

Андрій ЗИГАР¹, Ігор САВЧИН², Юрій ЮЩЕНКО¹, Микола ПАСІЧНИК¹

¹ Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна.

² Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна.

<https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017>

АНАЛІЗ ІНКЛІНОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ҐРУНТІВ В РАЙОНІ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

Мета. Метою досліджень є математичний аналіз та прогнозування деформацій дисперсних ґрунтів на основі вивчення даних інклінометричних спостережень в районі природно-технічної системи Дністровської ГАЕС. **Методика.** Методика досліджень базується на математичному аналізі та моделюванні процесів, що відбуваються у гірському масиві, на якому розташована Дністровська ГАЕС, із використанням методу кінцевих елементів. **Результати.** В роботі представлено аналіз результатів геотехнічного моніторингу деформацій дисперсних ґрунтів, реалізованого на базі інклінометричних вимірювань на території Дністровської ГАЕС. Встановлено кількісні параметри розподілу горизонтальних зміщень в інклінометричних свердловинах. Вони дали можливість виявити негативну динаміку у геологічних шарах N_{1-2ar} і N_{1r+v} , яка очевидно спричинена техногенним навантаженням. Виконано моделювання деформацій дисперсних ґрунтів під впливом природних і техногенних навантажень. На основі результатів моделювання підтверджено зміну знаку деформацій під впливом додаткового навантаження, яким може служити наповнення Дністровського верхнього водосховища. Очевидно, використання виключно цього методу не дає можливості повною мірою виявляти та відстежувати сучасні геологічні, сейсмічні та геодинамічні процеси. Оптимальним є поєднання і детальний аналіз різних методів моніторингу (геофізичних, геодезичних, параметричних, віброметричних, гідрогеологічних, температурних, візуально-інструментальних та інших), а також моделювання деформацій об'єкту під впливом природних і техногенних чинників. Такі моделювання могли б бути використані для проектування інших об'єктів такого типу, тому це є перспективним напрямком для подальших досліджень. Наукова новизна. Вперше проведено математичний аналіз та прогнозування деформацій дисперсних ґрунтів в районі природно-технічної системи Дністровської ГАЕС на основі вивчення даних інклінометричних спостережень. Практична значущість. Запропонована методика може бути використана при проектуванні інших об'єктів такого типу, оскільки моделювання деформацій об'єкту під впливом природних і техногенних чинників дає можливість оцінити можливі ризики та попередити їх.

Ключові слова: геотехнічний моніторинг; дисперсні ґрунти; прогнозування деформацій; інклінометричні свердловини; Дністровська ГАЕС.

Вступ

Дністровська ГАЕС (гідроакumuлююча електростанція) розташована за 8 км на північний схід від міста Сокиряни Чернівецької області (48°30'49"N, 27°28'24"E) (рис. 1).

Її будівництво розпочато у 1983 р. Сьогодні завершено перший етап будівництва – 3 гідроагрегати (із 7 проектних). У результаті спорудження Дністровської ГАЕС утворено Дністровське верхнє водосховище з площею дзеркала 1,3 км² (проектна площа 3,0 км²) та корисним об'ємом – 11,45 км³ (проектний об'єм 32,70 км³) [<https://uhe.gov.ua/>]. Дністровське верхнє водосховище розташоване на плато на 125 м вище від рівня Дністровського руслового буферного водосховища, і побудоване шляхом виїмки та насипу ґрунту в екран дна і дамб обгородження висотою до 20 м.

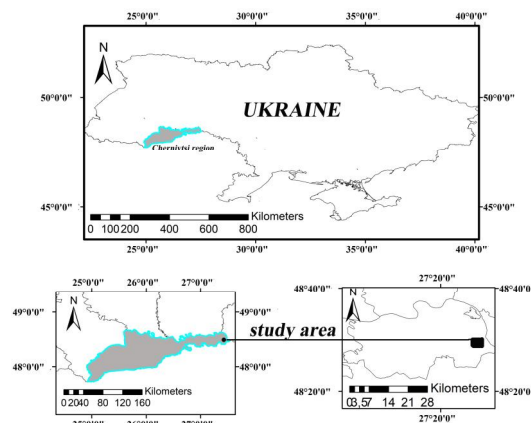


Рис. 1. Географічне розташування об'єкта досліджень

Відомо що, будівництво та експлуатація великомасштабних гідроспоруд завжди пов'язані з

