

## ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВЕРХОВОГО УКОСУ СУХОЇ ГІРСЬКОЇ ЄМНОСТІ ПРИ РІЗЬКИХ ЗМІНАХ РІВНЯ ВОДИ ПІД ЧАС ПАВОДКУ

Світлана Величко<sup>1</sup>, Олена Дупляк<sup>2</sup>, Тетяна Курбанова<sup>3</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
31, Повітрофлотський проспект, Київ, 03037, Україна

<sup>1</sup> канд. тех. наук., velychko.sv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-8848-289X

<sup>2</sup> канд. тех. наук., dupliak.ov@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3500-5106

<sup>3</sup> tania99Kv@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7317-4341

DOI: 10.32347/2524-0021.2021.37.4-12

**Анотація.** Захист від шкідливої дії вод є одним із пріоритетних напрямків успішного ведення господарської діяльності на територіях, які періодично потерпають від паводків. На території України – це є гірські райони Карпат. Для паводків на гірських річках притаманне повторення декілька разів на рік, яке характеризується раптовим підняттям рівня води з практично таким самим швидким пониженням рівня води. До активних заходів захисту від паводків відносяться протипаводкові сухі гірські ємності, принцип роботи яких полягає в трансформації частини стоку, і нетривале накопичення води в штучно створеному водосховищі, з наступним швидким спорожненням його до межених відміток. Під час проходження паводку в тілі греблі, що утворює протипаводкову ємність формується складний гідравлічний режим відмінний від роботи постійного водосховища. Проектування протипаводкових ґрунтових споруд здійснюється згідно нормативних документів, які розроблені для будівництва водосховищ з постійним напором води, та вимагають перевірки стійкості низового укосу для максимальних рівнів води в стаціонарних умовах та перевірки стійкості верхового укосу при пониженні рівня води від високого стаціонарного положення, що не відповідає реальним фільтраційним процесам в тілі греблі сухої ємності. Тому метою даної роботи є визначення необхідних граничних умов роботи сухої гірської ємності та оцінка стійкості верхового укосу методами граничної рівноваги. В роботі проведений аналіз роботи сухої гірської ємності та встановлено, що характерними для роботи греблі є два стани: суха ємність з рівнем води в межений період та змінне положення кривої фільтрації в ядрі та верховій призмі під час проходження паводку. Основними факторами, які впливають на стійкість верхового укосу є фізико-механічні властивості ґрунтів, закладання укосу, період стояння високого рівня води та інтенсивність зниження рівня води. Стійкість верхового укосу була оцінена методом Morgenstern & Price та Ordinary на програмному комплексі Slope/w. Під час проходження паводку коефіцієнт стійкості, розрахований методами граничної рівноваги, після 25 години (період високого стояння рівнів води з наступним пониженням рівня води) почав падати, і досягнув мінімального значення в момент формування найбільших градієнтів кривої фільтрації 45-50 години. Розрахунки стійкості укосу методом граничної рівноваги були порівняні з результатами розрахунків виконаними методом SRM, який враховує напружено-деформований стан греблі, значення коефіцієнтів стійкості, визначені методом Ordinary, та характер зміни їх протягом проходження паводку майже співпадають, що свідчить про надійність отриманих результатів різними методами оцінки стійкості укосу.

**Ключові слова:** нестационарна фільтрація, суха гірська ємність, стійкість укосу, крива фільтрації, гідрограф паводку.

## ВСТУП

Особливості природних умов в гірських районах України зумовлюють виникнення таких небезпечних явищ як паводки, особливо рідкої повторюваності. Паводки та повені – це природній процес, і якщо мова йде не про катастрофічні явища рідкої повторюваності, то періодичне затоплення заплави, рух донних наносів та утворення тимчасових водойм в старицях є корисним для збереження біорізноманіття [1]. За останні двадцять років спостерігаються підвищення середньорічних температур, зима стає більш теплою, літо перетворюється на спекотне, що сприяє формуванню сильних злив, а отже і паводків як в літній так і в зимовий періоди [2].

