

УДК 626/627

Стефанишин Д. В., д.т.н., професор (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне; Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ); **Дем'янюк А. В., ст. викладач** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В П'ЄЗОМЕТРИ В ТІЛІ ЗЕМЛЯНОЇ ГРЕБЛІ БІЛЯ ДРЕНАЖУ ЗА ДАНИМИ РЕГУЛЯРНИХ П'ЄЗОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Наведено результати прогнозування рівня води в п'єзометрі, встановленому в тілі земляної греблі біля дренажу, за даними регулярних п'єзометричних спостережень, які забезпечує автоматизована система контролю, з використанням індуктивних моделей кінематично-регресійного типу.

Ключові слова: земляна гребля, індуктивна модель, п'єзометричні спостереження, прогнозування, ситуаційна модель, фільтрація.

Аналіз причин виникнення аварій на земляних греблях свідчить, що в більшості випадків (до 60% від загальної кількості) вони, так чи інакше, пов'язуються з фільтрацією [1]. Зважаючи на це, контролю фільтрації на земляних греблях приділяється значна увага [2].

Серед видів інструментального контролю фільтрації на земляних греблях особливе значення мають п'єзометричні спостереження [2, 3]. Поверхня депресії, побудована за результатами натурних вимірювань рівня води в п'єзометрах, встановлених в кількох вимірювальних (п'єзометричних) створах, найбільш наглядно характеризує фільтраційний потік в тілі земляної греблі та вказує на можливі фільтраційні порушення. Від положення поверхні депресії в тілі земляної греблі залежить стійкість її низового укусу. За допомогою п'єзометрів, встановлених біля протифільтраційних елементів і дренажних пристроїв, перевіряється їх працездатність, здійснюється перевірка загальної і локальної фільтраційної міцності тіла греблі та її основи, а також достатність заглиблення поверхні депресії під поверхню низового укусу для недопущення її сезонного промерзання.

Рівні води в п'єзометрах контролювати відносно легко, тому належно організований п'єзометричний контроль дозволяє забезпечити завчасне виявлення фільтраційних порушень, оцінити стан земляної греблі в цілому та стан її окремих зон і елементів. Це обумовлює акту-

альність досліджень, пов'язаних з контролем фільтрації в тілі земляних гребель на основі п'езометричних спостережень.

На разі контроль фільтрації в тілі земляних гребель за даними п'езометричних спостережень здійснюється на основі порівняння фактичних, заміряних даних про рівні води в п'езометрах з деякими їх допустимими значеннями [2, 3].

Якнайкраще таке порівняння з точки зору оперативності контролю може здійснюватися за рахунок регулярних п'езометричних спостережень, які забезпечує їх автоматизація. Впровадження сучасних автоматизованих систем контролю (АСК) стану гідроспоруд, як показав досвід застосування АСК на гідроспорудах Київського гідровузла та інших гідроспорудах Дніпровського каскаду [4], значно розширило можливості традиційного п'езометричного контролю фільтрації на земляних греблях, оснащених великою кількістю п'езометрів, оскільки дозволяє не тільки забезпечувати високу точність замірів, а й неперервність, послідовність і систематичність (регулярність) таких спостережень в просторі і часі, встановлювати довільні інтервали часу між окремими замірами тощо.

Однак «відхилення» натурального положення рівня води в тому чи іншому п'езометрі від допустимого не завжди однозначно можуть свідчити про порушення фільтраційного режиму в тілі греблі. Земляна гребля, що перебуває в експлуатації, включно з п'езометричною мережею, є складною, стохастичною, динамічною системою, стан якої змінюється в часі, в тому числі і випадковим чином. В тілі греблі, на різних ділянках фільтрації, одночасно, можуть відбуватися як суфозійні процеси, так і процеси кольматажу, і для оцінки її стану в режимах, що повторюються, важливо контролювати загальний напрямок змін, що відбуваються із спорудою [5] і які відбиваються на показах п'езометрів. При цьому для ефективності п'езометричного контролю важливо не тільки відслідковувати й інтерпретувати [6], а й передбачати ці зміни, що неможливо без перспективного прогнозування рівнів води в п'езометрах залежно від передісторії завантаження споруди та ситуації, що може складатися на споруді.

