

УДК 528.482:004.052

Корнилій ТРЕТЯК¹, Богдан ПАЛЯНИЦЯ¹

¹* Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: bohdan.b.palianytsia@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.005>

ДОСЛІДЖЕННЯ СЕЗОННИХ ДЕФОРМАЦІЙ ГРЕБЛІ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС ЗА ДАНИМИ ГНСС-ВИМІРІВ

Мета. Виявити залежність між сезонною зміною температури і вертикальними та горизонтальними зміщеннями контрольних ГНСС-пунктів на основі даних, отриманих автоматизованою системою моніторингу греблі Дніпровської ГЕС у період з 2016 по 2020 роки. **Вхідні дані.** Для досліджень використовувалися дані цілодобових ГНСС-вимірів, отриманих на 16 пунктах греблі Дніпровської ГЕС у період з середини 2016 до середини 2020 року. **Методика.** Часові ряди ГНСС-вимірів, попередньо опрацьованих системою GeoMoS, проаналізовані спеціально розробленим програмним продуктом на предмет визначення параметрів сезонних зміщень та їх взаємозв'язку із сезонними змінами температури повітря. Аналіз часових рядів ГНСС. На основі досліджень встановлено, що на циклічність деформацій дамби визначальним є вплив температури довкілля. Це стосується як горизонтальних, так і вертикальних зміщень, але за умови відсутності суттєвих змін рівня води у верхньому водосховищі. Значення екстремальних зміщень зростають ближче до середини греблі і спадають на краях. Така тенденція простежується щорічно. За даними трирічного ГНСС-моніторингу греблі амплітуда піврічних горизонтальних коливань контрольних пунктів відносно осі греблі є в межах 15–18 мм. Практично усі вектори горизонтальних зміщень мають перпендикулярне розташування до осі дугоподібної греблі. У першій половині року вектори горизонтальних зміщень спрямовані на розширення греблі, а у другій половині року – на стиснення. У зимовий та літній період горизонтальні зміщення хвилюподібно зростають від правого краю греблі до її лівого краю. Встановлено, що практично кожного року екстремальні відхилення – як горизонтальні, так і вертикальні, – відбуваються у лютому та серпні. Екстремуми температури настають швидше, ніж екстремальні зміщення ГНСС-станцій. Для греблі Дніпровської ГЕС горизонтальні екстремальні зміщення в середньому відстають на 37 діб, а вертикальні – на 32 доби від екстремальних температур. Очевидно, деформації греблі пов'язані з температурою бетонних конструкцій, яка змінюється з певним запізненням відносно температури повітря. Величини екстремальних зміщень і епохи їх прояву залежать від конструкції греблі та її технічних параметрів. Для кожної греблі ці екстремальні зміщення й епохи їх прояву будуть різними. Відповідно, моніторинг цих зміщень та їхніх змін у часі є одним із критеріїв оцінки загального стану греблі. Наукова новизна та практична значущість. Виявлені у результаті проведених досліджень закономірності зв'язку між зміною температури та зміщеннями ГНСС-пунктів можуть бути використані для подальших досліджень з опрацювання та аналізу даних моніторингу гідротехнічних споруд.

Ключові слова: ГНСС-виміри, геодезичний моніторинг гідротехнічних споруд, сезонні деформації греблі, геодезичний моніторинг Дніпровської ГЕС.

Вступ

Греблі – важливі гідротехнічні споруди, необхідні для забезпечення людства екологічно чистою електроенергією, створення запасів води та зберігання відходів від забруднення довкілля. Побудовані греблі несуть також певну небезпеку для навколишнього середовища. [Khosravi, et al., 2013; Sarkar, et al., 2013; Zeidan, 2015; Zhang, L., et al., 2015]. Зміна рівня води у штучних водосховищах під час повеней та технологічних операцій спричиняє гідродинамічні навантаження на навколишні

території та земну кору, що може викликати сейсмічність, яка у свою чергу може спричинити руйнування самої греблі. Старіння греблі впродовж довгих періодів експлуатації зумовлює появу деформацій, напружень та тріщин у бетонних конструкціях, що є небезпечним для стійкості греблі. За даними Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD) під впливом цих чинників відбулося до 80 % від всіх катастрофічних руйнувань річкових гідроспоруд [Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2013 році].

Серед усіх гідроспоруд греблі великих водосховищ за ймовірними небезпечними наслідками несуть найвищу гідродинамічну небезпеку техногенного характеру для населення і територій.

В Україні гідроенергетика розвинута на доволі високому рівні. Тільки на річці Дніпро є 6 гідровузлів, найпотужніший серед яких – Дніпровський гідровузол (1569 МВт). Він розташований на р. Дніпро в м. Запоріжжя вище о. Хортиця, у порівняно вузькій долині (рис. 1).

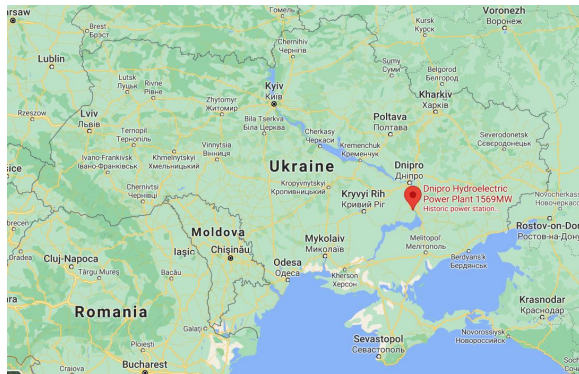


Рис. 1. Фрагмент карти з розташуванням Дніпровської ГЕС

Дно і береги річкової долини в цьому районі утворює масив середньо- і крупнозернистих архейських гранітів. Основою споруд Дніпровської ГЕС (рис. 2) є кристаліні породи запорізького блоку, представлені переважно слабо вивітрілими гранітами, що мають підвищену тріщинуватість.



Рис. 2. Водозливна гребля Дніпровської ГЕС

Ідея будівництва греблі на річці Дніпро виникла ще в XVIII столітті. Її з упевненістю можна вважати символом цілої епохи, що й зараз викликає захоплення своєю красою та величчю.

Середньорічне виробництво електроенергії Дніпровською ГЕС становить близько 4008 млн кВт год. Будівництво електростанції почалося ще у 1927 році, а в 1932 відбулося відкриття. Розміри греблі вражають: довжина – 760 м, висота – 60 м. У 1941 та

1943 роках, під час війни, греблю було двічі підірвано [Moroko, 2010]. Ще до закінчення війни у 1944 році розпочалося відновлення гідроелектростанції, і вже в березні 1947 року введено в експлуатацію перший агрегат Дніпровської ГЕС. Сьогодні там працює 17 турбін.

