

© В.І. Тимощук<sup>1</sup>, Є.А. Шерстюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА СТАНУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ЛАДИЖИНСЬКОЇ ТЕС У ЗВ'ЯЗКУ З ЇХ РЕКОСТРУКЦІЄЮ

© V. Tymoshchuk<sup>1</sup>, Y. Sherstiuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT THE CONDITIONS OF LADYZHYNKA TPP HYDROTECHNICAL CONSTRUCTIONS IN ACCORDANCE WITH THEIR RECONSTRUCTION

**Метою** роботи є прогнозна оцінка гідрогеомеханічного стану золовідвалу ДТЕК Ладжинська ТЕС та змін гідродинамічного і гідрогеохімічного режимів на ділянці його розташування в умовах проекрованої реконструкції.

**Методика дослідження.** Комплексна оцінка змін гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів на ділянці золовідвалу та визначення гідрогеомеханічної стійкості огорожувальних споруд виконано за результатами чисельного геофільтраційного, геоміграційного і гідрогеомеханічного моделювання з використанням програмних комплексів MODFLOW, PHASE2 та GEOSTUDIO.

**Результати дослідження.** На основі встановлених закономірностей формування гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів на ділянці золовідвалу виконаний прогноз їх змін відповідно до прийнятої схеми реконструкції золовідвалу. За результатами чисельного моделювання напружено-деформованого стану виконана оцінка гідрогеомеханічної стійкості огорожувальних споруд в умовах проектованого нарощування третього ярусу золовідвалу. Обґрунтовані заходи щодо підвищення стійкості огорожувальних споруд золовідвалу в умовах його реконструкції.

**Наукова новизна.** Отримані нові дані щодо характеру змін гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів на ділянці золовідвалу в умовах його реконструкції. Заходи щодо забезпечення стійкості гідротехнічної споруди обґрунтовано завдяки комплексному дослідженню напружено-деформованого стану порід, що складають огорожувальні дамби з урахуванням прогнозного обводнення породного масиву та сейсмічності території.

**Практичне значення.** Результати виконаних досліджень складають основу для обґрунтування технічних рішень щодо забезпечення стійкості гідротехнічних споруд енергогенеруючих підприємств.

**Ключові слова:** *гідротехнічні споруди, гідродинамічний і гідрогеохімічний режими, огорожувальні споруди, сейсмічність території, гідрогеомеханічна стійкість.*

**Вступ.** В умовах глобальної енергетичної напруженості та необхідності забезпечити енергетичний баланс України питання продовження ресурсу енергетичних підприємств є надзвичайно актуальним. З огляду на те, що завдання утилізації золошлаків, які утворюються після спалювання твердого палива на ТЕС, на даний час залишається невирішеним [1], то підтримка золошлакового господар-

ства в комплексі з забезпеченням екологічної безпеки та стійкості споруд є задачею сьогодення для енергетичних підприємств. Золівідвал Ладижинської ТЕС з огорожувальними дамбами знаходиться в 6 км від проммайданчика ДТЕК Ладижинська ТЕС і в 1,0...1,5 км на південний захід від с. Заозерне, розміщується на правому березі водосховища річки Південний Буг в двох кілометрах на північний захід від м. Ладижин, Вінницька обл.

Ділянка золівідвалу в геоморфологічному відношенні знаходиться в районі злучини р. Південний Буг в балці, яка відноситься до річного басейну р. Сільниця. Балка, у якій знаходиться золівідвал, розташована між правим берегом р. Південний Буг, та р. Сільниця, яка впадає в р. Південний Буг в 10 км від ділянки розташування золівідвалу.

Метою дослідження є прогнозна оцінка гідрогеомеханічного стану золівідвалу ДТЕК Ладижинська ТЕС та змін гідродинамічного і гідрогеохімічного режимів прилеглої території в умовах його реконструкції.

**Основна частина.** При дослідженні гідродинамічного та гідрогеохімічного режимів ділянки золівідвалу в умовах його реконструкції використана реалізована у програмному комплексі MODFLOW 2009 чисельна модель геофільтрації, яка представляє собою модель тривимірного потоку підземних вод постійної щільності в пористому середовищі [2-14]. Розрахункова схематизація ділянки розташування золівідвалу ДТЕК Ладижинська ТЕС виконана виходячи з особливостей геологічної будови території, характеру залягання водоносних горизонтів і їх гідравлічних характеристик, фільтраційних властивостей водовмісних порід, наявності гідравлічного взаємозв'язку між водоносними горизонтами, характеру живлення-розвантаження за площею розвитку водоносних горизонтів і на їх контурах.

Основним об'єктом досліджень в чисельній моделі є зона вільного водообміну, яка включає товщу обводнених четвертинних відкладень на схилових ділянках балки і в її тальвегу, кору вивітрювання кристалічного масиву, а також товщу обводнених техногенних утворень, представлених золами і золошлаковими матеріалами, в межах існуючого золівідвалу.

Структура моделі відповідно до геологічної будови території і характеру залягання розвинених в її межах водоносних горизонтів приведена до чотиришарової товщі, що враховує проектоване нарощування 3-го ярусу золівідвалу. У якості нижньої межі моделі прийнята умовна поверхня кори вивітрювання кристалічного масиву.