Прогнозування за даними спостережень є складною математичною задачею, яка належить до так званих некоректних (обернених) задач моделювання, обтяжених невизначеністю.

Як відомо, традиційні методи побудови математичних моделей за натурними даними з метою прогнозування ґрунтуються на принципі оптимізації [7, 8]. Однак процес оптимізації при побудові таких моделей передбачає вихід на певні граничні обмеження, які на практиці не

завжди виконуються. При цьому зі збільшенням кількості даних проблеми, пов'язані зі стійкістю рішення оптимізаційної задачі, можуть виникати навіть при використанні простих моделей, а збільшення розмірності моделей за рахунок врахування додаткових параметрів, врахування нелінійних ефектів тощо ці проблеми тільки посилюють [5].

В [5, 9-12] запропоновано новий підхід до моделювання і прогнозування стану складної системи за даними моніторингу, що ґрунтується на побудові ситуаційних і індуктивних моделей регресійного типу. Ситуаційні моделі адаптуються до даних окремих часових інтервалів функціонування системи з однорідним прогнозним фоном [5, 9], які обмежуються монотонними або квазістаціонарними динамічними рядами даних, і вважаються адекватними на цих інтервалах [5, 10]. Результати ситуаційного моделювання формують підставу (базу) для побудови індуктивних моделей, де враховуються особливості еволюції параметрів стану системи в часі [5, 9, 10]. Загальна прогнозна модель станів системи при такій постановці задачі являє собою сімейство індуктивних моделей як моделей «рівнів», представлених у вигляді регресій модельних значень або комбінацій трендів та регресій залишків трендів модельних значень, що встановлюються за ситуаційними моделями минулих періодів, від деяких похідних параметрів незалежних змінних [11, 12]. Прогнозування стану системи може здійснюватися як на основі ситуаційних моделей, за допомогою яких відслідковується поведінка параметрів стану системи в межах обмежених інтервалів часу, на яких ситуаційні моделі є адекватними, так і на основі індуктивних моделей, за допомогою яких відслідковується еволюція ситуаційних моделей як фазових портретів минулих станів системи та відтворюються ситуаційні моделі станів системи майбутніх періодів.

В якості рівнянь зв'язку при такому моделюванні можуть використовуватися відносно прості залежності (функціональні – кінематичного типу у вигляді трендів і регресійні), що легко адаптуються до нових даних та змін прогнозного фону. Можуть враховуватися лаги між змінними моделей. Допускається модифікація параметрів моделі, якими описується стан системи, з метою побудови адекватних ситуаційних і індуктивних моделей для цілей прогнозування.

При цьому, якщо ситуаційні моделі майбутніх періодів, відтворені за допомогою індуктивних моделей, відповідатимуть майбутнім натурним даним, то це однозначно вказуватиме на коректність прогнозу, свідчатиме про адекватність вибраних математичних моделей та про еволюційний, контрольований характер змін станів системи. Такий підхід до моделювання і прогнозування фільтрації в тілі земляних гребель є новим і потребує перевірки на реальних прикладах.

Загальна картина фільтрації в тілі земляної греблі в кожен поточний момент часу складається з даних, які надходять з окремих п'єзометрів. Відповідно і задача її прогнозування складатиметься з індивідуальних прогнозів рівнів води в окремих п'єзометрах. Таким чином коректність прогнозування депресійної поверхні в тілі греблі визначатиметься адекватністю відповідних моделей і коректністю прогнозування рівня води в кожному окремому п'єзометрі.

В якості прикладу для перевірки можливості використання ситуаційно-індуктивного моделювання за даними регулярних спостережень, які забезпечує АСК, при прогнозуванні рівнів води в п'єзометрах було вибрано п'єзометр П-65Б, розташований в області дренажу в створі ПК-211 лівобережної земляної греблі Київського гідровузла.