Врахування масштабів руйнування вимагає постійного контролю технічного стану греблі. Одним із методів оцінки стану стійкості греблі є геодезичний моніторинг. Конструктивна складність цих інженерних споруд вимагає ретельного підходу до створення системи моніторингу [Chen, et al., 1990]. Метою моніторингу є не тільки попередження серйозних аварій та руйнувань, а також збір даних для перевірки проектних параметрів, вивчення причин деформаційних процесів та набуття належного досвіду для створення нових, досконаліших проектів [Chrzanowski, et al. 2011]. Протягом тривалого часу технології моніторингу удосконалювалися. Постійно підвищується точність збору інформації, проведення вимірювань, збільшується ступінь автоматизації опрацювання отриманих даних. Застосування новітніх наземних і космічних технологій дає змогу отримувати тривалі часові ряди високоточних спостережень. Це суттєво підвищує якість моніторингу гідротехнічних споруд [Milillo, et al. 2016].

Методи, засновані на глобальних навігаційних супутникових системах (ГНСС), на початку широко застосовувалися лише для вимірювання зміщень на пунктах греблі. Надалі створено мережі ГНСС, що використовувалися для періодичних вимірювань на контрольованих опорних точках. В останні роки розроблені автоматизовані системи контролю (АСК) та інтегровані геотехнічні системи. Автоматизовані – приймають сигнали з ГНСС-приймачів, здатних працювати в безперервному режимі, а інтегровані – разом з іншими засобами моніторингу входять у систему раннього оповіщення про загрози безпечної роботи гідроспоруди [Drummond, 2010; Scaioni, et al., 2018]. Отримані інтегровані дані активно застосовуються для аналізу та інтерпретації деформаційних процесів на об'єктах гідровузлів.

Дані моніторингу використовуються для дослідження за допомогою статистичних, детермінованих методів та структурного моделювання кореляції із зовнішніми навантаженнями. Серед них – зміна рівня води у водоймі, сезонна зміна умов довкілля, та інші. [Chrzanowski, et al. 2011; Corsetti, et al., 2018]. Низка авторів [Zhang, et al., 2018; Oro, S. R., et al., 2016; Mata, et al., 2013, та інші] стверджують, що однією з головних причин сезонних деформацій гребель є динаміка річної зміни температури повітря за умови, що рівень води у водосховищі суттєво не змінюється.

Річну варіацію бетонної греблі Alto Lindoso у Португалії (довжина – 297 м, висота – 110 м) та

ефект від зміни температури бетону у [Mata, et al. 2013] представлено синусоїдальною функцією, аргументом якої є порядковий номер дня від початку року до дати спостережень. Побудовано річну теплову хвилю без урахування добових варіацій температури, оскільки такі дані важко пов'язати із характером сигналу та реакцією греблі.

Результати моніторингу аркової греблі ГЕС Ліжіахіа (довжина основної ділянки 204 м, висота 147 м), що знаходиться на китайській річці Хуанхе [Zhang, et al., 2018], не виявили кореляції між деформаціями греблі та коливаннями рівня водойми, а лише від сезонної зміни температури. Встановлено, що коли температура в липні 2015 року досягла найвищого значення, аркова гребля розширилася, рухаючись вгору за течією, і повзучість її була максимальною, а в січні – навпаки гребля стиснулася, рухаючись вниз за течією. При цьому зміщення на середині становило близько 10 мм, а на краях – близько 5,3 мм.

На греблі Дніпровської ГЕС моніторинг просторових переміщень методами ГНСС розпочали виконувати у 1997 році. Результати сезонних спостережень показали, що верх греблі має закономірні циклічні рухи. Для надійного встановлення діапазону цих рухів та накопичення відповідних даних виникла необхідність подальших спостережень. Відтоді з метою контролю стану гідро споруди ведеться постійний контроль різних фізичних показників та проводяться різнопланові геодезичні вимірювання [Tretiyak, et al., 2015]. З 2015 року на Дніпровській ГЕС працює стаціонарна система моніторингу просторових зміщень споруд. Програмними засобами цієї системи є продукти компанії Leica GeoMoS і Spider. З моменту запуску автоматизованої системи суттєво підвищилася оперативність отримання даних, моніторинг почав проводитися в автоматичному режимі.

Стаціонарна система моніторингу просторових зміщень споруд – це сучасний програмно-апаратний комплекс. Він у режимі реального часу збирає і передає на сервер результати вимірів із мульти-системних ГНСС-приймачів, роботизованих електронних тахеометрів, прецизійних інклінометрів та іншого обладнання. З метою визначення достовірних параметрів зміщень та деформацій греблі ГНСС-виміри проходять опрацювання за допомогою програмного продукту Spider та передаються у програмний продукт GeoMoS для сумісного опрацювання з іншими геодезичними та геотехнічними сенсорами. Схему системи GeoMoS показано на рис. 3.

Система моніторингу Дніпровської ГЕС містить 63 пункти розміщені на греблі та основних будівлях. Координати пунктів MP01-MP17, R1 та R2 визначаються на основі супутникових та лінійно-кутових вимірювань, вони оснащені ГНСС-приймачами та відбивачами 360°. Пункти R1 та R2

додатково оснащені електронними роботизованими тахеометрами, а пункти PP1 і PP2 – відбивачами для проведення лінійно-кутових вимірювань (дані вимірювань з тахеометрів у цій роботі не розглядаються).

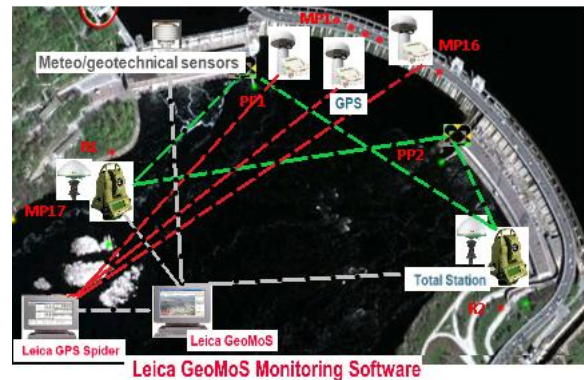


Рис. 3. Схема стаціонарної системи моніторингу просторових зміщень споруд Дніпровської ГЕС

Мета

Виявити залежність між сезонною зміною температури і вертикальними та горизонтальними зміщеннями ГНСС-пунктів на основі даних, отриманих автоматизованою системою моніторингу греблі Дніпровської ГЕС у період з 2016 по 2020 роки.

Вхідні дані

Для дослідження використовувалися дані ГНСС-вимірів, проведених на пунктах греблі Дніпровської ГЕС. Розташування пунктів зображено на рис. 4.



Рис. 4. Мережа ГНСС-пунктів на греблі Дніпровської ГЕС

Безпосередньо на греблі розташовані 16 контрольних пунктів (MP1-MP16), на яких проводяться цілодобові ГНСС-спостереження (з пункту MP-9 інформація не надходила), та два фундаментальні геодезичні пункти R1 і R2, обладнані

ГНСС-приймачами Leica GMX902 GG з антеною AR10, роботизованим тахеометром TM30, прецизійним інклінометром Nivel 201 та метеорологічним давачем DTM. Труби, на яких закріплені антени, належним чином захищені від впливу температурних змін довкілля, ультрафіолетових променів та вологості, як показано на рис. 5. Для такого захисту застосовувалися пластикові труби, герметик і армована алюмінієва плівка. Це дало змогу значно зменшити систематичні похибки координат, що виникають за деформації пунктів унаслідок їхнього нерівномірного добового нагрівання.

