

УДК 627.132 : 004.15

© Д.В. Стефанишин, д-р техн. наук

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ

ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ ВОДОУТРИМУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЕКРАНУ ВЕРХОВОГО БАСЕЙНУ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС ЗА ДАНИМИ ГЕОТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

Здійснено імовірнісний аналіз водоутримуючої здатності екрану верхового басейну Дністровської ГАЕС за даними геотехнічного контролю з урахуванням особливостей його конструкції та протифільтраційних властивостей глинистих ґрунтів.

Ключові слова: імовірнісний аналіз, водоутримуюча здатність, ґрунт, екран дна басейну, полімерна мембрана

Дністровська ГАЕС, одна з найбільших ГАЕС у світі й найпотужніша в Європі, будується в Чернівецькій області на р. Дністер з 1983 р. Перший запуск на повну потужність першого агрегату на ГАЕС було здійснено 10 січня 2009 р. З 22 грудня 2010 р. на агрегат було отримано сертифікат відповідності. Його потужність у турбінному режимі складає 324 МВт, в насосному – 421 МВт. Для порівняння, встановлена потужність усієї Київської ГАЕС (шість агрегатів) у турбінному режимі складає 235,5 МВт, Київської ГЕС (20 агрегатів) – 408,5 МВт.

Вид на будівництво Дністровської ГАЕС показано на рис. 1. Усього на Дністровській ГАЕС проектом передбачено введення 7 оборотних агрегатів сумарною потужністю 2268 МВт у турбінному і 2947 МВт у насосному режимах. Основними її функціями є регулювання частоти і графіка навантажень в енергосистемі України, формування аварійного резерву електроенергії [1].

Одна з основних споруд Дністровської ГАЕС – верховий басейн – водойма, що розташовується на плато на висоті більш ніж 140 м над природним рівнем води в р. Дністер. Загальна площа верхового басейну ГАЕС складає більше 250 га. Басейн огорожується лівобережною та правобережною дамбами загальною довжиною 7,5 кілометрів і висотою 20-25 метрів. З метою уникнення фільтрації з верхового басейну проектом передбачено облаштування протифільтраційного екрану.

Екран дна першої черги басейну, загальною площею 63 га, для пуску першого агрегату, виконувався з глинистих ґрунтів товщиною 2 м. Екран дна другої черги басейну, загальною площею 210 га, у зв'язку з дефіцитом однорідних глинистих ґрунтів виконувався з використанням полімерної мембрани. Комбінований екран другої черги складається з насипу підстиляючого (сарматські глини), товщиною 0,5 м, й захисного (неогенові глини), товщиною 0,5

м, шарів глинистих ґрунтів та розміщеної між ними полімерної мембрани товщиною 2 мм, підсиленої двома шарами геотекстилю.



Рис. 1 - Вид з лівого берега Дністра на будівництво Дністровської ГАЕС



Рис. 2 - Будівництво другої черги екрану верхового басейну Дністровської ГАЕС (укладка захисного кам'яного накиду поверх екрану)

Вид на будівництво другої черги екрану верхового басейну показано на рис. 2. У жовтні 2012 р. була розібрана тимчасова дамба, що відгороджувала першу чергу басейну, і верховий басейн Дністровської ГАЕС було повністю введено в експлуатацію.

У ході інженерних вишукувань та при проектуванні гідроспоруд Дністровської ГАЕС було встановлено, що основним фактором, що забезпечує надійну й безпечну експлуатацію верхового басейну ГАЕС є водонепроникність екрану, призначенням якого є недопущення обводнення Дністровського схилу на ділянці основних споруд [1]. Основною вимогою до екрану верхового басейну Дністровської ГАЕС є вимога максимально можливої водоутримуючої здатності, за якої фільтрація через екран має бути не більшою за інфільтраційний притік у товщу порід, який відбувався би в природних умовах за рахунок атмосферних вод [1, 2].

Для забезпечення відповідної водонепроникності екрану верхового басейну ГАЕС максимально допустиме значення коефіцієнта фільтрації глинистих ґрунтів, що уклалися в дно екрану першої черги, приймалося $\sim 10^{-5}$ м/добу ($\sim 10^{-8}$ см/с) [2]; максимально допустиме

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

значення коефіцієнта фільтрації глин підстилаючого й захисного шарів на ділянці дна екрану другої черги водойми, а також глинистих ґрунтів похилої частини екрану в межах лівобережної і правобережної огорожувальних дамб водойми обмежувалося величиною 10^{-4} м/добу ($\sim 10^{-7}$ см/с).