Ситуаційне моделювання здійснювалося на основі щоденних спостережень, що проводилися в 2002-2009 рр., для першої декади грудня кожного року. З врахуванням рекомендацій [5] в якості незалежної змінної при побудові ситуаційних моделей на вибраних інтервалах часу приймався рівень води у верхньому б'єфі (РВБ), в якості залежної змінної – падіння напору h між РВБ та рівнем води у п'єзометрі:

$$h = x - z, \quad (1)$$

де x – рівень води у РВБ; z – рівень води у п'єзометрі. Відповідно, майбутній рівень води в п'єзометрі на j -му інтервалі часу (для першої декади грудня місяця) та k -му РВБ буде:

$$z_{p,jk} = x_{jk} - h_{p,jk}, \quad (2)$$

де x_{jk} – очікуване значення РВБ, $h_{p,jk}$ – прогнозоване значення падіння напору при k -му РВБ на j -му інтервалі часу.

Ситуаційні моделі у формі простих лінійних регресій h від РВБ (x) на ділянці фільтрації між верхнім б'єфом і п'єзометром П-65Б за даними спостережень в 2002-2009 р. наведено на рис. 1.

За допомогою ситуаційних моделей $h_{r,j}(x)$ можна здійснювати прогнозування рівня води в п'єзометрі на відповідних j -х інтервалах часу, на яких ці моделі можуть вважатися адекватними (наприклад, орієнтуючись на високі значення коефіцієнтів детермінації (R^2), близькі до 1, та відсутність повторних аномальних викидів). При цьому сукупності відповідних розрахункових (модельних) значень падіння напору $h_{r,j}(x_k)$, розрахованих для кожного з виділених j -х періодів часу при деяких зафіксованих значеннях РВБ, що можуть повторюватися

протягом служби греблі ($x_{kj} = \text{const}$), формуватимуть, як показано

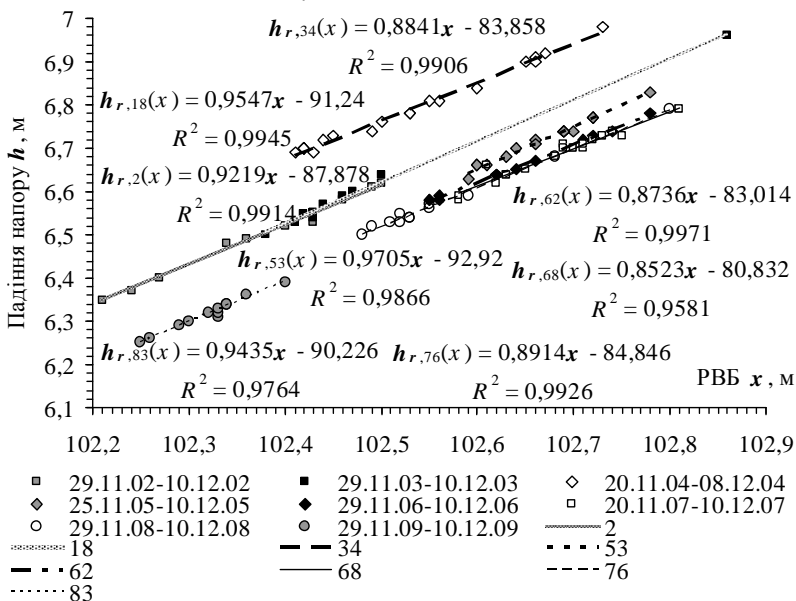


Рис. 1. Ситуаційні регресійні моделі падіння напору $h_{r,j}(x)$

на ділянці фільтрації між верхнім б'єфом та п'єзометром П-65Б

нижче на рис. 2, ряди динаміки, що відображають еволюційні зміни в показах п'єзометра в часі. В нашому випадку ці еволюційні зміни можна представити кінематичними моделями (трендами) у вигляді експоненціальних функцій часу (рис. 2).

