



УДК 627.132

СТЕФАНИШИН Д.В., докт. техн. наук, пров. наук. співробітник.
ІТГІП НАН України, м. Київ, проф. каф. гідроспоруд
НУВГП, м. Рівне



ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ОЦІНКИ СТАНУ ЗЕМЛЯНОЇ ГРЕБЛІ, ЩО ПЕРЕБУВАЄ В ПОСТІЙНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ЗА ДАНИМИ РЕГУЛЯРНИХ П'ЄЗОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Пропонується новий підхід до оцінки стану земляної греблі, що перебуває в постійній експлуатації, за даними регулярних п'єзометричних спостережень фільтрації на основі аналізу еволюції модельних значень контрольних діагностичних параметрів.

Земляні греблі є найбільш поширеними гідроспорудами серед напірних споруд, що побудовані в Україні. Вони присутні у складі всіх гідровузлів, за виключенням, можливо, лише Запорізького (ДніпроГЕСу) та Теремля-Рікського, є основними гідроспорудами, що формують напірні фронти великих, середніх та малих водосховищ різного призначення, що експлуатуються в Україні.

Без перебільшення можна стверджувати, що проблема забезпечення надійності й безпеки гідроспоруд в Україні є насамперед проблемою забезпечення надійності й безпеки земляних гребель, побудованих з місцевих ґрунтових матеріалів – пісків, суглинків тощо.

Значне поширення земляних гребель в Україні може пояснюватися топографічними і інженерно-геологічними умовами створів, наявністю в достатній кількості місцевих ґрунтових матеріалів, високою технологічністю будівництва та економічністю цього типу гідроспоруд. Слід відмітити і достатньо високу надійність земляних гребель при експлуатації.

Зокрема на користь земляних гребель свідчить статистика аварій на спорудах цього типу в порівнянні з ґрунтовими греблями інших типів. Поступаючись дещо в стійкості до порушень й аварій перед бетонними греблями, серед гребель з ґрунтових матеріалів земляні греблі виявляються найбільш надійними. Відносна частота різного роду інцидентів (порушень, пошкоджень тощо) та аварій на земляних греблях виявляється найменшою (Табл. 1).

Якщо ж оцінювати греблі різного типу за живучістю, яка нами [2] визначалася за статистичним коефіцієнтом

$$K_v = 1 - n_{acc}/n_{inc}, \quad (1)$$

де n_{acc} – кількість гребель, що зазнали аварій; n_{inc} – загальна кількість порушень на греблях, в залежності від їх типу, то земляні греблі поступаються лише кам'я-

но-земляним (як найбільш живучим за статистичними даними) та арковим.

Аварії на греблях, хоча і рідко, але все-таки відбуваються і повністю їх виключити, і не тільки на земляних греблях, практично неможливо. Однак не варто спекулювати на тему про нібито недостатню надійність гребель в Україні саме тому, що більшість з них є земляними.

Аналіз причин аварій на греблях, зокрема земляних, свідчить, що у більшості випадків їх можна було попередити або мінімізувати наслідки при належному контролі [3].

Що стосується аварій власне на земляних греблях, то тут важливо відзначити, що причини аварій на цих гідроспорудах не відрізняються особливою різноманітністю. Насамперед це різного роду фільтраційні порушення. В цілому з фільтрацією пов'язують до 60 % всіх випадків аварій на ґрунтових греблях [4, 5], серед яких переважають земляні. В 45% випадках аварії на ґрунтових греблях викликалися фільтрацією безпосередньо, у формі внутрішньої ерозії (суфозії тощо). В 15 % випадках фільтрація була опосередкованою причиною.

Серед інших причин аварій на ґрунтових греблях виділяють переливи води через гребінь (біля 33% випадків від загальної кількості аварій) та сповзання укосів (біля 5% аварій). При цьому лише у 2% випадках безпосередні причини аварій на ґрунтових греблях, серед яких, практично відсутні земляні, були спірними. Отже ефектив-

Таблиця 1. Загальна статистика інцидентів та аварій на греблях різного типу [1, 2]

Греблі		Відносні частоти, %		Коефіцієнт живучості, K_v
		Інциденти	Аварії	
Бетонні	Гравітаційні	3,1	1,9	0,39
	Аркові	4,4	1,5	0,66
	Контрфорсні	5,1	2,2	0,57
Ґрунтові	Земляні	6,7	2,5	0,63
	Кам'яно-земляні	17	4	0,77
	Кам'яно-накидні	10,9	5	0,54

ний контроль стану земляної греблі є цілком можливим.