техногенними ризиками – конструктивними, гідродинамічними, геологічними, геодинамічними та інколи, сейсмічними. Савчин І. і Пронишин Р. [Savchyn & Pronyshyn, 2020] зазначають, що Дністровська ГАЕС побудована в складних інженерно-геологічних умовах, що характеризуються великим перепадом висот та крутими схилами між Дністровським русловим буферним водосховищем та Дністровським верхнім водосховищем, наявністю зсувних ділянок, небезпекою фільтрації води в нижні горизонти. В процесі будівництва Дністровської ГАЕС відбулися доволі серйозні техногенні втручання у сформовану природну структуру масиву, а також у процеси, що в ньому відбуваються. Циклічність роботи станції також призводить до додаткового техногенного навантаження і до зміни гідродинамічного режиму [Сідоров та ін., 2015]. Процес будівництва і експлуатації такого об'єкту повинен обов'язково супроводжуватись спостереженням за горизонтальними і вертикальними рухами земної кори, а також детальним аналізом деформаційних процесів. Постійний моніторинг і контроль таких процесів може вберегти від катастроф і їх наслідків, або ж запобігти їм. Тому на будівельному майданчику Дністровської ГАЕС застосовуються всі основні методи геотехнічного моніторингу: візуально-інструментальний, геодезичний, параметричний, віброметричний, гідрогеологічний, температурний та геофізичний. Для прикладу, відповідно до Savchyn & Vaskovets (2018) та Savchyn & Pronyshyn (2020) з 2003 року на території Дністровської ГАЕС проводяться спостереження за деформаціями схилів у районі розташування основних гідроенергетичних споруд, які базуються на ГНСС-вимірюваннях. Авторами встановлено, що сучасні локальні горизонтальні рухи в районі Дністровського гідроенергетичного комплексу мають нерівномірний пульсаційний знакозмінний характер. Це призводить до виникнення зон прояву екстремальних значень стиску та розтягу, які в більшості змінили знак на протилежний після наповнення Дністровського верхнього водосховища. ГНСС-методи доцільно використовувати для моніторингу поверхневих деформаційних процесів, проте вони не дають можливості контролювати внутрішні деформаційні процеси, які виникають в товщі масиву. Загальновізнано використовувати традиційні мобільні або стаціонарні інклінометри для вивчення процесів внутрішньої деформації. Для прикладу, такі методи використовувались для моніторингу деформаційних процесів водосховища Три ущелини (Китай) (Yin, et. al., 2010; Hu, et. al., 2015; Yin, et. al., 2016). Основним недоліком традиційних мобільних інклінометрів є необхідність ручних вимірювань на кожній глибині, які є недостатньо ефективними через неможливість моніторингу в режимі реаль-

ного часу. Набагато ефективнішим є використання автоматизованих стаціонарних інклінометрів, які дають змогу здійснювати моніторинг у реальному часі. Основним недоліком стаціонарних інклінометрів є відносно висока вартість і обмежена кількість контрольних точок.

Застосування моніторингу на основі інклінометрів дозволяє отримати реальну і негайну інформацію про вектор і швидкість руху геологічних шарів під впливом техногенного навантаження, але це ускладнює визначення напружень в абсолютних числових значеннях, оскільки корінні породи в яких проводяться вимірювання, у багатьох випадках неоднорідні та анізотропні, а підземне середовище не дуже сприяє вимірюванню найменших напружень.

Геофізичний моніторинг на Дністровській ГАЕС представлений мережею екстензометричних свердловин; в рамках модернізації обладнання в 2018 році введено в експлуатацію дві сучасні інклінометричні свердловини, що дозволить якісно покращити моніторинг унікальних будівель та споруд ГАЕС. Наявність даних інклінометричних спостережень породжує необхідність їх аналізу та інтерпретації.

Мета

Метою досліджень є математичний аналіз та прогнозування деформацій дисперсних ґрунтів на основі вивчення даних інклінометричних спостережень в районі природно-технічної системи Дністровської ГАЕС.

Дані та методика

Для вивчення деформацій ґрунтів у межах плато, на якому розташована Дністровська ГАЕС, було закладено дві інклінометричні свердловини № 1 та № 2 (рис. 2). Свердловини охоплюють два основних структурно-стратиграфічні комплекси, які беруть участь у геологічній структурі регіону – фундамент Східноєвропейської платформи (протерозой) та її осадовий покрив (фанерозойські утворення) [Геологічна карта України, 2008]. Протерозой представлений бердичівським ультраметаморфічним комплексом ($\gamma\text{mPR}_1\text{bd}$). Він складений гранат-біотитовими гранітами і мігматитами. У структурному плані гранат-біотитові граніти і мігматити спостерігаються в синформних структурах. Відклади вендської системи в досліджуваному районі представлені грушкінською ($V_1\text{gr}$), могилівською ($V_2\text{mg}$), яришівською ($V_2\text{jr}$), нагорянською ($V_2\text{ng}$) та данилівською ($V_2\text{dn}$) світами. Це теригенні товщі складені пісковиками, алевролітами та аргілітами. Описані нижче породи перекриваються з стратиграфічною незгідністю утвореннями крейдового віку. Незвиська та пилипчанська світи об'єднані ($K_{1-2}\text{nz+pl}$) – кварц-

глауконітовий пісок в базальних верствах, вище глауконітові піски, піщаністі вапняки з глауконітом. Вік незвиської світи визначений як сеноманський. Озаринецька світа (K_2oz) представлена вапняками з домішками глинистого матеріалу та поодинокими стяжіннями кременів, вище залягають трепели зі стяжіннями опалових і халцедонових кременів. Неогенові утворення представлені відкладами баденського (N_{1pd}) та сарматського (N_{1p+v}) регіоярусів та товщею алювіальних відкладів древніх терас Дністра (N_{1-2ap}). Відклади баденського регіоярису складені пісками та пісковиками у верхній частині глинистими пісковиками. Сарматські відклади представлені різними генетичними типами – морськими, лагунними та континентальними. Літологічно вони представлені глинами, пісками, вапняками. Завершують