Критерій надійності екрану верхового басейну Дністровської ГАЕС згідно з вимогою максимально можливої водоутримуючої здатності, за якої фільтрація через екран має бути не більшою за інфільтраційний притік в товщу порід, який відбувався би в природних умовах за рахунок атмосферних вод, може бути записаний у вигляді:

$$h_{\phi} \leq h_{инф}, \quad (1)$$

де h_{ϕ} – шар фільтрації через екран, мм; $h_{инф}$ – шар інфільтрації атмосферних вод через покривні породи в природних умовах, мм.

Нехай $k_{\phi,est}$ – деяке випадкове значення дійсного коефіцієнта фільтрації ґрунту екрану, k_{ϕ}^{\max} – максимально допустиме граничне значення коефіцієнта фільтрації, встановлене проектом. Тоді ймовірність порушення заданої водоутримуючої здатності екрану за умови (1) буде:

$$P(E, k_{\phi}, h_{инф}) = P(k_{\phi,est} \geq k_{\phi}^{\max}) \cdot P(h_{инф} < h_{\phi}^{\max}), \quad (2)$$

або

$$P(E, k_{\phi}, h_{инф}) = G(k_{\phi}^{\max}) \cdot F(h_{\phi}^{\max}), \quad (3)$$

де $P(k_{\phi,est} \geq k_{\phi}^{\max})$ – ймовірність того, що дійсне значення коефіцієнта фільтрації $k_{\phi,est}$ через екран виявиться більшим ніж максимально допустиме k_{ϕ}^{\max} ; $G(k_{\phi}^{\max})$ – відповідно, функція забезпеченості (ймовірності перевищення) $k_{\phi,est}$ при значенні $k_{\phi,est} = k_{\phi}^{\max}$; $P(h_{инф} < h_{\phi}^{\max})$ – ймовірність того, що природний інфільтраційний притік у товщу порід за рахунок атмосферних вод міг би виявитися меншим за фільтрацію при k_{ϕ}^{\max} ; $F(h_{\phi}^{\max})$ – відповідно, інтегральна функція розподілу шару інфільтрації атмосферних опадів $h_{инф}$ в природних умовах при значенні $h_{инф} = h_{\phi}^{\max}$, де h_{ϕ}^{\max} – шар фільтрації при k_{ϕ}^{\max} .

При прогнозуванні шарів інфільтрації атмосферних опадів в районі розміщення Дністровської ГАЕС було використано ряд даних спостережень за атмосферними опадами на гідрометеорологічній станції Озерна, Новодністровськ, з 2004 по 2011 рік. Прогнозування здійснювалося за методикою О.В. Огнєвського [3]), згідно з якою коефіцієнт втрат атмосферних опадів на випаровування приймався рівним: 0,5 – для весняного періоду; 0,8 – для літа; 0,6 –

для зимового періоду. При цьому, з врахуванням того, що в результаті будівництва поверхневий стік за межі верхового басейну ГАЕС став неможливим, кількість інфільтрації встановлювалася як різниця між величиною опадів та втрат на випаровування. На основі ряду шарів інфільтрації $h_{\text{инф}}$ для періоду спостережень з 2004 по 2011 рік було отримано наступні статистичні характеристики природної інфільтрації атмосферних вод: середнє – 18,15 мм; середнє квадратичне відхилення (стандарт) – 13,08 мм; коефіцієнт варіації – 0,72; коефіцієнт асиметрії – 1,29. Інтегральні криві ймовірності розрахункових шарів природної інфільтрації атмосферних вод – емпірична та апроксимуюча аналітична крива закону розподілу Пірсона III типу (арифметичний розподіл) – наводяться на рис. 3.