Відповідно до прийнятої структури розрахункові шари геофільтраційної моделі представлені наступним чином: 1 шар – водоносний – представлений товщею техногенних відкладень золошлакового матеріалу в інтервалі проектованого нарощування секцій №1 і №2 на висоту до 5,0 м; 2 шар – водоносний – складений обводненою товщею існуючих техногенних відкладень золошлакового матеріалу в межах секцій №1 і №2 золівідвалу потужністю до 30,0 м; 3 шар – водоносний і слабководоносний – представлений товщею суглинків нижньочетвертинного віку і червоно-бурих глин неоген-нижньочетвертинного

віку загальною потужністю відповідно 4,0...11,7 м і 6,0...16,5 м; 4 шар – водоносний – в межах модельованої товщі представлений корою вивітрювання кристалічних порід – сильно тріщинуватих граніто-гнейсів потужністю до 15,0 м.

Фільтраційні параметри розрахункових шарів задані згідно з результатами досліджень, виконаних на етапі інженерно-геологічних вишукувань, і даними вивчення властивостей ґрунтів і складованих у золівдвал золошлакових матеріалів в лабораторних і польових умовах.

До розрахунку прийняті параметри проникності виділених шарів відповідно до наступних діапазонів значень: коефіцієнт фільтрації – від 0,01 до 1,0 м/доб, коефіцієнт гравітаційної водовіддачі – від 0,1 до 0,2 дол. од., коефіцієнт пружної водовіддачі –  $10^{-4}$  дол. од. За відсутності вираженої зональності гідравлічних характеристик в межах розрахункових шарів в чисельній моделі їх величини задані осередненими значеннями в межах всієї площі поширення.

Інфільтраційне живлення по площі моделі встановлено рівним 16,5 мм/рік, що становить величину близько 2,5% від загальної кількості атмосферних опадів, рівної згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27: 2010 "Будівельна кліматологія" 660 мм/рік [3, 7].

Методикою моделювання передбачалось вирішення задач прогнозу оцінки змін гідродинамічного режиму на ділянці розташування золівдвалу відповідно до прийнятої просторово-часової схеми складування золошлакоматеріалів. При вирішенні задач нестационарної фільтрації розрахунковий час, що відповідав періоду від початку будівництва третього ярусу золівдвалу до його заповнення до відміток 221,2 і 219,5 м відповідно для першої і другої секцій золівдвалу, становив 5 років (2000 діб) в межах загального розрахункового періоду 25 років (10000 діб).

Основним фактором, що визначає формування гідродинамічного режиму на ділянці, є рівень техногенного живлення водоносного горизонту в четвертинних відкладеннях і корі вивітрювання кристалічних порід в умовах підпертого стану ґрунтових вод за рахунок нарощування третього ярусу золівдвалу.

При оцінці впливу реконструкції золівдвалу на гідрогеохімічний режим водоносних горизонтів показником їх стану є загальний вміст розчинених речовин, представлених переважно макрокомпонентами. Основним показником, що характеризує техногенні зміни, є вміст сульфат-іону  $SO_4^{2-}$  у підземних і поверхневих водах.

Аналіз розподілу фактичних значень мінералізації в межах розрахункових шарів свідчить про відсутність вираженої закономірності її зміни як по площі досліджуваної території, так і в межах окремих водоносних шарів. Згідно з даними інженерно-геологічних вишукувань мінералізація вод на характеризується значеннями: вода в чаші золівдвалу – 1055 мг/л; ґрунтові води четвертинного горизонту – 645 мг/л; вода в р. Сільниця – 1020 мг/л. Вміст сульфат-іону: вода в чаші – 556 мг/л, ґрунтові води четвертинного горизонту – 298 мг/л, вода в р. Сільниця – 566 мг/л.

Для умов площинного живлення ґрунтового водоносного горизонту фонові значення мінералізації і вмісту сульфат-іону задані еквівалентно їх початковій концентрації в першому від поверхні водоносному горизонті.

Розрахунки виконані в нестационарній постановці на кінцевий період формування золовідвалу відповідно до просторово-часової схеми складування золошлакоматеріалів на період 5, 10 і 25 років ( $t = 2000, 5000$  і  $10000$  діб).

За даними прогнозних розрахунків встановлено, що формування гідродинамічного режиму на ділянці золовідвалу зумовлено підвищеним техногенним живленням в межах його чаші, яке пов'язане з експлуатацією золовідвалу та проєктованим нарощуванням третього ярусу. При проєктованому нарощуванні третього ярусу золовідвалу відбувається, зважаючи на характер гідравлічної взаємодії техногенного об'єкта з підземними водами, відповідне підняття рівнів підземних вод на прилеглий до золовідвалу території.

Так, при досягненні проєктних відміток поверхні золовідвалу ( $t = 2000$  діб) рівень води в межах огорожувальних споруд першого і другого ярусу нарощування секцій № 1 і № 2 сягає позначок відповідно  $217,0...221,0$  та  $219,0...219,5$  м, а на прилеглий території знаходиться на абсолютних відмітках  $215,0...219,0$  м, що відповідає підвищенню рівнів води відносно існуючого положення на величину до  $1,0$  м в межах смуги шириною  $500$  м, до  $2,0$  м в межах смуги  $100$  м від золовідвалу, та до  $3,0$  м – безпосередньо в контурах огорожувальних споруд першого і другого ярусів нарощування. При цьому прилегла до золовідвалу територія в межах смуги до  $100...150$  м підтоплюється (рис. 1).