розріз досліджуваного району древні алювіальні утворення, які представлені грубозернистими піщано-гравійно-гальковими відкладами. Варто зазначити, що неогенові слабкі та нестійкі шари були видалені з основи, під час будівництва верхнього басейну Дністровської ГАЕС. Стратиграфічне розташування геологічних шарів для обох свердловин практично однакове, азимут простягання шарів становить $ПнЗх = \pm 78^\circ$, свердловини не обводнені (рис. 3). В районі свердловин вивчений керн і проведені пресометричні дослідження деформованості порід, лабораторно обчислений модуль деформації геологічних шарів (E) [Геологічна карта України, 2008]. Також в [Bubniak, et al., 2020], ґрунтуючись на лініаметному аналізі, встановлено, що Дністровська ГАЕС знаходиться в зоні із середньою густиною лініаметів.

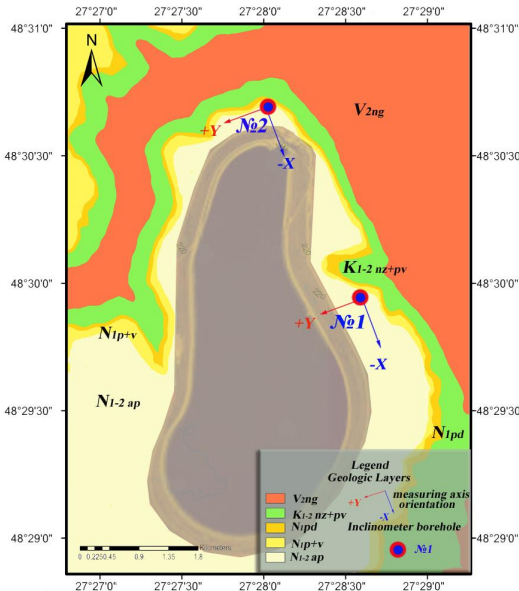


Рис. 2. Карта розташування інклінометричних свердловин № 1 та № 2 (Карта доповнена даними з [Геологічна карта України, 2008])

Відстань між свердловинами – 1400 м. Вісь X паралельна руслу Дністра, вісь Y доповнює систему праворуч. Свердловини оснащені 20 стаціонарними двовісними вертикальними інклінометричними сенсорами Geokon модель 6150 В-2 [Geokon, 2019], з кроком заглиблення 2 метри. Глибина забою для кожної свердловини становить 40 метрів. Усі сенсори автоматизовані з використанням мікроелектромеханічної технології системи (MEMS). Дані сенсори проводять вимірювання автоматично 4 рази на день, тобто кожні 8 годин. Для дослідження було обрано період з 01.01.2018 р. по 31.12.2020 р., впродовж якого потримано 116 800 значень. Отримані значення були усереднені до одного на день для кожного датчика.

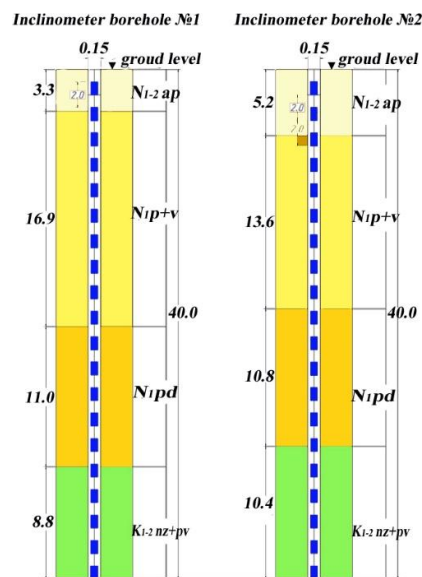


Рис. 3. Геологічний розріз уздовж осі свердловини

Варто зазначити, що принцип дії датчиків ґрунтується на визначенні відхилень контрольної маси через вимірювання диференціальної ємності. За допомогою цього методу можна визначити як динамічне (удар або вібрацію), так і статичне прискорення (нахил або обертання).

Аналіз та інтерпретація

Для аналізу та інтерпретації результатів вимірювань здійснено перехід від вимірних кутів нахилу α_{xi} та α_{yi} до переміщень M_{xi} and M_{yi} , а також до вектора переміщення M_i i -го датчика відповідно:

$$M_{xi} = L \times \sin \alpha_{xi}, \quad M_{yi} = L \times \sin \alpha_{yi}, \quad (1)$$

$$M_i = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2},$$

де L – базова лінія вимірювань (для конструкції, використаної в цьому дослідженні, $L = 2000$ мм).