Паводки в Закарпатті відбуваються декілька разів на рік, а великі трапляються з наступною періодичністю: 1947, 1957, 1968, 1970, 1992, 1998, 2001, 2008, 2010, 2020. Особливістю проходження паводків на гірських річках є різке підвищення рівнів води та швидке опускання паводкових вод до побутових значень: середня інтенсивність підйому рівня під час паводків на малих річках складає 0,5-0,7 м/добу, на середніх і великих досягає 1,5-3,5 м/добу [3]. Для захисту населених пунктів в басейні річки Тиса було запропоновано будівництво протипаводкових сухих гірських ємностей, які трансформують руйнівну для русла паводкову витрату 1,0% забезпеченості в паводкову витрату 10% забезпеченості. Паводкова витрата 10% забезпеченості за дослідженнями авторів [4] називається руслоформуючою, бо підтримує природній стан русла та позитивно впливає на фауну та флору річкової системи.

Принцип дії сухої гірської ємності полягає в акумуляції витрати, яка є більшою за руслоформуючу, решта води проходить крізь греблю без трансформації. Так

як руйнівні паводки більші за 10% забезпеченість трапляються раз в 10-12 років, то більшість часу ємність залишається сухою і не впливає на стік річки. При проходженні руйнівних паводків частина стоку залишається в ємності на час не більше 8-10 діб, і ємність поступово спорожнюється [5].

Проектування протипаводкових ґрунтових споруд здійснюється згідно нормативних документів, які розроблені для будівництва водосховищ з постійним напором води, та вимагають перевірки стійкості низового укосу для рівнів води НПР та ФПР в стаціонарних умовах та перевірки стійкості верхового укосу при пониженні рівня води від високого стаціонарного положення.

Дослідження опускання рівня води в водосховищах після встановлення стаціонарної фільтрації розглянуто в деяких наукових статтях [6-9], які свідчать, що опускання рівня води зі швидкістю 0,5-1,0 м/добу, вже призводить до критичного стану стійкості верхового укосу. Основні параметри, які впливають на положення кривої фільтрації в тілі греблі при опусканні води після тривалого стояння високих вод в водосховищі є:

- коефіцієнти фільтрації ґрунтів призм та ядра греблі;
- швидкість опускання води;
- пористість ґрунтів;
- закладання верхового укосу.

При проходженні паводку на гірських річках та трансформації в сухій гірській ємності відбувається швидке підняття рівня води, нетривале стояння високих вод 10-12 годин та швидке пониження рівнів води. В умовах інтенсивної зміни рівнів води та нетривалого стояння високих вод крива фільтрації не досягає стаціонарного положення, і розрахунок положення кривої вільної поверхні необхідно проводити в умовах нестаціонарної фільтрації в залежності від гідрографу паводку [10,

11]. Отже оцінку стійкості верхового укосу необхідно проводити при моделюванні положення кривої фільтрації в нестационарних умовах починаючи з допаводкових рівнів води в ємності (витрата в руслі річки, яка проходить без зміни і не впливає на стійкість греблі) з поступовим підняттям рівня води та опускання згідно гідрографу трансформованого паводку 1% забезпеченості. В нормативній літературі відсутні рекомендації, в який саме момент проходження паводку і опускання рівня води необхідно оцінювати стійкість верхового укосу.

Розрахунки нестационарної фільтрації складні та вимагають використання методу скінченних елементів. Сучасні програмні комплекси дозволяють вирішувати такі задачі. В роботі використаний програмні комплекси *Seep/w* (фільтраційні розрахунки) та *Slope/w* (розрахунки стійкості укосу методами граничної рівноваги). Для оцінки стійкості укосу був використаний метод *Morgenstern & Price* та *Ordinary*.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ

Визначення необхідних граничних умов роботи сухої гірської ємності та оцінка стійкості верхового укосу методом скінченних елементів.

Для поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- провести аналіз роботи сухої гірської ємності;
- визначити основні фактори, які впливають на стійкість верхового укосу проти паводкової ємності;
- розрахувати стійкість верхового укосу;
- визначити граничні умови необхідні для оцінки надійної роботи сухої гірської ємності.

### ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основною спорудою сухої гірської ємності є кам'яно-накидна гребля з тонким ядром з глинистих матеріалів та призми

з гравійно-галечникової суміші з великими коефіцієнтами фільтрації.

