

2. Kristopchuk, M. J. (2009). Efektivnist pasazhirskoi transportnoi Sistemi primiskogo spoluchennya. Kharkiv, 214.
3. Permovskyy, A. A. (2011). Passazhyrskye oftransportation. Nizhny Novgorod, 164.
4. Dolya, V. K. (2011). Pasazhirski transported. Kharkiv, 504.
5. Spiess, H., Florian, M. (1989) Optimalstrategies: a new assignment model for transitnet works. Transportation Research Part B: Methodological, 23 (2), 83–102. doi: 10.1016/0191-2615(89)90034-9
6. Cepeda, M., Cominetti, R., Florian, M. (2006). A frequency-based assignment model for congested transit networks with strict capacity constraints: characterization and computation of equilibria. Transportation Research Part B: Methodological, 40 (6), 437–459. doi: 10.1016/j.trb.2005.05.006
7. Wu, J. H. (1994) Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms. Transportation Science, 28 (3), 193–203. doi: 10.1287/trsc.28.3.193
8. Ponkratov, D. P., Faletskaya, G. I. (2014). Valuing criteria for selecting them ovement of passenger sincities. Scientificnotes. Interuniversitycollection, 46, 452–459.
9. Vinogradov, M. I. (Ed.) (1969). Guidance on the physiology of labor. Moscow, 408.
10. Davidich, J. O. (2006). Design motortechology. Protsivconsideringneuro science driver. Kharkov. 292.
11. Baevskii, R. M. (1984). Mathematical analysis of change sinheartrate during stress. Moscow, 222.
12. Halushko, V. G. (1976). Probabilistic and statistical methods by car. Kiev, 232.

Дата надходження рукопису 25.02.2015

Григорова Тетяна Михайлівна, кандидат технічних наук, докторант, кафедра транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002

E-mail: tagrigorova@yandex.ru

Давідіч Юрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, кафедра транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61005

E-mail: kafedra_tsl@ukr.net

Доля Віктор Костянтинович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою, кафедра транспортних систем і логістики, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61005

УДК 528.06

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.38832

АПРОКСИМАЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ КОНТРОЛЬНИХ ТОЧОК ГРУНТОВИХ ГРЕБЕЛЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЯДІВ ФУР'Є

© О. В. Мельник, Ю. А. Мельник

У статті розглядаються питання моделювання процесу осідання верху бетонного парапету ґрунтової греблі водосховища Хмельницької АЕС та прогнозування переміщення окремих марок. Пропонується здійснювати аналіз результатів високоточного геометричного нівелювання в 2 етапи: спочатку виділяється трендова складова із застосуванням поліноміальної апроксимації, а потім залишкові відхилення від кривої тренда апроксимують частковим рядом Фур'є

Ключові слова: апроксимація, прогнозування, ряди Фур'є, нівелювання, гідротехнічні споруди, прогнозна модель

The modeling process of settling of concrete top parapet of soil dam reservoir of Khmelnytsky NPP and forecasting movement of individual points is considered in the article. It is proposed to analyze the results of high-precision geometric leveling in 2 stages: at first is allocated trend component using polynomial approximation and then the remaining deviations from trend curve approximating by partial Fourier series

Keywords: approximation, prediction, Fourier series, leveling, waterworks, predictive model

1. Вступ

При експлуатації гребель виникає особлива потреба у моніторингових спостереженнях, що вимагає періодичного контролю та всебічного аналізу їх структурного стану і базується на великому наборі змінних, які визначають розмір деформацій. Значні деформації інженерних споруд, що наближаються до критичних, потенційно можуть викликати загибель великої кількості людей, потужні руйнування і нега-

тивні екологічні наслідки, тому збереження і довговічність гідротехнічних споруд є одним із найважливіших завдань.

Завдання розробки ефективних методів виявлення і прогнозування деформацій інженерних споруд є актуальним, оскільки його успішний розв'язок дозволить забезпечити надійність, довговічність і безпеку експлуатації відповідальних споруд, зокрема таких як ґрунтові греблі значної протяжності.

Вирішення цього завдання є неодмінною передумовою для підвищення ефективності використання капітальних вкладень у будівництво і раціонального планування різноманітних регламентних робіт, у тому числі геодезичних спостережень за деформаціями споруд.