Зміна рівнів ґрунтових вод на прилеглий ділянці відбувається впродовж проєктного терміну нарощування золовідвалу та зумовлюється абсолютними відмітками його секцій. При цьому поверхня ґрунтових вод, що формується на кінцевий термін експлуатації гідротехнічної споруди ( $t = 2000$  діб), залишається майже незмінною впродовж розрахункового періоду  $t = 10000$  діб.

Складова фільтраційних втрат із золовідвалу в загальному балансі досліджуваної території становить  $990,01$  м<sup>3</sup>/добу до початку його нарощування, та збільшується до  $1334,84$  м<sup>3</sup>/добу на кінцевий термін його експлуатації ( $t = 2000$  діб). Характерним є поступове зниження фільтраційних втрат – їх значення на розрахункові періоди  $t = 5000$  діб та  $t = 10000$  діб складають відповідно  $1195,43$  та  $1163,84$  м<sup>3</sup>/добу.

За результатами міграційних розрахунків встановлено, що формування зон з підвищеним вмістом розчинених речовин і сульфат-іону відбувається безпосередньо під золовідвалом і в межах контуру розсіювання на прилеглих ділянках уздовж тальвегу балки в напрямку р. Сільниця.

При мінералізації води, що надходить до золовідвалу, рівній встановленій за результатами інженерно-геологічних вишукувань  $1055$  мг/л, формування ореолу з підвищеною мінералізацією ґрунтових вод відбувається навколо золовідвалу в межах смуги шириною до  $350$  м на його бокових контурах та до  $500$  м в напрямку русла р. Сільниця (рис. 1).

Аналогічний ореол формується і для сульфат-іону  $SO_4^{2-}$ , який входить до макрокомпонентного складу підземних вод в межах ореолу з підвищеною мінералізацією.

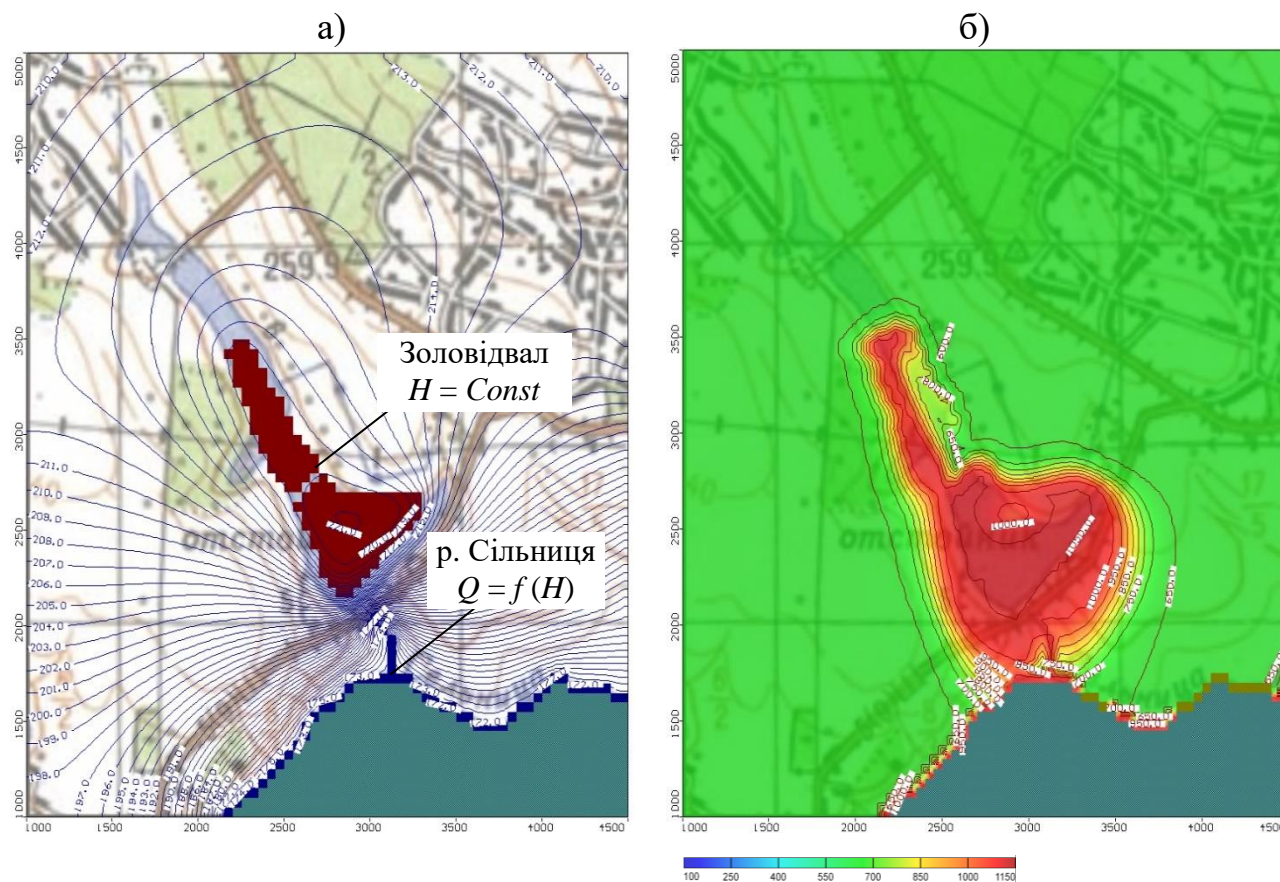


Рис. 1. Прогнозне положення рівневої поверхні ґрунтового водоносного горизонту, м (а) та мінералізація підземних вод на кінець проєктованого терміну експлуатації золовідвалу, мг/л (б)