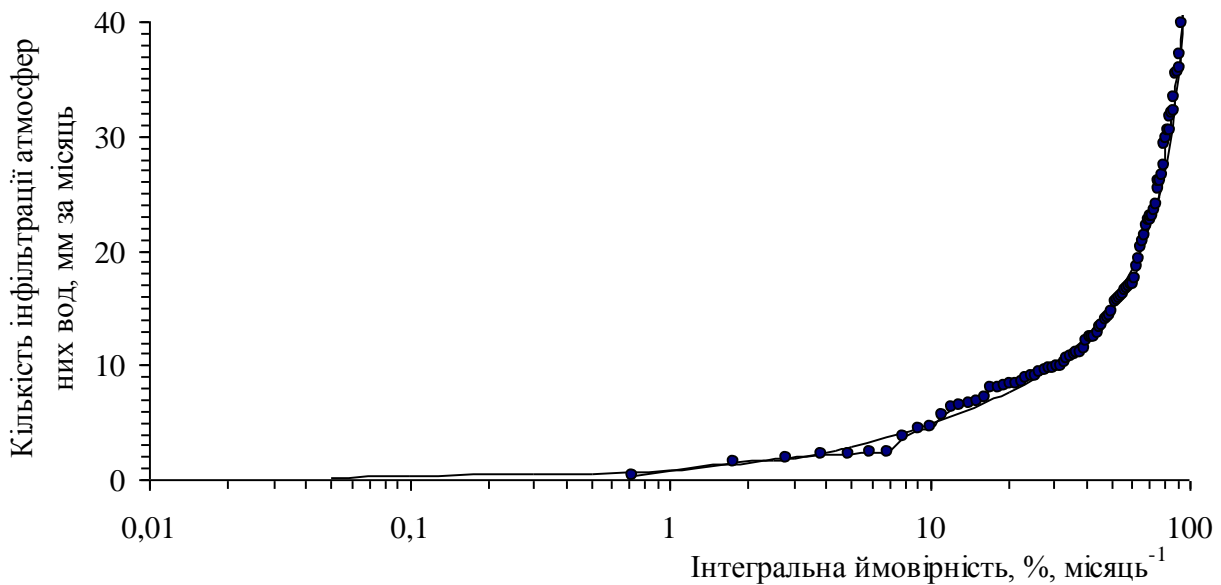


Рис. 3 - Емпірична та аналітична (закон Пірсона III типу, арифметичний розподіл) інтегральні криві ймовірності розрахункових шарів інфільтрації атмосферних опадів

У результаті фільтраційних розрахунків були встановлені наступні розрахункові значення $h_{\text{инф}} = h_{\text{ф}}^{\text{max}}$ шарів природної інфільтрації атмосферних опадів в природних умовах, при зменшенні яких умова (1), якщо коефіцієнт фільтрації через глинистий ґрунт екрану виявиться рівним $k_{\text{ф}}^{\text{max}}$, порушуватиметься:

- для ділянки дна екрану першої черги при $k_{\text{ф}}^{\text{max}} = 1,13 \cdot 10^{-8}$ см/с ймовірністю перевищення $G(k_{\text{ф}}^{\text{max}}) = 10\%$ (див. результати моделювання в [2]) та при товщині екрану 2 м відповідне розрахункове значення шару інфільтрації складає 0,25 мм/місяць; значення його інтегральної функції ймовірності $F(h_{\text{ф}}^{\text{max}}) = 0,05\%$, місяць⁻¹ або $F(h_{\text{ф}}^{\text{max}}) = 6 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹;

- для похилої частини екрану на ділянках лівобережної та правобережної огорожувальних дамб при $k_{\text{ф}}^{\text{max}} = 10^{-4}$ м/добу ($1,157 \cdot 10^{-7}$ см/с) та при товщині екрану 3 м відповідне розрахункове значення шару інфільтрації $h_{\text{инф}} = 1,68$ мм/місяць; значення його інтегральної функції ймовірності $F(h_{\text{ф}}^{\text{max}}) = 2,5\%$, місяць⁻¹ або $F(h_{\text{ф}}^{\text{max}}) = 0,262$, рік⁻¹;

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

- для ділянки дна екрану другої черги при $k_{\phi}^{\max} = 10^{-4}$ м/добу ($1,157 \cdot 10^{-7}$ см/с) відповідне розрахункове значення шару інфільтрації через один з шарів глинистого ґрунту комбінованого екрану, при товщині шару ґрунту 0,5 м, $h_{\text{инф}} = 10,07$ мм/місяць; значення його інтегральної функції ймовірності $F(h_{\phi}^{\max}) = 33\%$, місяць⁻¹ або $F(h_{\phi}^{\max}) = 0,992$, рік⁻¹.

Введемо наступні позначення випадкових подій, пов'язаних з порушенням водоутримуючої здатності глинистих ґрунтів ділянок екрану.

Нехай подія E_1 – порушення водоутримуючої здатності глинистих ґрунтів ділянки дна екрану в межах першої черги; E_2 – порушення водоутримуючої здатності глинистих ґрунтів похилої частини екрану в межах лівобережної та правобережної дамб огороження; $E_{3,1}$ – порушення водоутримуючої здатності ґрунтів підстиляючого шару на ділянці дна екрану другої черги басейну; $E_{3,2}$ – порушення водоутримуючої здатності ґрунтів захисного шару на ділянці дна екрану другої черги басейну.

