

УДК 001.5:519.7 : 626/627.8

© Д.В. Стефанишин, д-р техн. наук

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

ПРОГНОЗУВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНОЇ СИТУАЦІЇ НА ЗЕМЛЯНІЙ ГРЕБЛІ ВОДОСХОВИЩА-ОХОЛОДЖУВАЧА ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС ВНАСЛІДОК НАДМІРНО ШВИДКОГО СПРАЦЮВАННЯ ВЕРХНЬОГО Б'ЄФА

Проаналізовано можливість виникнення небезпечної ситуації на земляній греблі водосховища-охолоджувача Хмельницької атомної електростанції (ВО ХАЕС) у випадку надмірно швидкого спрацювання верхнього б'єфа. Встановлено основні причини, що можуть зумовлювати зниження стійкості верхнього укусу греблі при спрацюванні водосховища.

Ключові слова: водосховище-охолоджувач, земляна гребля, коефіцієнт фільтрації, небезпечна ситуація, стійкість верхнього укусу, швидке спрацювання верхнього б'єфа.

Вступ. Водосховище-охолоджувач Хмельницької атомної електростанції (ВО ХАЕС) руслово-наливного типу багаторічного регулювання поряд з охолодженням води забезпечує зворотне технічне водопостачання ХАЕС.

У витратній частині водного балансу ВО ХАЕС, що розміщується на р. Гнилий Ріг, правій притоці р. Вілії, головну роль відіграє випаровування, об'єм якого при роботі двох блоків ХАЕС сягає 50% корисного об'єму водосховища. Значні втрати води на випаровування призводять до збільшення загальної мінералізації води у водоймі. Наразі уповільненню процесу підвищення загальної мінералізації води на ВО ХАЕС сприяє частковий виніс розчинених речовин фільтраційним потоком (природна «продувка» водойми) через береги й основу протяжної земляної греблі, який не перехоплюється дренажним каналом і не перекачується назад у водойму (це складає більше 10% корисного об'єму ВО). Однак прогнозоване підвищення температури води у ВО після введення нових енергоблоків № 3 і № 4, особливо в активній зоні водосховища, потребуватиме регулярних штучних його «продувок» шляхом здійснення організованих скидів води через донний водовипуск.

З метою мінімізації впливу на навколишнє середовище скиди планується здійснювати в періоди, коли витрати води в р. Вілії складатимуть не менше 10-100 м³/с. Сприятливі умови для організації штучних «продувок» ВО ХАЕС, як очікується, можуть мати практично кожен рік. Передбачається, що штучні скиди води з ВО ХАЕС будуть здійснюватися за спеціально розробленим і погодженим з природоохоронними і водогосподарськими організаціями регламентом при постійному контролі температурного режиму в контрольних створах. Витрати

«продувочних» скидів при цьому можуть сягати $10 \text{ м}^3/\text{с}$ і більше, в залежності від величини витрат води в р. Вілії, при максимально можливій витраті спрацювання б'єфу ВО ХАЕС від нормального підпірного рівня (НПР) до $70 \text{ м}^3/\text{с}$.

Актуальність та мета досліджень. Спрацювання водосховища з метою його спорожнення, окрім очікуваних позитивних ефектів, може призводити і до різних негативних наслідків [1]. Серед таких наслідків слід виділити можливе пониження стійкості верхового укосу земляної греблі та його сповзання в умовах так званого надмірно швидкого (або «швидкого») спрацювання рівня води у верхньому б'єфі, коли відбувається «зависання» поверхні депресії в тілі греблі на високих відмітках. Це актуалізує дослідження, направлені на забезпечення надійності земляної греблі ВО ХАЕС з врахуванням штучних скидів води.

Метою досліджень є прогнозування можливості виникнення небезпечної ситуації на земляній греблі ВО ХАЕС на випадок надмірно швидкого спрацювання верхнього б'єфа з врахуванням основних чинників, що можуть зумовлювати зниження стійкості верхового укосу споруди при спрацюванні водосховища.

Критерій виникнення небезпечної ситуації. Для ідентифікації умов виникнення небезпечної ситуації внаслідок надмірно швидкого спрацювання рівня води, що може загрожувати стійкості верхового укосу земляної греблі, використовується відомий параметр [1, 2]

$$\alpha = \frac{k_{\phi}}{\mu \cdot v \cdot m^2}, \quad (1)$$

де k_{ϕ} , μ – коефіцієнти фільтрації та водовіддачі ґрунту; v – швидкість пониження рівня води у водосховищі; m – коефіцієнт закладення верхового укосу.