За умови основного напрямку підземного потоку вздовж тальвегу балки до р. Сільниця контур з підвищеними мінералізацією і вмістом сульфат-іону досягає русла річки ще до закінчення нарощування третього ярусу, тобто до кінця проєктованого терміну експлуатації золовідвалу ( $t = 2000$  діб), і залишається практично незмінним протягом розрахункового терміну 25 років (10000 діб).

Мінералізація і вміст сульфат-іону в міграційному потоці на контурі р. Сільниця як в існуючих умовах, так і при нарощуванні третього ярусу не перевищує аналогічних показників у річкових водах, складаючи відповідно 700 і 450 мг/л в ґрунтових водах і 1020 і 566 мг/л – у річкових, не впливаючи на якісний склад води у р. Сільниця.

Розрахунок стійкості із застосуванням прямого динамічного методу виконаний на основі акселерограм з урахуванням тривалості та інтенсивності максимального розрахункового землетрусу – МРЗ. Зміни прискорення в часі задавалися в горизонтальному і вертикальному напрямках.

Крок часу акселерограм повинен був таким, щоб включити час пікових і раптових змін [15-17].

Прямий динамічний аналіз базується на кінцево-елементному вирішенні рівняння руху наступного вигляду [10, 11, 14]:

$$[K]\{d\} + [D]\{v\} + [M]\{a\} = \{F\}, \quad (1)$$

де  $\{d\}$  – вектор вузлових переміщень;  $\{v\}$  – вектор вузлових швидкостей;  $\{a\}$  – вектор вузлових прискорень;  $[K]$  – матриця жорсткості;  $[D]$  – матриця загасання коливань;  $[M]$  – матриця мас;  $\{F\}$  – вектор вузлових сил.

Методика розрахунку і розробка прогнозу стійкості огорожувальних споруд золівдвалу передбачали вирішення прямих гідрогеомеханічних задач, які на першому етапі полягали в оцінці напружено-деформованого стану ділянок огорожувальних, на другому – оцінці їх стійкості за результатами динамічного аналізу з використанням синтетичних акселерограм, отриманих за даними мікросейсмічного районування ділянки золівдвалу (в умовах сейсмічного впливу на рівні максимального розрахункового землетрусу – МРЗ).

Критерієм забезпечення стійкості укосів огорожувальних споруд є виконання для найнебезпечнішої призми зсуву нерівності:

$$\gamma_{fc} F \leq \frac{1}{\gamma_n} \left( R \frac{\gamma_c}{\gamma_{m(g)}} \right), \quad (2)$$

де  $\gamma_n$   $\gamma_{fc}$   $\gamma_c$   $\gamma_{m(g)}$  – коефіцієнти, відповідно, надійності за відповідальністю, сполучення навантажень, умов роботи, надійності за матеріалами або ґрунтами, значення яких вибираються за ДБН В.2.4-3:2010 [18];  $R$  – узагальнене розрахункове значення сил (або їх моментів) граничного опору зсуву по поверхні, що розглядається;  $F$  – узагальнене розрахункове значення активних сил (або моментів цих сил) відносно центра поверхні ковзання.

При пошуку небезпечної поверхні зсуву може бути використана залежність для коефіцієнту стійкості (коефіцієнту запасу стійкості)

$$k_s = \frac{R}{F}. \quad (3)$$

Тоді умова (2) може бути записана як

$$k_s = [k_s], \quad (4)$$

де  $k_s \geq [k_s]$  – допустиме (нормоване) значення коефіцієнта стійкості:

$$[k_s] = \frac{\gamma_n \cdot \gamma_{fc} \cdot \gamma_{m(g)}}{\gamma_c}. \quad (5)$$

Відповідно до класу (підкласу) відповідальності СС2-1, до якого віднесено гідротехнічні споруди золівдвалу Ладижинська ТЕС, для періоду експлуатації при основному розрахунковому сполученні навантажень для категорії відповідальності конструкції та її елементів А [16] значення нормованого коефіцієнту надійності згідно з ДБН В.2.4-3:2010 [18] становить  $\gamma_n = 1,20$ .

Значення коефіцієнта сполучення навантажень при розрахунках за першою групою граничних станів приймається у відповідності до ДБН В.2.4-3:2010 [18]

і для періоду експлуатації при аварійному сейсмічному навантаженні на рівні МРЗ становить  $\gamma_{fc} = 0,85$ .

Згідно з розрахунковим сполученням навантажень для основного сполучення навантажень при використанні розрахункових значень властивостей ґрунтів (значення коефіцієнта надійності за ґрунтами при використанні розрахункових значень фізико-механічних характеристик приймається рівним  $\gamma_{m(g)} = 1,0$ ) і коефіцієнті умов роботи  $\gamma_c = 1,0$  допустиме нормоване значення коефіцієнту стійкості для основного сполучення навантажень становить  $[k_s] = 1,20$ , для аварійного – при сейсмічному навантаженні на рівні МРЗ –  $[k_s] = 1,02$ .