2. Постановка проблеми

Надійня оцінка просторово-часового стану гідротехнічних об'єктів атомних електростанцій (АЕС) зумовлює необхідність проведення високоточних комплексних інженерно-геодезичних спостережень з метою забезпечення їх нормального і безаварійного експлуатаційного режиму.

Грунтові греблі АЕС за рівнем складності розвитку деформаційних процесів в них та ступеню їх аварійності у декілька разів перевищують будь-які гідротехнічні споруди аналогічного типу [1].

Найбільш точними методами визначення вертикальних зміщень гідротехнічних споруд є прецизійне геометричне нівелювання коротким променем. На основі таких даних оцінюються різноманітні явища, що активізують деформаційні процеси, і можуть мати аварійні наслідки. Для цього на основі інтерполяції результатів геодезичного моніторингу та побудови цифрових моделей поверхонь деформацій [2] розробляються різноманітні моделі оцінки і прогнозування вертикальних зміщень гідротехнічних споруд.

3. Літературний огляд

При моделюванні деформацій гідротехнічних споруд одними з перших були імовірно-статистичні [3], кореляційно регресійні методи [4], методи випадкових функцій [5], аналіз деформацій та їх зв'язок із конкретними явищами (набухання ґрунту, суфозія тощо [4, 6]. Виділяються статистичні моделі, які виражають залежність деформацій від фізико-механічних властивостей ґрунтів, гідрогеологічних, геологічних та інших факторів у поєднанні з конструктивними та будівельно-експлуатаційними напрямками [7].

Враховуючи широкий спектр інженерно-геологічних умов будівництва та різноманітності складності ґрунтових гребель, застосування того чи іншого методу має свої переваги та недоліки залежно від того, які параметри моделі є визначальними і яка проблема моделювання залишається актуальною. За останні роки зросла кількість публікацій, присвячених цим питанням [8], що свідчить про їх актуальність.

4. Розробка методики прогнозування

Результати спостережень за деформаціями гідротехнічних споруд можна представити у вигляді двох складових: систематичної та випадкової, що передбачає аналіз флуктуацій систематичної складової. Дані геодезичного моніторингу деформацій ґрунтових гребель отримують як таблично задану функцію, аргументом якої є протяжність греблі. Аналіз і інтерпретацію таких результатів значно полегшила б наявність аналітичного вигляду моделюю-

чої функції. Оскільки аналітичний вираз даної функції у переважній більшості випадків є невідомим, то постає практичне завдання: знайти емпіричну залежність, яка б найкращим чином відображала особливості розподілу вихідних даних.

У статті розглядаються питання моделювання процесу осідання верху бетонного парапету ґрунтової греблі водосховища Хмельницької АЕС та прогнозування переміщення окремих марок з використанням рядів Фур'є

Пропонується здійснювати аналіз результатів високоточного геометричного нівелювання в 2 етапи: спочатку виділяється трендова складова із застосуванням поліноміальної апроксимації, а потім залишкові відхилення від кривої тренда апроксимують частковим рядом Фур'є [2].

Для більш точної апроксимації процесу осідання вздовж гребеня бетонного парапету греблі доцільно виділити трендову складову процесу осідання у вигляді поліноміальної функції

$$h(x) = \sum_{i=0}^n C_i X^i \quad (1)$$

та апроксимації залишкових відхилень від кривої тренду частковим рядом Фур'є за дискретними значеннями висотних відміток контрольних марок (дюбелів).

В процесі математичної обробки вихідних даних за трендову складову нами взято поліном п'ятого степеня виду [3]:

$$h_5(x) = 1.163 - 42.199x + 22.304x^2 - 5.389x^3 + 0.607x^4 - 0.024x^5. \quad (2)$$