В залежності від значення параметра α умовно розрізняються три режими пониження рівня води у б'єфі, які визначають розрахункові схеми фільтрації при оцінці стійкості ґрунтових укосів, що перебувають під впливом рівня води у водоймі:

1) при $\alpha \leq 0,05$ – режим так званого «швидкого» (або миттєвого) спрацювання рівня води у водоймі, при якому швидкість його пониження значно перевищує швидкість вертикального пониження кривої депресії; це найбільш небезпечний для стійкості верхового укосу земляної греблі режим, при якому ґрунт в обводненій до спрацювання рівня води області слід розглядати як зважений;

2) при $0,05 < \alpha \leq 5$ – режим, при якому виникає неусталена фільтрація в напрямку водойми; цей режим також є небезпечним для стійкості ґрунтового укосу через сили неусталеної фільтрації, які направлені в сторону зрушення; при цьому можливий і розвиток місцевої суфозії в області верхового клину греблі;

3) при $\alpha > 0,5$ – режим повільного спрацювання рівня, при якому швидкість пониження рівня води у водоймі і швидкість вертикального пониження кривої депресії практично співпадають; фільтрація вважається усталеною і направленою в бік ґрунтового масиву, сили якої сприяють стійкості укосу.

Критерієм виникнення небезпечної ситуації на земляній греблі ВО ХАЕС внаслідок надмірно швидкого спрацювання рівня верхнього б'єфа в результаті штучних або аварійних скидів, із запасом ризику, можна вважати умову $\alpha \leq 5$. На практиці це означає, що для запобігання можливості виникнення небезпечної ситуації на земляній греблі ВО ХАЕС при спрацюванні рівня верхнього б'єфа необхідно узгоджувати значення швидкості пониження рівня води у водоймі зі значенням коефіцієнта фільтрації тіла земляної греблі.

Аналіз даних п'езометричних спостережень та ідентифікація коефіцієнта фільтрації. Земляна гребля ВО ХАЕС виконана із середньозернистих пісків. Гребля однорідна, насипного типу, трапецеїдального профілю, із закладанням укосів: верхового – 1:3,75; низового – 1:3,5. Максимальна висота греблі – 14,7 м. Максимальний напір – 12,4 м. Гребля виконана криволінійною в плані, довжиною по гребеню 7 124 м, шириною по гребеню 8,0 м. Перевищення відмітки гребеня над нормальним підпірним рівнем складає 3,0 м. Ґрунти основи греблі ближче до лівобережного межування складають середньо- та дрібнозернисті піски і супіски; в середній частині – заміщення торфу на середньозернисті піски; ближче до правобережного межування – середньо- та дрібнозернисті піски, гравелісті піски, супіски і глини.

Низовий укіс греблі захищено похилим дренажем з кам'яного накиду товщиною 600 мм, який служить також кріпленням від дії хвиль. Верховий укіс має кріплення з монолітних залізобетонних плит товщиною 200 мм, які на лівобережній частині греблі виконують також функцію протифільтраційного екрану. Для перехоплення й організованого відводу води, яка профільтрувала через тіло і основу греблі, в нижньому б'єфі влаштовано дренажний канал.

Фільтраційний режим в тілі та основі греблі контролюється п'езометричною мережею (всього 15 п'езометричних створів, 72 п'езометри). Гребля відноситься до найвищого класу за наслідками – класу СС3 [3], що в значній мірі визначає актуальність проблеми забезпечення її надійності при експлуатації.

З метою встановлення реальної картини фільтрації на греблі аналізувалися дані п'езометричних спостережень із січня 2006 р. по грудень 2009 р. В результаті проведених досліджень були встановлені характерні тенденції, які можуть свідчити про загальну картину фільтрації через тіло греблі в різних зонах, стан цих зон та споруди в цілому з врахуванням складних процесів фільтраційних деформацій (суфозії та кольматажу), що розвиваються в часі в тілі споруди, в її основі і, зокрема, в області верхового клину.