На третьому етапі за результатами динамічного аналізу з використанням модуля SLOPE/W програмного комплексу GEOSTUDIO визначалося положення критичної поверхні ковзання для кожного із розрахункових профілів з мінімальним значенням коефіцієнту стійкості ( $k_s$ ) для кожного із значень прискорень в межах часового перерізу розрахункового землетрусу з кроком 0,01 с.

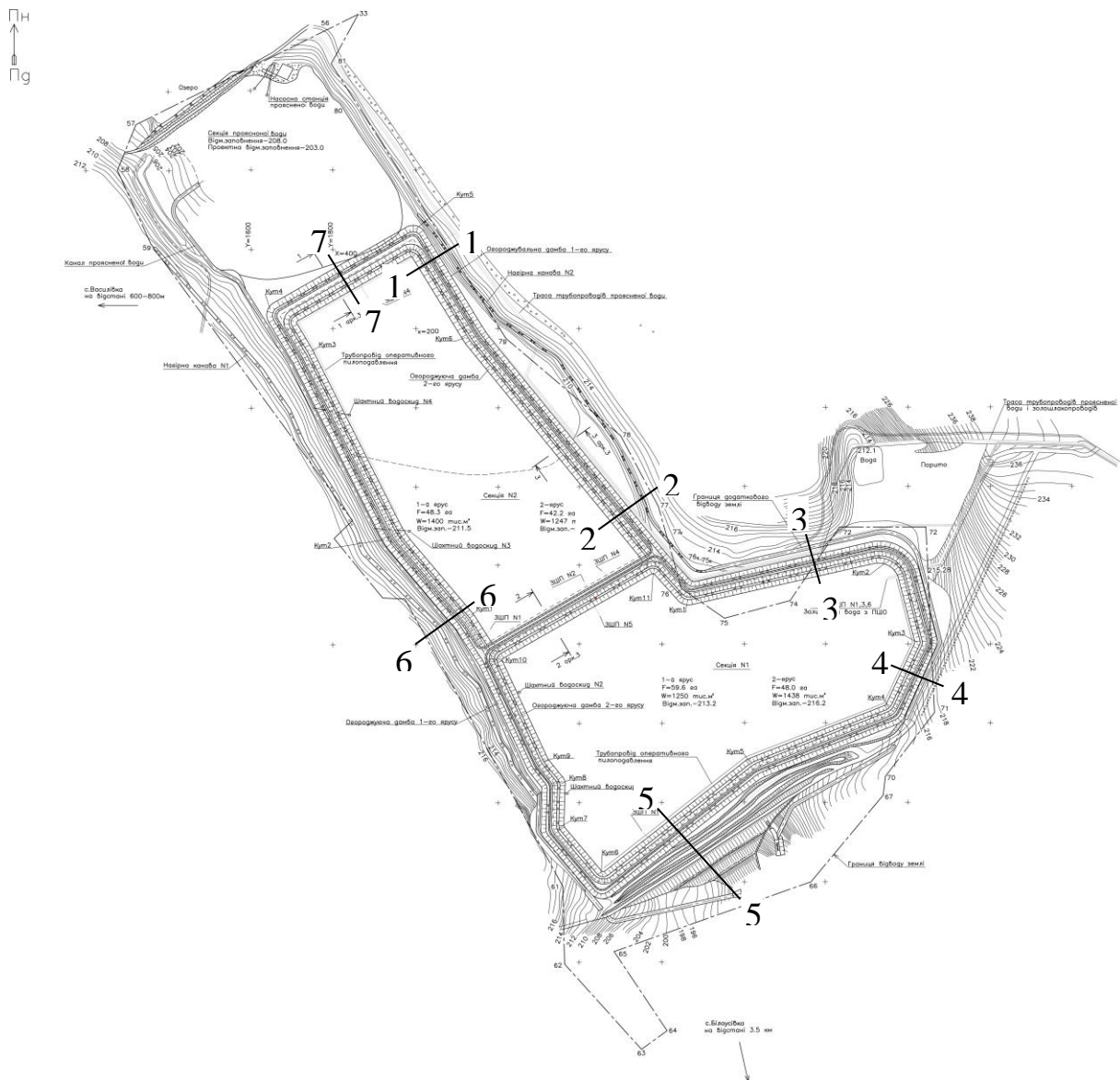


Рис. 2. Розрахункові профілі ділянок огороджувальних споруд золовідвалу

Для оцінки впливу дренажного водозниження на гідрогеомеханічну стійкість огорожувальних споруд розглядалася можливість закладення горизонтального трубчатого дренажу в основі дамб нарощування третього ярусу золівідвалу. Положення трубчатого дренажу визначалось поверхнею сполучення дамб третього ярусу нарощування з дамбами другого ярусу на відмітках проектного заповнення чаші золівідвалу другого ярусу 216,2 і 214,5 м відповідно для першої і другої секцій золівідвалу (див. рис. 2).

Послідовність розрахунків стійкості огорожувальних споруд полягала у визначенні на першому етапі з використанням модуля SEEP/W програмного комплексу GEOSTUDIO положення рівня ґрунтових вод і відповідного йому розподілу гідравлічних напорів (порового тиску), які визначались згідно з положенням нормального підпірного горизонту у чаші золівідвалу, рівного абсолютним відміткам 221,2 і 219,5 м відповідно для першої і другої секцій золівідвалу третього ярусу нарощування.