Повна щорічна ймовірність порушення водоутримуючої здатності глинистих ґрунтів ділянки дна екрану в межах першої черги (подія E_1) за умови (1) з врахуванням того, що на цій ділянці значення відповідних ймовірностей $G(k_{\phi}^{\max}) = 0,1$, $F(h_{\phi}^{\max}) = 6 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹, згідно з формулою (2) буде: $P(E_1, k_{\phi}, h_{\text{инф}}) = 6 \cdot 10^{-4}$, рік⁻¹.

Для оцінки повних щорічних ймовірностей порушення водоутримуючої здатності ґрунтів похилої частини екрану (подія E_2) та дна екрану в межах другої черги верхньої водойми ГАЕС (події $E_{3,1}$, $E_{3,2}$) за умови (1) здійснювалося імовірнісне моделювання коефіцієнтів фільтрації глинистих ґрунтів, що уклалися на цих ділянках, на основі даних геотехнічного контролю.

Результати імовірнісного моделювання як випадкової величини коефіцієнта фільтрації глинистих ґрунтів, що уклалися на похилій частині екрану в межах лівобережної та правобережної дамб огороження, у вигляді емпіричної та аналітичної функцій забезпеченості (ймовірності перевищення) наведені на рис. 4.

Аналізувався ряд даних з 288 елементів, який був сформований за результатами багатofакторного аналізу даних геотехнічного контролю на основі математичного планування експерименту (дані к. т. н. О.В. Жеребятьєва). Було встановлено, що середнє ряду \bar{x} оцінюється величиною $6,41 \cdot 10^{-6}$ м/добу, середнє квадратичне відхилення $\sigma_x = 1,354 \cdot 10^{-5}$ м/добу, коефіцієнт варіації величиною 2,11 (211%), коефіцієнт асиметрії величиною 8,664. Враховуючи досвід моделювання коефіцієнта фільтрації на ділянці дна екрану першої черги [2], де було показано, що коефіцієнт фільтрації як випадкова величина підпорядковується логарифмічному закону розподілу, було проведено моделювання ряду, складеного з логарифмів значень коефіцієнтів фільтрації. При цьому було встановлено, що кращою моделлю розподілу коефіцієнтів фільтрації глинистих ґрунтів, що уклалися на похилій частині екрану, буде закон розподілу Гумбеля I типу для їх логарифмів з параметрами (встановленими для ряду логарифмів значень коефіцієнта фільтрації) $\alpha = 1,486$, $u = -12,9055$ (рис. 4), де параметри

$$\alpha, u \text{ визначалися з формул } \bar{x} = u + \frac{0,5772}{\alpha}, \sigma_x = \sqrt{\frac{\pi^2}{6\alpha^2}}.$$