В якості діагностичного параметра, за яким оцінювалися зміни, що відбуваються в тілі земляної греблі в результаті фільтрації, було вибрано значення падіння напору в області верхового клину – на ділянці (в області фільтрації) між верхнім б'єфом та першим зі сторони водосховища в кожному п'езометричному створі п'езометром:

$$\Delta H_{1,i} = \downarrow PVB - \downarrow PVI_{1,i}, \quad (2)$$

де $\downarrow PVB$ – відмітка рівня води у верхньому б'єфі; $\downarrow PVI_{1,i}$ – відмітка рівня води в п'езометрі, що розташовується першим зі сторони водойми в i -му п'езометричному створі.

Величина падіння напору на ділянці фільтрації через тіло земляної греблі, що безпосередньо примикає до верхнього б'єфа, як залежна, результуюча змінна, дозволяє контролювати перебіг процесів фільтраційних деформацій (суфозії, кольматажу), що відбуваються у верховій призмі греблі, в тому числі з врахуванням працездатності кріплення верхового укосу, а також вплив цих процесів на загальну стійкість верхового укосу.

В якості незалежної (пояснюючої) змінної, за якою аналізувалися еволюції падіння напору на характерних ділянках тіла греблі, було вибрано рівень води у верхньому б'єфі (РВБ). Хід рівня води у верхньому б'єфі (РВБ) на заданому інтервалі часу показано на рис. 1.

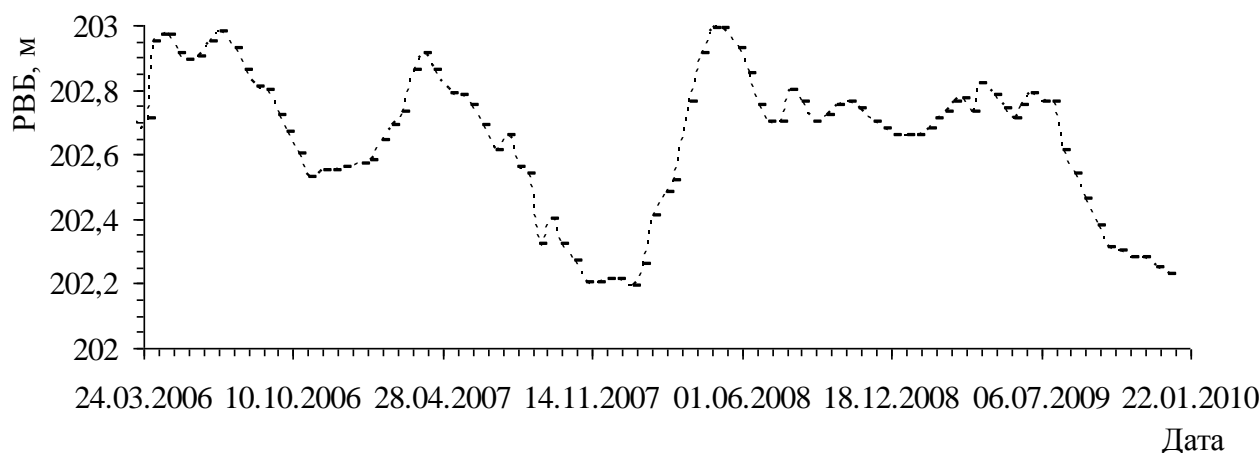


Рис. 1 – Графік ходу рівня води у верхньому б'єфі (РВБ) ВО ХАЕС

З метою деталізації еволюційних змін, що відбувалися в тілі греблі, часовий проміжок спостережень (із січня 2006 р. по грудень 2009 р.) розбивався на дев'ять часових інтервалів:

- 1) з 11.01.2006 р. по 30.03.2006 р., який характеризувався підйомом рівня води у верхньому б'єфі з відмітки 202,63 м до відмітки 202,71 м;
- 2) з 06.04.2006 р. по 04.07.2006 р., який характеризувався коливаннями рівня води у верхньому б'єфі між відмітками 202,95 м і 202,98 м;
- 3) з 26.07.2006 р. по 01.11.2006 р., який характеризувався спадом рівня води у водосховищі з відмітки 202,98 м до 202,53 м;
- 4) з 21.11.2006 р. по 03.04.2007 р., який характеризувався підйомом рівня води у водосховищі з відмітки 202,53 м до 202,91 м;
- 5) з 17.04.2007 р. по 08.01.2008 р., який характеризувався спадом рівня води у водосховищі з відмітки 202,91 м до 202,19 м;
- 6) з 21.01.2008 р. по 06.05.2008 р., який характеризувався підйомом рівня води у водосховищі з відмітки 202,26 м до 202,99 м;
- 7) з 28.05.2008 р. по 22.07.2008 р., який характеризувався спадом рівня води у водосховищі з відмітки 202,93 м до 202,7 м;
- 8) з 05.08.2008 р. по 23.07.2009 р., який характеризувався коливаннями рівня води у верхньому б'єфі між відмітками 202,8 м і 202,76 м;

9) з 05.08.2009 р. по 24.12.2009 р., який характеризувався спадом рівня води у водосховищі з відмітки 202,61 м до 202,25 м.