Отримавши дані i -го (одинарного) давача, можна визначити сумарні переміщення всього профілю вздовж осей X та Y відповідно:

$$M_x = \sum_1^n M_{xi}, M_y = \sum_1^n M_{yi}. \quad (2)$$

Значення переміщень, отримані в процесі обробки вздовж кожної з осей, було використано для побудови кумулятивних кривих розподілу горизонтальних переміщень у кожній свердловині (рис. 4 та 5). Варто зазначити, що діапазон

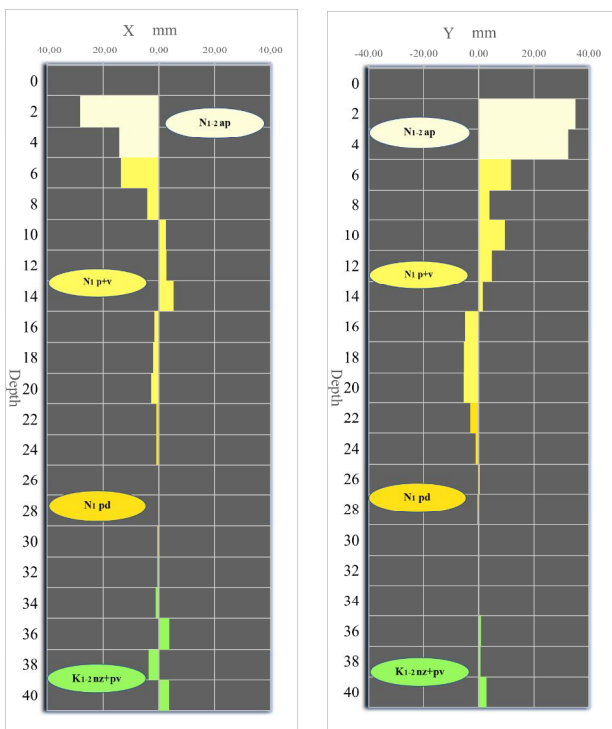


Рис. 4. Кумулятивні профілі горизонтальних переміщень свердловини № 1

Відомо, що зі збільшенням напруги зростає деформація, тобто при пружних деформаціях шари N_{1-2ap} і N_{1p+v} відновлюються до початкових значень при знятті навантаження. Оскільки цього не сталося, розглянуті типи шарів перейшли в нелінійну фазу закону Гука [Корольов та ін., 1985], тобто в незворотні деформації. Причина цих зсувних деформацій та напружень може полягати в нерівномірному розподілі навантаження на вершину плато в поєднанні з динамічними коливаннями, спричиненими експлуатацією Дністровської ГАЕС. На основі цих припущень, а також на підтримку теорії причин виникнення деформації було вирішено провести комп'ютерне моделювання процесів, що відбуваються в гірській масі, ґрунтованому на методі кінцевих елементів [Zienkiewicz, et al., 1971; Paswey& Clough, 1971;

вимірювань датчиків цього типу становить $\pm 10^\circ$, а при незмінному положенні інклінометричної свердловини точність вимірювання переміщень становить ± 2 мм [Geokon, 2019].

Аналізуючи отримані результати, можна відзначити негативну динаміку в геологічних шарах N_{1-2ap} та N_{1p+v} , свердловина № 1, оскільки ці шари піддаються сильним дотичним напруженням τ (у площині XY). Шари N_{1-2ap} в обох свердловинах мають різноспрямований вектор деформації γ , а шари N_{1p+v} і нижче мають близькі до односпрямованого переміщення вздовж осі $(-Y)$, що вказує на такий тип деформації як зсув (у напрямку $-Y$).

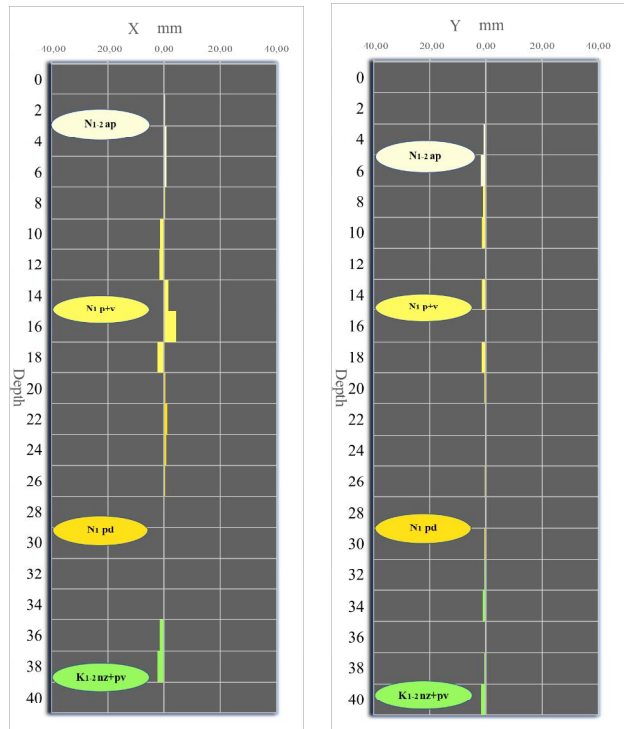


Рис. 5. Кумулятивні горизонтальні профілі зміщення свердловини № 2

Pawsey, 1970; Too, 1971; Howlett, 1966; Sokolnikoff& Specht, 1956; Scordelis& Lo, 1964; Bakhrebah& Schnobrich, 1973; Davoodi, et al., 2018; Mirasli& Rahnema, 2019].