Для досліджень використовувалися тільки дані ГНСС-вимірів, що отримані від початку встановлення автоматизованої системи контролю в період з 09.02.2016 по 12.07.2020 з частотою запису вимірів у 30 с. Початкові дані виявились ненадійними, оскільки у цей період експлуатації відбувалося налагодження системи. Тому для розрахунків використано дані, отримані з липня 2016 року.



а) Фундаментальний геодезичний пункт R1;



б) контрольний пункт МР-4

Рис. 5. Загальний вигляд пунктів

Аналіз часових рядів ГНСС

У результаті аналізу часових серій зміни координат пунктів, визначених ГНСС-методом, встановлено, що у даних вимірів, опрацьованих програмним пакетом GeoMoS, присутні грубі похибки. Особливо це проявляється на початках роботи системи, коли відбувалось її налаштування, та при заміні обладнання. Відповідно, ці дані вимагали фільтрації. За даними часових серій встановлено, що середня максимальна величина зміщення в горизонтальній площині та за висотою відносно середнього положення пункту за весь період не перевищує 20 мм. Відповідно, згідно з правилом 3σ , усі значення відхилень від середнього положення точки, які перевищували по абсолютній величині 60 мм, були відфільтровані. Другий крок фільтрації полягав у визначенні середнього максимального зміщення за весь період окремо кожної точки. Повторною фільтрацією усувались зміщення, які за абсолютною величиною були більші за потрійне значення середнього максимального зміщення.

На основі фільтрованих даних визначено практично щоденні зміщення усіх ГНСС-пунктів протягом усього періоду спостережень. Для прикладу, на рис. 6. приведено вертикальне зміщення пункту МР-11 за весь період вимірів.

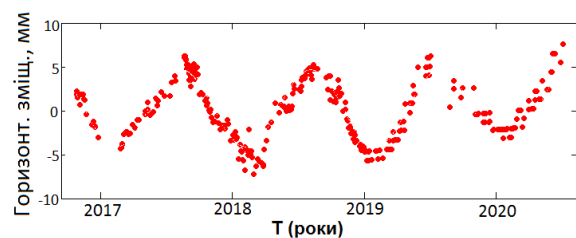


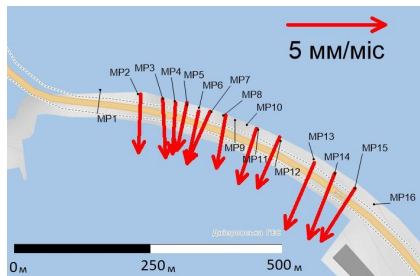
Рис. 6. Приклад зміщень пункту МР-11 за весь період вимірів

Для інших пунктів криві їх зміщення у горизонтальній та вертикальній площинах мають аналогічний характер. Хоча амплітуда коливань на кожному пункті є різною, проте криві зміщень мають спільну закономірність. Вона полягає в тому, що зміщення впродовж кожного року мають плавний гармонійний характер, а екстремальні відхилення відносно осі греблі щорічно фіксуються у лютому (що від початку року відповідає 0,1 року) та у серпні (що від початку року відповідає 0,6 року).

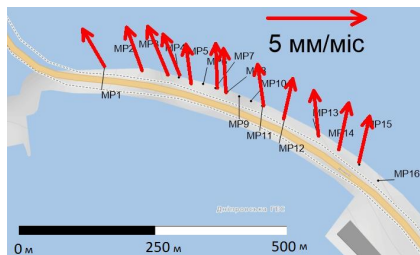
Отже, впродовж піврічних періодів (приблизно з лютого по серпень) зміщення мають практично лінійну закономірність. У зв'язку з цим необхідно розглядати лінійні швидкості зміщення контрольних пунктів у межах визначених піврічних періодів. Тому надалі дані розділялися на піврічні періоди і обчислювалися вектори швидкостей зміщень пунктів для піврічних періодів. Графічне представлення розподілу векторів швидкостей горизонтальних зміщень пунктів за визначені піврічні періоди з 2016 по 2020 роки подано на рис. 7.

Вектори швидкості горизонтальних зміщень (рис. 7) упродовж річного періоду мають циклічність у зміні напрямку, а саме: у першій половині року напрямки векторів швидкостей горизонтальних зміщень скеровані проти течії річки, тобто у верхній б'єф, а у другій – за течією, у нижній б'єф. Амплітуда піврічних горизонтальних коливань контрольних пунктів відносно середнього положення знаходиться у межах 15–18 мм. На всіх рисунках переважає перпендикулярне розташування вектора швидкості горизонтальних зміщень до осі дугоподібної греблі. Відповідно у першій половині року вектори горизонтальних зміщень спрямовані на розширення греблі, а у другій половині року – на стиснення.

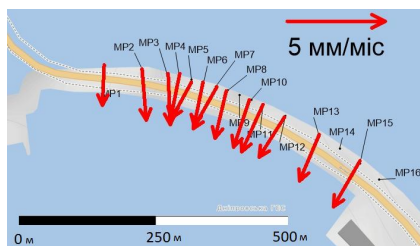
Швидкості вертикальних зміщень за визначені піврічні періоди показано на рис. 8.