Розрахункова модель кам'яно-накидної греблі з ядром наведена на рис.1. Висота греблі від поверхні складає 19,6м. Верховий укіс має закладання 2,5, а низовий – 2,25. На верховому та низовому укосах для підвищення стійкості укосів сформовані берми шириною 3,0м. Кріплення верхового укосу виконано кам'яним накидом. Основа греблі – водонепроникні міцні ґрунти. Пропуск паводкової витрати здійснюється через донний водовипуск. В ємності під час проходження паводку 1% забезпеченості має місце складний гідравлічний режим різкого підйому рівня, затримки високого рівня води і інтенсивного опускання.

Для моделювання проходження паводку був прийнятий графік функції зміни рівня води в проти паводковій ємності в залежності від часу проходження паводку, який наведений на рис. 2: підняття рівня води від побутових значень до максимальної витрати відбувається за 12,4 години, пониження рівня проходить дещо повільніше протягом 20 годин. Для моделювання підняття рівня води в ємності гідрограф паводка був розбитий на рівні проміжки часу по 5 годин.

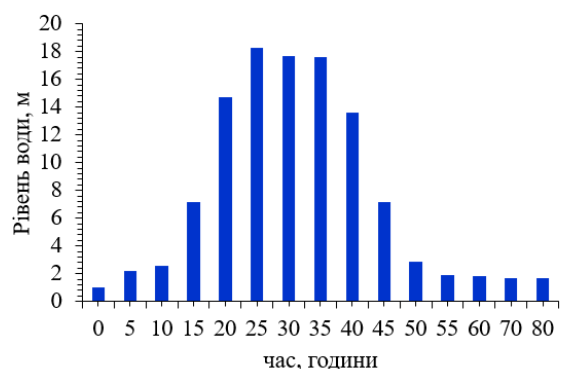


Рис. 2. Зміна рівнів води в проти паводковій ємності під час проходження паводку 1% забезпеченості

Fig. 2. The water levels change in the flood control reservoir during the flood of the 1% probability.

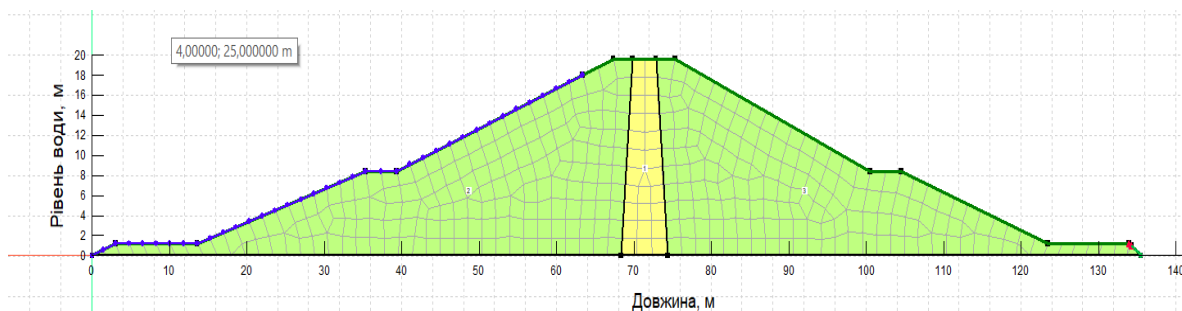


Рис. 1. Розрахункова 2D модель сухої гірської ємності

Fig. 1. The 2D model for calculation of the dry flood control reservoir

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості ґрунтів тіла та основи греблі

Table 1. Physico-mechanical properties of the soils of dam body and foundation

Показник	призми	ядро	основа
Питома вага, КН/м <sup>3</sup>	21,3	19,6	21
Питоме зчеплення, МПа	1	16	30
Кут внутрішнього тертя, град	30	23	36
Коефіцієнт фільтрації, м/доб	19,9	0,067	0,001

Ґрунти, які складають призми греблі згідно класифікації відносяться до гравійно-галечникових з суглинистим заповнювачем, ядро – суглинок важкий, основа адгезито-базальти має невеликий коефіцієнт фільтрації і може вважатися водопором. Фізико-механічні властивості ґрунтів прийняті за матеріалами досліджень [5] та наведені в таблиці 1.