Таким чином враховувалися різні режими роботи водосховища на вибраному інтервалі часу п'єзометричних спостережень: підйоми рівня води, спрацювання рівня води, перебування рівня води у водосховищі на відносно стабільних відмітках.

За даними п'єзометричних спостережень в межах кожного з виділених дев'яти розрахункових часових інтервалів встановлювалися регресійні залежності між падінням напору та РВБ на характерній ділянці фільтрації – між верхнім б'єфом та першим зі сторони водосховища п'єзометром для кожного з 15 п'єзометричних створів (С-1÷С-15).

При моделюванні використовувалося рівняння простої лінійної регресії. Побудова регресій здійснювалася засобами MS Excel. На основі отриманих регресійних залежностей для кожного з дев'яти часових інтервалів із січня 2006 р. по грудень 2009 р. визначалися середні значення падіння напору на ділянці фільтрації у верхньому клині тіла греблі для кожного з 15 п'єзометричних створів в залежності від середнього значення рівня води у верхньому б'єфі на часовому інтервалі із січня 2006 р. по грудень 2009 р. За результатами цих обчислень будувалися графіки поведінки в часі значень падіння напору на характерній ділянці фільтрації із січня 2006 р. по грудень 2009 р. в п'єзометричних створах, за якими оцінювалися еволюційні зміни в розвитку фільтрації через тіло земляної греблі.

Було встановлено, що найбільш складна картина фільтрації в області верхнього клину греблі з точки зору стійкості укусу на випадок спорожнення водосховища спостерігається у створі С-10. Має місце тренд до зменшення величини падіння напору на ділянці фільтрації в області верхнього клину (збільшення обводнення верхнього укусу греблі) в часі.

Графік ходу падіння напору між РВБ та рівнем води в п'єзометрі П-49, що розташовується першим в створі С10, в часі показано на рис. 2; графік зміни в часі модельних значень падіння напору між РВБ та рівнем води в п'єзометрі П-49, встановлених за допомогою регресійних залежностей при РВБ = 202,65 м, наведено на рис. 3.