На другому етапі в модулі SLOPE/W з урахуванням розрахункового розподілу гідравлічних напорів визначався початковий напружено-деформований стан масивів, який в подальшому складав основу для статичного розрахунку стійкості огорожувальних споруд і динамічного аналізу в модулі QUAKE/W. Сейсмічні сили розраховувались у відповідності до заданих синтетичних акселерограм, масштабованих за піковими значеннями горизонтальних ( $R$ - і  $T$ -компоненти акселерограми) і вертикальних ( $Z$ -компонента) прискорень до значень, які відповідають розрахунковій сейсмічності на рівні максимального розрахункового землетрусу МРЗ за даними вишукувань (рис. 3).

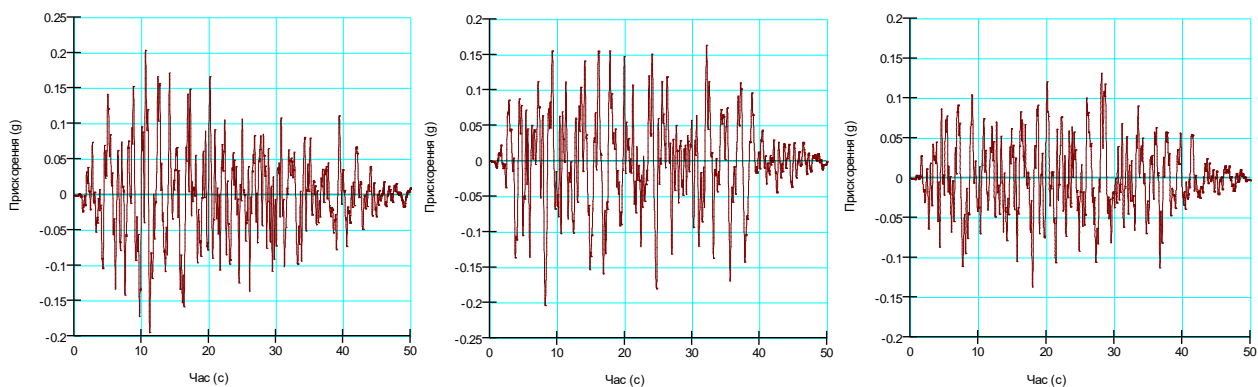


Рис. 3. Компоненти акселерограми, використаної в динамічному розрахунку ( $R$ -,  $T$ - та  $Z$ -компонента відповідно)

На третьому етапі за результатами динамічного аналізу з використанням модуля SLOPE/W визначалося положення критичної поверхні ковзання для кожного із розрахункових профілів з мінімальним значенням коефіцієнту стійкості ( $k_s$ ) для кожного із значень прискорень в межах часового перерізу розрахункового землетрусу з кроком 0,01 с.

Для оцінки впливу дренажного водозниження на стійкість огорожувальних споруд розглядалася можливість закладення горизонтального трубчатого дренажу в основі дамб нарощування третього ярусу золівідвалу. Положення дренажу визначалось поверхнею сполучення дамб третього ярусу нарощування з дамбами другого ярусу на відмітках проектного заповнення чаші другого ярусу 216,2 і 214,5 м відповідно для першої і другої секцій золівідвалу.



При визначенні кута закладення укосів огорожувальних дамб третього ярусу нарощування однією з умов було неперевикнення рівневою поверхнею води поверхні сполучення проєктованих дамб з огорожувальними дамбами другого ярусу.

Згідно з результатами статичних розрахунків, отримані значення коефіцієнтів запасу стійкості для всіх профілів, крім профілю 6-6, задовольняють умову нормованого значення коефіцієнта стійкості, визначеного для основного сполучення навантажень  $[k_s] = 1,20$  (табл. 1).

Встановлені за результатами динамічних розрахунків значення коефіцієнтів стійкості відповідно до критичних поверхонь ковзання для часових інтервалів землетрусу, як і у випадку статичних розрахунків для основного сполучення навантажень, також перевищують нормоване значення для аварійного сполучення навантажень, яке дорівнює  $[k_s] = 1,02$  (табл. 1). Виключенням є профілі 6-6 та 7-7.

Таблиця 1

Розрахункові значення коефіцієнта запасу стійкості огорожувальних споруд при проєктованому нарощуванні третього ярусу золівідвалу

Варіант розрахунку	Нормоване значення, $[k_s]$ , дол.од. ( $\gamma_n = 1,20$ )	Значення коефіцієнта запасу стійкості, $k_s$ , дол.од. / (часова позначка, с)						
		Розрахункові профілі						
		1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7
Проєктне нарощування дамб, статичний розрахунок, основне навантаження, $\gamma_{ls} = 1,00$	1,20	1,228	1,531	1,385	1,543	1,215	1,177	1,426
Проєктне нарощування дамб, динамічний розрахунок, сейсмічне навантаження на рівні МРЗ, $\gamma_{ls} = 0,85$ (R+Z-компоненти акселерограми)	1,02	$\frac{1,062}{(16,2)}$	$\frac{1,216}{(22,8)}$	$\frac{1,122}{(15,7)}$	$\frac{1,339}{(15,8)}$	$\frac{1,077}{(19,8)}$	$\frac{0,956}{(38,0)}$	$\frac{0,994}{(19,8)}$
Проєктне нарощування дамб, динамічний розрахунок, сейсмічне навантаження на рівні МРЗ, $\gamma_{ls} = 0,85$ (T+Z-компоненти акселерограми)	1,02	$\frac{1,034}{(40,7)}$	$\frac{1,281}{(21,9)}$	$\frac{1,055}{(42,5)}$	$\frac{1,494}{(29,4)}$	$\frac{1,068}{(31,8)}$	$\frac{0,969}{(38,4)}$	$\frac{1,097}{(28,9)}$