Враховуючи особливу "схильність" земляних гребель руйнуватися саме через фільтрацію, її контролю на цих гідроспорудах приділяється особлива увага. Контроль здійснюється різними способами [6, 7]. Це і візуальні спостереження в тому числі і з використанням сучасних телеметричних засобів, і інструментальний контроль, що проводиться із застосуванням відповідної контрольно-вимірювальної апаратури (КВА). Візуальні і інструментальні спостереження зазвичай взаємодоповнюються.

Наприклад, при візуальних спостереженнях серед зовнішніх негативних проявів фільтрації розрізняють такі порушення: мокрі плями на поверхні низового укосу споруди, просочування, протікання, свищі, грифони, ключі тощо [6, 7]. Ці порушення можуть вказувати на близькість, а інколи і неминучість аварії на земляній греблі (Рис. 1).

З метою завчасного виявлення негативного впливу фільтрації на земляну греблю, її основу, конструктивні елементи тощо здійснюється інструментальний контроль.

У більшості випадків інструментальний контроль фільтрації на земляних греблях організується на основі спостережень за рівнями ґрунтових вод у п'єзометрах та шляхом вимірювання витрат води, що профільтувала через тіло греблі, основу, межування тощо. При цьому важливо, щоб інструментальний контроль фільтрації був регулярним, а його результати адекватно інтерпретувалися.

Відповідь на питання про те, як саме має здійснюватися адекватна інтерпретація результатів регулярного інструментального контролю фільтрації на основі п'єзометричних спостережень для

вирішення задачі оцінки стану земляної греблі в умовах її постійної експлуатації є основною метою статті.

Тут і надалі під оцінкою стану (технічного стану) земляної греблі будемо розуміти встановлення її відповідності заданим (проектним, експлуатаційним та ін.) вимогам справності, працездатності, готовності тощо за визначеними згідно з прийнятим регламентом контролю показниками стану – контрольними діагностичними параметрами й ознаками. Ці параметри й ознаки мають в цілому (інтегрально) або хоча б частково характеризувати стан гідроспоруди, її тіла, основи, конструктивного елемента тощо в довільний момент часу.

Основні контрольні діагностичні параметри, що характеризують фільтрацію через земляну греблю, можуть встановлюватися безпосередньо за результатами вимірювань. Одним з найважливіших серед таких діагностичних параметрів звичайно є фільтраційна витрата. Контроль фільтраційних витрат дозволяє інтегрально оцінювати стан земляної греблі, окремих її ділянок тощо. Однак регулярність вимірювань фільтраційних витрат зазвичай поступається регулярності п'єзометричних спостережень.

Рівні води в п'єзометрах відносно легше контролюються, в тому числі і за допомогою автоматичних засобів. Однак з точки зору інтегрального оцінювання стану греблі важливо адекватно інтерпретувати отримані результати п'єзометричних спостережень.

На разі контроль стану греблі здійснюється за положенням кривої депресії в п'єзометричному створі на основі порівняння натурних даних з розрахунковими (проектними). При цьому не завжди враховується те, що не всі "відхилення" натурального положення кривої депресії від розра-



Рис. 1. Розвиток аварії на греблі Teton (США) в 1976 р.



хункового однозначно можуть свідчити про погіршення стану земляної греблі. Земляна гребля є динамічною системою, стан якої змінюється в часі, і для оцінки стану греблі, що перебуває в постійній експлуатації, в режимах, що постійно повторюються, важливо контролювати загальний напрямок змін, що відбуваються зі спорудою.