Через обмежену обчислювальну потужність середовище моделювання було прийнято за ізотропне, ступінь свободи (защемлення) для моделі максимально наближений до природного. До моделі застосовано гіпотезу Вінклера [Potarov, 2014] (пружна основа). Для визначення напруженого стану в конкретній точці, а згодом і в твердому тілі, потрібно визначити тензор напружень $T\sigma$, компоненти яких є три компоненти нормальних ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) і шість дотичних ($\tau_{xy}=\tau_{yx}, \tau_{yz}=\tau_{zy}, \tau_{zx}=\tau_{xz}$) напружень для характеристики точки у загальному випадку. Цей тензор $T\sigma$ належить до тензору другого рангу, тому його

можна представити як у вигляді ряду лінійних рівнянь, так і у вигляді матриці [Цытович, 1963; Цытович, 1973; Benjamin& Cornell, 1970; Tonon, et al., 2000]:

$$T\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

Варто зазначити, що послідовність індексів компонентів тензору (3) характеризує орієнтацію компонентів.

Відомо, що різні типи напружень спричиняють різні типи деформацій, а саме:

- нормальне напруження σ – викликає нормальні деформації (ϵ),
- дотичні напруження τ – спричиняють дотичні деформації (γ),
- об’ємні напруження, σ_v – спричиняють об’ємні деформації (ϵ_v).

Додатні значення напружень і деформацій характеризують стиск, від’ємні значення – розтяг. Як і тензор напружень (3), тензор деформацій ($T\epsilon$) також можна записати у вигляді матриці:

$$T\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \epsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \epsilon_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

Оскільки деформація зсуву здійснюється у двох взаємно перпендикулярних напрямках, дотичні компоненти тензора деформації (3) діляться на два.

Основний фокус дослідження буде зосереджено на геологічних шарах N_{1-2ar} та N_{1p+v} , які викликають особливе занепокоєння. Основні фізико-механічні властивості цих шарів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості ґрунтів

Геологічний шар	Щільність (γ_s), 10^4 N/m ³	Опір зсуву		Коефіцієнт Пуассона (μ)	Модуль деформації (E), МПа
		Коефіцієнт внутрішнього тертя ($tg \varphi$)	Коефіцієнт сцеплення (C_0), МПа		
N_{1-2ar}	2,00	0,45	0,25	0,22	20
N_{1p+v}	1,97	0,75	1,50	0,25	500
N_{1pd}	2,05	0,30	0,35	0,30	50
$K_{1-2nz+pl}$	2,20	0,50	0,20	0,33	120

Значення показника ($tg \varphi$) (див. табл. 1) можна інтерпретувати як показник кількості дефектів ґрунту. У природному стані ці дефекти утримуються між собою за допомогою так званих структурних зв’язків [Masoom, et al., 2016], при розриві яких ґрунт переходить в розуцільнений стан і прагне утворити кут природнього укосу на основі теорії Кулона [Vainberg, 1993] про кореляцію між дотичними та нормальними напруженнями (рис. 6).

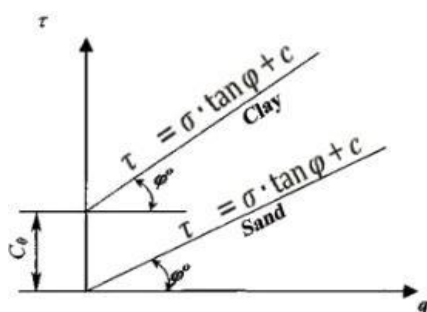


Рис. 6. Ілюстрація теорії Кулона

З цього випливає, що в полі механічних напружень виникаючих в процесі експлуатації Дністровської ГАЕС коефіцієнт внутрішнього

зчеплення c_0 геологічного шару N_{1-2ar} прямує до нуля ($0,25 \rightarrow 0$). Крім того, через не замкнутість геологічної системи відбувається відтік і, можливо, віджим вологи з ґрунту, що зменшує поровий тиск. Згідно з теорією Карла Терцагі, чим вищий поровий тиск – u , тим менший зовнішній механічний тиск σ передається на скелет ґрунту. [Terzaghi, 1962; Herget, 1973; Terzaghi et al., 1996; Vainberg, 1993; Вайнберг, 2012]:

$$\tau = (\sigma - u) \cdot \tan \varphi + c \quad (5)$$

Для моделювання процесів, що відбуваються в гірському масиві на основі методу кінцевих елементів, була використана розрахункова схема (рис. 7), де девіатором статичного навантаження (D) буде маса споруди дамби, а також максимально заповнений басейн $D\sigma_z = 0,28$ МПа, матеріал моделі ізотропний і відповідає параметрам геологічного шару N_{1-2ar} (див. таблицю 1), $F_g = const$.

