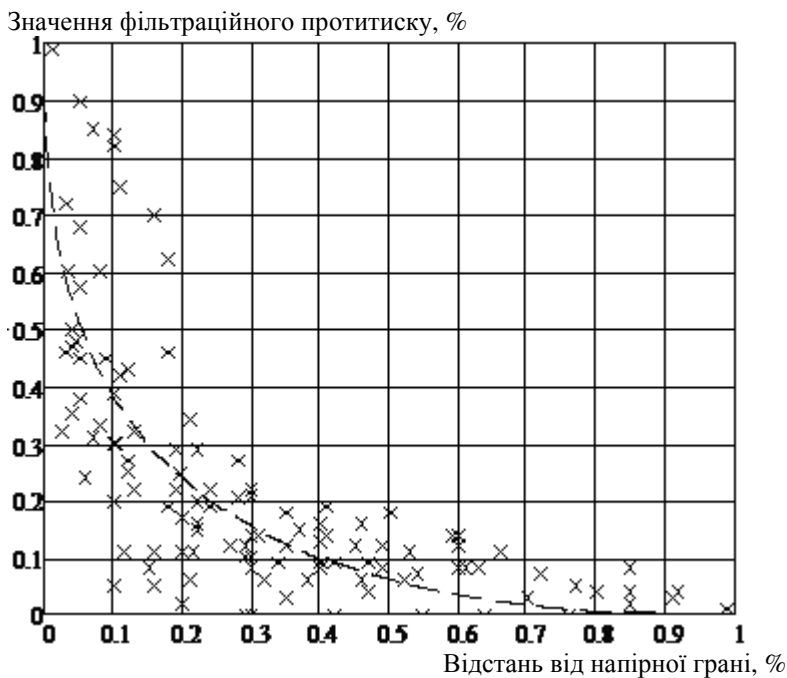
Для отриманої сукупності точок середньоквадратичного відхилення функції математичного очікування від отриманих експериментальних значень фільтраційного протитиску методом найменших квадратів підбрана функція розподілу середньоквадратичного відхилення  $s$ .

Вид функції:

$$s = \frac{x}{c^2} \cdot e^{\frac{-x^2}{2}} \cdot d^2, \quad (3)$$

де  $c, d$  – константи,  $c = 2,053, d = -0,144$ .

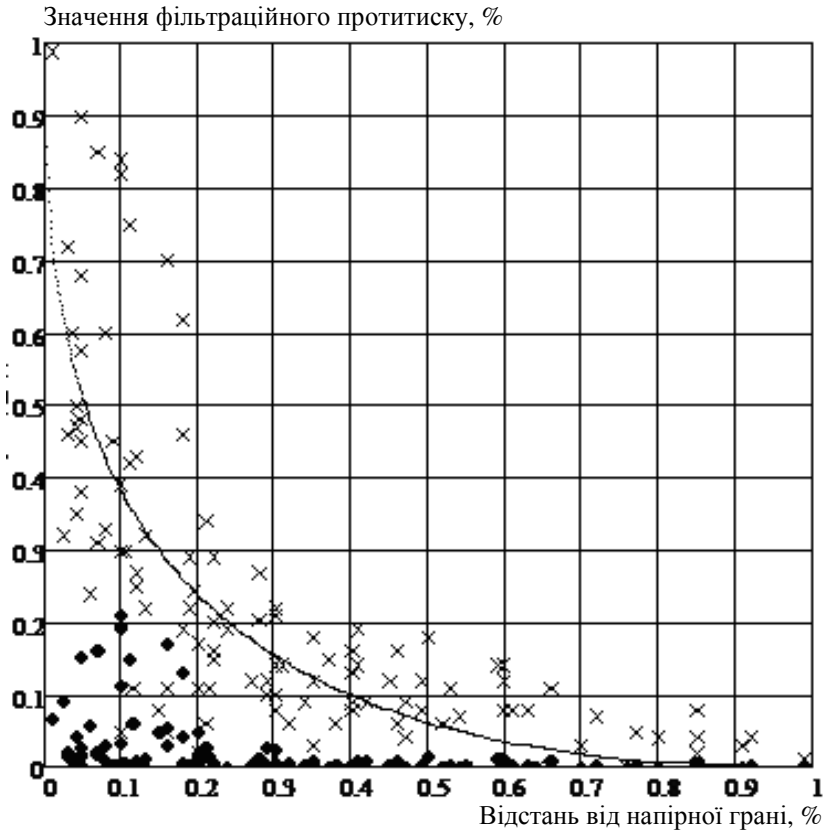
Отриманий результат представлено на рис. 4.



xxx – значення фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель;

— — — функція математичного очікування фільтраційного протитиску

Рис. 2. Функція математичного очікування фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель



••• - значення середньоквадратичного відхилення;  
— - функція математичного очікування фільтраційного протитиску

Рис. 3. Розташування значень середньоквадратичного відхилення

За результатами даної роботи були отримані функція математичного очікування фільтраційного протитиску по підшві бетонних гравітаційних гребель, функція розподілу середньоквадратичного відхилення.

Випадкова функція фільтраційного протитиску в основі бетонних гравітаційних гребель на скельній основі може бути представлена законом нормального розподілу із визначеними параметрами функцій розподілу математичного очікування  $y$  і середньоквадратичними від-

хиленнями  $s$ .