Оскільки для інтерпретації результатів інструментального контролю з метою оцінки стану земляної греблі може допускатися будь-яка модифікація діагностичних параметрів й ознак, то при виборі контрольних діагностичних параметрів на основі п'езометричних спостережень пропонується орієнтуватися не на загальне положення кривої депресії в п'езометричному створі, а на перепади напору на різних його ділянках, наприклад, на різницю між рівнем води у верхньому б'єфі (РВБ) та рівнем в найближчому та кожному з наступних п'езометрах, різницю рівнів в сусідніх п'езометрах, один з яких розташовується біля дренажного пристрою або за протифільтраційним елементом тощо.

Так, контроль перепаду напору на ділянці п'езометричного створу від урізу води у верхньому б'єфі до першого зі сторони водосховища п'езометра, тобто на ділянці тіла земляної греблі, що безпосередньо примикає до верхнього б'єфа, дозволяє контролювати перебіг фільтраційних процесів, що відбуваються в верховій призмі греблі (суфозії, кольматажу) з врахуванням працездатності кріплення верхового укусу, екрану тощо, а також вплив фільтрації на загальну стійкість верхового укусу.

Збільшення перепаду напору на цій ділянці може свідчити про переважання процесів кольматажу над суфозійними процесами у верховій призмі, утворення "природного" екрану на верховому укусі земляної греблі, про "падіння" кривої депресії, яке позитивно впливає на стійкість верхового укусу; зменшення перепаду напору — про переважання суфозійних процесів над процесами кольматажу, "підйом" кривої депресії та зменшення стійкості укусу.

Контроль перепаду напору на ділянці від урізу води у верхньому б'єфі або між першим зі сторони водосховища п'езометром та п'езометром, що встановлюється за протифільтраційним пристроєм (екраном, ядром, діафрагмою тощо), дозволяє контролювати стан протифільтраційного пристрою, його фільтраційну міцність.

Контроль перепаду напору на ділянці п'езометричного створу від урізу води у верхньому б'єфі або між п'езометром зі сторони водосховища та п'езометром, що встановлюється перед дренажем, дозволяє контролювати загальну

фільтраційну міцність тіла греблі, працездатність дренажу, а також вплив фільтрації на стійкість низового укусу греблі.

Зменшення перепаду напору між урізом води у верхньому б'єфі та п'езометром, що встановлюється за протифільтраційним пристроєм, може свідчити про пошкодження протифільтраційного пристрою; коли те ж саме має місце між урізом води у верхньому б'єфі та п'езометром, що встановлюється перед дренажем, — про замулення дренажу.

Слід зазначити, що контроль перепадів напору, на відміну від контролю положення кривої депресії, можна здійснювати на основі діагностичних моделей, зі встановленням відповідних залежностей (регресійних, функціональних, логічних тощо) контрольних діагностичних параметрів й ознак від незалежних від стану споруди параметрів (наприклад, рівня води у верхньому б'єфі (РВБ), напору, температури води тощо).

Використання діагностичних моделей при оцінці стану гідроспоруд, зокрема і земляних гребель, на основі інструментальних спостережень є загальноприйнятим підходом [6, 7].

На разі найбільше поширення серед діагностичних моделей, на основі яких здійснюється оцінка стану земляних гребель при експлуатації за даними інструментальних спостережень, набули різного роду регресійні моделі: лінійні, нелінійні, в тому числі і багатофакторні, а також, авторегресійні, дистрибутивно-лагові тощо. В останніх моделях тим чи іншим способом враховується фактор часу. Регресійний аналіз дозволяє спростити задачу діагностики земляної греблі й оцінки її стану, оскільки при цьому відпадає необхідність у вирішенні складних задач структурної та параметричної ідентифікації феноменологічних моделей процесів і явищ, що визначають поведінку греблі та її стан при експлуатації, що, як відомо, будуються на основі систем рівнянь теорії пружності, теплопровідності, гідромеханіки тощо з необхідними умовами однозначності.

Однак побудова адекватної регресійної моделі також може бути непростю задачею, особливо коли мова йде про динамічне моделювання, з врахуванням фактору часу. Досить часто і побудова статичної моделі, особливо багатофакторної, суттєво ускладнюється.

Проблема полягає в тому, що з урізноманітненням, зокрема зі збільшенням кількості накопичених даних спостережень, або зі зростанням складності і розмірності моделі можуть виникати проблеми зі стійкістю рішення оптимізаційної задачі.