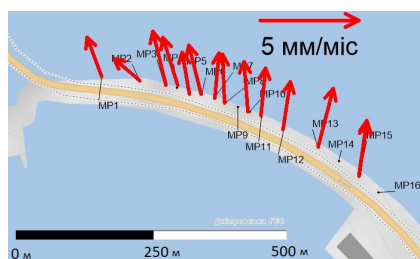
а) Період з 2016, 6 по 2017, 1



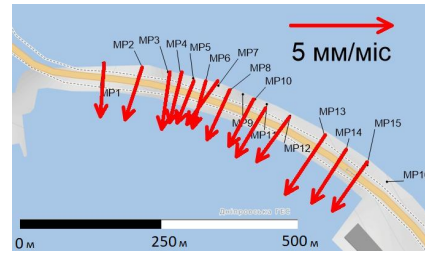
б) Період з 2017, 1 по 2017, 6



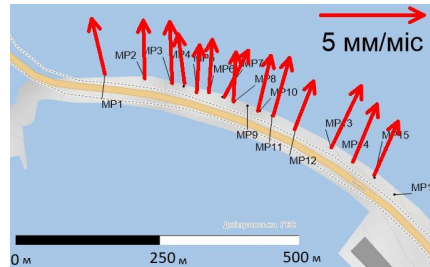
в) Період з 2017, 6 по 2018, 1



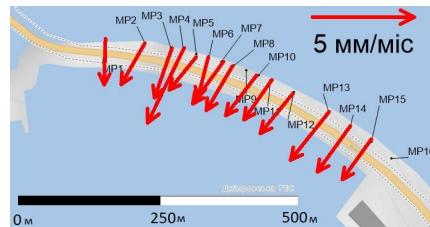
г) Період з 2018, 1 по 2018, 6



д) Період з 2018, 6 по 2019, 1

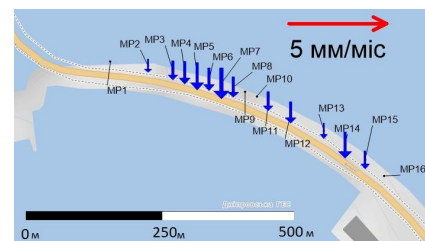


е) Період з 2019, 1 по 2019, 6

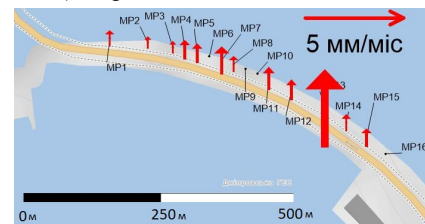


є) Період з 2019, 6 по 2020, 1

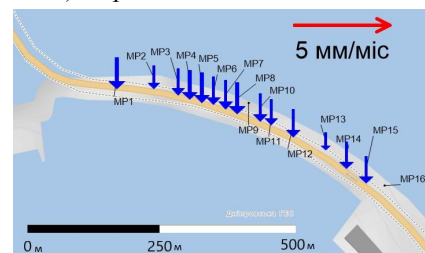
Рис. 7. Розподіл векторів швидкостей горизонтальних зміщень контрольних пунктів греблі Дніпровської ГЕС з 2016 по 2020 роки



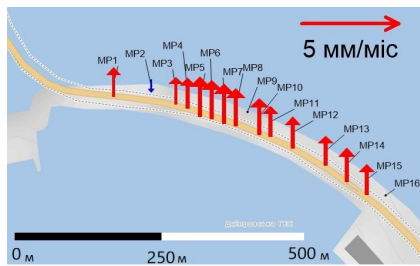
а) Період з 2016, 6 по 2017, 1



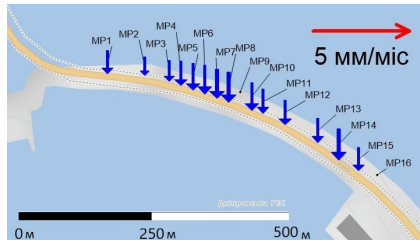
б) Період з 2017, 1 по 2017, 6



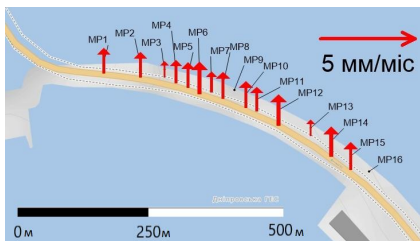
в) Період з 2017, 6 по 2018, 1



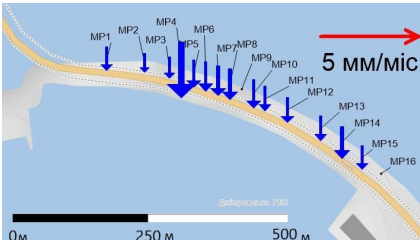
з) Період з 2018, 1 по 2018, 6



д) Період з 2018, 6 по 2019, 1



е) Період з 2019, 1 по 2019, 6



є) Період з 2019, 6 по 2020, 1

Рис. 8. Розподіл векторів швидкостей вертикальних зміщень контрольних пунктів греблі Дніпровської ГЕС з 2016 по 2020 роки

Для вертикальних зміщень було встановлено, що кожного року у першому півріччі відбувається підняття усіх пунктів греблі, а у другому – всі пункти опускаються. Амплітуда піврічних вертикальних коливань контрольних пунктів не перевищує 12–15 мм. У межах цих піврічних періодів зміщення відбуваються практично за лінійним законом.

З метою визначення середніх амплітуд та періодів зміщень всіх контрольних пунктів протягом усього часу спостережень проводилася апроксимація їх зміщень за таким виразом:

$$\Delta T_i = a_0 + a_1 \cdot \cos\left(\frac{T_i}{T}\right) + a_2 \cdot \sin\left(\frac{T_i}{T}\right), \quad (1)$$

де: $\Delta(T)_i$ – зміщення, a_0 , a_1 , a_2 – коефіцієнти апроксимації, T_i – біжучий день від початку року, T – кількість днів у році.

Визначення тривалості оптимального періоду між екстремальними зміщеннями пункту виконувалось за умови мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}} = \min, \quad (2)$$

де Δ – відхилення апроксимованого зміщення відносно виміряного.

Приклад пошуку оптимального періоду зміщень, що відповідає мінімуму функції (2) для пункту MP-4 показано на рис. 9.

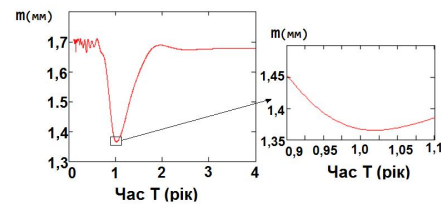


Рис. 9. Результати пошуку оптимального періоду зміщень для пункту MP-4

Для кожного ГНСС-пункту визначені криві апроксимації вертикальних та горизонтальних зміщень за весь період спостережень. Для прикладу, на (рис 10.) представлено криву апроксимації горизонтальних зміщень Δ за даними усього періоду спостережень для контрольного пункту MP-11.

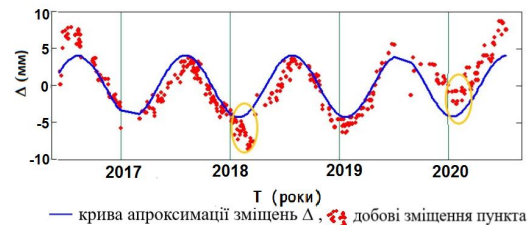


Рис. 10. Крива апроксимації зміщень Δ за даними усього періоду спостережень для контрольного пункту MP-11

Тривалість періоду коливань (рис. 10) є близькою до одного року. Проте різниця між оптимальним і річним періодом призводить до систематичного зсуву екстремумів апроксимованої кривої від виміряних. Ці відмінності позначені на рис. 10 жовтим кольором. Очевидно, період екстремальних зміщень кожного пункту щороку є іншим. Тому надалі було досліджено величину тривалості щорічних періодів для кожного контрольного пункту.

Результати визначення щорічних оптимальних періодів горизонтальних та вертикальних зміщень для усіх пунктів наведені у табл. 1, 2.

