

ВИЗНАЧЕННЯ МОДЕЛЬНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОБЕЗПЕКОЮ УКІСНИХ СПОРУД ХВОСТОСХОВИЩ

Андрій Рябо

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6305-3853>

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, Дніпро

Вступ

Проблеми екобезпеки укісних систем наливних масивів хвостосховищ різних галузей промисловості перетинаються із завданнями раціонального природокористування, заснованих на геомеханічних дослідженнях, спрямованих на удосконалення конструктивних параметрів гідровідвалів та дамб. Відсутність надійного геомеханічного обґрунтування технології формування наливних гірничо-технічних споруд призводить до аварійних ситуацій, що виявляються у вигляді швидкоплинних та катастрофічних деформацій наливних масивів. Аварії створюють соціально-економічні загрози та втрати, приводять до замулення токсичними пульпами родючих земель, забруднення поверхневих та підземних вод.

Необхідною передумовою розробки екологічно безпечних технологічних рішень щодо формування техногенних масивів є урахування фізико-географічних, геологічних, інженерно-геологічних, гідрогеологічних та гірничо-технічних факторів, що визначають стан та характер можливої зміни геологічного середовища. Впровадження взаємозв'язків цих факторів з проектними параметрами наливних споруд хвостосховищ дозволяє забезпечити попередній рівень екобезпеки на етапах прийняття конструкторських рішень. Подальше існування та розвиток укісної системи, у поєднанні з прогресом засобів та заходів впливу на параметри безпеки взагалі, та параметри екобезпеки зокрема, наливної системи хвостосховища формує систему управління її станом [1-3].

Перспективним напрямом підвищення ефективності та екобезпеки зведення гідровідвалів та хвостосховищ є управління станом наливних масивів як безперервний процес моніторингу, оцінки, прогнозу, та цілеспрямованої зміни стійкості укісних споруд та інтенсивності ущільнення тонкодисперсних матеріалів внутрішніх зон. Важливою складовою систем моніторингу та забезпечення бажаного рівня екобезпеки наливних укісних систем є математичні моделі процесів функціонування та управління даних систем.

МЕТА І ЗАДАЧІ

Метою дослідження є створення структури функціональних залежностей оптимізаційної моделі управління екобезпечним функціонуванням укисних споруд хвостосховищ.

Задачі оптимізації природно-техногенних систем об'єднують технічні та екологічні показники при досягненні окремими параметрами або частинними та інтегральними критеріями оптимальних значень. Стосовно наливних масивам це насамперед оптимізація кутів укосу, висоти дамб, ширини основи, дамб, властивостей порід що складають тіло дамби та інші показники.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У якості вихідних матеріалів та методів дослідження використувались геомеханічні моделі та методи стійкості масивів гірських порід, моделі функціонування наливних масивів хвостосховищ, системноаналітичні моделі та методи оптимізації та управління.

Теоретичною основою геомеханічних моделей є концепція граничного пластичного стану рівноваги укосів природно-техногенних масивів гірських порід та положення механіки твердого деформованого тіла. Механіко-математичні моделі наливних масивів базуються переважно на теоріях фільтраційної консолідації та повзучості ґрунтів, граничного напруженого стану та граничної рівноваги сипучого середовища зі зчепленням. Розрахунки стійкості переважно включають визначення зсувних та утримуючих сил (напружень) та встановлення на основі порівняння цих сил коефіцієнтів запасу стійкості укосів заданого профілю. При визначенні коефіцієнту стійкості насипних та наливних гребель та огорожувальних дамб хвостосховищ використовують круглоциліндричні, плоскі або комбіновані поверхні ковзання [1-5].

У загальному вигляді коефіцієнт стійкості обводненого масиву, у випадку круглоциліндричної поверхні ковзання, має вигляд [1]

$$k_s = \frac{\sum_{i=1}^n [(P_i \cos \alpha_i + P_i^w \frac{\cos(\beta - \alpha_i)}{\cos \beta} - F_i) t g \varphi_i + c_i l_i]}{\sum_{i=1}^n (P_i \sin \alpha_i + P_i^w \frac{\sin(\beta - \alpha_i)}{\sin \beta})}, \quad (1)$$

де n – кількість блоків розбиття призми зрушення; i – номер блоку; P_i – маса i -го блоку разом з укладеною в ньому водою; P_i^w – маса води над поверхнею укосу в межах i -го блоку; β – кут укосу; α_i – кут нахилу поверхні ковзання в межах i -го блоку; c_i – зчеплення в межах лінії ковзання i -го блоку; l_i – довжина лінії ковзання в межах i -го блоку; φ_i

– кут внутрішнього тертя у межах i -го блоку; F_i -додаткові навантаження в межах i -го блоку.