В загальному вигляді, з врахуванням випадкових відхилень модельних значень падінь напору від трендів, індуктивні (прогнозні) моделі падінь напору k -х рівнів ($k = 1, 2, 3$; $x_1 = 102,2$ м; $x_2 = 102,6$ м; $x_3 = 103,0$ м), представлялися у вигляді композицій двох складових: регулярної (тренду) та регресії відповідних випадкових відхилень Δh_{jk} («залишків») вилучення k -го тренду в ряді модельних значень $h_{r,j}(x_k)$ від деякої пояснюючої змінної x_L :

$$h_{p,k}(t, x_L) = h_{m,k}(t) + \Delta h_{r,k}(x_L), \quad k = 1, 2, 3, \quad (3)$$

де $\Delta h_{jk} = h_{r,j}(x_k) - h_{m,k}(t)$, x_L – пояснююча змінна, яку, в нашому випадку, зі зміщенням (лагом) в ретроспективу на один часовий період

(на одну ситуаційну модель), було вибрано на основі кореляційного

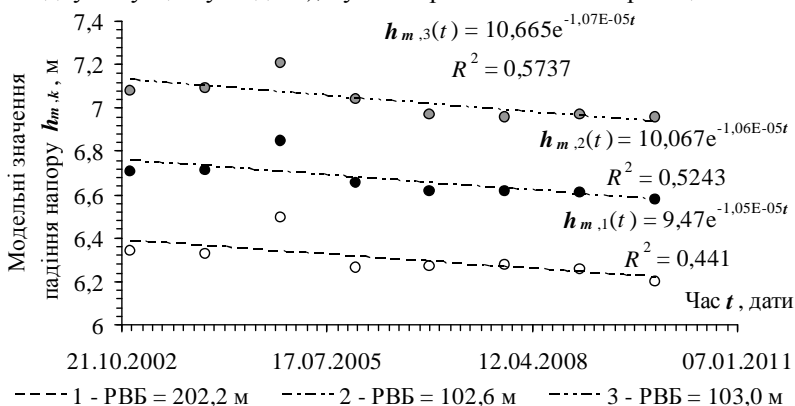


Рис. 2. Виділення кінематичних складових (трендів) $h_{m,k}(t)$, $k = 1, 2, 3$, в ряді модельних значень падінь напору на ділянці фільтрації між верхнім б'єфом та п'єзометром П-65Б

аналізу з рядами модельних даних Δh_{jk} :

$$x_L = (x_{1,j-1} + x_{n,j-1}) / 2, \quad (4)$$

де $x_{1,j-1}$, $x_{n,j-1}$ – значення першого і останнього членів ряду значень РВБ попереднього ($j-1$) періоду.

Модельні значення падіння напору на ділянці фільтрації та значення «залишків» Δh наведено в табл. 1.

Значення пояснюючої змінної x_L для періодів, що передують відповідним j -м часовим інтервалам, для яких будувалися ситуаційні моделі (перша декада грудня кожного року), наведено в табл. 2.

Регресійні моделі для випадкової складової $\Delta h_{r,k}(x_L)$ для k -го рівня РВБ представлено на рис. 3.

З метою перевірки адекватності індуктивних моделей виду (3), побудованих за даними спостережень 2002-2009 р. р. для цілей прогнозування рівнів води в п'єзометрі П-65Б, здійснювалося перспективне прогнозування значень падіння напору на ділянці фільтрації між РВБ та рівнем води у п'єзометрі П-65Б на грудень 2010, 2011, 2012 рр.

На рис. 4 наведено результати перспективного прогнозування падінь напору на вибраній ділянці фільтрації у вигляді відповідних ситуаційних моделей з врахуванням спостережених значень змінної x_L , які

порівнюються з моделями, побудованими за натурними даними.

Таблиця 1

Моделні (для регресій h_r , трендів h_m) значення падінь напору та «залишків» Δh на ділянці фільтрації в першу декаду грудня

Рік	РВБ, м								
	102,2			102,6			103,0		
	h_r	h_m	Δh	h_r	h_m	Δh	h_r	h_m	Δh
2002	6,340	6,382	-0,041	6,709	6,758	-0,050	7,078	7,133	-0,055
2003	6,330	6,357	-0,027	6,712	6,732	-0,020	7,094	7,105	-0,011
2004	6,497	6,333	0,164	6,851	6,706	0,144	7,204	7,078	0,127
2005	6,265	6,309	-0,044	6,653	6,680	-0,027	7,042	7,050	-0,008
2006	6,268	6,284	-0,017	6,617	6,655	-0,037	6,967	7,022	-0,056
2007	6,273	6,260	0,013	6,614	6,629	-0,015	6,955	6,995	-0,040
2008	6,255	6,236	0,019	6,612	6,603	0,008	6,968	6,968	0,001
2009	6,200	6,213	-0,013	6,577	6,578	-0,001	6,955	6,941	0,014