Достовірність такої апроксимації складає $R^2 = 0.735$. Для більш детального вивчення процесу вертикальних рухів у цьому ж циклі (38 цикл.) представимо відхилення результатів спостереження від значень, які одержали трендовою кривою (1), у вигляді скінченного ряду Фур'є:

$$\bar{h}(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{40} \left[a_k \cos\left(\frac{2k\pi}{L}x\right) + b_k \sin\left(\frac{2k\pi}{L}x\right) \right], \quad (3)$$

$$\text{де } a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{i\phi} - h_{i\tau})}{n}, \quad a_j = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (h_{i\phi} - h_{i\tau}) \cos\left(\frac{2j\pi}{L}x\right),$$

$$b_j = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (h_{i\phi} - h_{i\tau}) \sin\left(\frac{2j\pi}{L}x\right), \quad j = \overline{1..n}.$$

L – максимальна довжина греблі водосховища, $h_{i\phi}$ – фактичне осідання i -ї контрольної марки (дюбеля), $h_{i\tau}$ – осідання i -ї контрольної марки (дюбеля), отримане з трендової складової апроксимуючої функції за (2).

В результаті для будь якої точки гребеня бетонного парапету греблі водосховища ХАЕС запропонована апроксимуюча функція у вигляді [8]:

$$H(x) = h_5(x) + a_0 + \sum_{k=1}^{40} [a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)]. \quad (4)$$

5. Апробація результатів досліджень

Коефіцієнти скінченного ряду Фур'є даної функції апроксимації подано у табл. 1. Графічне пред-

ставлення процесу осідання гребеня бетонного парапету греблі водосховища та характер трендової кривої (2) показано на рис. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти скінченного ряду Фур'є апроксимуючої функції (4) осідань контрольних марок (дюбелів) верху бетонного парапету греблі водосховища Хмельницької АЕС

a0									
-1,159									
a01	a02	a03	a04	a05	a06	a07	a08	a09	a10
-0,514	-0,074	-0,642	0	0,472	1,079	-0,264	-0,96	0,224	0,242
a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27	a28	a29	a30
0,121	-0,24	0,638	0,409	0,956	0,302	-1,117	-1,335	0,481	1,152
a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18	a19	a20
-0,404	0,158	-0,24	-0,228	0,096	-0,316	0,052	0,363	-0,329	-0,063
a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37	a38	a39	a40
0,32	0,006	-0,953	0,142	-0,126	0,813	0,218	-0,689	0,166	-0,184
b01	b02	b03	b04	b05	b06	b07	b08	b09	b10
-0,493	0,05	0,622	-0,519	-0,34	1,507	0,025	1,071	0,052	0,425
b21	b22	b23	b24	b25	b26	b27	b28	b29	b30
-0,277	0,091	-0,297	0,827	-0,55	0,791	0,473	-0,027	0,011	0,401
b11	b12	b13	b14	b15	b16	b17	b18	b19	b20
0,243	-0,406	1,358	0,31	0,62	0,038	-0,154	-0,72	-0,018	-1,285
b31	b32	b33	b34	b35	b36	b37	b38	b39	b40
0,235	0,373	-0,27	0,117	0,066	-0,382	1,474	-0,398	-0,038	-0,545

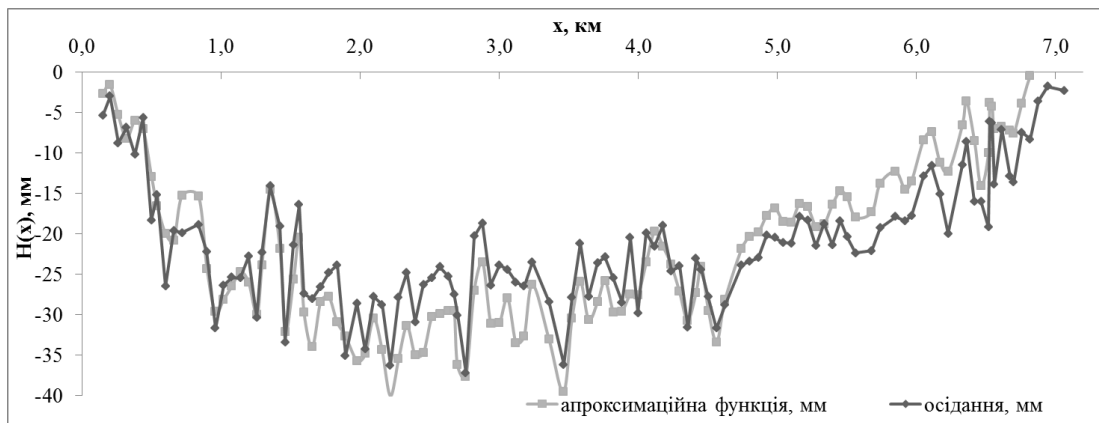


Рис. 1. Графічна апроксимація процесу осідання верху бетонного парапету греблі Хмельницької АЕС лінійною комбінацією поліному 5-го степеня та скінченного ряду Фур'є