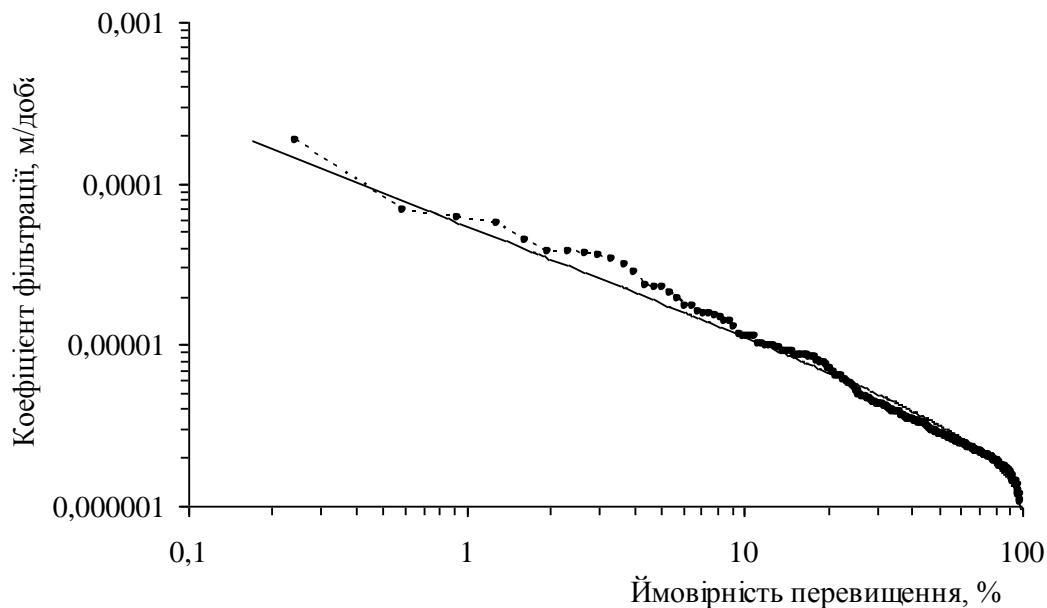


Рис. 4 - Емпірична та аналітична (закон Гумбеля I типу для логарифмів) функції забезпеченості (ймовірності перевищення) коефіцієнтів фільтрації глинистих ґрунтів, що уклалися на похилій частині екрану

Повна щорічна ймовірність порушення водоутримуючої здатності екрану в межах його похилої частини (подія E_2) за умови (1) з врахуванням того, що на цій ділянці значення відповідних ймовірностей $G(k_f^{\max}) = 0,412\%$ або $4,12 \cdot 10^{-3}$, $F(h_{\phi}^{\max}) = 0,262$, рік⁻¹, згідно з формулою (2) буде: $P(E_2, k_{\phi}, h_{\text{инф}}) = 1,08 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹.

При імовірнісному моделюванні коефіцієнта фільтрації для сарматських глин, що уклалися в підстилаючий шар на ділянці дна екрану другої черги басейну, аналізувався ряд з 6 елементів прямих геотехнічних випробувань коефіцієнта фільтрації.

Було встановлено, що середнє ряду оцінюється величиною $2,6 \cdot 10^{-4}$ м/добу, середнє квадратичне відхилення величиною $3,81 \cdot 10^{-4}$ м/добу, коефіцієнт варіації величиною 1,4 (140%), коефіцієнт асиметрії величиною 1,848. В якості модельного закону було вибрано закон Гумбеля I типу (арифметичний) з параметрами $\alpha = 3362,19$, $u = 9,1425$.

При імовірнісному моделюванні коефіцієнта фільтрації для неогенових глин, що уклалися в захисний шар на ділянці дна екрану другої черги басейну, аналізувався ряд з 25 елементів, який був сформований за результатами багатофакторного аналізу даних геотехнічного контролю на основі математичного планування експерименту (дані к. т. н. О.В. Жеребятьєва).

Було встановлено, що середнє ряду оцінюється величиною $3,72 \cdot 10^{-6}$ м/добу, середнє квадратичне відхилення величиною $3,02 \cdot 10^{-6}$ м/добу, коефіцієнт варіації величиною 0,812 (81,2%), коефіцієнт асиметрії величиною 2,84. В якості модельного закону було вибрано закон Гумбеля I типу (для логарифмів) з параметрами $\alpha = 2,1737$, $u = -12,965$.

Розділ 3. Науково-технологічна безпека та інтелектуальні ресурси

Результати моделювання коефіцієнтів фільтрації як випадкових величин для глинистих ґрунтів підстилаючого (сарматські глини) й захисного (неогенові глини) шарів, що уклалися на ділянці дна екрану в межах другої черги, у вигляді емпіричних та аналітичних функцій забезпеченості (ймовірності перевищення) наведені на рис. 5, 6.

