

УДК 621.385.833

к.т.н. Мельник О.В.,  
Східноєвропейський національний університет мені Лесі Українки,  
к.т.н. Мельник Ю.А.,  
Луцький національний технічний університет

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУФОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ТІЛІ ГРЕБЛІ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС

*Розглядаються питання дослідження перебігу суфозійних процесів у ґрунтовому матеріалі тіла греблі водосховища Хмельницької АЕС. Встановлені важливі залежності осідання від масопереносу піску, осідання поверхні від маси винесеного піску для двох варіантів моделей. Одержані апроксимуючі функції, які відображають взаємний зсув величин в часі для чотирьох параметрів процесу.*

*Ключові слова: суфозійні процеси, моделювання, кореляція, фільтраційний потік, винесення піску.*

**Вступ.** Аварії кам'яно-ґрунтових гребель порівняно рідкісні і відносяться головним чином до раннього періоду їх будівництва (1883-1927 рр.). Руйнування в більшості випадків відбувалися внаслідок переливу води через гребінь (Енгліш, Уелнот Грув, Лоуер Отей, Бюль Крик та ін. висотою до 40 м) і рідше - внаслідок утворення хімічної суфозії через наскрізні тріщини в ядрі греблі. Аварійний стан, що загрожує руйнуванням, може виникнути також через суфозію ґрунту в основі греблі (Апішапа).

Комплексний підхід з детального вивчення властивостей ґрунтів основи, вживання заходів з їх закріплення, видаленню шарів схильних до вимивання, а також зменшенню градієнтів напору відповідними протифільтраційними пристроями може повністю виключити можливість вимивання ґрунту з-під основи, і, отже, виключити небезпеку руйнування греблі.

Виникнення суфозії в тілі греблі є наслідком низької якості її проектування або зведення. Вимиванню ґрунту ядра або екрону можливо запобігти правильним призначенням розмірів зазначених елементів, що забезпечують нерозмивні градієнти напору, а також належним підбором складу і розмірів перехідних зон (фільтрів). При цьому вельми важливою умовою є якісне ущільнення ґрунтових матеріалів, так як погано ущільнені зони створюють зони підвищеної фільтрації і небезпеки суфозії.

Випадки суфозії часто мають місце в примиканнях гребель до крутих берегових схилів і бетонних споруд через складність ущільнення ґрунту

механізмами в зоні контакту. Ці зони вимагають додаткового ручного ущільнення і особливого контролю.

**Аналіз публікацій:** Значний внесок у дослідження питань проектування та контролю технічного стану гребель різних типів внесли вчені з Всеросійського науково-дослідного інституту гідротехніки імені Б.Є. Веденєєва [1,2,3]. На теренах України цікаві здобутки є в роботах [4,5,6,7] та багатьох інших. Дослідження процесів конкретно у ґрунтовій греблі водосховища ХАЕС були початі в роботах [8,9,10].

**Постановка проблеми.** Фільтраційно-суфозійні властивості ґрунтів визначаються закономірностями будови їх порового простору і особливостями взаємодії частинок з фільтраційним потоком. Будова ґрунту, перш за все, залежить від розподілу частинок за розмірами, які разом з іншими властивостями можна розглядати як різнозернистість. При цьому різнозернистий ґрунт, на відміну від багатозернистого штучного матеріалу, складається з фракцій (до десятка і більше), кожна з яких об'єднує частинки, що відрізняються за розмірами не більше ніж в два-три рази. В залежності від зернового складу ґрунт може бути як суфозійним, так і несуфозійним, тобто таким, в якому відсутня механічна суфозія. Ідеальним несуфозійним ґрунтом являється матеріал, що складається з частинок одного розміру. Математичні моделі для прогнозування вертикальних рухів споруд створюються для визначення просторового розміщення точок споруди, навіть таких, які не включались в обробку. Створення математичних моделей для прогнозування деформацій інженерних споруд та земної поверхні на основі геодезичних, геологічних та інших натурних спостережень тісно пов'язані з аналізом результатів вимірювань та вивченням впливів домінуючих факторів на них. Саме тому важливим є питання визначення впливу фактору вимивання піску із тіла греблі на її деформаційну стійкість

### **Виклад основного матеріалу.**

#### **1. Моделювання ерозійних процесів**

При експлуатації греблі у специфічних інженерно-геологічних умовах може виникати несприятливий, наприклад суфозійно-карстовий процес, що призводить до непередбачених за матеріалами повторних геодезичних вимірів стрибкоподібним змінам осідання греблі.

Розглянемо принципову схему цього явища.

Нехай на момент  $t_1$  початку будівництва греблі ґрунти її основи детально вивчені і мають будову, що показано на схемі (рис. 1).