Як відомо, вибір регресійної моделі ґрунтується на мінімізації відповідного функціоналу (функції помилок), який, зазвичай, записується у вигляді суми квадратів відхилень модельних значень $\bar{y} = f(a_0, a_1, \dots, x_j)$, $j = \overline{1, m}$, деякого діагностичного параметра від спостережень, де – незалежні параметри моделі загальної кількістю:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = f(a_0, a_1, \dots) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де a_0, a_1, \dots – шукані коефіцієнти регресійної моделі.

Метод (2) називають ще методом найменших квадратів.

Таким чином на основі вирішення задачі (2) реалізується принцип оптимізації – пошук оптимальної, найкращої моделі.

Однак процес оптимізації передбачає виведення системи, що досліджується, на певні граничні обмеження (гіпотеза про незалежність випадкових величин та нормальний закон їх розподілу, сталість дисперсії для різних вибірок та ін.). На практиці ці граничні обмеження не завжди

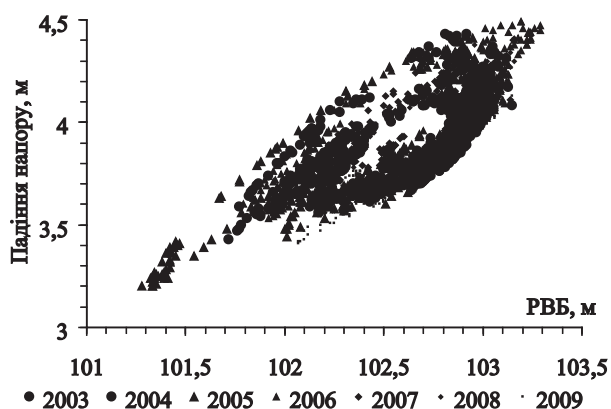
строго виконуються (див. графічну ілюстрацію на прикладі залежності перепаду напору від рівня води у верхньому б'єфі (РВБ) на Рис. 2, 3).

На Рис. 2 (а, б) наглядно показано принципову неможливість побудови адекватної регресійної моделі через змінність дисперсії відхилень (гетероскедастичність) моделі, що породжується, зокрема, надмірною кількістю даних спостережень та їх неоднорідністю.

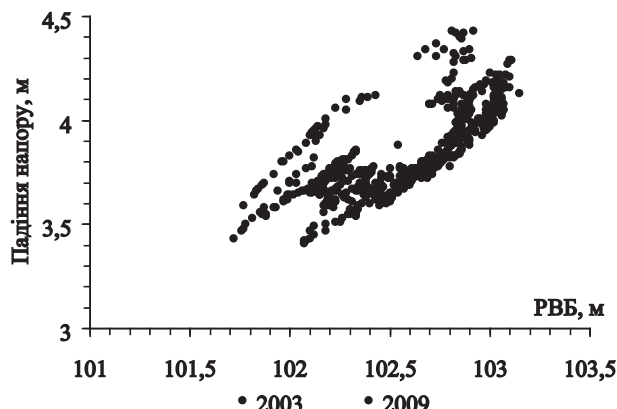
На Рис. 3 показано інший приклад нестійкості рішення оптимізаційної задачі, коли орієнтація на більш високий рівень детермінації, який характеризується коефіцієнтом R^2 , може призводити до невизначеності екстраполяційного прогнозування. При цьому в обох випадках будувалися прості регресійні моделі.

Практика показує, що збільшення розмірності моделі за рахунок врахування більшої кількості параметрів, не здатне подолати проблему гетероскедастичності моделі і знизити невизначеність екстраполяційного прогнозування [8].