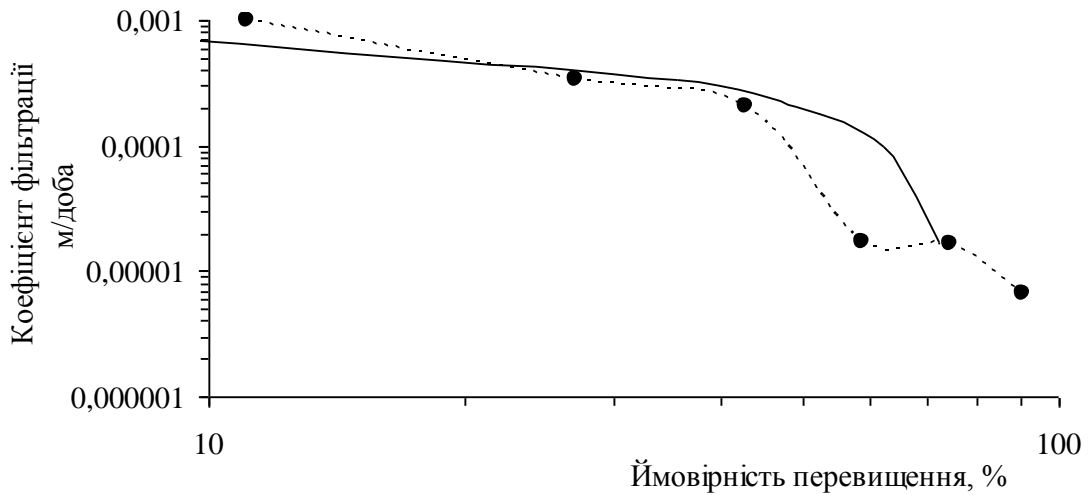


Рис. 5 - Емпірична та аналітична (закон Гумбеля I типу, арифметичний) функції забезпеченості (ймовірності перевищення) коефіцієнтів фільтрації сарматських глин, що уклалися в підстилаючий шар на ділянці дна екрану другої черги басейну

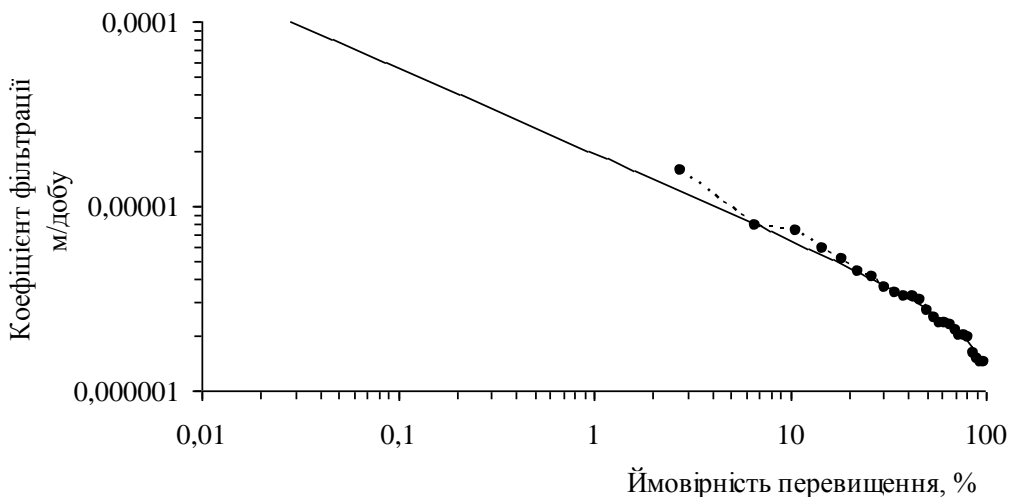


Рис. 6 - Емпірична та аналітична (закон Гумбеля I типу, для логарифмів) функції забезпеченості (ймовірності перевищення) коефіцієнтів фільтрації неогенових глин, що уклалися в захисний шар на ділянці дна екрану другої черги басейну

Повна щорічна ймовірність порушення водоутримуючої здатності ґрунтів підстилаючого шару на ділянці дна екрану другої черги басейну (подія $E_{3,1}$) за умови (1) з врахуванням

того, що значення відповідних ймовірностей $G(k_\phi^{\max}) = 62,2\%$ або $0,622$, $F(h_\phi^{\max}) = 0,992$, рік⁻¹, згідно з формулою (2) буде: $P(E_{3,2}, k_\phi, h_{\text{инф}}) = 0,617$, рік⁻¹.

Повна щорічна ймовірність порушення водоутримуючої здатності ґрунтів захисного шару на ділянці дна екрану другої черги басейну (подія $E_{3,2}$) за умови (1) з врахуванням того, що значення відповідних ймовірностей $G(k_\phi^{\max}) = 0,0285\%$ або $2,85 \cdot 10^{-4}$, $F(h_\phi^{\max}) = 0,992$, рік⁻¹, згідно з формулою (2) буде: $P(E_{3,2}, k_\phi, h_{\text{инф}}) = 2,83 \cdot 10^{-4}$, рік⁻¹.

Оцінка ймовірності обводнення Дністровського схилу внаслідок недостатньої водоутримуючої здатності ґрунтів екрану верхового басейну на різних ділянках виконувалася методом дерев відмов і несправностей [4]. Діаграма дерева відмов і несправностей для оцінки ймовірності сценарію «Обводнення Дністровського схилу на ділянці основних споруд в результаті недостатньої водоутримуючої здатності екрану верхового басейну», з результатами обрахунків, наведена на рис. 7.

