

УДК 624.13
UDC 624.13

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-223-229

**ДИНАМІКА ДЕПРЕСІЙНОЇ ПОВЕРХНІ У ТІЛІ ГРУНТОВИХ СПОРУД ПІД ЧАС
ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ВОДИ У ВОДОЙМИЩІ**

**DYNAMICS OF THE PHREATIC SURFACE IN THE BODY OF EARTH STRUCTURES DURING
DRAWDOWN OF WATER LEVEL IN A RESERVOIR**



Кузло Микола Трохимович, доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне), завідувач кафедри автомобільних доріг, основ і фундаментів, e-mail: kuzlo-@ukr.net тел. +380966890792

<https://orcid.org/0000-0001-9242-2478>



Авдєєв Максим Олегович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: crystalmpg@gmail.com, тел. +380674286515

<https://orcid.org/0009-0007-2961-5526>

Анотація. У статті наведено критерій необхідності врахування гідродинамічних сил від неусталеного фільтраційного потоку у ґрунтових водонасичених укосах при зниженні рівня води у водоймищах з різною інтенсивністю. Отримано залежність для встановлення депресійної поверхні в тілі водонасичених однорідних укосів на будь-який момент часу спорожнення водоймища, рух ґрунтових вод у яких відбувається із нескінченності зі сторони ґрунтового масиву. Встановлені закономірності динаміки депресійної поверхні у водонасичених ґрунтових укосах під час зниження рівня води у водоймищах для двох видів за водопроникністю основ.

Ключові слова: водонасичені ґрунтові укоси, водоймища, депресійна поверхня, гідродинамічні сили, фільтраційний потік.

Вступ. Аналіз стану водонасичених ґрунтових укосів споруд показав, що вибір інженерних заходів з покращення їх роботи у багатьох випадках залежить від режиму і інтенсивності зміни гідрогеологічних умов та дії техногенних факторів [1,2].

При експлуатації ґрунтових споруд в умовах змінного рівня води у водоймищі на надійність, довговічність і безперебійну експлуатацію здатні впливати наступні основні фактори [3]: швидкість зниження рівня води у водоймищі, гідродинамічні сили від неусталеного фільтраційного потоку, геометричні параметри споруди, фільтраційні властивості ґрунту, зміна фізико-механічних властивостей ґрунту тіла і основи споруди у наслідок його водонасичення і осушення тощо.

Значним силовим фактором, що виникає в межах потенційно-нестійкої призми зсуву, є неусталений фільтраційний потік, що обумовлений зміною умов на межі області фільтрації. Його наявність призводить до виникнення гідродинамічних сил, що значно впливають на напружений стан в скелеті ґрунту.

Методи досліджень. Критерієм необхідності врахування гідродинамічних сил від неусталеного фільтраційного потоку при зниженні рівня води у водоймищі згідно із дослідженням Можевітінова А. Л. і Сулейманова І. А [4]є:

$$\alpha = \frac{k}{\mu \cdot V \cdot m}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт фільтрації ґрунту тіла споруди;
 V – швидкість зниження рівня води у водоймищі;
 μ, m – відповідно, коефіцієнт водовіддачі ґрунту тіла споруди і закладання укосу.

При цьому, критерій α повинен знаходитись у межах:

$$0,05 \leq \alpha \leq 5,0 \quad (2)$$

При $\alpha < 0,05$, можна вважати, що депресійна поверхня в тілі і в укосів споруди не змінюється за час зниження рівня води у водоймищі. Для даного випадку, розрахунки стійкості укосів необхідно вести, як для миттєвого зниження рівня води у водоймищі.

При $\alpha > 5,0$, можна вважати, що депресійна поверхня отримує незначне відставання від рівня води, що понижується у водоймищі. Для даного випадку, можна допустити, що розміщення депресійної поверхні в тілі укосу відповідає рівню води у водоймищі на певний час його спорожнення.

Розміщення депресійної поверхні в тілі і укосі ґрунтової споруди на будь-який момент зниження рівня води у водоймищі можна встановити експериментально, наприклад методом ЕГДА, існуючими аналітичними або чисельними розв'язками.