Для визначення оптимального розміру сітки була проведена верифікація моделі та порівняння розрахунків положення кривої фільтрації з гідравлічним розрахунком фільтрації [12] для різних розмірів сітки від 5,0 до 0,5м. Оптимальний розмір сітки був прийнятий 1,8x1,8м, форма елементів прямокутно-трикутна однорідна для призм та ядра.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При моделюванні положення кривої фільтрації та стійкості верхового укусу були прийняті наступні припущення:

- ґрунти тіла греблі – ізотропні;
- основа греблі була прийнята водонепроникною та недеформованою;

- початковий рівень води в ємності прийнятий вище основи греблі на 1,0м, що відповідає рівню ґрунтових вод до проходження паводку;

- для моделювання фільтрації були задані криві основної гідрофізичної характеристики та криві водопровідності ґрунтів призм та ядра, за допомогою бази даних *Seep/w* відповідно класифікації ґрунтів для призм – галечникові ґрунти, для ядра – глинисті;

- імовірні дощі до моменту проходження паводку не враховувались, так само як можливе випаровування з поверхні ґрунту греблі.

В основу розрахунків стаціонарної фільтрації на програмному комплексі *Seep/w* покладено закон Дарсі, який в диференційній формі в умовах однорідно-ізотропних ґрунтів має вигляд [13]:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

Положення кривих при проходженні паводку було прийнято за розрахунками на програмному комплексі *Midas GTS NX* розраховані в роботі [5].

В ПК *Slope/w* закладено п'ять методів визначення стійкості укосу за круглоциліндричними поверхнями (студентська версія), визначення стійкості розраховувалося методом *Morgenstern & Price* та *Ordinary* [14].

*Ordinary Method* визначає коефіцієнт стійкості укосу як співвідношення моментів вертикальних утримуючих сил до моментів зсувних сил:

$$k = \frac{\sum\{cl + \tan\phi(G\cos\alpha - ul)\}}{\sum G\sin\alpha}, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт стійкості укосу;  $c$  – питома зчеплення, кПа;  $l$  – довжина дуги ковзання, м;  $G$  – вага відсіку, кН;  $\alpha$  – кут нахилу відсіку до горизонту;  $\phi$  – кут внутрішнього тертя;  $u$  – поровий тиск, кПа.

Метод *Morgenstern & Price* враховує три рівняння рівноваги:

Коефіцієнт стійкості відносно рівноваги горизонтальних сил:

$$F_f = \frac{\sum(c l \cdot \cos\alpha + (N - ul)\tan\phi \cdot \cos\alpha)}{\sum N\sin\alpha - \sum D\cos\omega}, \quad (3)$$

Коефіцієнт стійкості відносно моментів рівноваги:

$$F_m = \frac{\sum(c l R + (N - ul)R\tan\phi)}{\sum Gx - \sum Nf + \sum Dd}, \quad (4)$$

де  $N$  – нормальна сила, кН;  $D$  – сконцентроване навантаження в точці, кН;  $l$  – довжина кривої ковзання, м;  $R$  – радіус ковзання, м;  $w$  – кут нахилу сконцентрованого навантаження до горизонту, град;  $d$  – перпендикуляр опущений з центру ковзання на сконцентроване навантаження, м;  $f$  – перпендикуляр опущений з центру ковзання на нормальну силу, м;  $x$  – горизонтальна відстань від центру ковзання до осі відсіку, м.

Рівняння зв'язку горизонтальних та вертикальних сил взаємодії між відсіками:

$$X = E\lambda f(x), \quad (5)$$

де  $X$  – зчеплення між відсіками (вертикальна сила), кН;  $E$  – нормальна сила (горизонтальна), кН;  $\lambda$  – коефіцієнт пропорційності функції;  $f(x)$  – функція взаємозв'язку має форму напівсинусу.