Забезпечення стійкості огорожувальних споруд в умовах проектного нарощування третього ярусу золовідвалу Ладижинська ТЕС при закладенні укосів огорожувальних дамб 1:2,5 і щільності золошлакового матеріалу  $1,72 \text{ т/м}^3$  (розрахункове значення щільності сухого золошлакового матеріалу  $1,43 \text{ т/м}^3$ ) досягається при спорудженні в основі низового укосу дамб нарощування самотічного трубчатого горизонтального дренажу.

Закладення горизонтального дренажу необхідно виконувати по зовнішньому периметру золовідвалу за виключенням розділяючої дамби між першою та другою секціями; відносно положення горизонтального дренажу визначається поверхнею сполучення проєктованих дамб нарощування третього ярусу золовідвалу з верховим укосом дамб другого ярусу золовідвалу.

З урахуванням необхідного ухилу самотічного горизонтального трубчатого дренажу не менше  $i = 0,002$  і неперевищення проєктних відміток дренажного водозниження в тілі огорожувальних дамб [15, 18, 19] його закладення доцільно виконувати відносно існуючого заповнення чаші золовідвалу на відмітках від 215,2 і 213,5 м на низових ділянках дрен відповідно для першої і другої секцій до 217,5 і 215,5 м – на їх верхових ділянках при довжині дрен близько 1090 і 1140 м для першої і 980 і 1170 м – для другої секцій золовідвалу.

Розрахунки, виконані для умов закладення горизонтального трубчатого дренажу в основі низового укосу дамб 3-го ярусу, показали, що при його роботі забезпечується додатковий запас стійкості не менше  $[k_s] = 1,20$  і  $[k_s] = 1,02$  відповідно для основного та аварійного сполучення навантажень (табл. 2).

Таблиця 2

Розрахункові значення коефіцієнта запасу стійкості огорожувальних споруд золовідвалу при роботі контурного горизонтального дренажу

Варіант розрахунку	Нормоване значення, $[k_s]$ , дол.од. ( $\gamma_n = 1,20$ )	Значення коефіцієнта запасу стійкості, $k_s$ , дол.од. / (часова позначка, с)						
		Розрахункові профілі						
		1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7
Проєктне нарощування дамб, контурний горизонтальний дренаж, статичний розрахунок, $\gamma_{ls} = 1,00$	1,20	1,270	1,698	1,494	1,792	1,217	1,294	1,480
Проєктне нарощування дамб, контурний горизонтальний дренаж, динамічний розрахунок, сейсмічне навантаження на рівні МРЗ, $\gamma_{ls} = 0,85$ ( $R+Z$ -компоненти акселерограми)	1,02	<u>1,075</u> (16,3)	<u>1,313</u> (22,8)	<u>1,184</u> (15,7)	<u>1,439</u> (15,8)	<u>1,079</u> (19,8)	<u>1,043</u> (37,9)	<u>1,081</u> (33,5)

**Висновки.** Прогнозна оцінка гідродинамічного режиму в умовах проектуваного нарощування дамб третього ярусу золівідвалу до відміток 222,7 і 221,0 м із заповненням чаші золівідвалу до відміток 221,2 і 219,5 м відповідно для першої і другої секцій свідчить про очікуваний підйом рівня води безпосередньо навколо золівідвалу з можливим підтопленням і затопленням незавершених дамб першого і другого ярусу нарощування.

Фільтраційні втрати із чаші золівідвалу, оцінені за результатами геофільтраційного моделювання, для існуючого стану огорожувальних споруд і відміток заповнення чаші становлять 990,01 м<sup>3</sup>/добу, а в умовах нарощування третього ярусу золівідвалу на кінцевий період експлуатації золівідвалу 5 років їх величина складає 1334,84 м<sup>3</sup>/добу; характерним для ділянки золівідвалу є поступове зменшення втрат, величина яких на розрахункові періоди 10 і 25 років від початку будівництва становить відповідно 1195,43 і 1163,84 м<sup>3</sup>/добу.

За результатами міграційних розрахунків встановлено, що поширення підземних вод четвертинного горизонту з підвищеними мінералізацією і вмістом сульфат-іону обмежується в плані контуром навколо золівідвалу шириною близько 350 м, а в глибину – покрівлею кори вивітрювання кристалічного масиву; при цьому, максимальне просування фронту з підвищеною мінералізацією і вмістом сульфат-іону відбувається до завершення терміну експлуатації золівідвалу – 5 років.

Мінералізація і вміст сульфат-іону в міграційному потоці на контурі р. Сільниця як в існуючих умовах, так і при проектуваному нарощуванні третього ярусу золівідвалу не перевищує аналогічних показників у річкових водах, складаючи відповідно 700 і 450 мг/л в ґрунтових водах і 1020 і 566 мг/л – у річкових водах, не впливаючи на якісний склад води у р. Сільниця.