Таблиця 2

Значення змінної x_L для попередніх $(j-1)$ періодів

Рік	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
x_L	102,47	102,93	102,68	102,62	103,07	102,96	102,84	102,59

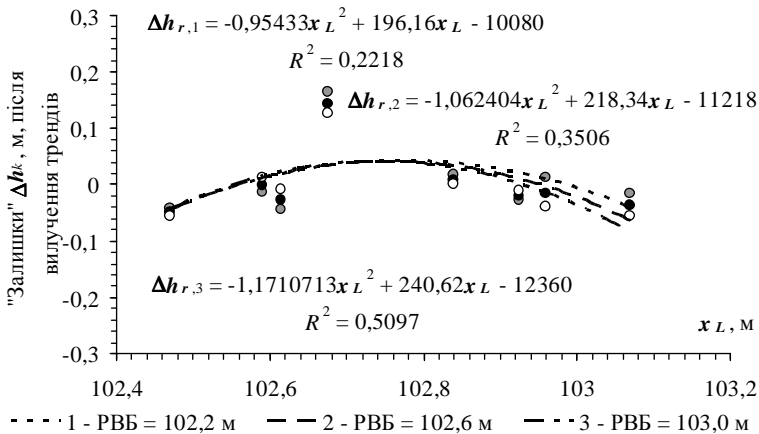


Рис. 3. Моделювання регресійних складових $\Delta h_{r,k}(x_L)$, $k = 1,2,3$, при індуктивному моделюванні падінь напору на ділянці фільтрації між верхнім б'єфом та п'єзометром П-65Б