Використовуючи запропоновану схему (див. рис. 7), проведено моделювання при двох умовах:

- гірський масив знаходиться в природних полях напружень ($D\sigma_z = 0$ МПа);
- гірський масив під впливом поля механічних напружень ($D\sigma_z = 0,28$ МПа).

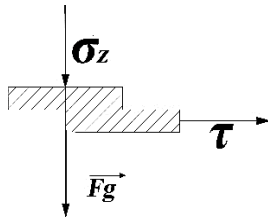


Рис. 7. Розрахункова схема

В результаті моделювання складено карти схеми розподілу природного (рис. 8) та механічного (рис. 9) напруження досліджуваного регіону.

Аналізуючи отримані результати, простежується взаємозв'язок нормальних та дотичних напружень у масиві в природних умовах (див. рис. 8) та в полях механічних напружень, що виникають внаслідок експлуатації Дністровської ГАЕС (див. рис. 9). У природних умовах максимальні дотичні напруження при стисненні становили 3,554 МПа, а при розтягу – 1,337 МПа. При навантаженні 0,2 МПа показники на стиснення зросли до 20 МПа, а на розтяг до – 2,77 МПа, більша частина загальної площі вершини плато перемістилася із зон стиску в зони розтягу. Зміна знаку деформації після заповнення Дністровського верхнього водосховища також відображена в роботі Savchyn & Pronyshyn, 2020. Найімовірніше, цей процес призвів до виникнення зсувних деформацій у шарі N₁-2ар інклінометричної свердловини № 1.

Оскільки показники дотичного напруження не є критичними для даного геологічного шару, вірогідно що він знаходиться в процесі консолідації, тобто зміни на рівні структурних зв'язків [Цытович, 1963; Цытович, 1973]. Згідно з даними моделювання, шар N_{1р+v} здійснює природний опір відповідно до

третього закону Ньютона $F1 = -F2$. Різниця напружень між шарами обумовлена локальним накопиченням пружних деформацій, або перенесенням напружень під дією гідротехнічної конструкції. Логічно також припустити, що конструкція Дністровської ГАЕС виконала корисну роботу по відношенню до тіла, а саме змінила напружено-деформований стан гірської маси, передала енергію $[E] = Дж$, яка від потенціальної перейшла до кінетичної, провокуючи тим самим збільшення сейсмічного фону в регіоні, обговореному в [Savchyn & Pronyshyn, 2020]. Отримані результати дають загальне уявлення про характер виникнення деяких геодинамічних процесів, що виникають в зоні механічних напружень. Верхній басейн Дністровської ГАЕС активізував і посилив геодинамічні процеси в масиві. Постійна зміна напружено-деформованого стану може призвести до зміни структури геологічних порід, накопичення ефекту втоми, що зменшить стійкість опору гірського масиву до динамічних навантажень.

Наукова новизна

Вперше проведено математичний аналіз та прогнозування деформацій дисперсних ґрунтів в районі природно-технічної системи Дністровської ГАЕС на основі вивчення даних інклінометричних спостережень.

Практична значущість

Запропонована методика може бути використана при проектуванні інших об'єктів такого типу, оскільки моделювання деформацій об'єкту під впливом природних і техногенних чинників дає можливість оцінити можливі ризики та попередити їх.