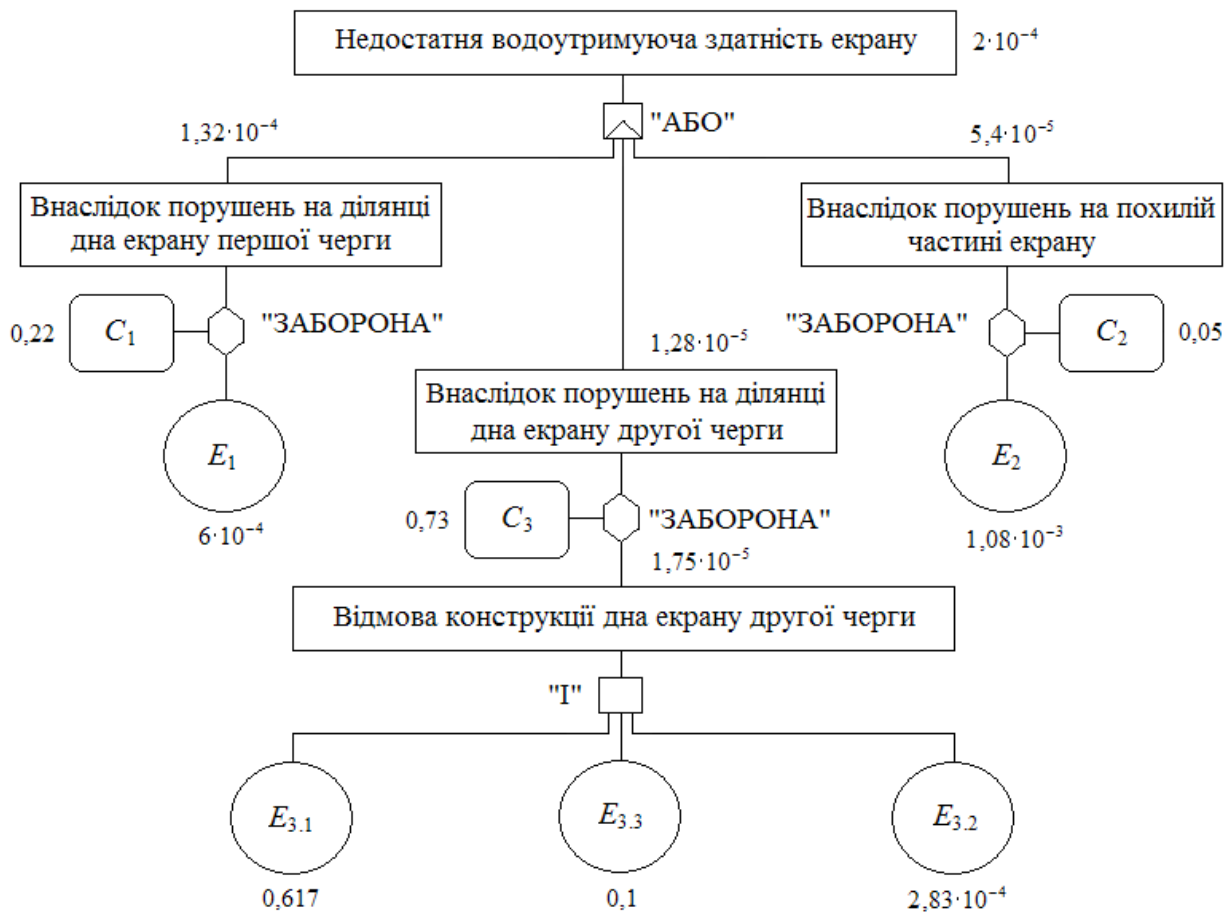


Рис. 7 - Дерево відмов і несправностей для оцінки ймовірності сценарію «Обводнення Дністровського схилу на ділянці основних споруд в результаті недостатньої водоутримуючої здатності екрану верхового басейну»

Враховувалися наступні базові аварійні події:

подія E_1 – порушення водоутримуючої здатності глинистих ґрунтів ділянки дна екрану в межах першої черги, ймовірністю $6 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$;

подія E_2 – порушення водоутримуючої здатності ґрунтів похилої частини екрану, ймовірністю $1,08 \cdot 10^{-3}$, рік $^{-1}$;

подія $E_{3,1}$ – порушення водоутримуючої здатності ґрунтів підстилаючого шару на ділянці дна екрану другої черги басейну, ймовірністю $0,617$, рік $^{-1}$;

подія $E_{3,2}$ – порушення водоутримуючої здатності ґрунтів захисного шару на ділянці дна екрану другої черги басейну, ймовірністю $2,83 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$.