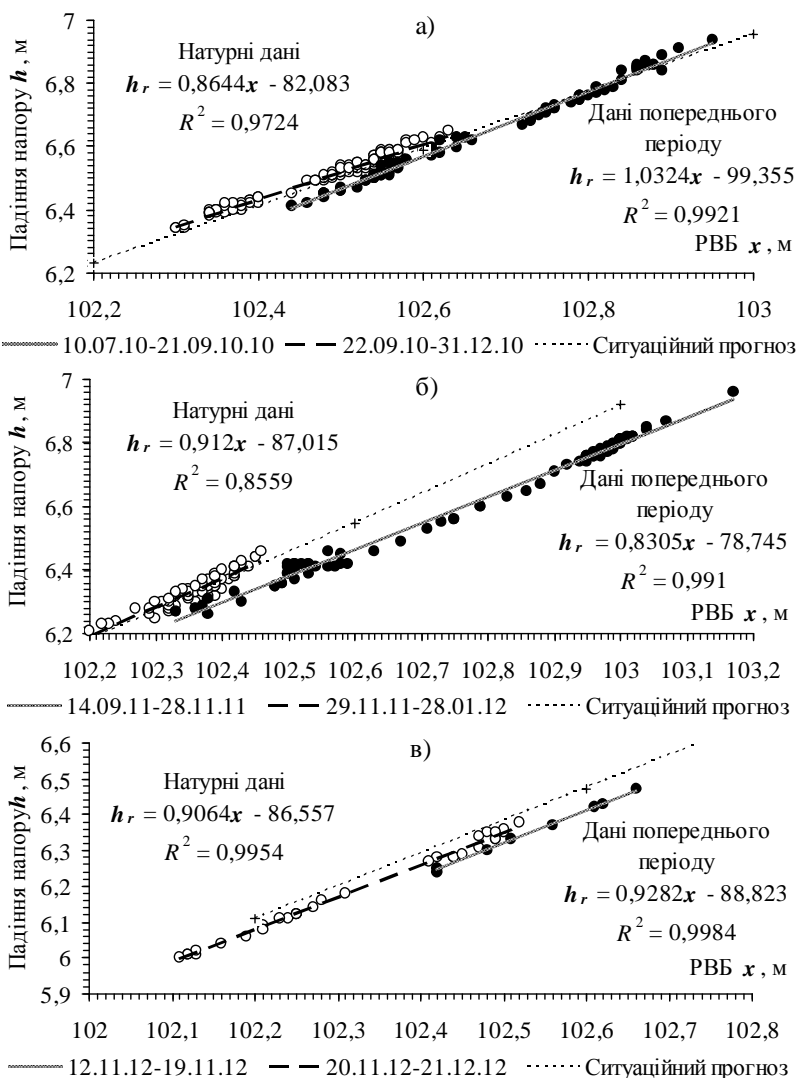


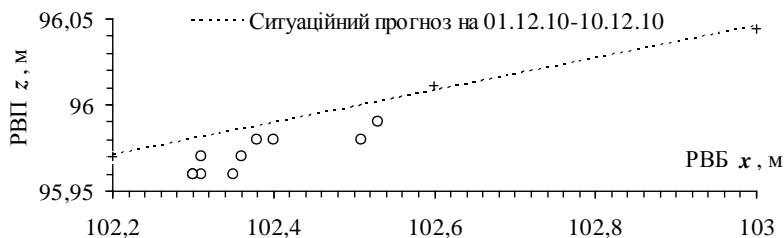
Рис. 4. Співставлення результатів прогнозування падіння напору на ділянці фільтрації від урізу РВБ до п'єзометра П-65Б з даними спостережень в 2010 (а), 2011 (б) і 2012 (в) рр.

На рис. 5 наведено результати перспективного прогнозування рів-

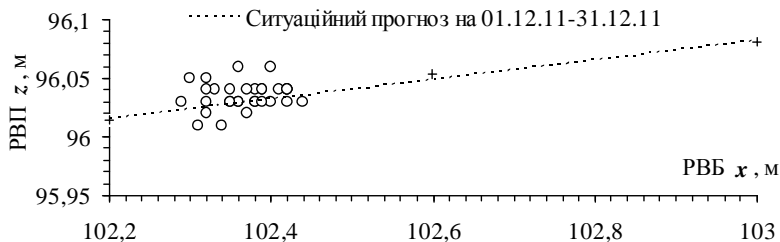
нів води в п'езометрі П-65Б в грудні 2010, 2011, 2012 рр., які порівнюються зі спостереженими даними.

В цілому результати прогнозування відповідають натурним даним. Відхилення прогнозних значень відмітки рівня води в п'езометрі від даних натурних спостережень не перевищує кількох сантиметрів.

а)



б)



в)

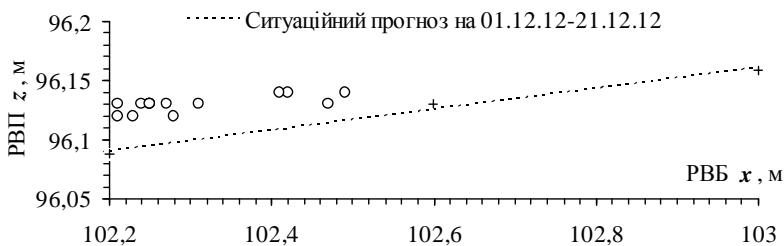


Рис. 5. Співставлення результатів прогнозування відмітки рівня води (z) в п'езометрі (РВП) П-65Б з даними спостережень в 2010 р. (а), 2011 р. (б) та 2012 р. (в)

В ході проведених досліджень виконано прогнозування рівня води в п'езометрі П-65Б, встановленому в тілі лівобережної земляної греблі Київського гідровузла, результати якого підтверджують можливість використання і адекватність запропонованих індуктивних моделей кі-

нематично-регресійного типу для цілей прогнозування на віддалену перспективу (на кілька років), за даними регулярних п'єзометричних спостережень, які забезпечує АСК. Ситуаційно-індуктивне моделювання дозволяє по мірі надходження нових даних змінювати період підстави прогнозу (проміжок часу спостережень, на базі якого будуються індуктивні математичні моделі) та здійснювати уточнення їх параметрів, що підвищуватиме коректність наступних прогнозів.