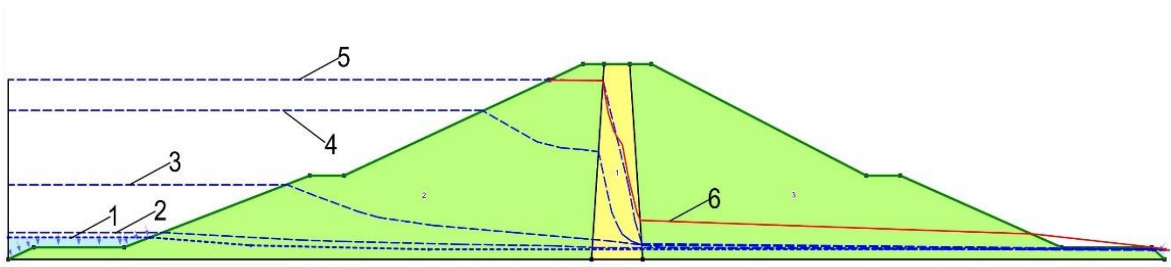
Для моделювання ґрунтів використувувалася модель Кулона- Мора.

Розрахунки положення кривої фільтрації в стаціонарних умовах при рівні води в верхньому б'єфі 18,3 м та в нижньому – 1,0 м показали, що крива виходить вище нижньої берми і покриває її водою, що створює несприятливі умови стійкості укосу. При такому положенні кривої фільтрації необхідно б було підняти берму на 0,5 м вище виходу кривої фільтрації на укіс.

З початком збільшення витрати в річці відбувається часткова акумуляція стоку в ємності, що призводить до збільшення рівня води з середньою інтенсивністю 0,8 м/год. Досягаючи максимального рівня води в ємності 18,3 м, високі рівні води в ємності підтримуються 10 годин, після чого відбувається різке пониження рівня води з середньою швидкістю 0,9 м/год. Це доволі велика інтенсивність, яка зазвичай не допускається в стаціонарних водосховищах, бо призводить до руйнування верхового укосу.

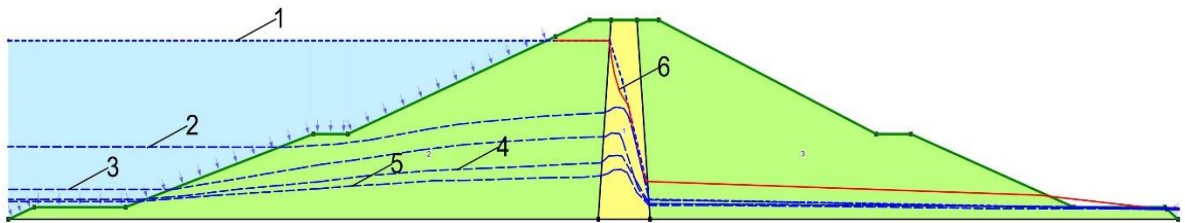
Під час проходження паводку рівень води в тілі греблі моделювався за допомогою положень кривих вільної поверхні, які наведені на рис. 2 для періоду підйому води (від 0 до 30 години), та на рис. 3 під час пониження води в ємності (35 - 70 години). Для кожного положення кривої фільтрації визначався коефіцієнт стійкості укосу. Метою розрахунків було визначення положення кривої фільтрації з мінімальним коефіцієнтом стійкості, і час настання цього критичного для стійкості укосу моменту.

Як видно з рис. 2, фільтраційний потік проходить через тіло призми, але в ядрі за рахунок малих коефіцієнтів фільтрації положення кривої фільтрації не доходить до стаціонарного положення (крива б). Протягом всього паводку рівень води в нижньому б'єфі практично не збільшується і не виходить на укіс вище берми як



**Рис. 2.** Положення кривих фільтрації в період паводку від 0 до 30 годин: 1 – 5 годин; 2 – 10 годин; 3 – 15 годин; 4 – 20 годин; 5 – 30 годин; 6 – стаціонарна крива

**Fig. 2.** The seepage curves location at the period from 0 to 30 hours of the flood: 1 – 5 hours; 2 – 10 hours; 3 – 15 hours; 4 – 20 hours; 5 – 30 hours; 6 – steady state seepage



**Рис. 3.** Положення кривої фільтрації в період паводку від 35 до 70 годин: 1 – 35 годин; 2 – 45 годин; 3 – 50 годин; 4 – 60 годин; 5 – 70 годин; 6 – стаціонарна крива