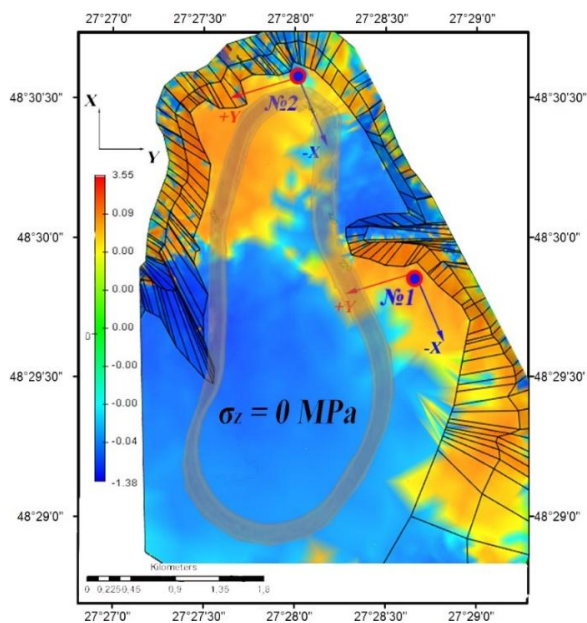


Рис. 8. Масив у полях природних (власних) напружень

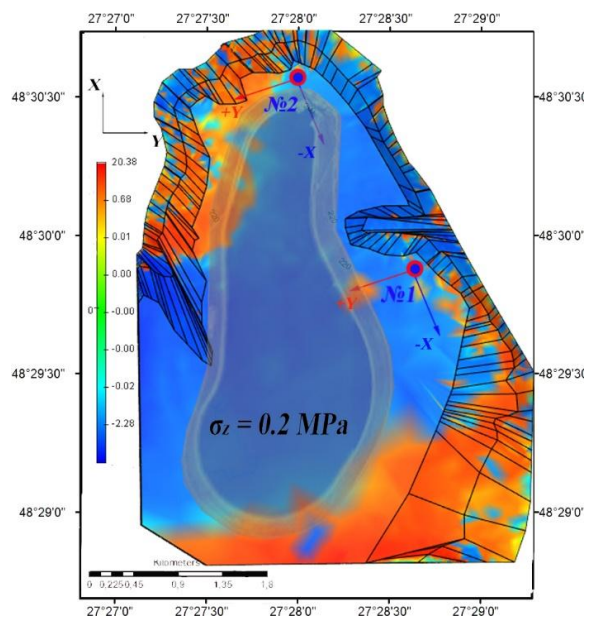


Рис. 9. Масив в полях механічних напружень

Висновки та обговорення

В роботі представлено аналіз результатів геотехнічного моніторингу деформацій дисперсних ґрунтів, реалізованого на базі інклінометричних вимірювань на території Дністровської ГАЕС.

Встановлено кількісні параметри розподілу горизонтальних зміщень в інклінометричних свердловинах. Вони дали можливість виявити негативну динаміку у геологічних шарах N_{1-2ap} і N_{1p+v} , яка очевидно спричинена техногенним навантаженням.

Виконано моделювання деформацій дисперсних ґрунтів під впливом природних і техногенних навантажень. На основі результатів моделювання підтверджено, зміну знаку деформацій під впливом додаткового навантаження, яким може служити наповнення Дністровського верхнього водосховища.

Очевидно, використання виключно цього методу не дає можливості в повній мірі виявляти та відстежувати сучасні геологічні, сейсмічні та геодинамічні процес. Оптимальним є поєднання та детальний аналіз різних методів моніторингу (геофізичних, геодезичних, параметричних, віброметричних, гідрогеологічних, температурних, візуально-інструментальних та інших), а також моделювання деформацій об'єкту під впливом природних і техногенних чинників. Такі моделювання могли б бути використані при проектуванні інших об'єктів такого типу, тому це є перспективним напрямком для подальших досліджень.

Подяка

Автори висловлюють подяку представникам ТОВ «Гідропроект» (Харків, Україна), ПАТ «Укргідропроект» (Харків, Україна), ПрАТ «Укргідроенерго» (Вишгород, Україна) за підтримку та допомогу в написанні публікації.

Список літератури

Вайнберг, А. И. Численные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости склона основных сооружений Днестровской ГАЭС. Гидроэнергетика Украины, 2012. (1), 48–53.

Геологічна карта України, Масштаб 1: 200 000. Волино-Подільська серія, М-35-XXVIII (Бар), М-35-XXXIV (Могилів-Подільський). 2008. Пояснювальна записка.

Корольов, В. А., Золочевская, Р. И., Осипов, В. И. Деформируемость глинистых грунтов при компрессионном уплотнении. Физико-химическая механика природных дисперсных систем. Под ред. Шукина Е. Д., МГУ, 1985. 213–222.

Сідоров, І. С., Перій, С. С. & Сарнавський, В. Г. Визначення рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС супутниковими та наземними геодезичними методами. *Геодинаміка*. 2015. 19 (2), 15–25. doi: 10.23939/jgd2015.02.015.

Цытович, Н. А. *Механика грунтов*, 4-е изд. М.: Госизд-во литературы по строительству архитектуры и строительным материалам. 1963. 638 с.

Цытович, Н. А. *Механика грунтов* (краткий курс). 2-е изд. М.: Высшая школа. 1973. 280 с.

Bakhrebah, S. A. & Schnobrich, W. C. (1973). *Finite element analysis of intersecting cylinders*. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Benjamin, J. R. & Cornell, C. A. (1970). *Solutions Manual to Accompany Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill.

Bubniak, A. M., Bubniak, I. M. & Zyhar, A. I. (2020, May). Lineaments analysis of the Dniester area (between Bakota and Novodnistrovsk). In *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1–4). European Association of Geoscientists & Engineers.

Davoodi, M., Pourdeilami, A., Jahankhah, H. & Jafari, M. K. (2018). Application of perfectly matched layer to soil-foundation interaction analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 753–768.

Geokon (2019). Instruction Manual, Model 6300, Vibrating Wire In-Place Inclinator. https://www.geokon.com/content/manuals/6300_In-Place_Inclinometer.pdf.

Herget, G. (1973, January). Variation of rock stresses with depth at a Canadian iron mine. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 10, No. 1, pp. 37–51). Pergamon. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(73\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(73)90058-2).

Howlett, J. (1966). *Handbook of Mathematical Functions*. Edited by Milton Abramowitz and Irene A. Stegun. Constable (Dover Publications Inc.) Paperback edition 1965. *The Mathematical Gazette*, 50(373), 358–359.

Hu, X., Zhang, M., Sun, M., Huang, K. & Song, Y. (2015). Deformation characteristics and failure mode of the Zhujiadian landslide in the Three Gorges Reservoir, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(1), 1–12.