Для ґрунтових споруд, що влаштовані з однорідного ґрунту (рис. 1), розміщення депресійної поверхні в їх тілі і укосі на будь який моменту часу зниження рівня води у водоймищі можна встановити з використанням залежності В. И. Шестакова [5]:

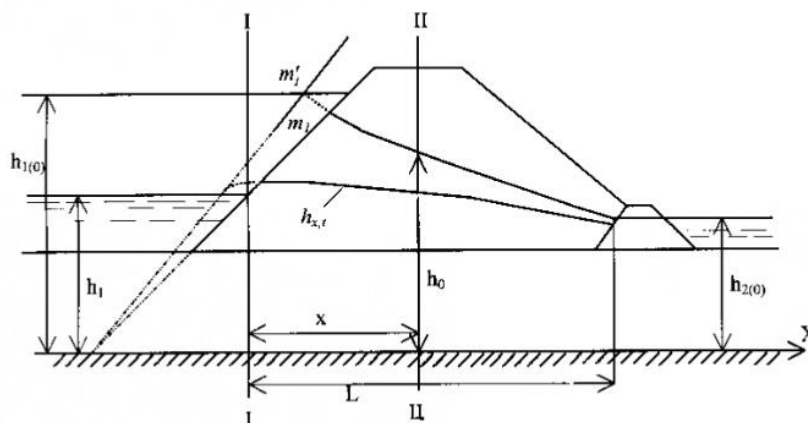


Рисунок 1 – Розрахункова схема з визначення депресійної поверхні в тілі греблі при пониженні рівня води у водоймищі

Figure 1 – Schematic diagram illustrating the determination of the depression surface within the dam body when the water level in the reservoir is lowered

$$h(x,t) = \left\{ \begin{array}{l} h_0^2 - v \cdot t \left[h_{1(0)} + h_1 + \frac{m_1 (h_{1(0)}^2 - h_{2(0)}^2)}{L} \right] \\ \cdot \left[F(\lambda, n) - \frac{x + m_1 \cdot vt}{L + m_1 \cdot vt} F(\lambda_L, n) \right] \end{array} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

де v — середня швидкість зниження рівня води у водоймищі;
 $h_1 = h_{1(0)} - vt$ - глибина води у водоймищі під час зниження рівня води;
 $F(\lambda, n); F(\lambda_L, n)$ — функції, що визначаються з монограм (рис. 2).

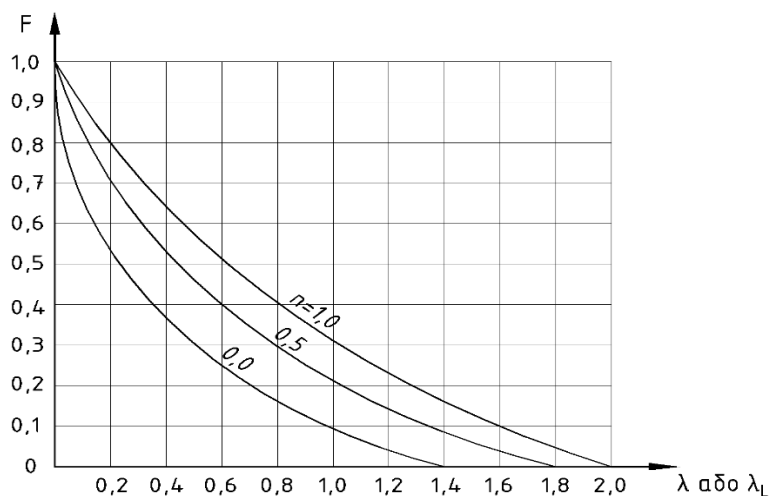


Рисунок 2 – Монограми для визначення функцій $F(\lambda, n); F(\lambda_L, n)$
Figure 2 – Monograms for identifying functions $F(\lambda, n); F(\lambda_L, n)$

Автором [6] отримано залежність для встановлення депресійної поверхні на будь-який момент часу спорожнення водоймища для однорідних укосів або схилів фільтраційний потік у яких відбувається із нескінченності зі сторони ґрунтового масиву (рис. 3).