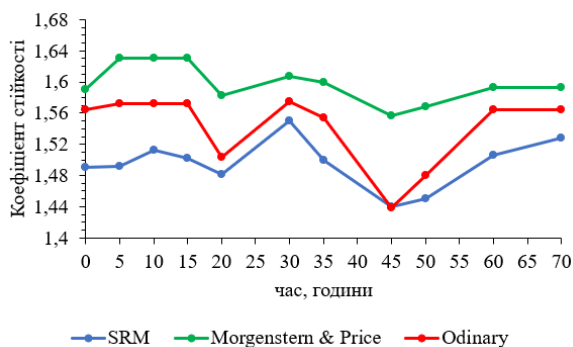
**Fig. 3.** The seepage curves location at the period from 35 to 60 hours of the flood: 1 – 35 hours; 2 – 45 hours; 3 – 50 hours; 4 – 60 hours; 5 – 70 hours; 6 – steady state seepage

при стаціонарній фільтрації. Отже проходження паводку практично не впливає на низовий укіс, і його стійкість не змінюється під час проходження паводку, тому не має необхідності визначати стійкість низового укусу при стаціонарних високих рівнях води, та підвищувати низову берму.

З підняттям рівня води в ємності стійкість укусу спочатку дещо збільшується, що пов'язано зі збільшенням гідростатичного тиску на укіс. На 20 годині спостерігається деяке зменшення стійкості укусу, що пов'язано зі збільшенням градієнту фільтрації в верхівій призмі за рахунок швидкого підйому води та уповільненого проникнення води в призму греблі.

Під час опускання рівня води в ємності напрямок потоку змінюється до верхового укусу. У верхівій призмі затухання порового тиску відбувається дуже швидко завдяки великій ефективній пористості та коефіцієнту фільтрації. В ядрі спостерігається певна затримка зниження порового тиску, за рахунок чого пониження кривої фільтрації відбувається повільніше ніж пониження рівня води в ємності, що знижує стійкість верхового укусу при високій інтенсивності опускання води.

Визначені коефіцієнти стійкості укусу методом граничної рівноваги та їх порівняння з розрахунками методом SRM з врахуванням напружено-деформованого стану греблі [5] наведені на рис. 4.



**Рис. 4.** Зміна коефіцієнту стійкості під час проходження паводку 1% забезпеченості

**Fig. 4.** The Safety Factor change during the 1% flood

## ВИСНОВКИ

1. Основні фактори, які впливають на надійну роботу ємності - положення рівня води в ємності до початку паводку та інтенсивність зміни рівня води в ємності під час проходження паводку.
2. Перевірка стійкості низового укосу при максимальних рівнях води в ємності та стаціонарному положенні кривої фільтрації не відповідає реальним умовам роботи ємності.
3. Необхідно перевіряти стійкість верхового укосу для двох станів греблі:
  - суха гребля: розрахунок стаціонарної фільтрації при рівнях в руслі річки до паводку;
  - під час проходження паводку: розрахунок нестационарної фільтрації при опусканні рівня води.
4. Стійкість верхового укосу протипаводкової сухої гірської ємності під час проходження паводку залежить від коефіцієнтів фільтрації ґрунтів тіла греблі, закладання верхового укосу, періоду стояння високих вод та інтенсивності опускання рівня води.
5. Під час проходження паводку в період пониження рівня води після 30 годин коефіцієнт стійкості укосу, розрахований методами граничної рівноваги, починає знижуватися, досягаючи мінімального значення в момент опускання рівня води до нижніх рівнів (закінчення паводку),

коли мають місце найбільші градієнти фільтрації в верховій призмі.

6. Розрахунки роботи греблі під час проходження паводку показали, що при закладанні верхового укосу 1:2.5 з бермами гребля є стійкою.