Masoom, H., Courtier-Murias, D., Farooq, H., Soong, R., Kelleher, B. P., Zhang, C., ... & Simpson, A. J. (2016). Soil organic matter in its native state: unravelling the most complex biomaterial on earth. *Environmental science & technology*, 50(4), 1670–1680.

Mirassi, S. & Rahnema, H. (2019). Effect of frequency content of seismic source load on Rayleigh and P waves in soil media with cavity. *Journal of Structural and Construction Engineering*. doi: 10.22065/jsce.2019.176403.1808.

Paswey, S. E. & Clough, R. W. (1971). Improved numerical integration of thick slab finite elements. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 3, 545–586.

Pawsey, S. F. (1970). *The analysis of moderately thick and thin shells* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA).

- Potapov, V. D. (2014). About calculation of bars lying on a nonlocal elastic foundation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 4, 63–68.
- Savchyn, I. & Pronyshyn, R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dnister Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11(5), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.001>.
- Savchyn, I., Vaskovets, S. (2018). Local geodynamics of the territory of Dnister Pumped Storage Power Plant. *Acta Geodyn. Geomater.*, 15, 1(189), 41–46. doi: 10.13168/AGG.2018.0002.
- Scordelis, A. C. & Lo, K. S. (1964, May). Computer analysis of cylindrical shells. In *Journal Proceedings* (Vol. 61, No. 5, pp. 539–562).
- Sokolnikoff, I. S. & Specht, R. D. (1956). *Mathematical theory of elasticity* (Vol. 83). New York: McGraw-Hill.
- Terzaghi, K. (1962). *Measurement of stresses in rock*. Institution of civil engineers. *Geotechnique*, 12, 105–124.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Tonon, F., Bernardini, A. & Mammino, A. (2000). Reliability analysis of rock mass response by means of random set theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(3), 263–282.
- Too, J. J. M. (1971). *Two-dimension, plate, shell and finite prism isoparametric elements and their applications* (Doctoral dissertation, University College Swansea).
- Vainberg, A. I. (1993). Forces in the casing of the aggregate shafts of the Dnestrovsk water-storage electric power plant. *Journal of Mining Science*, 29(1), 27–31.
- Yin, Y., Huang, B., Wang, W., Wei, Y., Ma, X., Ma, F. & Zhao, C. (2016). Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 577–595.
- Yin, Y., Wang, H., Gao, Y. & Li, X. (2010). Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 7(3), 339–349.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. & Too, J. (1971). Reduced integration technique in general analysis of plates and shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 3(2), 275–290.

Andrii ZYHAR^{1a}, Ihor SAVCHYN², Yuriy YUSHCHENKO^{1b}, Mykola PASICHNYK^{1c}

¹ Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsyubynskoho Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine.

^{1a} <https://orcid.org/0000-0002-3882-8829>, ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-5616-8089>, ^{1c} <https://orcid.org/0000-0001-9378-6302>.

² Lviv Polytechnic National University, Institute of Geodesy, 6, Karpinski Str., Lviv, 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-5859-1515>.

ANALYSIS OF INCLINOMETRIC OBSERVATIONS AND PREDICTION OF SOILS DEFORMATIONS IN THE AREA OF THE DNISTER PSPP

Purpose. The aim of the research is mathematical analysis and forecasting of dispersive soils behaviour based on the study of inclinometric observations data in the area of the natural-technical system of the Dnister PSPP. **Methodology.** The research methodology is based on mathematical analysis and modelling of processes occurring in the mountain massif on which the Dnister PSPP is located, using the finite element method. **Results.** The paper presents an analysis of the results of geotechnical monitoring of the behaviour of dispersive soils, implemented on the basis of inclinometric measurements on the territory of the Dnister PSPP. Quantitative parameters of horizontal displacement distribution in inclinometric wells are established. They made it possible to detect negative dynamics in the geological horizons N_{1-2ap} and N_{1p+v} , which is apparently caused by technogenic load caused by the Dnister upper reservoir. The behaviour of dispersive soils under the influence of natural and technogenic loads has been modelled. Based on the simulation results, the change of the sign of deformations under the influence of additional load, which can be the filling of the Dnister upper reservoir, is confirmed. Obviously, the use of this method alone does not allow to fully detect and track modern geological, seismic and geodynamic processes. A combination and detailed analysis of different monitoring methods (geophysical, geodetic, parametric, vibrometric, hydrogeological, temperature, visual-instrumental and others), as well as modelling the behaviour of the object under the influence of natural and technogenic factors is optimal. Such simulations could be used in the design of other objects of this type, so this is a promising area for further research. **Originality.** For the first time, a mathematical analysis and forecasting of the behaviour of dispersed soils in the area of the natural and technical system of the Dnister PSPP was conducted on the basis of studying the data of inclinometric observations. **Practical significance.** The proposed technique can be used in the design of other objects of this type, as modelling the behaviour of the object under the influence of natural and technogenic factors makes it possible to assess possible risks and prevent them.

Key words: geotechnical monitoring; dispersive soils; stress-strain behaviour; inclinometric wells; Dnister PSPP.

Надійшла 05.04.2021 р.