З метою спрощення задачі пониження рівня води у водоймищі буде відбуватися за лінійним законом

$$h = V \cdot t, \quad (4)$$

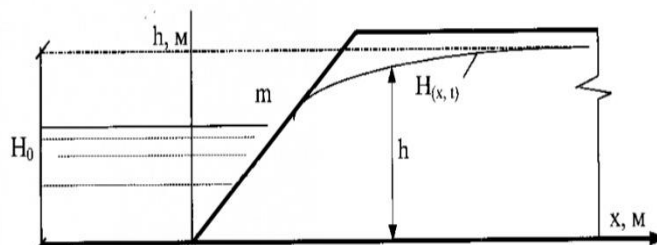


Рисунок 3 – Розрахункова схема з визначення депресійної поверхні в ґрунтовому масиві при пониженні рівня води у водоймищі
Figure 3 – Schematic diagram illustrating the determination of the depression surface in the soil mass when the water level in the reservoir is lowered

Під час зниження рівня води у водоймищі в ґрунтовому масиві виникає неусталений фільтраційний потік, який для випадку одновимірного потоку з достатньою точністю можна описати рівнянням

$$\frac{k \cdot h}{\mu} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{\partial H(x,t)}{\partial t}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт фільтрації;
 h – потужність фільтраційного потоку;
 μ – коефіцієнт водовіддачі.

Граничні умови для ґрунтового укосу, притік води у якому відбувається із нескінченності, запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} H(x,0) &= H_0; \quad 0 < x < \infty; \quad \text{при } t = t_0 = 0; \\ H(x,0) &= H_0 - V \cdot t = h_1; \quad 0 < t < \infty; \\ \frac{\partial H(+\infty, t)}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Розв'язок даної задачі є аналогічним рішенням з теорії теплопровідності. Це дозволило використати ряд формул з даної теорії. Тоді розв'язок рівняння (5) з урахуванням граничних умов (6) отримаємо у вигляді:

$$H_{(x,t)} = H_0 - V \cdot t + (V \cdot t) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{\frac{k \cdot h}{\mu} \cdot t}} \right), \quad (7)$$

де H_0 – глибина води у водоймищі до початку спорожнення;
 t – будь-який час спорожнення рівня води у водоймищі;
 x – горизонтальна координата деякої точки, що характеризує розміщення кривої депресії;
 V – швидкість пониження рівня води у водоймищі.

Метою роботи є встановлення закономірностей динаміки депресійної поверхні у водонасичених укосах ґрунтових спорудах під час зниження рівня води у водоймищі.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети були виконані теоретичні дослідження з використанням залежності (7). При цьому, дослідження виконувались для параметрів ґрунтових споруд і швидкості пониження рівня води у водоймищі в межах критерію $0,05 \leq \alpha \leq 5,0$, що визначає необхідність урахування неусталеного фільтраційного потоку в оцінці стійкості укосів. Крім того, в процесі досліджень розглянуто два види основ: 1 – з добре водопроникливими ґрунтами $k_f > 0,75$ м/добу; 2 – з мало водопроникливими ґрунтами $k_f < 0,05$ м/добу.

Звичайно, мало водопроникна основа з $k_f < 0,05$ м/добу прийнята з допущенням, так, як швидкість фільтрації в доному випадку незначна у порівнянні зі швидкістю зниження рівня води у водоймищі.

Розрахунки виконувались для наступних значень α : 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0, що дозволило урахувати практично основні випадки, які зустрічаються під час експлуатації ґрунтових споруд в умовах зниження рівня води у водоймищі.