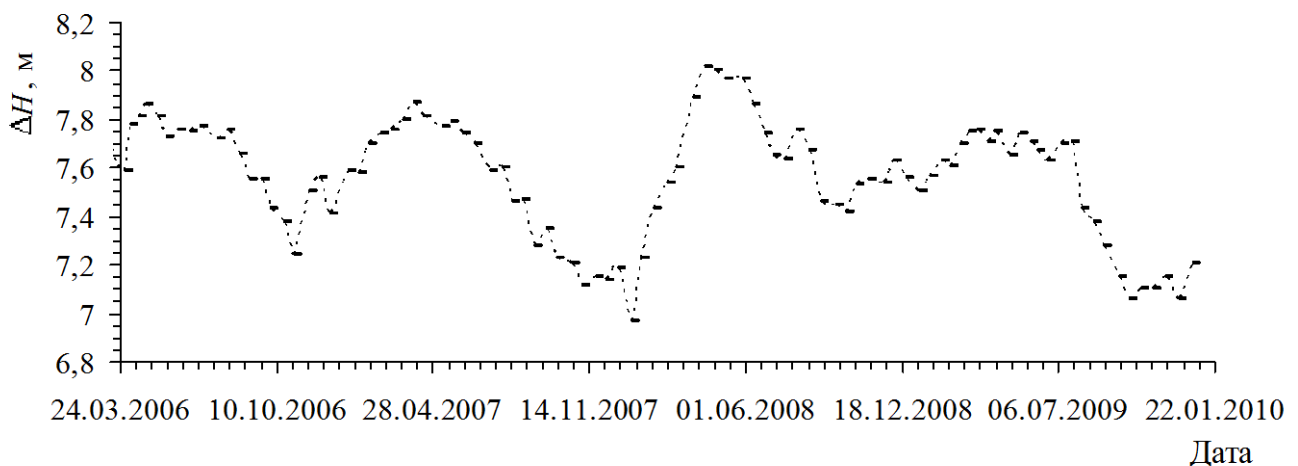


Рис. 2 – Графік ходу падіння напору між РВБ та рівнем води в п'єзометрі П-49

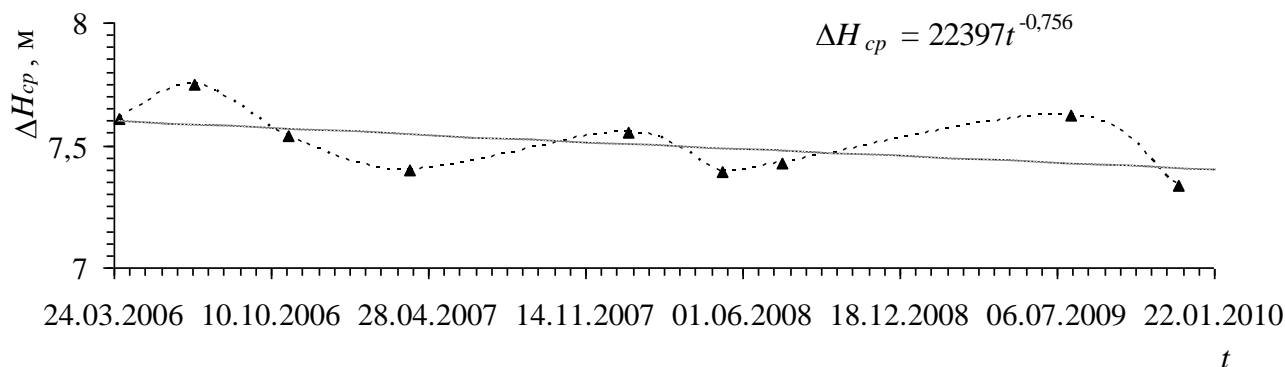


Рис. 3 – Графік ходу та тренд модельних значень падіння напору між РВБ та рівнем води в п'єзометрі П-49 при РВБ = 202,65 м

Результати проведених досліджень вказують на те, що коефіцієнти фільтрації в області верхового клину тіла земляної греблі ВО ХАЕС можуть суттєво змінюватися в часі.

Для ідентифікації коефіцієнта фільтрації в області верхового клину розв'язувалася задача параметричної ідентифікації математичної моделі (обернена задача зі встановленням таких значень коефіцієнтів фільтрації, що відповідають даним п'єзометричних спостережень). Розглядалася математична модель плоскої задачі фільтрації у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\phi} \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t};$$

$$H(x,0) = H_0(x), 0 \leq x \leq l; H(0,t) = H_1(t), 0 \leq t \leq t_1; H(l,t) = H_2(t), 0 \leq t \leq t_1, \quad (3)$$

де $H(x,t)$ – напір в точці x області фільтрації в момент часу t ; k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації; l – гранична координата розрахункової області фільтрації.

Задача ідентифікації коефіцієнта фільтрації розв'язувалася методом «підстановки», що базується на рішенні серії прямих задач при варіюванні значень коефіцієнта фільтрації в різних зонах тіла греблі. Чисельний розв'язок прямої задачі при цьому шукався методом скінчених різниць на основі неявної різницевої схеми (обчислення проводилися В.В. Олінійчук згідно з методикою [4]). Область фільтрації покривалася апроксимуючою сіткою з кусково-лінійною апроксимацією функції, що відображає зміну п'єзометричних напорів по фільтраційній області з достатньо малим кроком, щоб врахувати відмінності у відстанях між п'єзометрами. Рішення серії прямих задач на різних ділянках земляної греблі при зміні значення коефіцієнтів фільтрації здійснювалося до тих пір, доки різниця між розрахунковими та експериментальними значеннями відміток рівнів води у відповідних п'єзометрах не ставала меншою заданої точності наближення.

На основі розв'язування задачі параметричної ідентифікації математичної моделі фільтрації в різних п'єзометричних створах було встановлено, що коефіцієнти фільтрації в різних зонах тіла греблі внаслідок суфозії та кольматажу стрибкоподібно змінювалися в часі протягом розрахункового проміжку (з 2006 р. по 2009 р.) в середньому з 15 до 0,001 м/добу.

Результати ідентифікації значення коефіцієнта фільтрації в області верхового клину у створі С-10 наведено на рис. 4.