7. Коефіцієнт стійкості укосу, розрахований методами граничної рівноваги Ordinary практично співпадає з результатами розрахунків, виконаними методом SRM з врахуванням напружено-деформованого стану греблі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Chen L., Liu S., Wu Y., Xu Y., Chen S., Pang S., Gao Z., Zhang G.** Does Ecological Water Replenishment Help Prevent a Large Wetland from Further Deterioration? Results from the Zhalong Nature Reserve, China. *Remote Sensing*. 2020, 12, 3449.
2. **Lukianets O., Obodovskyi I.** Spatial, Temporal and Forecast Evaluation of Rivers' Streamflow of the Drainage Basin of the Upper Tisa under the Conditions of Climate Change. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2015. Vol 71. No 1. p 36-46.
3. **Velychko S., Dupliak O.** Assessment of the Influence of Mountain Flood Control Reservoir Operation on the Floodplain Stability During an Extreme Flood // *Ecological Engineering & Environmental Technology* 2021, 22(1), 31–38
4. **Obodovskyi O., Onyschuk V., Grodzinskyi M., Melnyk A.** Changes in the “Channel-Flow” Hydrodynamic System of the Mountain Rivers in Tisza River Basin (within Ukraine) in Terms of High-Water Conditions. *AIP Conference Proceedings* 2186, 120015-1–120015-5, 2019.
5. **Velychko S., Dupliak O.** The dam slope stability under the transient condition during an extreme flood. *E3S Web Conf.*, 2021, 280, 10010.
6. **Aldulaimi A.** Safety evaluation of the chamrga earth dam. a seepage deformation, and stability analysis with GeoStudio. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 664 012075.
7. **Hailu M. B.** Modeling assessment of seepage and slope stability of dam under static and dynamic conditions of Grindeho Dam in Ethiopia. *Model. Earth Syst. Environ.*, 2021, 7, 2231–2239.
8. **Salim, S. G., Noori, K. M. G.** “Assessment of the Upstream Slope Stability of Darbandikhan

Rockfill Dam during Drawdown”, ARO - THE SCIENTIFIC JOURNAL OF KOYA UNIVERSITY, 2021, 9(1), pp. 8-15.

9. **Alfatlawi, Thair, J. M., Al-temimi, Yahyea, K., Alomari, & Zeena, M.** Evaluation of the upstream slope stability of earth dams based on drawdown conditions - Khassa Chai Dam: a case study *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020, 671 012072. .

10. **Zumr D., Císlarová M.** Soil moisture dynamics in levees during flood events - variably saturated approach. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2010, 58, 1, 64–72.

11. **Gottardi G., Gragnano C.** On the role of partially saturated soil strength in the stability analysis of a river embankment under steady-state and transient seepage conditions. *E3S Web of Conf.*, 2016, 9 19002.

12. **Дупляк О. В.** Гідротехнічні споруди: навчальний посібник. К.: КНУБА, 2008. 156 с.

13. **Seepage Modeling** with SEEP/W / GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5, 2012. 199 p.

14. **Stability Modeling** with SLOPE/W / GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5, 2012. 199 p.

#### REFERENCES

1. **Chen, L., Liu, S., Wu, Y., Xu, Y., Chen, S., Pang, S., Gao, Z., & Zhang, G. (2020).** Does Ecological Water Replenishment Help Prevent a Large Wetland from Further Deterioration? Results from the Zhalong Nature Reserve, China. *Remote Sensing.*, 12, 3449. <https://doi.org/10.3390/rs12203449>

2. **Lukianets, O., & Obodovskyi, I. (2015)** Spatial, Temporal and Forecast Evaluation of Rivers' Streamflow of the Drainage Basin of the Upper Tisa under the Conditions of Climate Change. *Environmental Research, Engineering and Management*, 71(1). 36-46. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.71.1.10286>

3. **Velychko, S., & Dupliak, O. (2021)** Assessment of the Influence of Mountain Flood Control Reservoir Operation on the Floodplain Stability During an Extreme Flood. *Ecological Engineering & Environmental Technology* 22(1), 31–38 <https://doi.org/10.12912/27197050/132096>

4. **Obodovskyi, O., Onyschuk, V., Grodzinskyi, M., & Melnyk, A. (2019)** Changes in the “Channel-Flow” Hydrodynamic System of the Mountain Rivers in Tisza River Basin (within Ukraine) in Terms of High-Water

Conditions. *AIP Conference Proceedings* 2186, 120015-1–120015-5

<https://doi.org/10.1063/1.5138046>

5. **Velychko, S., & Dupliak, O. (2021)** The dam slope stability under the transient condition during an extreme flood. *E3S Web Conf.*, 280, 10010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128010010>