За результатами проведених досліджень для однорідних ґрунтових споруд трапецеїдального перерізу розташованих на мало водопроникливих основах, побудовані графіки залежності (рис. 4):

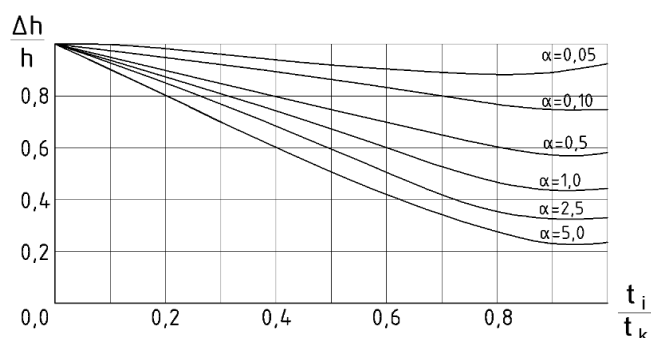


Рисунок 4 – Динаміка кривої депресії у тілі укосу дамби при пониженні рівня води у водоймищі, що розміщена на мало водопроникливих ґрунтах основи

$$\frac{\Delta h}{h} = f\left(\frac{t_i}{t_k}\right), \quad (8)$$

де $\Delta h=h_i$ – розміщення депресійної поверхні в масиві споруди на деякий час t_i ;
 h – початкове розміщення депресійної поверхні в тілі укосу;
 t_k — кінцевий момент часу який відповідає цілковитому зниженню рівня води.

На основі одержаних розрахункових даних підтверджено, що при даних умовах будівництва і експлуатації ґрунтових споруд депресійна поверхня має значне відставання від зниження рівня води у водоймищі. Наприклад, при $\alpha=5,0$ відставання депресійної поверхні на момент часу $\left(\frac{t_i}{t_k}\right) = 1$, становить $0,25h$, а для $\alpha=0,05$ складає $0,92h$. Крім того, в процесі досліджень встановлено, що швидкість падіння депресійної поверхні по висоті укосу змінюється. Її значення в початковий момент часу зростає, потім зменшується, а при незначному співвідношенні $\left(\frac{t_i}{t_k}\right)$ падіння депресійної поверхні практично не відбувається.

Аналогічно були виконані дослідження для випадку, коли споруда розташовані на добре водопроникливих ґрунтах основи. Результати досліджень наведені на рис. 5.

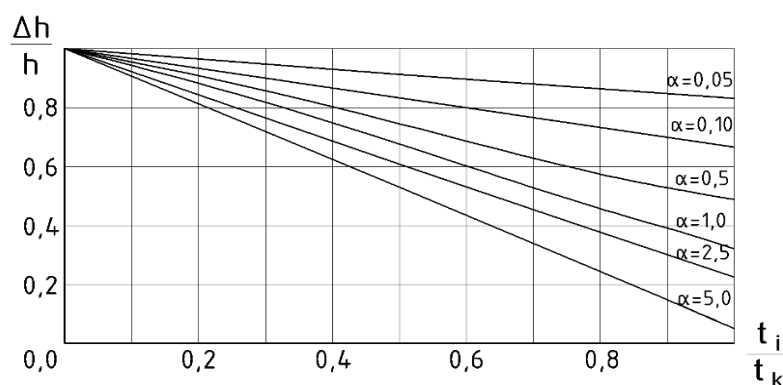


Рисунок 5 – Динаміка кривої депресії у тілі укосу дамби при пониженні рівня води у водоймищі, що розміщена на добре водопроникливих ґрунтах основи

Figure 5 – Variation in the depression curve within the dam slope body as the water level in the reservoir decreases, where the dam is situated on highly permeable foundation soils

Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що за прийнятих умов будівництва і експлуатації ґрунтових споруд відставання депресійної поверхні від рівня води при $\alpha=5,0$ складає всього $0,05h$, а при $\alpha=0,05$ воно рівне $0,88h$. Крім того, на відміну від розрахункової схеми з мало водопроникними ґрунтами основи, падіння депресійної поверхні в тілі укосу змінюється незначно. Для даного випадку на динаміку депресійної поверхні в тілі укосу значно впливає дренуюча здатність ґрунту основи, що забезпечує рух фільтраційного потоку у вертикальному напрямку. При цьому градієнт напору дорівнює одиниці, а падіння депресійної поверхні в тілі укосу відбувається практично з однаковою швидкістю.