Слід відмітити, що неспівпадіння по модулю результатів нівелювання із значеннями прогнозу моделі (4) становить: мінімально – 0,01 мм, а максимально – 8,05 мм. Розмах неспівпадінь становить 15,91 мм, а середньо-квадратична помилка – 3,46 мм.

Нами запропоновано прогнозує моделі осідань окремих закладних марок гідростворів здійснювати рядом Фур'є [7].

Проілюструємо таку модель для однієї з марок. Нехай у табл. 2 представлені результати фактичних осідань марки Мз 15 протягом 12 років. Апроксимацію осідань представимо такою залежністю

$$S(t) = at + b + A_0 + \sum_{j=1}^{12} \left[A_j \cos\left(\frac{2j\pi}{T}t\right) + B_j \sin\left(\frac{2j\pi}{T}t\right) \right]. \quad (5)$$

Із формули (5) видно, що трендова складова прогнозу моделі є логарифмічною кривою, а ряд Фур'є поданий 12-ма гармоніками. Для кращої наочності фактичні значення осідань і теоретична апроксимуюча крива зображені на рис. 2.

Аналогічні дані отримані для решти закладних марок верху бетонного парапету греблі. Для визначення коректності апроксимуючої кривої фактичні значення осідань марки Мз 15 за 35-37 цикли в обробку не включались.

При обчисленні прогнозних значень осідань одержали: -31,028 мм, -30,368 мм та -35,820 мм відповідно для 35, 36 та 37 циклів спостережень (табл. 2). Звідси можна зробити висновок, що точність прогнозування становить $\pm 1,8$ мм на рік.

Таблиця 2

Результати фактичних та прогнозних значень осідань марки Мз 15

№ ц-лу	Фактичне значення осадки, мм	Трендове значення, мм	Прогнозне значення осадки, мм	№ ц-лу	Фактичне значення осадки, мм	Трендове значення, мм	Прогнозне значення осадки, мм
1	-0,6	-4,413	0,146	19	-16,8	-14,921	-16,167
2	-3,6	-4,81	-0,51	20	-19,6	-16,111	-19,113
3	-3,9	-5,405	-2,653	21	-19,9	-17,301	-22,274
4	-3,9	-5,801	-2,775	22	-20,4	-17,697	-23,146
5	-5,5	-6,396	-4,815	23	-23,1	-18,887	-23,026
6	-5,6	-6,991	-6,373	24	-19,1	-19,68	-17,638
7	-6,9	-7,784	-6,311	25	-16,7	-20,275	-15,696
8	-7,7	-8,18	-7,884	26	-22,9	-21,068	-22,732
9	-9,3	-8,775	-9,837	27	-24,5	-22,456	-25,614
10	-10,6	-9,37	-11,322	29	-26,4	-24,042	-26,35
11	-10,8	-10,163	-9,755	31	-25,9	-24,835	-24,881
12	-10,9	-10,56	-9,781	32	-27,8	-26,024	-27,838
13	-12,3	-11,353	-12,423	33	-26,5	-27,016	-25,709
14	-13,4	-11,947	-13,833	34	-28,9	-28,998	-24,439
15	-14,6	-12,542	-17,554	35	-28,8	-29,593	-31,028
16	-15,8	-12,939	-16,615	36	-30,2	-31,378	-30,368
17	-17,6	-13,93	-19,447	37	-31,6	-33,559	-35,82
18	-18,4	-14,327	-22,337				

Таблиця 3

Коефіцієнти прогнозної моделі виду (5) для Мз 15.