Таблиця 1

Періоди горизонтальних зміщень			
Назва пункту	Періоди горизонтальних зміщень		
	2017 р.	2018 р.	2019 р.
MP-1	1.064	0.956	1.058
MP-2	1.046	0.916	1.027
MP-3	1.033	0.963	1.011
MP-4	1.037	0.926	0.998
MP-5	1.078	0.935	1.016
MP-6	1.083	0.935	1.032
MP-7	1.124	0.943	1.012
MP-8	1.039	0.938	0.996
MP-10	1.058	0.921	1.032
MP-11	1.026	0.941	0.995
MP-12	1.027	0.926	1.032
MP-13	1.091	0.954	1.050
MP-14	0.984	0.895	1.018
MP-15	0.863	0.947	1.021
Середній	1.040	0.935	1.021

Таблиця 2

Періоди вертикальних зміщень			
Назва пункту	Періоди горизонтальних зміщень		
	2017 р.	2018 р.	2019 р.
MP-1	1,204	0,970	0,972
MP-2	1,206	0,973	0,922
MP-3	1,198	0,975	0,987
MP-4	1,205	0,963	0,935
MP-5	1,040	0,991	0,988
MP-6	0,958	0,988	0,973
MP-7	0,992	0,992	0,946
MP-8	0,947	0,975	1,030
MP-10	0,965	0,956	1,043
MP-11	1,053	1,009	0,942
MP-12	1,179	0,997	0,973
MP-13	1,140	0,975	1,015
MP-14	1,239	0,896	1,021
MP-15	0,998	0,971	0,987
Середній	1,095	0,974	0,981

є додатними влітку і від'ємними взимку.

Таблиця 3

Епохи та величини екстремальних горизонтальних зміщень контрольних пунктів у 2017 р.				
Назва пункту	Зимові		Літні	
	День року	Зміщ. в мм	День року	Зміщ. в мм
1	2	3	4	5
MP-1	54	-2.9	233	1.8
MP-2	55	-2.0	199	3.6
MP-3	54	-3.5	240	4.2
MP-4	59	-3.8	247	3.4
MP-5	54	-3.6	247	2.6
MP-6	54	-4.3	241	3.5
MP-7	49	-5.2	202	4.3
MP-8	54	-5.9	235	5.0
MP-10	55	-4.1	243	4.0
MP-11	54	-3.8	238	4.1
MP-12	60	-3.9	239	3.9

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5
MP-13	54	-4.4	237	4.8
MP-14	54	-4.7	221	5.5
MP-15	76	-4.2	234	4.1
Середнє	56	-4.0	233	3.9

Таблиця 4

Епохи та величини екстремальних горизонтальних зміщень контрольних пунктів у 2018 р.

Назва пункту	Зимові		Літні	
	День року	Зміщ. в мм	День року	Зміщ. в мм
MP-1	95	-4.2	259	3.4
MP-2	59	-1.8	224	4.1
MP-3	53	-3.7	222	6.6
MP-4	64	-3.1	221	5.3
MP-5	66	-2.5	234	4.5
MP-6	62	-3.1	234	4.7
MP-7	62	-3.1	234	5.5
MP-8	58	-4.1	228	5.9
MP-10	66	-3.6	234	5.7
MP-11	53	-3.7	225	5.9
MP-12	56	-3.4	228	5.5
MP-13	44	-5.1	218	7.8
MP-14	51	-4.0	215	7.3
MP-15	49	-4.1	223	6.1
Середнє	60	-3.5	229	5.6

Таблиця 5

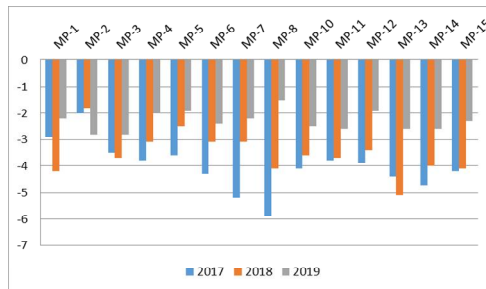
Епохи та величини екстремальних горизонтальних зміщень контрольних пунктів у 2019 р.

Назва пункту	Зимові		Літні	
	День року	Зміщ. в мм	День року	Зміщ. в мм
MP-1	30	-2.2	235	7.6
MP-2	28	-2.8	235	5.8
MP-3	44	-2.8	235	8.4
MP-4	53	-2.0	235	6.0
MP-5	47	-1.9	237	5.6
MP-6	39	-2.4	237	6.1
MP-7	45	-2.2	246	6.2
MP-8	39	-1.5	238	4.5
MP-10	37	-2.5	226	7.0
MP-11	37	-2.6	237	6.8
MP-12	34	-1.9	237	6.4
MP-13	16	-2.6	235	8.4
MP-14	31	-2.6	245	7.8
MP-15	34	-2.3	246	6.6
Середнє	37	-2.3	237	6.7

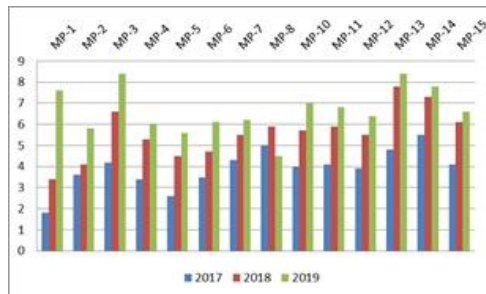
За даними середньорічних оптимальних періодів зміщень усіх пунктів (табл. 1 і 2) видно, що тривалість обчислених оптимальних періодів для усіх контрольних пунктів щороку є іншою і не рівною одному року. Тривалість середніх річних періодів коливань зміщень контрольних пунктів протягом 2017–2019 років змінюється у перерахунку на дні:

для горизонтальних зміщень – з 380 днів по 341 день, а для вертикальних – з 400 днів по 355 днів.

За результатами обчислень у табл. 3–5, представлено епохи (дні від початку року), в які спостерігалися екстремальні горизонтальні зміщення відносно осі греблі на кожному пункті. Екстремальні відхилення від осі греблі На основі отриманих даних на рис 11. представлено гістограми, екстремальних горизонтальних зміщень за 2017–2019.



а) зимові зміщення



б) літні зміщення

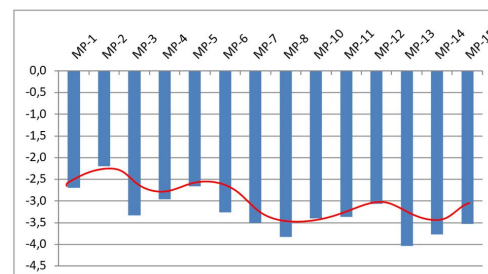
Рис. 11. Значення екстремальних горизонтальних зміщень контрольних пунктів за 2017–2019 роки

Практично на всіх пунктах (див. рис. 11) максимальна амплітуда коливань є пропорційною до величини щорічних зміщень, але ця закономірність зберігається тільки за окремого порівняння літніх та зимових зміщень. Практично усі контрольні пункти з великою амплітудою коливань зміщень і самою величиною зміщень у літній період мають малу амплітуду коливань і малу величину зміщень у зимовий період. Аналогічна закономірність спостерігається на пунктах з малою амплітудою коливань зміщень і малою величиною зміщень у літній період, а в зимовий період на цих пунктах велика амплітуда коливань зміщень і велика величина зміщень.

На рис. 12 представлено величини сезонних (зимових та літніх) середніх горизонтальних зміщень контрольних пунктів за 2017–2019 роки.