подія $E_{3,3}$ – відмова полімерної мембрани внаслідок будь-якої з причин, пов'язаних з її облаштуванням та експлуатацією; ймовірність події $E_{3,3}$, з запасом, приймалася рівною не менше $0,1$; при цьому враховувалося, що однією з основних причин можливої відмови полімерної мембрани може бути людський фактор [5].

В якості подій-умов, які певним чином обумовлюють появу аварійних подій-наслідків, розглядалися припущення щодо відносно більшої можливості додаткового обводнення Дністровського схилу внаслідок недостатньої водоутримуючої здатності екрану верхнього басейну в результаті виникнення порушень на ділянках екрану, що мають більшу площу перекриття. Ймовірності відповідних подій-умов встановлювалися як відношення площі відповідної ділянки екрану до загальної площі перекриття.

Площі відповідних ділянок приймалися наступними: площа ґрунтового екрану першої черги (без мембрани, товщина 2 м) – 63 га; площа ґрунтового екрану 2-ї черги (з мембраною, товщина 1 м) – 210 га; площа похилої частини екрану – 14,6 га (при загальній довжині дамб огороження 73000 м та ширині 20 м). Відповідно були встановлені наступні ймовірності подій-умов C_1 , C_2 , C_3 : $P(C_1) = 0,22$; $P(C_2) = 0,73$; $P(C_3) = 0,1$.

У результаті розрахунків встановлено, що повна ймовірність реалізації сценарію «Обводнення Дністровського схилу на ділянці основних споруд в результаті недостатньої водоутримуючої здатності екрану верхнього басейну» не повинна перевищити $2 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$, в тому числі: ймовірність реалізації цього сценарію внаслідок порушень на ділянці дна екрану першої черги верхнього басейну – $1,32 \cdot 10^{-4}$, рік $^{-1}$ (66% від повної ймовірності обводнення схилу); ймовірність реалізації цього сценарію внаслідок порушень на похилій частині екрану – $5,4 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$ (27% від повної ймовірності обводнення схилу); ймовірність реалізації цього сценарію внаслідок порушень на ділянці дна екрану другої черги верхнього басейну – $1,28 \cdot 10^{-5}$, рік $^{-1}$ (7% від повної ймовірності обводнення схилу). Можна зробити висновок про достатньо високу надійність екрану другої черги, що має комбіновану конструкцію, виконану з глинистих ґрунтів і полімерної мембрани.

Список використаної літератури

1. Стефанишин Д.В. Оцінка надійності ґрунтових гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС / Д.В. Стефанишин, О.В. Жеребят'єв // Вісник НУВГП. Зб. наукових праць. – Вип. 3 (47). – Частина 1. Рівне: НУВГП. – 2009. – С. 520-530.

2. Жеребятъев О.В. Оцінка водопроникності ґрунтового екрана верхнього басейну Дністровської ГАЕС за даними геотехнічного контролю і натурних фільтраційних випробувань / О.В. Жеребятъев, Д.В. Стефанишин //Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування. Зб. наукових праць у 2-х книгах. – Вип. 75. – Книга 2. – 2011. – К.: ДП НДІБК. – С. 516-524.
3. Железняков Г.В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / Под ред. Г.В. Железнякова. – М.: Колос, 1984. – 205 с.
4. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. – 591 с.
5. Хенлі Е.Дж. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка ризику / Е.Дж. Хенлі, Х. Кумамото [Пер з англ. за ред. Ю. Г. Зареніна]. – К.: Вища школа, 1987. – 543 с.

Стаття надійшла до редакції 27.11.12 українською мовою

© Д.В. Стефанишин

**Вероятностный анализ вододерживающей способности экрана верхового бассейна
Днестровской ГАЭС по данным геотехнического контроля**

Осуществлено вероятностный анализ вододерживающей способности экрана верхового бассейна Днестровской ГАЭС по данным геотехнического контроля с учетом особенностей его конструкции и противифльтрационных свойств глинистых грунтов.

© D.V. Stefanishin

**Probabilistic analysis of of water-holding capacity of the screen of the upper basin of the
Dniester PSP according to the data of geotechnical control**

The probabilistic analysis of water-holding capacity of the screen of the upper basin of the Dniester PSP according to the data of geotechnical control considering its design and properties of impervious clay soils was performed.