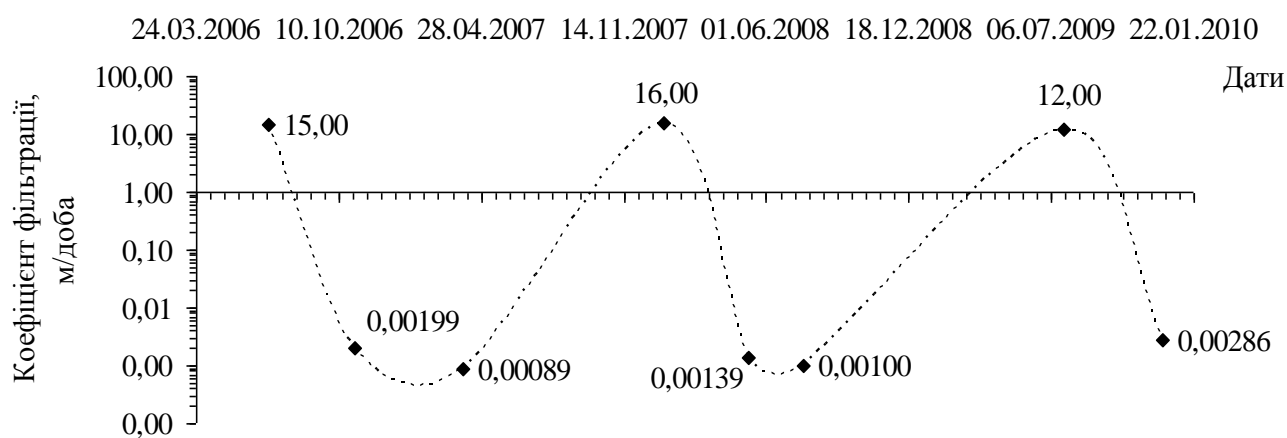


Рис. 4 – Графік зміни в часі значення коефіцієнта фільтрації у верховому клині земляної греблі ВО ХАЕС в н'єзометричному створі С-10

Відповідно до зміни коефіцієнта фільтрації в зоні верхового клину земляної греблі ХАЕС може змінюватися і допустима швидкість пониження рівня води у верхньому б'єфі $v_{дон}$, за якої не прогнозується небезпечна ситуація для стійкості верхового укусу:

$$v_{дон} = \frac{k_{\phi}}{\alpha \cdot \mu \cdot t^2}, \quad (4)$$

де критеріальне значення α може встановлюватися рівним 0,05 або 5, в залежності від припустимого ризику виникнення небезпечної ситуації.

На рис. 5 наведено результати оцінки граничних (допустимих) значень швидкості пониження рівня води у верхньому б'єфі ВО ХАЕС, які свідчать про високу ймовірність виникнення небезпечної ситуації на земляній греблі у випадках, коли має місце різке зменшення значення коефіцієнта фільтрації (до $2,86 \cdot 10^{-3}$ м/добу і менше) в області верхового клину греблі. Якщо, наприклад, $\alpha = 0,05$, то при $\mu = 0,7$ та $t = 3,75$, допустима швидкість пониження РВБ (без зависання поверхні депресії) при $k_{\phi} = 2,86 \cdot 10^{-3}$ м/добу складе всього $5,8 \cdot 10^{-3}$ м/добу. Режим неусталеної фільтрації ($0,05 < \alpha \leq 5$) при цьому може спостерігатися і при високих значеннях коефіцієнта фільтрації (наприклад, при $k_{\phi} = 12$ м/добу гранична швидкість спрацювання РВБ, при якій виникають сили неусталеної фільтрації, складе 0,244 м/добу). Все це вказує на необхідність узгодження допустимої швидкості спрацювання рівня води у ВО ХАЕС при штучних скидах з поточним фільтраційним режимом в тілі земляної греблі.