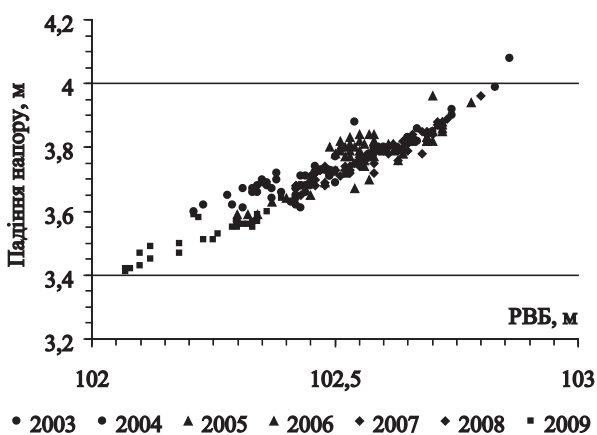
Слід зазначити, що більшість задач, що постають в результаті декомпозиції, структуризації математичних моделей, є некоректно поставленими [9]. В результаті навіть малі зміни вхідних даних



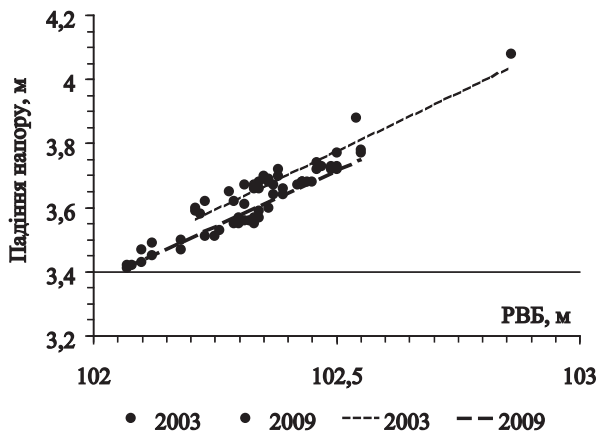
а) 2003 -2009 р. р.



б) 2003 і 2009 р. р.



в) 2003 -2009 рр. (грудень місяць)



г) 2003 і 2009 рр. (грудень місяць)

Рис. 2. Поля розсіювання падіння напору в тілі земляної греблі Київського гідрозузда в залежності від РВБ для різних часових інтервалів спостережень



(незалежних змінних) можуть призводити до значних змін на "виході" (залежної змінної) з порушенням умов стійкості розв'язків на основі "удосконаленої" моделі.

Яким же може бути вихід в ситуації, що складається?

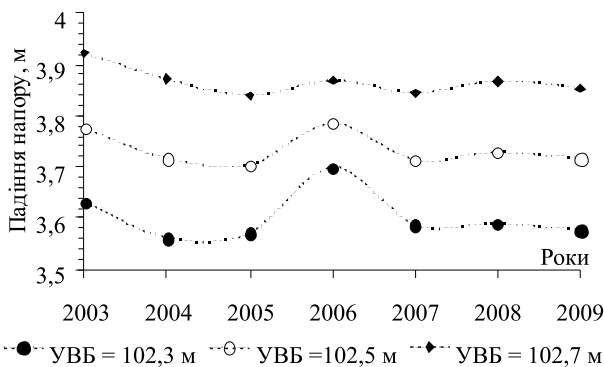
Вихід, на нашу думку, лежить у відмові від стереотипів. За Л. Л'юнгом [10], моделювання за даними спостережень, або, в загальному випадку, — вирішення задачі структурно-параметричної ідентифікації моделі, це скоріше мистецтво, аніж наука, адже потребує уміння дослідника за інформацією, що неявно міститься у вибірці даних, а також на основі апріорних знань сформулювати нестандартні вимоги до моделі, адекватної меті моделювання.

Зокрема, якщо мова йде про структуру задачі, то її слід здійснювати не за рахунок ускладнення моделі (наприклад, йти від простої регресії до множинної), а за рахунок декомпозиції задачі шляхом побудови множини простих моделей.