A -2,3792		a ₈	0,4570	B -4,4133				Середньоквадратична похибка апроксимації	
a ₀	-0,7783	a ₉	0,2732	b ₁	-0,2320	b ₉	0,4570		
a ₁	1,8827	a ₁₀	-0,5598	b ₂	1,2511	b ₁₀	0,2565	s ₁₀	1,2817498
a ₂	0,4074	a ₁₁	0,6914	b ₃	0,0267	b ₁₁	0,1197	s ₁₁	1,1866674
a ₃	0,6365	a ₁₂	0,0095	b ₄	-0,0925	b ₁₂	0,0678	s ₁₂	1,1928378
a ₄	0,2222	a ₁₃	0,2506	b ₅	-0,0997	b ₁₃	-0,0098	s ₁₃	1,1823833
a ₅	-0,0997	a ₁₄	1,1549	b ₆	-0,5692	b ₁₄	-0,2172	s ₁₄	1,3398015
a ₆	0,3538	a ₁₅	-1,0577	b ₇	0,3005	b ₁₅	-0,3588	s ₁₅	1,4013001
a ₇	-0,1308	a ₁₆	0,8465	b ₈	0,2680	b ₁₆	0,2164	s ₁₆	1,4787262

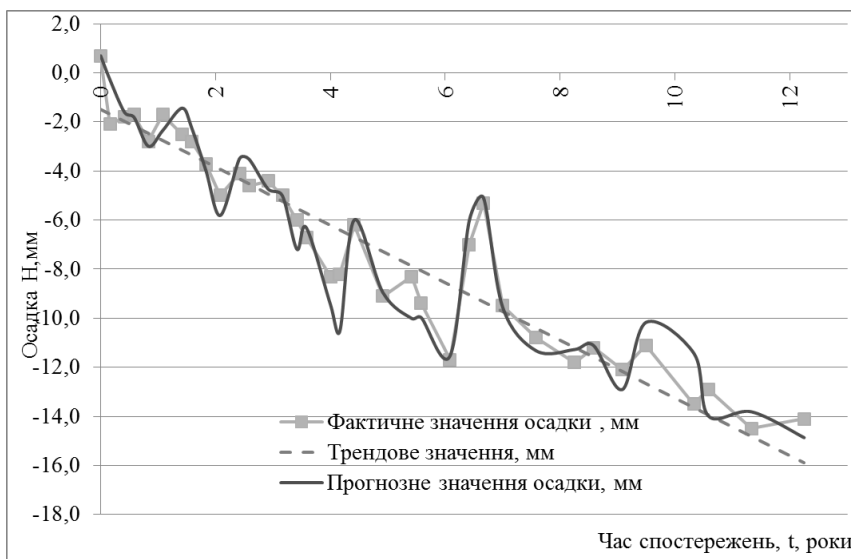


Рис. 2. Апроксимація процесу осідання марки Мз 15 рівнянням(5)

6. Висновки

На основі моделювання експериментальних даних встановлюється суть деформаційних процесів не лише в контрольованих точках спостережень, а й в будь-якій довільній точці об'єкту геодезичного моніторингу.

Запропоновані математичні моделі підтвердили свою ефективність, оскільки модельні відмітки верхніх закладних марок (Мз) та марок (дубелів) верху бетонного парапету ґрунтової греблі водосховища Хмельницької АЕС добре корелюють з результатами наступних контрольних циклів спостережень.

Дана методика дозволяє з досить високою достовірністю прогнозувати переміщення контрольних точок щонайменше на 2–3 цикли спостережень.

Література

1. Гольдин, А. Л. Проектирование ґрунтовых плотин [Текст]: учеб. / А. Л. Гольдин, Л. Н. Рассказов. – М.: И-во АСВ, 2001. – 384 с.
2. Третьяк, К. Оптимізація побудови геодезичних мереж Дністровської ГАЕС супутниковими радіонавігаційними технологіями [Текст] / К. Третьяк, І. Сідоров // Зб. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2005. – № 10. – С. 207–219.
3. Грешилов, А. А. Анализ и синтез стохастических систем [Текст] / А. А. Грешилов. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
4. Киричков, В. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами [Текст] / В. Киричков. – Киев.: Вища школа, 1990. – 263 с.
5. Эйкофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкофф. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
6. Болнокин, В. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭОМ [Текст] / В. Болнокин, П. Чинаев. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.
7. Зайцев, А. Геодезические методы исследования деформаций сооружений [Текст] / А. Зайцев, С. Морфенко, Д. Михалёв. – Киев: Недра, 1991. – 271 с.
8. Мельник, В. М. Моніторинг ґрунтових гребель значної протяжності наземно-супутниковими геодезичними методами [Текст] / В. М. Мельник, О. В. Рудик, В. П. Павлишин, О. В. Мельник. // Scientific Bulletin of Chelm. Section of Technical Sciences. – 2008. – No.1. – P. 115–125.
9. Гридчин, А. Н. Подбор моделей и прогнозирование осадок сооружений по результатам геометрического нивелирования [Текст] / А. Н. Гридчин, Ю. А. Гридчин, Э. А. Краснов // Сб.: Геодезия и фотограмметрия при мелиоративном строительстве. – Новочеркасск, 1984. – С. 15–25.