На рис. 12 видно прояв щорічних закономірностей розподілу середніх сезонних зміщень вздовж осі греблі. У зимовий та літній період горизонтальні зміщення хвилюподібно зростають від правого краю греблі до її лівого краю. Це підтверджується симетричністю ліній умовного розподілу зміщень у

вздовж осі греблі (рис. 12, а і 12, б). Виявлені закономірності можуть бути наслідком стиску тіла греблі та появи напружень при зимовому горизонтальному зсуві, що викликаний частковим концентричним спрямуванням векторів зміщень всередину нижнього водосховища. Відповідно від величини накопичених напружень у тілі греблі в зимовий період відбувається їх відповідне розвантаження частково радіальним спрямуванням векторів відносно осі греблі у бік верхнього водосховища у літній період. Чим більше накопичення напружень у тілі греблі в зимовий період, тим більша довжина векторів горизонтальних зміщень у літній період, яка необхідна для розвантаження цих напружень. Крім цього, безперечно, на величину зимових та літніх зміщень має вплив також зростання температури навколишнього середовища. Аналогічний, але зворотний процес проявляється при переході деформацій з літнього періоду до зимового.



Умова ліній розподілу горизонтальних зміщень по осі греблі

а) зимові зміщення



Умова ліній розподілу горизонтальних зміщень по осі греблі

б) літні зміщення

Рис. 12. Значення середніх горизонтальних зміщень контрольних пунктів за 2017–2019 роки

Аналогічні розрахунки виконано і для вертикальних зміщень. За результатами обчислень у табл. 6–8 представлено епохи (дні з початку року), у які спостерігалися екстремальні вертикальні зміщення відносно осі греблі на кожному пункті. Екстремальні відхилення від осі греблі є додатними влітку і від'ємними взимку.

Практично на усіх пунктах (див. рис. 13) максимальна амплітуда коливань є пропорційною величині щорічних зміщень, але ця закономірність так само як для горизонтальних зміщень, зберігається тільки при окремому порівнянні літніх та зимових вертикальних зміщень.

Таблиця 6

**Епохи та величини екстремальних
вертикальних зміщень
контрольних пунктів у 2017 р.**

Назва пункту	Зимові		Літні	
	День року	Зміщ. в мм	День року	Зміщ. в мм
MP-1	-4*	-1.2	216	1.2
MP-2	-28	-0.5	196	1.03
MP-3	-6	-1.2	218	1.9
MP-4	-6	-1.9	214	1.2
MP-5	54	-1.9	232	1.5
MP-6	54	-3.2	238	2.0
MP-7	59	-3.5	240	2.2
MP-8	54	-1.7	227	1.6
MP-10	55	-1.7	218	1.8
MP-11	54	-1.4	231	1.7
MP-12	-4	-1.6	223	2.0
MP-13	61	-1.5	234	1.9
MP-14	-4	-1.7	231	1.7
MP-15	95	-1.5	242	1.5
Середнє	31	-1.7	226	1.7

Таблиця 7

**Епохи та величини екстремальних
вертикальних зміщень
контрольних пунктів у 2018 р.**

Назва пункту	Зимові		Літні	
	День року	Зміщ. в мм	День року	Зміщ. в мм
MP-1	53	-1.2	222	2.1
MP-2	51	-1.5	221	2.4
MP-3	41	-1.8	223	3.5
MP-4	48	-2.2	234	3.3
MP-5	51	-2.1	234	3.7
MP-6	41	-2.1	220	3.1
MP-7	53	-2.0	228	3.2
MP-8	48	-1.7	228	2.5
MP-10	41	-1.5	220	2.7
MP-11	53	-1.5	233	1.2
MP-12	61	-1.8	225	3.2
MP-13	35	-1.6	215	2.2
MP-14	53	-1.2	222	2.1
MP-15	51	-1.5	221	2.4
Середнє	49	-1.7	225	2.7

Таблиця 8

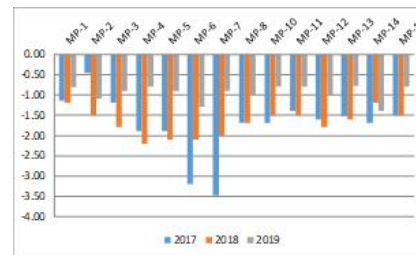
**Епохи та величини екстремальних
вертикальних зміщень
контрольних пунктів у 2019 р.**

Назва пункту	Зимові		Літні	
	День року	Зміщ. в мм	День року	Зміщ. в мм
1	2	3	4	5
MP-1	43	-0.8	235	2.1
MP-2	66	-1.1	234	1.5
MP-3	73	-0.9	246	1.6
MP-4	63	-0.8	235	1.8
MP-5	39	-0.9	237	1.8
MP-6	61	-1.3	237	3.4

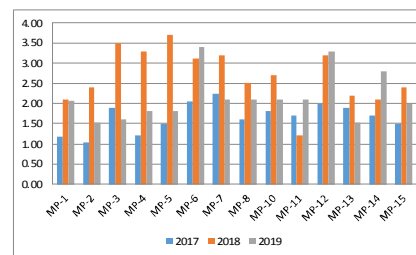
Продовження табл. 8

1	2	3	4	5
MP-7	77	-0.9	246	2.1
MP-8	35	-1.0	238	2.1
MP-10	47	-0.8	237	2.1
MP-11	62	-0.8	237	2.1
MP-12	54	-1.0	237	3.3
MP-13	51	-0.8	246	1.5
MP-14	41	-1.4	245	2.8
MP-15	34	-0.8	246	2.0
Середнє	53	-1.0	240	2.2

На основі отриманих даних на рис. 13 представлено гістограми екстремальних вертикальних зміщень за 2017–2019.



а) Екстремальні зимові зміщення



а) Екстремальні літні зміщення

Рис. 13. Значення екстремальних вертикальних зміщень контрольних пунктів за 2017–2019 роки

На рис. 14 представлені величини сезонних (зимових та літніх) середніх горизонтальних зміщень контрольних пунктів за 2017–2019 роки. Очевидним є прояв щорічних закономірностей розподілу середніх сезонних зміщень вздовж осі греблі. У зимовий та літній період вертикальні зміщення зростають від країв греблі до її центральної частини. Подібні закономірності отримували на греблях інших ГЕС, зокрема на греблі ГЕС Lijiaxia у Китаї [Zhang, et al., 2018]. Крім цього, так само як і для горизонтальних зміщень, існує симетричність ліній умовного розподілу зміщень уздовж осі греблі (рис. 14, а і 14, б). Частковим винятком є тільки пункт MP-12.