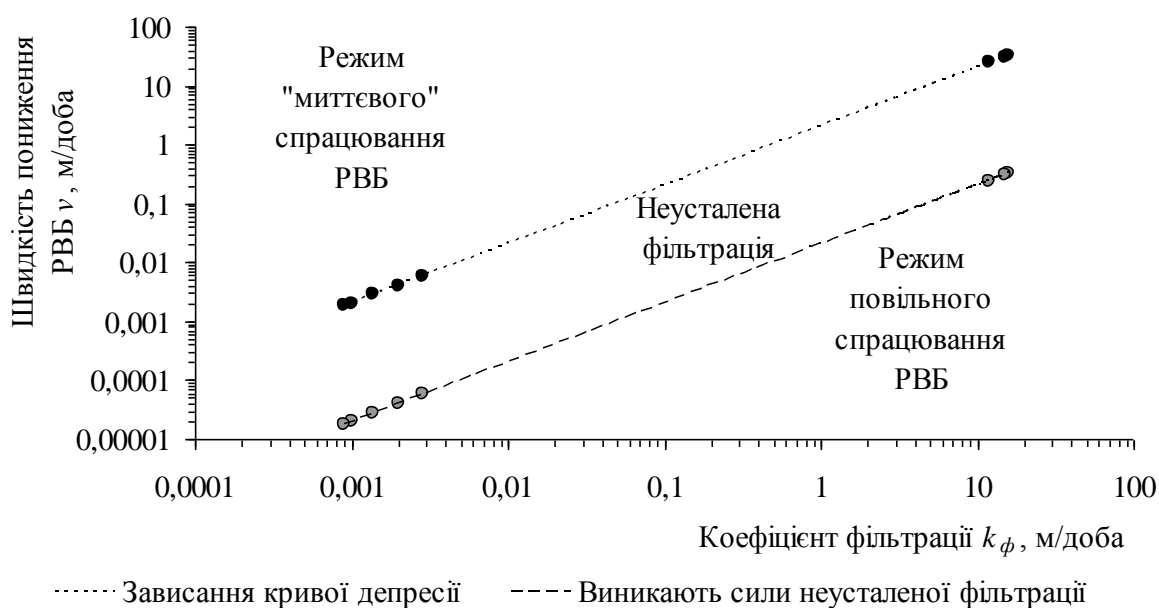


Рис. 5 – Результати оцінки граничних (допустимих) значень швидкості пониження рівня води у верхньому б'єфі ВО ХАЕС

Висновки та рекомендації. Проаналізовано можливість виникнення небезпечної ситуації на земляній греблі ВО ХАЕС при надмірно швидкому спрацюванні верхнього б'єфа. Розв'язано задачу параметричної ідентифікації коефіцієнта фільтрації в тілі земляної греблі за даними п'езометричних спостережень. Встановлено, що коефіцієнт фільтрації внаслідок розвитку процесів суфозії та кольматажу може змінюватися в часі стрибкоподібно в значному діапазоні, що слід враховувати при визначенні допустимої швидкості спрацювання рівня води у ВО ХАЕС при штучних скидах.

Список використаної літератури

1. 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.
2. Беллендир Е.Н. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е.Н. Беллендир, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин и др. // – СПб.: В 2-х томах. Т. 1. Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2003. – 553 с.
3. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення / ДБН В.2.4-3:2010. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 37 с.
4. Король В.В. Параметрична ідентифікація математичних моделей процесів в гідротехнічних спорудах / В.В. Король, Д.В. Стефанишин // Зб. наук. праць / Кам'янець-Подільський національний університет, Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. – Кам'янець-Подільський: К-ПНУ, 2008. – Вип. 1. – С. 100–109.

Стаття надійшла до редакції 16.07.2014 українською мовою

© Д.В. Стефанишин

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ НА ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЕ
ВОДОХРАНИЛИЩА-ОХЛАДИТЕЛЯ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС
ВСЛЕДСТВИЕ ЧРЕЗМЕРНО БЫСТРОЙ СРАБОТКИ ВЕРХНЕГО БЬЕФА**

Проанализирована возможность возникновения опасной ситуации на земляной плотине водохранилища-охладителя Хмельницкой атомной электростанции в случае чрезмерно быстрой сработки верхнего бьефа. Установлено основные причины, влияющие на снижение устойчивости верхового откоса плотины при сработке водохранилища.

© D.V. Stefanyshyn

**PREDICTION OF DANGEROUS SITUATIONS ON EARTHFILL DAM
OF COOLING RESERVOIR OF THE KHMELNITSKY NPP
DUE TO EXCESSIVELY RAPID UPSTREAM DRAWDOWN**

The possibility of a dangerous situation on earth fill dam of cooling reservoir of the Khmelnitsky nuclear power plant in the case of excessively rapid upstream drawdown was analyzed. The basic factors influencing the deterioration of stability of upper slope of the dam under reservoir drawdown was established.