1. Беллендир Е. Н. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых ГТС / Е. Н. Беллендир, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин и др. В 2-х томах. – СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003, 2004. – 553 с. – 524 с.
2. Малаханов В. В. Техническая диагностика грунтовых плотин / В. В. Малаханов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 121 с.
3. Кавешников Н. Т. Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений / Н. Т. Кавешников. – М. : Агропромиздат, 1989. – 272 с.
4. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні [Електронний ресурс] / Офіційний сайт Держслужби України з надзвичайних ситуацій. 2004-2012. – Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/content/national_lecture.html.
5. Стефанишин Д. В. Про один підхід до оцінки стану земляної греблі, що перебуває в постійній експлуатації, за даними регулярних п'єзометричних спостережень / Д. В. Стефанишин // Гідроенергетика України, № 3, 2012. – С. 27-32.
6. In-Soo Jung. Interpreting the Dynamics of Embankment Dams through a Time-Series Analysis of Piezometer Data Using a Non-Parametric Spectral Estimation Method / In-Soo Jung, M. Berges, J. H. Garrett Jr, Ch. J. Kelly // Computing in Civil Engineering, 2013. – P. 25–32.
7. Довгий С. О. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень / С. О. Довгий, П. І. Бідюк, О. М. Трофимчук, О. І. Савенков. – К. : Азимуг-Україна, 2011. – 608 с.
8. Kuhn M. Applied Predictive Modeling / M. Kuhn, K. Johnson. – New York : Springer Science+Business Media, 2013. – 600 p.
9. Stefanyshyn D.V. A Method of Forecasting of Indexes of Dynamic System that evolves slowly, based on Time Series Analysis / D. V. Stefanyshyn // ICSM 2013. Proc. of 4th Int. Conf. on Inductive Modelling. Kyiv, Ukraine, September 16-20, 2013. – P. 221–224.
10. Stefanyshyn D. V. Prediction of indexes of dynamic system with use of observational data as time series / D. V. Stefanyshyn // Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2013). Abstracts of XXII International Conference. September 23-27. Foros-Yalta, Ukraine. – К. : 2013. – P. 31–32.
11. Стефанишин Д. В. Метод прогнозного моделювання показників стану гідроспоруд за даними моніторингу/ Д. В. Стефанишин // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації. Тези доповідей VI Міжнар. наукової конференції. – Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет. 2014. – С. 157–158.
12. Стефанишин Д. В. Про один підхід до прогнозування стану складної системи за даними моніторингу / Ю. Д. Стефанишина-Гаврилюк, Д. В. Стефанишин // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT-2014, Київ, травень 2014 р. / ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ». – К. : ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2014. – С. 155.

Рецензент: д.т.н., проф. Щодро О. Є. (НУВГП)

Stefanyshyn D. V., Doctor of Engineering, Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne; Institute of telecommunications and global information space of National academy of sciences of Ukraine, Kyiv); **Demianiuk A. V., Senior Lecturer** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

PREDICTING OF WATER LEVEL IN A PIEZOMETER SET IN THE BODY OF AN EARTHFILL DAM NEAR DRAINAGE ACCORDING TO REGULAR PIEZOMETRIC OBSERVATIONS DATA

The results of predicting of water level in a piezometer set in the body of an earthfill dam near drainage are presented according to regular piezometric observations being provided with automated control system with using of inductive models of cinematically regressive type. *Keywords:* earthfill dam, inductive model, piezometric observations, predicting, seepage, situational model.

Стефанишин Д. В., д.т.н., профессор (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно; Институт телекоммуникации и глобального информационного пространства НАН Украины, г. Киев); **Демьянюк А. В., ст. преподаватель** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ В ПЬЕЗОМЕТРЕ В ТЕЛЕ ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЫ У ДРЕНАЖА ЗА ДАННЫМИ РЕГУЛЯРНЫХ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Приведены результаты прогнозирования уровня воды в пьезометре, установленном на земляной плотине у дренажа, по данным регулярных пьезометрических наблюдений, обеспечиваемых автоматизированной системой контроля, с использованием индуктивных моделей кинематически-регрессионного типа. *Ключевые слова:* земляная плотина, индуктивная модель, пьезометрические наблюдения, прогнозирование, ситуационная модель, фильтрация.