Гідрогеомеханічна стійкість огорожувальних споруд золівідвалу в умовах нарощування третього ярусу на ділянці низової греблі визначається: стійкістю самої греблі і залежить від фізико-механічних властивостей і стану насипних суглинків в її тілі та розподілу і величини гідравлічних напорів, а стійкість огорожувальних дамб в межах першої і другої секцій золівідвалу – наявністю в їх основі золи і впливом розподілу гідравлічних напорів в тілі дамб.

Виконані розрахунки горизонтального трубчатого дренажу за умови закладення його в основі низового укосу дамб третього ярусу нарощування показали, що при роботі горизонтального дренажу забезпечується додатковий запас стійкості огорожувальних споруд золівідвалу не менше  $[k_s] = 1,20$  і  $[k_s] = 1,02$  відповідно для основного і аварійного сполучення навантажень на рівні максимального розрахункового землетрусу.

Величини питомого дренажного водовідбору, встановлені за результатами кінцево-елементних рішень профільних геофільтраційних задач при діаметрі труб дренажу 200 мм, змінюються в діапазоні 0,011...0,023 м<sup>3</sup>/год на 1 м (0,0031...0,0065 л/с на 1 м) для розрахункових профілів огорожувальних споруд секцій № 1 і № 2 золівідвалу.

Перелік посилань

1. Горова, А., & Павличенко, А. (2013). Дослідження екологічного стану територій розміщення золошлакових відходів теплових електростанцій. *Розробка родовищ*, 393-397.
2. Веригин, Н.Н., Васильев, С.В., Саркисян, В.С., & Шержуков, Б.С. (1977). *Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород*. Недра.
3. Гриневский, С. О., & Новоселова, М. В. (2010). Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод. *Водные Ресурсы*, 37(6), 1–12.
4. Лившиц, В.М., & Белокопытова, Н.А. (1987). *Методические рекомендации по моделированию на ЭВМ фильтрации подземных вод в слоистых толщах*. ДО ИМР.
5. Ломакин, Е.А., Мироненко, В.А., & Шестаков, В.М. (1988). *Численное моделирование геотфильтрации*. Недра.
6. Норватов, Ю.А. (1988). *Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых)*. Недра.
7. *Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. Комплекс. н-и и конструктор.-технолог. – т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. (Справ. пособие к СНиП)*. (1991). Стройиздат.
8. *Руководство по проектированию золоотвалов тепловых электрических станций. П 20-74*. ВНИИГ. (1974). Энергия.
9. Тимошук, В.И., & Шерстюк, Е.А. (2012). Закономерности геофильтрации в зоне гравитационно нагруженных участков хвостохранилищ и отвалов горных пород. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 30-36.
10. Фадеев, А.Б. (1987). *Метод конечных элементов в геомеханике*. Недра. 221.
11. Duncan, J.M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 307-316.
12. Kinzelbach, W. (1986). *Groundwater modeling*. Elsevier.
13. McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. (1984). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875*.
14. Pande, G.N., Beer, G., & Williams, J.R. (1990). *Numerical Methods in Rock Mechanics*. John Wiley and Sons, Ltd.
15. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. (2006). Мінбуд України.
16. ДБН В.1.2-14:2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. (2009). Мінрегіонбуд України.
17. ДБН-В.2.1-10:2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. (2009). Мінрегіонбуд України.
18. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. (2010). Мінрегіонбуд України.
19. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. (2014). Мінрегіонбуд України.

ABSTRACT

**Purpose.** The purpose of study is a predictive assessment of stress-strain state of the "DTEK Ladyzhynska TPP" ash dump and changes in the hydrodynamic and hydrogeochemical modes within its location area in conditions of the designed reconstruction.

**The methodology.** Comprehensive assessment of changes in hydrodynamic and hydrogeochemical modes around the ash dump site and defining the hydrogeomechanical stability of enclosing dams is performed based on the results of numerical modeling of groundwater flow and transport, and stress-strain state using the MODFLOW, PHASE2, and GEOSTUDIO software.

**Findings.** The forecast of changes in hydrodynamic and hydrogeochemical modes around the ash dump site in accordance with the accepted ash dump reconstruction scheme is carried out based on the identified regularities of their formation. An assessment of the hydrogeomechanical stability of the enclosing dams in conditions of designed building up the third storey of the ash dump was performed based on the results of numerical simulation of the stress-strain state. Measures to increase the stability of the ash dump's enclosing dams under reconstruction are justified.

**The originality.** New data were obtained regarding the nature of changes in hydrodynamic and hydrogeochemical modes around the ash dump under the conditions of its reconstruction. Measures to ensure stability of the hydrotechnical construction are substantiated in consequence of a comprehensive study of the stress-strain state of the material making up the enclosing dams, considering the predicted moisturizing of dam massif and the seismicity of the territory.

**Practical implications.** The results of the performed research form the basis for substantiating technical decisions regarding ensuring the stability of hydrotechnical constructions of energy-generating enterprises.

**Keywords:** *hydrotechnical construction, hydrodynamic and hydrogeochemical mode, enclosing dam, seismicity of the territory, stress-strain stability.*