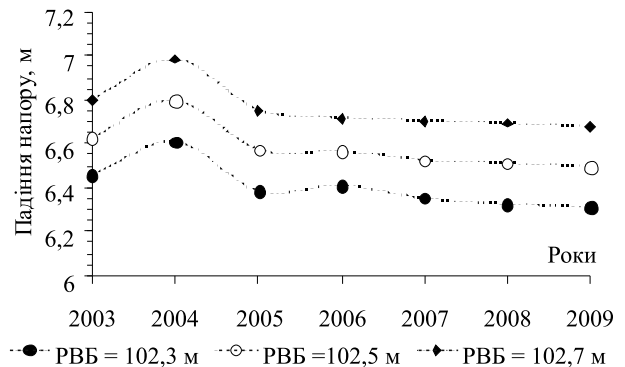
На Рис. 2 (в, г) і Рис. 4 показано приклади такої декомпозиції. Завдяки "розчленуванню" простої лінійної регресії падіння напору в залежності від рівня води у верхньому б'єфі (РВБ) по рокам спостережень для одного місяця було отримано сімейство лінійних регресій, кожна з яких може вважатися цілком прийнятною, адекватною моделлю.

Композиція отриманих результатів моделювання показана на Рис. 5—7, де показані еволюції середніх значень падіння напору при різних значеннях рівнів води у верхньому б'єфі (РВБ) для двох ділянок на ПК-211 лівобережної земляної греблі Київського гідровузла.

Про що можуть свідчити отримані нами результати в наведеному прикладі?



а) ділянка між верхнім б'єфом та п'єзометром П-62



б) ділянка між верхнім б'єфом та п'єзометром П-63-б

Рис. 5. Еволюції середнього (регресії) падіння напору в тілі земляної греблі Київського гідровузла при різних РВБ

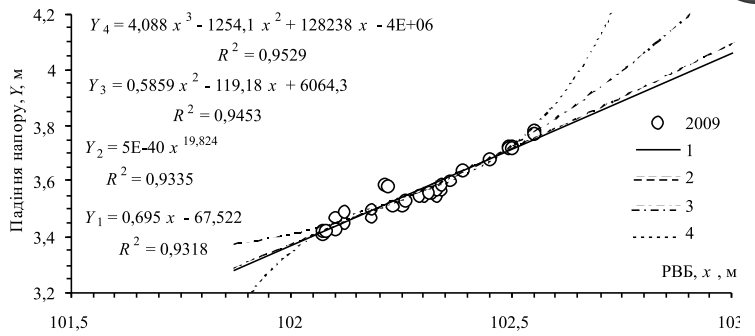


Рис. 3. Невизначеність екстраполяційного прогнозування середнього (регресії) падіння напору в тілі земляної греблі Київського гідровузла в залежності від РВБ за допомогою різних регресійних моделей

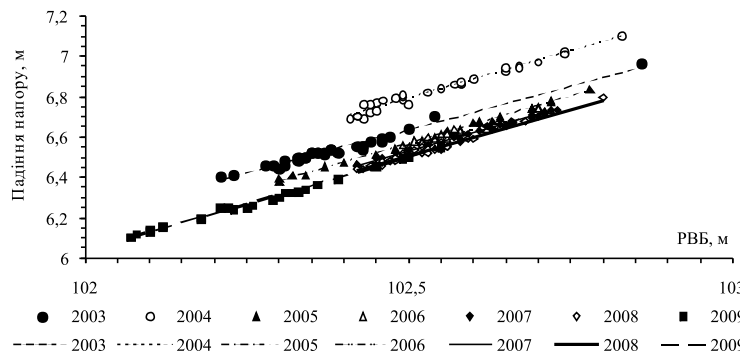


Рис. 4. Приклад розчленування регресії падіння напору в тілі земляної греблі Київського гідровузла в залежності від РВБ

Земляна гребля є складною динамічною системою, стан якої постійно змінюється в часі в результаті фільтрації. При цьому різним часовим інтервалам можуть відповідати різні діагностичні моделі перепадів напору. Має місце еволюція діагностичних моделей перепадів напору на різних ділянках, моделей, що найкраще відповідають даним п'єзометричних спостережень на окремих часових інтервалах.