Виявлені закономірності можуть бути наслідком вертикального стиску тіла греблі та появи максимальних напружень у її центральній частині, спричинених зростанням величини вертикального зсуву у напрямку до середини греблі. Відповідно

до величини накопичених напружень у тілі греблі в зимовий період відбувається їх відповідне розвантаження частковим розширенням тіла греблі у вертикальному напрямі у літній період. Аналогічно, як і для горизонтальних напружень, що більше накопичення вертикальних напружень у тілі греблі в зимовий період, то більша довжина векторів вертикальних зміщень у літній період, яка необхідна для розвантаження цих напружень. Крім цього, безперечно, на величину зміщень має вплив також зростання температури навколишнього середовища. Ймовірно, у центральній частині греблі ці перепади температур є значно більшими, тому на середині греблі зафіксовані більші амплітуди зимових та літніх зміщень.



а) зимові зміщення



б) літні зміщення

Рис. 14. Значення середніх вертикальних зміщень контрольних пунктів за 2017–2019 роки

Безперечно, однією з головних причин такого роду циклічних деформацій греблі є сезонна зміна температури навколишнього середовища [Oro, S. R., et al., 2016; Zhang, et al., 2018; Mata, et al., 2013, та інші].

З метою встановлення просторово-часового взаємозв'язку між векторами зміщень контрольних пунктів греблі з температурою повітря, нами було проаналізовано зміни річної температури повітря біля греблі протягом 2017–2019 років.

Для узагальнення сезонних змін температури нами було апроксимовано за аналогічною функцією (1) часові ряди значень температури, отриманих з метеостанції, що знаходиться безпосередньо на Дніпровській ГЕС (рис. 15). Дані температури надходять з дискретністю 3 год, починаючи з 2 год до 23 год кожної доби.

За даними апроксимації встановлено, що середній період екстремальних коливань температури за

даними 2017–2019 року складає практично один рік (0,999 року).

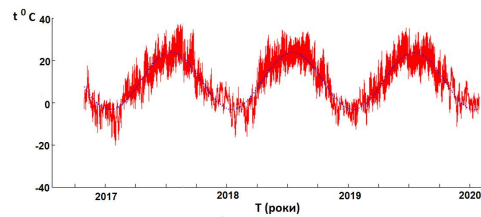


Рис. 15. Зміна температури з 2017 по 2019 роки (за даними метеостанції Дніпровської ГЕС)

Проте, детальний аналіз окремо взятих щорічних змін температури показує, що тривалість періоду між апроксимованими температурами є різною кожного року.

У табл. 9 наведено епохи у днях від початку року фіксації екстремальних значень горизонтальних та вертикальних зміщень та екстремумів температури.

Таблиця 9

Епохи екстремальних горизонтальних та вертикальних зміщень контрольних пунктів та температур повітря

Рік	Епохи (у днях від початку року)					
	Горизонтальні зміщення		Вертикальні зміщення		Температура	
	Зимові	Літні	Зимові	Літні	Зимові	Літні
2017	56	233	31	226	13	197
2018	60	229	49	225	22	193
2019	37	237	53	240	6	200

Значення апроксимованих за виразом (1) екстремальних температур повітря з 2017 по 2019 р. наведено у табл. 10.

Таблиця 10

Значення апроксимованих екстремальних температур повітря з 2017 по 2019 р.

Рік	Мін.	Макс.
2017	-4.04	23.50
2018	-3.88	24.32
2019	-1.82	23.40

Таблиця 11

Різниці епох екстремальних зміщень контрольних пунктів та екстремальних температур повітря

Рік	Різниці епох (дні)			
	Для горизонтальних зміщень		Для вертикальних зміщень	
	Зимові	Літні	Зимові	Літні
2017	43	36	18	29
2018	38	36	27	32
2019	31	37	47	40
Ср.	37,3	36,3	30,7	33,6

На основі отриманих даних було обчислено різниці епох, екстремальних зміщень контрольних пунктів та епох екстремальних температур повітря. Різниці між ними подано у табл. 11.

Епохи екстремальних горизонтальних зміщень (табл. 11) настають пізніше відносно епох екстремальних температур повітря у середньому на 37 днів. При цьому, що вища екстремальна температура у зимовий період, то менша різниця епох. У літній період екстремальна температура упродовж трьох років практично була незмінною, і, відповідно, різниця епох була також практично сталою. Для вертикальних зміщень ця різниця епох, навпаки, зростає у зимовий період зі зростанням екстремальної температури. Для літніх періодів різниця епох також зростає за практично незмінної екстремальної температури. У середньому епохи екстремальних вертикальних зміщень настають, порівняно з епохами екстремальних температур повітря, із запізненням у 32 дні. Очевидно температурні деформації греблі пов'язані з температурою бетонних конструкцій, яка не змінюється з певним запізненням відносно температури повітря.

Проведені дослідження дозволяють встановити періоди та величини сезонних деформацій греблі Дніпровської ГЕС і вплив на них температур повітря. Ці деформації мають вагомий вплив на появу тріщин у тілі греблі та її стійкість. Очевидно, величини екстремальних зміщень і епохи їх прояву залежать від конструкції греблі та її технічних параметрів. Для кожної греблі ці екстремальні зміщення і епохи їх прояву будуть різними. Відповідно, моніторинг цих зміщень і їхніх змін у часі є одним із критеріїв оцінки загального стану греблі.

Виявлені у результаті проведених досліджень закономірності зв'язку між зміною температури та зміщеннями ГНСС-пунктів можуть бути використані для подальших досліджень з опрацювання та аналізу даних моніторингу інженерних споруд.

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Вплив температури довкілля має визначальний вплив на циклічність деформацій гребель. Це стосується як горизонтальних, так і вертикальних зміщень, але за умови відсутності суттєвих змін рівня води у верхньому водосховищі.

2. За даними трирічного ГНСС-моніторингу греблі Дніпровської ГЕС амплітуда піврічних горизонтальних коливань контрольних пунктів відносно осі греблі є в межах 15–18 мм. Практично усі вектори горизонтальних зміщень мають перпендикулярне розташування до осі дугоподібної греблі. У першій половині року вектори горизонтальних зміщень спрямовані на розширення греблі, а у другій половині року – на стиснення. У зимовий та літній період горизонтальні зміщення хвилюподібно зростають від правого краю греблі до її лівого краю.

3. Для вертикальних зміщень було встановлено, що кожного року у першому півріччі відбувається піднімання усіх пунктів греблі, а у другому – всі пункти опускаються. Амплітуда піврічних вертикальних коливань контрольних пунктів є у межах 12–15 мм. У зимовий та літній період вертикальні зміщення зростають від країв греблі до її центральної частини.

4. Виявлені закономірності можуть бути наслідком вертикального стиску тіла греблі та появи максимальних напружень у її центральній частині, викликаних зростанням величини вертикального зсуву в напрямку середини греблі. Відповідно, від величини накопичених напружень у тілі греблі в зимовий період відбувається їх відповідне розвантаження частковим розширенням тіла греблі у вертикальному напрямі в літній період. Крім цього, безперечно, на величину зміщень має вплив також зростання температури навколишнього середовища. Ймовірно, у центральній частині греблі ці перепади температур є значно більшими, тому на середині греблі зафіксовані більші амплітуди зимових та літніх вертикальних зміщень.