10. Волошин, В. У. Моделювання вертикальних деформацій ґрунтової греблі водосховища Хмельницької АЕС [Текст] / В. У. Волошин, О. В. Мельник // Зб. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – № 23. – С. 132–136.

References

1. Gol'din, A. L., Rasskazov, L. N. (2001) Proektirovanie ґруntovyyh plotin [Design of earth dams]. Moscow, Russia: ASV, 384
2. Tretyak, K., Sidorov, I. (2005). Optymizatsiya pobudovy heodezychnykh merezh Dnistrov'skoyi HAES suputnykovymy radionavihatsiynymy tekhnolohiyamy [Optimization of building geodetic networks of Dnistrovsky Hydroelectric Power Station with using satellite radio navigation technology]. Zb. Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva, 10, 207–219.
3. Greshilov, A. A. (1990). Analiz i sintez stohasticheskikh sistem [Analysis and synthesis of stochastic systems] Radio i svjaz', 320.
4. Kirichkov, V. (1990). Identifikacija obektov sistem upravlenija tehnologicheskimi processami [Object identification process control systems] Vyshcha shkola, 263.
5. Jejkoff, P. (1975). Osnovy identifikacii sistem upravlenija [Identity-based control systems]. Moscow: Mir, 683.
6. Bolnokin, V., Chinaev, P. (1986). Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravlenija na JeOM [Analysis and synthesis of automatic control systems for PC]. Moscow, Russia: Radio i svjaz', 248.
7. Zajcev, A., Morfenko, S., Mihaljov, D. (1991). Geodezicheskie metody issledovanija deformacij sooruzhenij [Geodetic methods of research deformation structures]. Kiev, Ukraine: Nedra, 271.
8. Mel'nyk, V. M., Rudyk, O. V., Pavlyshyn, V. P., Mel'nyk, O. V. (2008). Monitorynh hruntovykh hrebel' znachnoyi protyazhnosti nazemno-suputnykovymy heodezychnymy metodamy [Monitoring of groundwater dams considerable length using ground-satellite geodetic methods]. Scientific Bulletin of Chelm. Section of Technical Sciences, 1, 115–125.
9. Gridchin, A. N., Gridchin, Ju. A., Krasnov, Je. A. (1984). Podbor modelej i prognozirovanie osadok sooruzhenij po rezul'tatam geometricheskogo nivelirovanija [Selection of models and forecasting sediment structures as a result of geometric leveling]. Sb.: Geodezija i fotogrammetrija pri meliorativnom stroitel'stve, 15–25.
10. Voloshyn, V. U., Mel'nyk, O. V. (2012). Modelyuvannya vertykal'nykh deformatsiy hruntovoyi hrebli vodoshkovichcha Khmel'nyts'koyi AES [Simulation of vertical deformation of soil dam reservoir Khmelnitsky NPP]. Zb. Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva, 23, 132–136.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Марчук В. І.
Дата надходження рукопису 11.02.2015*

Мельник Олександр Валентинович, доцент, кандидат технічних наук, кафедра геодезії, землевпорядкування і кадастру, Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, вул. Кравчука, 36, м. Луцьк, Україна, 43026
E-mail: hockins@gmail.com

Мельник Юлія Анатоліївна, асистент, кандидат технічних наук, кафедра міського будівництва та господарства, Луцький національний технічний університет, вул. Потебні, 56, м. Луцьк, Україна, 43018
E-mail: melnykjulka@gmail.com