Вибір розрахункових часових інтервалів для формування вибірових сукупностей даних п'єзометричних спостережень в принципі може

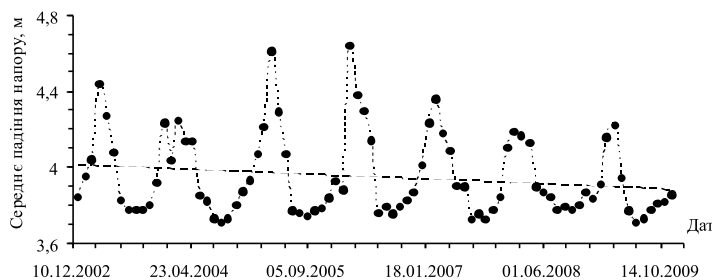


Рис. 6. Еволюція середнього (регресії) щомісячного падіння напору в тілі земляної греблі Київського гідровузла при РВБ = 102,7 м

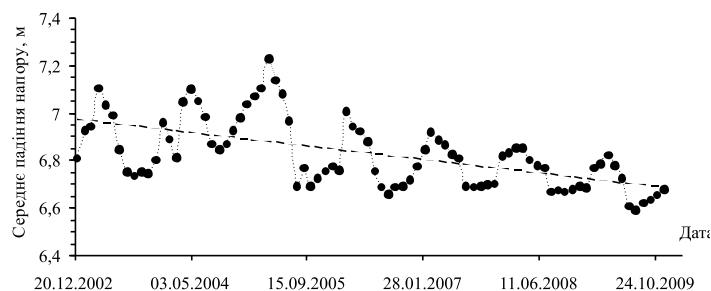


Рис. 7. Еволюція середнього (регресії) щомісячного падіння напору в тілі земляної греблі Київського гідровузла при РВБ = 102,7 м

бути довільним. Доцільно враховувати сезонний фактор, різні режими експлуатації водосховища (наповнення, спрацювання, стояння певного рівня) тощо. При врахуванні сезонного фактора в якості незалежного параметра для побудови рівнянь зв'язку перепадів напору достатньо орієнтуватися на рівень води у верхньому б'єфі або напір. Вибір "кращого" для моделі незалежного параметра (РВБ чи напору на греблі) легко здійснити на основі кореляційного аналізу.

Висновок. Запропонований нами новий підхід до оцінки стану земляної греблі, що перебуває в постійній експлуатації, за даними регулярних п'єзометричних спостережень на основі аналізу еволюцій модельних значень контрольних діагностичних параметрів, представлених перепадами напору на різних розрахункових ділянках поперечних перерізів тіла греблі, дозволяє реалізувати на практиці основні принципи технічної діагностики, сформульовані відомим британським інженером Р. Коллакотом [11], і альтер-

нативу принципу оптимізації — принцип адаптивізації [1], який реалізує основні ідеї моделювання за даними натурних спостережень Л. Л'юнга [10]. В загальному процесі контролю і діагностування стану земляної греблі ці принципи можна сформулювати наступним чином: а) забезпечення регулярних замірів обраних залежних та незалежних від стану греблі діагностичних параметрів й ознак; б) виявлення змін в часі в поведінці обраних контрольних, залежних від стану споруди діагностичних параметрів й ознак при незмінних значеннях відповідних незалежних параметрів; в) орієнтація на прості моделі, що найкраще адаптуються до даних окремих часових інтервалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Векслер А.Б., Ивашищев 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.
2. Стефанишин Д.В. Оцінка живучості гребель за результатами статистичного аналізу їх аварійності// Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. Вип. 1 (49). Рівне: НУВГП, 2010. — С. 42–48.
3. *The Aging of Embankment Dams*// Prepared by the USSD Committee on Materials for Embankment Dams. United States Society on Dams (USSD). May, 2010. — 11 p.
4. Аравин В.И., Носова О.Н. Натурные исследования фильтрации. —Л.: Энергия, 1969. — 256 с.
5. Беллендир Е.Н., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. —СПб.: В 2-х томах. Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2003, 2004. — 553 с., — 524 с.
6. Кавешников Н.Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений. —М.: Агропромиздат, 1989. — 272 с.
7. Малаханов В.В. Техническая диагностика грунтовых плотин. —М.: Энергоатомиздат, 1990. — 121 с.
8. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. —М.: Наука, 1981. — 487 с.
9. Тихонов А.Н., Гончарский А.В. и др. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. —М.: Наука, 1983. — 198 с.
10. Л'юнг Л. Идентификация систем. — М.: Наука, 1991. — 431 с.
11. Коллакот Р. Диагностика поврежденных: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 512 с.