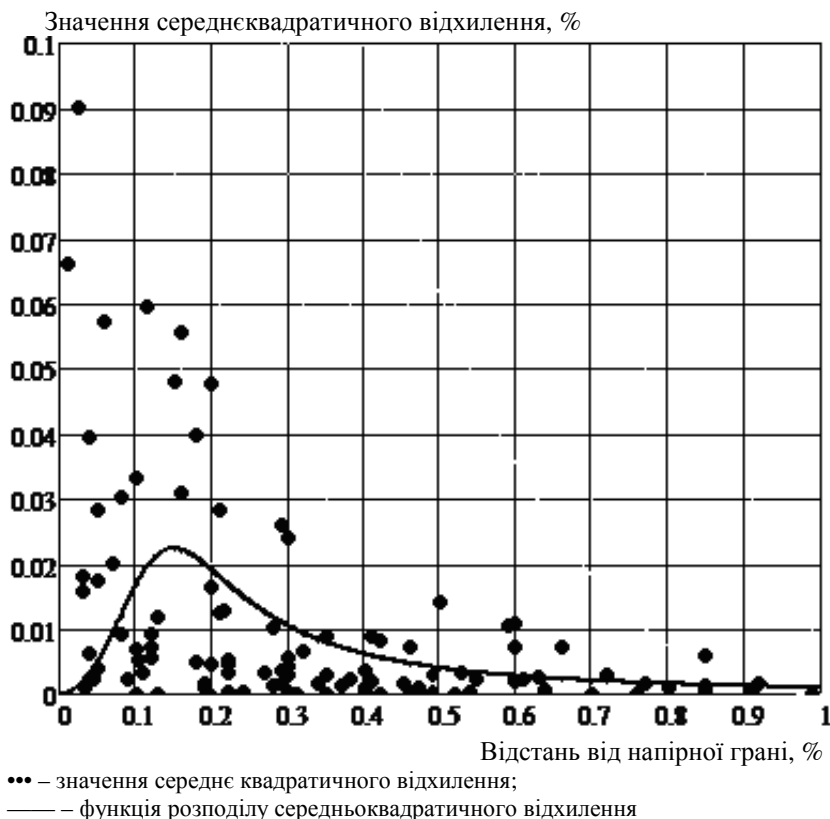


Рис. 4. Функція розподілу середньоквадратичного відхилення

Отримані результати можуть бути використані при виконанні імовірнісних розрахунків надійності бетонних гравітаційних гребель.

1. Известия всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева, т. 84, – М.-Л. : изд. «Энергия», 1967. – С. 269-276.
2. ICOLD. Dam failures – Statistical Analysis. Bulletin № 99. 1995.
3. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения Ч. 1. / Гришин М. М. – М. : Высш. Школа, 1979. – 615 с.
4. Розанов Н. П. Гидротехнические сооружения. / Розанов Н. П., Бочкарев Я. В., Лапшенков В. С. – М. : Агропромиздат, 1985. – 432 с., ил.
5. Липкинд В. М. Бетонные плотины гидроэлектростанций. / Липкинд В. М. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 246 с.
6. Адамович А. Н., Колтунов Д. В. «Цементация оснований гидросооружений» – М.-Л. : изд. «Энергия», 1964. – 515 с.
7. Гинзбург М. Б. «Определение противодавления в гравитационных плотинах

на скальном основани» – М. : Госэнергоиздат, 1958. – 65 с. **8.** В. Н. Дворяшин «Фильтрация гравитационных плотин на скальных основаниях» – М.-Л. : 1938. – 238 с. **9.** Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Беллендир Е. Н., Ивашинцов Д. А., Стефанидин Д. В., Финогенов О. М., Шульман С. Г. – СПб. : Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» т. 1, 2003. – 554 с. **10.** СНиП 2.06.06-85. Плотины бетонные и железобетонные. – М. : Госстрой СССР, 1986. – 40 с. **11.** Векслер Ф. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / Векслер Ф. Б., Ивашинцов Д. А., Стефанишин Д. В. – СПб. : Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. – 592 с. **12.** Надежность накопителей промышленных и бытовых отходов / Сольский С. В., Стефанишин Д. В., Финагенов О. М., Шульман С. Г. – СПб. : Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2006. – 302 с.

Рецензент: д.т.н., начальник відділу розрахункового обґрунтування споруд Вайнберг О. І. (ПАТ "УКРГІДРОПРОЕКТ", м. Харків)

---

**Kislyak O. O., Post-graduate Student, Mozhovyi A. O., Candidate of Engineering, Associate Professor** (Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv)

### **CONSTRUCTION THE FUNCTION OF FILTRATION BACKPRESSURE DISTRIBUTION ON THE SOLES OF THE CONCRETE GRAVITATIONAL DAMS**

**We construct a function of the expectation, the distribution function root mean square deviation, the distribution function of filtration backpressure on the soles of concrete gravity dams.**

**Key words: probability, backpressure.**

---

**Кисляк А. А., аспирант, Мозговой А. А., к.т.н., доцент** (Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков)

### **ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПРОТИВОДАВЛЕНИЕ ПО ПОДОШВЕ БЕТОННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН**

**Построено функции математического ожидания, распределения среднеквадратического отклонения, фильтрационного противодействия по подошве бетонных гравитационных плотин.**

**Ключевые слова: вероятность, противодействие.**

---