Перелік посилань

1. Демчишин М. Г. Техногенні впливи на геологічне середовище території України. Київ : Наукова думка, 2004. 205 с.
2. David G. Engineering Geology: Principles and Practice. Berlin : Springer, 2008. 429 p.
3. Кузло М. Т. Вплив зниження рівня води на міцність ґрунтового укосу. *Підвищення ефективності осушувально-зволожувальних систем* : зб. наук. праць. Київ : УкрНДІГіМ, 1985. С. 134–137.
4. Кузло М. Т. Встановлення режиму фільтрації у ґрунтових укосах при пониженні рівня води. *Меліорація і водне господарство* : міжвідомчий темат. наук. збірник. Київ : Аграрна наука, 2004. Вип. 91. С. 64–274.
5. Мельничук В. Г., Новосад Я. О., Міхницька Т. П. Інженерна геологія : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2013. 351 с.
6. Кузло М. Т. Дослідження фільтраційних сил у ґрунтовому укосі при зниженні рівня води у б'єфі. *Гідротехнічні споруди на меліоративних системах* : зб. наук. праць. Київ : УкрНДІГіМ, 1986. С. 84–90.

DYNAMICS OF THE PHREATIC SURFACE IN THE BODY OF EARTH STRUCTURES DURING DRAWDOWN OF WATER LEVEL IN A RESERVOIR

Kuzlo Mykola Trokhimovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine), Head of the Department of Automobile Roads, Bases and Foundations, e-mail: kuzlo-@ukr.net, +380966890792, <https://orcid.org/0000-0001-9242-2478>

Avdeev Maksym O., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: crystalmpg@gmail.com, tel. +380674286515, <https://orcid.org/0009-0007-2961-5526>

Summary. The article analyzes the condition of water-saturated earth slopes of structures under conditions of fluctuating water levels in reservoirs. A criterion has been substantiated for the necessity of considering hydrodynamic forces arising from unsteady seepage flow in water-saturated earth slopes during water level drawdown in reservoirs with different intensities. The relationship has been obtained for determining the phreatic surface within homogeneous water-saturated slopes at any moment during reservoir emptying, where groundwater flow occurs from infinity on the side of the soil mass.

Regularities in the dynamics of the phreatic surface in water-saturated earth slopes during water level drawdown in reservoirs have been established for two types of foundations differing in permeability.

Based on the research results, graphical relationships describing the dynamics of the phreatic surface in water-saturated slopes during water level drawdown in reservoirs have been constructed for homogeneous earth structures with a trapezoidal cross-section located on low-permeability and permeable foundations. It has been established that under certain construction and operation conditions of earth structures, the phreatic surface significantly lags behind the decrease in the reservoir water level. In addition, the study shows that the rate of decline of the phreatic surface along the slope height varies, which may significantly affect the intensity of reservoir drawdown.

Keywords: water-saturated earth slopes, reservoirs, phreatic surface, hydrodynamic forces, seepage flow.

References

1. Demchyshyn, M. H. (2004) *Technogenic impacts on the geological environment of the territory of Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka. 205 p. [In Ukrainian].
2. David, G. (2008) *Engineering Geology: Principles and Practice*. Berlin: Springer. 429 p.
3. Kuzlo, M. T. (1985) Impact of water level lowering on the stability of a soil slope, *Pidvyshchennia efektyvnosti osushuvalno-zvolozhuvalnykh system: zb. nauk. prats*, pp. 134–137. [In Ukrainian].
4. Kuzlo, M. T. (2004) Determination of the filtration regime in soil slopes during water level lowering, *Melioratsiia i vodne gospodarstvo: mizhvidomchyi temat. nauk. zbirnyk*, (91), pp. 64–274. [In Ukrainian].
5. Melnychuk, V. H., Novosad, Ya. O. and Mikhnytska, T. P. (2013) *Engineering geology: study guide*. Rivne: NUVHP. 351 p. [In Ukrainian].
6. Kuzlo, M. T. (1986) Study of filtration forces in a soil slope during water level lowering in the reach, *Hidrotekhnichni sporudy na melioratyvnykh systemakh: zb. nauk. prats*, pp. 84–90. [In Ukrainian].

Дата надходження до редакції 18.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 05.02.2026.