РЕЗУЛЬТАТИ

Особливостями функціонування гребель хвостосховищ є: поширеність способу створення гребель шляхом намивання її тіла з відходів гірничодобувних підприємств; роздільно-зернистий склад порід складових укісних систем; наявність динамічних процесів ущільнення (консолідації) у намивних спорудах; явища динамічних процесів зсувних деформацій у тілі та підставі дамб; обводненість та підтопленість укісного масиву, що обумовлюють одночасну дію гідродинамічних та гідростатичних сил.

Вищенаведені фактори вимагають адаптації існуючих моделей стійкості укісних систем з метою відображення в них зазначеної специфіки.

Структура порід намивного масиву та спосіб його формування, консолідаційні явища приводять до динамічної зміни основних властивостей, що впливають на стійкість укошу, а саме щільності, кута внутрішнього тертя та зчеплення та відповідно до необхідності коригування цих параметрів у модельних залежностях [1]. Як залежності, що відображають процеси ущільнення намивного ґрунту, пропонуються наступні

$$C_v = k_f(1 + \varepsilon_a)/a\gamma_w, \quad (2)$$

$$k = z/h, \quad (3)$$

$$\mu = v_n^2 t / C_v, \quad (4)$$

$$\gamma_p = \frac{1}{1 + \varepsilon_a} (\gamma_c - \gamma_w(1 + \varepsilon_a(1 - G_w))), \quad (5)$$

$$C_d = \frac{8\mu - 16(1 - \exp(-\mu/2))}{\mu^2(2 + \mu)}, \quad (6)$$

де C_v - коефіцієнт консолідації; k_f - коефіцієнт фільтрації; ε_a - середнє значення коефіцієнта пористості ґрунту; a - коефіцієнт стисливості ґрунту; γ_w - щільність води; γ_p - щільність ґрунту; h - висота шару, що намивається; z - поточна координата висоти шару, що намивається; до - наведена координата; v_n - швидкість намиву; t - час; γ_c - щільність частинок ґрунту; G_w - коефіцієнт водонасичення породи; C_d - середній рівень ущільнення шару змінної потужності на водопорі.

Уточнення значень щільності, зчеплення та кута внутрішнього тертя для намивних масивів різної потужності, з різними показниками часу "відпочинку", пропонується проводити з використанням залежностей виду:

$$\gamma_p = \gamma_{p0}(1 + f_1(C_d)), \quad (7)$$

$$C = C_0(1 + f_2(C_d)), \quad (8)$$

$$\varphi = \varphi_0(1 + f_2(C_d)), \quad (9)$$

де γ_{p0} , φ_0 , C_0 - експериментальні або статистичні значення щільності, зчеплення та кута внутрішнього тертя ґрунту.

До додаткових сил необхідно включення залежностей для визначення результуючої гідродинамічних та гідростатичних сил, а також залежність для визначення надлишкового порового тиску

$$F_{Gi} = \gamma_w(H_i - y_i)a_i/\cos\alpha_i, \quad (10)$$

$$P_{pi} = \gamma' h \frac{(1 - k)(2(1 - \exp(-k\mu/2) + \mu))}{2 + \mu}, \quad (11)$$

де F_{Gi} - результуюча гідродинамічних та гідростатичних сил; γ_w - щільність води; H_i та y_i - відповідно напір та ордината кривої ковзання, середні в межах блоку; a_i - ширина блоку, α_i - середній кут нахилу дотичної до кривої ковзання в межах блоку; P_{pi} - надлишковий поровий тиск у межах блоку.

Геомеханічна безпека при оптимізації укiсних систем забезпечується максимізацією коефіцієнта запасу стійкості

$$k_s(p_i) \rightarrow \max, \quad (12)$$

де $k_s(p_i)$ - коефіцієнт запасу стійкості; p_i - множина заданих параметрів від яких залежить коефіцієнт запасу стійкості.

Задача управління екобезпекою укiсних систем є синтезом завдань геомеханічної оптимізації та управління з екологічними критеріями та оєорієнтованими технологіями у якості керуючих параметрів [6].

Методологічно інтегральні критерії в загальному вигляді, як правило, є алгебраїчною згорткою частинних критеріїв. У якості інтегрального критерію впливу зсувних процесів наливних укiсних систем на довкілля та відповідно критерію екобезпеки можна прийняти залежність виду

$$C_{ES}^{ADL} = \left(\frac{1}{5}\right) * (C_G^{ADL} + C_H^{ADL} + C_A^{ADL} + C_B^{ADL} + C_S^{ADL}), \quad (13)$$

де C_G^{ADL} , C_H^{ADL} , C_A^{ADL} , C_B^{ADL} , C_S^{ADL} - частинні критерії впливу зсувних процесів наливного масиву на об'єкти геосфери, гiдросфери, атмосфери, біосфери, соціосфери.