6. **Aldulaimi, A. (2021)** Safety evaluation of the chamrga earth dam. a seepage deformation, and stability analysis with GeoStudio. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 664(1), 012075. <https://doi.org/10.3390/su10010129>

7. **Hailu, M. B. (2021)** Modeling assessment of seepage and slope stability of dam under static and dynamic conditions of Grindeho Dam in Ethiopia. *Model. Earth Syst. Environ.* 7, 2231–2239. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01006-2>

8. **Salim, S. G., & Noori, K. M. G. (2021)** Assessment of the Upstream Slope Stability of Darbandikhan Rockfill Dam during Drawdown, *Aro - The Scientific Journal Of Koya University*, 9(1), 8-15. <https://doi.org/10.14500/aro.10678>

9. **Alfatlawi, Thair, J. M., Al-temimi, Yahyea, K., Alomari, & Zeena, M. (2020)** Evaluation of the upstream slope stability of earth dams based on drawdown conditions - Khassa Chai Dam: a case study. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 671, 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012072>.

10. **Zumr, D., & Císlarová, M. (2010)** Soil moisture dynamics in levees during flood events - variably saturated approach. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(1), 64–72 ), <https://doi.org/10.2478/v10098-010-0007-z>

11. **Gottardi, G., & Gragnano, C. (2016)** On the role of partially saturated soil strength in the stability analysis of a river embankment under steady-state and transient seepage conditions. *E3S Web of Conf.*, 9, 19002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160919002>

12. **Dupliak, O. V. (2008)** *Hidrotekhnichni sporudy: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KNUBA, 13. **GEO-SLOPE International Ltd (2012)** *Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology*. Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5.

14. **GEO-SLOPE International Ltd (2012)** *Stability Modeling with SLOPE/W An Engineering Methodology*. Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5.



## Slope stability assessment of the upstream slope of the dry mountain flood control reservoir during the flood

*Svitlana Velychko, Olena Dupliak, Tetiana Kurbanova*

**Abstract.** The flood control is one of the priority goal for successful economic activity on the areas that are periodically suffer from floods. Such areas are the mountainous regions of the Ukrainian Carpathian Mountains. Floods on the mountain rivers are repeated several times each year, and are characterized by the sudden water level rise with almost the same rapid decrease of the water level. Active flood protection measures include dry mountain flood control reservoirs, the principle of which is to transform part of the flood runoff and to accumulate water for the short time in the the artificial reservoir, with followed rapid emptying to the minimum level. The complex hydraulic regime is formed in the body of the dam which forms the flood control reservoir during the flood, that is different from the operation of the water permanent reservoir. The design of the flood control structures is carried out in accordance with Ukrainian building codes for the construction of the water reservoirs with constant water level, and require testing the stability of the downstream slope for the maximum water levels under steady state seepage conditions and assessment the upstream slope stability during the water level decreasing from the maximum level calculated in the steady state condition, these calculations do not correspond to the real seepage processes in the body of the dam of the dry flood control reservoir. Therefore, the purpose of this work is to determine the necessary boundary conditions of the flood control reservoir operation and upstream slope stability assessment by the limit equilibrium method. In the article the operation of the dry mountain flood control reservoir was analysed and found that the dam was characterized by two states: dry reservoir with water minimum water level and variable position of the seepage curve in the core and the upstream prism during the flood. The main factors influencing the upstream slope stability are the physical and mechanical properties of the soil, the laying of the slope, the period of time when the high-water level is maintained and the intensity of water level dropping. The upstream slope stability was evaluated by the Morgenstern & Price and Ordinary methods on the Slope/w software package. After the first 25 hours of the flood (period of high-water levels and the next water level dropping) the Safety Factor evaluated by limit equilibrium methods began to decrease, and reached the minimum value during the greatest seepage curve gradients at the time between 45 and 50 hours. Slope stability calculations by the limit equilibrium method were compared with the results of calculations performed by the SRM method, the values of the Safety Factor and the way of their change during the flood evaluated by Ordinary and SRM methods almost coincide, which indicates the reliability of the results obtained by different methods of slope stability analysis.

**Key words:** transient seepage, dry mountain flood control reservoir, slope stability, phreatic curve, flood hydrograph.

*Стаття надійшла до редакції 08.11.2021*