5. Епохи екстремальних горизонтальних зміщень настають пізніше відносно епох екстремальних температур повітря у середньому на 37 днів. У середньому епохи екстремальних вертикальних зміщень настають порівняно з епохами екстремальних температур повітря із запізненням у 32 дні. Очевидно, температурні деформації греблі пов'язані з температурою бетонних конструкцій, яка змінюється з певним запізненням відносно температури повітря.

6. Очевидно, величини екстремальних зміщень і епохи їхнього прояву залежать від конструкції греблі та її технічних параметрів. Для кожної греблі ці екстремальні зміщення і епохи їх прояву будуть різними. Відповідно, моніторинг цих зміщень і їхніх змін у часі є одним із критеріїв оцінки загального стану греблі.

Список літератури

- Мороко, В. М. Дніпрогес: Чорний серпень 1941 року. Наукові праці історичного факультету Запорізького національного університету. 2010. Вип. XXIX. С. 197–202.
- Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки у 2013 році. Офіційний інформаційний портал ДСНС України. Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2013.html.
- Новини Укргідроенерго. Безпека гребель. <https://uhe.gov.ua/en/node/5207>.
- Chen, Y. Q., Chrzanowski, A., Second, J. M. A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys. *CISM J. ACSGC* 1990, 44, 141–149.
- Chrzanowski, A., Szostak, A., Steeves, R. Reliability and efficiency of dam deformation monitoring schemes. *In Proceedings of the 2011 Annual Conference of Canadian Dam Association (CDA/ACB), Fredericton, NB, Canada, 15 October 2011.*

- Corsetti, M., Fossati, F., Manunta, M., Marsella, M. Advanced SBAS-DInSAR technique for controlling large civil infrastructures: An application to the Genzano di Lucania dam. *Sensors* 2018, 18, 2371.
- Drummond, P. Combining CORS Networks, Automated Observations and Processing, for Network RTK Integrity Analysis and Deformation Monitoring. In Proceedings of the 15th FIG Congress Facing the Challenges, Sydney, Australia, 11–16 April 2010. Pp. 11–16.
- Khosravi, S., Heydari, M. M. Modelling of Concrete Gravity Dam Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction. *World Appl. Sci. J.* 2013, 22, 538–546.
- Mata J., Tavares de Castro A. and Sá da Costa J. (2013): Time-frequency analysis for concrete dam safety control: Correlation between the daily variation of structural response and air temperature. *Eng. Struct.*, vol. 48. Pp. 658–665.
- Milillo, P., Burgmann, R., Lundgren, P., Salzer, J., Perissin, D., Fielding, E., Biondi, F., Milillo, G. Space geodetic monitoring of engineered structures: The ongoing destabilization of the Mosul dam, Iraq. *Sci. Rep.* 2016, 6, 37408.
- Oro S. R., Mafioletti T. R., Neto A. C., Garcia S. R. P., Júnior CN Investigation of the influence of temperature and water level of a reservoir on the displacement of a concrete dam. *International J. Appl. Fur. Eng.* 2016; 21: 107–120. doi: 10.1515 / ijame-2016-0007.
- Sarkar, R., Paul, D. K., Stempniewski, L. Influence of reservoir and foundation on the nonlinear dynamic response of concrete gravity dams. *ISIT J. Earthq. Technol.* 2007, 44, 377–389.
- Scaioni, M., Marsella, M., Crosetto, M., Tornatore, V., Wang, J. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. *Sensors Special Issue "Sensors for Deformation Monitoring of Large Civil Infrastructures"* 2018, 18, 3682. <https://doi.org/10.3390/s18113682>.
- Tretyak K., Periy S., Sidorov I., Babiy L. Complex High Accuracy Satellite and Field Measurements of Horizontal and Vertical Displacements of Control Geodetic Network on Dniester Hydroelectric Pumped Power Station (HPPS). *Geomatics and Environmental Engineering*. 2015, vol. 9, no. 1. Pp. 83–96. <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2015.9.1.83>.
- Zeidan, B. A. Effect of foundation flexibility on dam-reservoir-foundation interaction. *ICASGE'15 6-9 April 2015, Hurgada, Egypt* <https://www.researchgate.net/publication/280308540>.
- Zhang, L., Peng, M., Chang, D., Xu, Y. *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015; ISBN 9781118558522.
- Zhang, Y., Yang, S., Liu, J., Qiu, D., Luo, X. & Fang, J. (2018). Evaluation and Analysis of Dam Operating Status Using One Clock-Synchronized Dual-Antenna Receiver. *Journal of Sensors*, 2018.

Kornyliy TRETYAK¹, Bogdan PALIANYTSIA¹

^{1*} Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: bohdan.b.palianytsia@lpnu.ua.

RESEARCH OF SEASONAL DEFORMATIONS OF THE DNIEPER HPP DAM ACCORDING TO GNSS MEASUREMENTS

The goal. Identify the relationship between seasonal temperature changes and vertical and horizontal displacements of GNSS control points based on data obtained by the automated monitoring system of the Dnipro HPP dam in the period from 2016 to 2020. Output data. The data of nocturnal GNSS measurements obtained at 16 points of the Dnipro HPP dam from mid-2016 to mid-2020 inclusive were used for the research. Method. A specially developed software product analyzes the GNSS time series of measurements pre-processed by the GeoMoS system to determine the parameters of seasonal displacements and their relationship with seasonal changes in air temperature. Results. Based on the conducted research, the influence of environmental temperature has a decisive effect on the cyclicity of dam deformations. This applies to both horizontal and vertical displacements but in the absence of significant changes in the water level in the upper reservoir. Values of extreme displacements increase closer to the middle of the dam and decrease at the edges. This tendency is observed every year in the study period. According to the three-year GNSS dam monitoring, the amplitude of semi-annual horizontal oscillations of the control points relative to the dam axis is in the range of 15–18 mm. Almost all vectors of horizontal displacements are perpendicular to the axis of the arcuate dam. In the first half of the year, the vectors of horizontal displacements aim to widen the dam, and in the second half of the year - at compressing the dam. The analysis of the data represents that almost every year, extreme deviations, both horizontal and vertical, occur in February and August. Temperature extremes occur faster than excessive GNSS displacements. For the dam of the Dnipro HPP, the extreme horizontal displacements lag on average by 37 days, and the vertical ones – by 32 days from the extreme temperatures. The thermal deformations of the dam are related to the temperature of the concrete structures, which changes with an certain delay relative to the air temperature. The magnitudes of extreme displacements and the epoch of their manifestation depend on the dam's design and its technical parameters. For each dam, these extreme displacements and the periods of their representation will be different. Accordingly, monitoring these displacements and their changes over time is one of the criteria for assessing the general condition of the dam. Scientific novelty and practical significance. The regularities of the connection between the change of temperature and the displacements of the GNSS points revealed as a result of the conducted researches can be used for further researches on processing and analysis of the data of monitoring of hydraulic structures.

Key words: GNSS measurements, geodetic monitoring of hydraulic structures, geodetic monitoring of the Dnipro HPP.

Надійшла 15.03.2021 р.