Кожен з частинних критеріїв може бути представлений у вигляді функції від базових соціо-еколого-економічних параметрів. Зокрема, специфічний вплив зсуву на геосферу, гiдросферу та атмосферу проявляється у забрудненні ґрунтів, поверхневих, підземних потоків та повітряного середовища. Частинні критерії, у більшості випадків,

включають нормативні значення параметрів, що оптимізуються. Частинні критерії впливу на ці середовища зазвичай виражаються у вигляді відношення концентрацій викинутих забруднюючих речовин до нормативних

$$C_{G,H,A}^{ADL} = \left| 1 - \frac{P_{G,H,A}}{P_{G,H,A}^N} \right|, \quad (14)$$

де $P_{G,H,A}^N, P_{G,H,A}$ - сумарні нормативні (допустимі) та поточні значення концентрацій забруднюючих речовин відповідно геосферних, гідросферних та атмосферних об'єктах. Як нормативні можна використовувати значення гранично допустимих концентрацій (ГДК) для цих середовищ. Зі структури формули (3) видно, що діапазон допустимих значень знаходиться в межах $[0,1]$.

Частинні критерії впливу на біосферу та соціосферу можна представити у вигляді

$$C_{B,S}^{ADL} = \left| 1 - \frac{n_{B,S}^{ADL}}{n_{B,S}^r} \right|, \quad (15)$$

де $n_{B,S}^{ADL}, n_{B,S}^r$ - щільність біосферних або соціосферних об'єктів на площі охоплюваній зсувом; $n_{B,S}^r$ - щільність відповідно біосферних та соціосферних об'єктів в регіоні, що розглядається.

Масштаб екологічно небезпечної дії зсувних явищ залежить від масових та геометричних характеристик зсуву. У свою чергу площа та маса зсувного тіла являються, зрештою, функцією від коефіцієнта стійкості укiсних споруджень намивних масивів. Таким чином, рішення задачі оптимізації екобезпеки намивних масивів хвостосховищ полягає в рішенні двох підзадач: максимізації коефіцієнта стійкості та мінімізації критерію комплексної екологічної дії

$$\left. \begin{array}{l} k_s \rightarrow \max \\ C_{ES}^{ADL} \rightarrow \min \end{array} \right\}, \quad (16)$$

Основні задачі управління станом масиву намивних порід наступні: встановлення оптимальних кутів нахилу укiсів дамб, що забезпечують їх стійкість та мінімальне рознесення з урахуванням заходів щодо зміцнення укiсів; обґрунтування технології намивання та стійкості укiсів на незручних та малопритатних для сільського господарства та будівництва територіях. Відмінністю задач оптимального управління від задач оптимізації є її динамічний характер, тобто залежність процесів від часу.

У загальному вигляді завдання оптимального управління екобезпекою укiсних систем намивних масивів хвостосховищ можна представити як досягнення оптимального значення функціоналом

$$J_{ES} = \int_{t_0}^{t_k} C_{TS}^{ADL}(S^{ADL}(k_s), t), u^{ADL}(t), t) dt, \quad (17)$$

де t – час; $[t_0, t_k]$ – проміжок часу, що розглядається; $S^{ADL}(k_s)$ - площа, що покривається зсувом як функція від коефіцієнта запасу стійкості; $u^{ADL}(t)$ - вектор-функція техніко-екологічних керівних параметрів.

ВИСНОВКИ

Побудовані функціональні залежності моделі можна використовувати для вирішення декількох різновидів задач та основу для побудови методик та моделей: 1) досягнення заданого рівня екобезпеки та проектних експлуатаційних параметрів хвостосховищ за допомогою управління властивостями та станом намивних товщ у ході їх формування за рахунок спільного намивання ґрунтів з різними властивостями; 2) прогнозу екобезпечної поведінки в часі намивних укiсних систем, що відповідають усім етапам формування гідроспоруд та враховують також періоди після завершення намиву окремих шарів та всього масиву; 3) обґрунтування екоорієнтованих технологій формування намивних масивів на основі прогнозу оцінки несучої здатності тонко дисперсних ґрунтів, визначення просторового положення, темпів зведення дренажних систем, уточнення порядку можливої рекультивациі та інших.

ПОСИЛАННЯ

1. Гальперин, А. М. (1988). Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. Москва: Недра.
2. Булат, А. Ф., Витушко, О. В., & Семененко, Е. В. (2010). Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий. Днепрпетровск: Герда.
3. Полищук, С. З., Лашко, В. Т., Кучерский, Н. И., Сытенков, В. Н., & др. (2001). Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров. Дніпропетровськ: Поліграфіст.
4. Шашенко, О. М., Сдвижкова, О. О., & Гапєєв, С. М. (2008). Деформованість та міцність масивів гірських порід. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.
5. Шашенко, О. М., Пустовойтенко, В. П., & Хозяйкіна, Н. В. (2009). Механіка ґрунтів. Київ: Новий друк.
6. Полищук, С. З., Долодаренко, В. О., Чернобровкіна, Н. А., & Рябко, А. І. (2001). Системний аналіз і моделювання у розв'язанні проблем сталого розвитку території. Дніпропетровськ: Поліграфіст.