Після моменту  $t_1$  в шарі 3 виникли умови, що сприяють розвитку суфозійно-карстового процесу, наприклад, в результаті пониження рівня ґрунтових вод і утворення гідравлічного напору, тобто після  $t_1$  в шарі 3

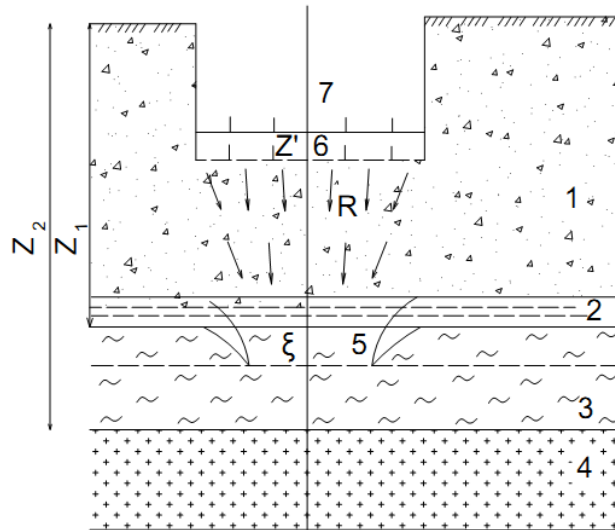


Рис.1. Схема розвитку суфозійно-карстового процесу:

1 – верхній шар – піски; 2 – водотривкий шар; 3 – розчинні породи; 4 – скельні породи; 5 – еквівалентна порожнина в результаті виносу ґрунтів із шару; 6 – осадка фундаменту стрибком при заповненні простору 5 ґрунтами шару, що залягає вище; 7 – розподіл навантаження на підшву фундаменту;  $R$  – напрямки зміщення часток ґрунту в шарах 1 і 2 при заповненні порожнини 5.

відбувається поступове зменшення кількості маси внаслідок механічного виносу часток або мінералізації піску, розщільнення піску і, як наслідок цього, – послаблення несучих властивостей шару.

Ясно, що до тих пір, поки виконується умова  $R < \Phi$  ( $R$  – навантаження від греблі,  $\Phi$  – несуча здатність основи), осадочні марки на греблі реагують на процес, що протікає в шарі 3, не будуть. Цей процес залишається "невидимим" для нівелювання.

Поступове винесення часток піску із шару 3 приведе до утворення по нижній межі шару 2 склепіння, яке в залежності від властивостей міцності може або осідати, проявляючись на зовнішній поверхні у вигляді мурди осідання, і ти самим не допускати розвитку значних по висоті пустот, або навпаки, призводить до утворення значних за розміром пустот 5. В останньому випадку невиконання умови  $K < \Phi$  приведе до руйнування і появи стрибка  $\xi'$  в осадці греблі. Тому важливо оцінити значення  $\xi$ , за яким можна судити про потенційну можливість появи стрибків  $\xi'$ . Очевидно, що коли  $\xi = 0$ , стрибків  $\xi'$  в осадці бути не може.

Оцінити значення  $\xi$  можна прямим і побічним шляхом на основі співставлення результатів високоточних гравіметричних вимірів, виконаних на фізичній поверхні в моменти  $t$  і  $t_1$ .

Існує велика кількість формул для обчислення  $V_{zzz}$  на спостережуваній

поверхні за помірними значеннями аномалій сили тяжіння  $\Delta g$ . Виберемо одну з них, яка за [1] забезпечує найменшу середню квадратичну похибку та більш зручна для використання в даному випадку:

$$V_{zzz}(0) = \frac{1}{7l^2} [4\Delta g(0) + 2\bar{\Delta}g(l) - 6\bar{\Delta}g(\sqrt{5}l)], \quad (1)$$

де  $\bar{\Delta}g$  – середні значення із аномалій сили тяжіння, поміряні в вершинах вписаних в окіл квадрату зі сторонами  $2l$  і  $2\sqrt{5}l$ .

Із теорії інтерполяції гравітаційних аномалій відоме співвідношення [2], яке визначає значення  $V_{zzz}$  на початку прямокутної системи координат  $x, y, z$  за середньою щільністю та формою аномалієподібного тіла:

$$V_{zzz}(0,0,0) = 3f\sigma \iiint_{\tau} \frac{z(2z^2 - 3x^2 + 3y^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{7/2}} dx dy dz, \quad (2)$$

де  $\sigma = \sigma' - \sigma_0$ ;  $\sigma_0, \sigma'$  – середня щільність вміщуваних гірських порід та порід в області  $\tau$  досліджуваного шару;  $f$  – гравітаційна стала.

Вводячи більш зручну в даному випадку циліндричну систему координат  $z, R, \alpha$  будемо мати:

$$V_{zzz}(0,0,0) = 3f\sigma \int_{z_1}^{z_2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{z(2z^2 - 3r^2) r dt dz d\alpha}{(z^2 + r^2)^{7/2}} \quad (3)$$

де  $z_1 \leq z \leq z_2$ ;  $0 \leq r \leq R$ ;  $0 < \alpha < 2\pi$ ;  $z_1, z_2$  – глибини поверхні вертикального циліндра;  $\alpha$  – полярний кут.

Інтегруючи (3) по  $\alpha, r, z$  одержимо

$$V_{zzz}(0,0,0) = 2\pi f \sigma X, \quad (4)$$

де

$$X = \frac{12}{5} \left( \frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) - \frac{24}{5} \left( \frac{1}{\sqrt{R^2 + z_2^2}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + z_1^2}} \right) - \frac{2}{5} R^2 \left( \frac{1}{\sqrt[3]{R^2 + z_2^2}} - \frac{1}{\sqrt[3]{R^2 + z_1^2}} \right). \quad (5)$$

Виконавши вимірювання в двох циклах, знайдемо за формулами (4) і (5)

$$\delta V_{zzz}(0,0,0) = V''_{zzz}(0,0,0) - V'_{zzz}(0,0,0). \quad (6)$$

Нехтуючи варіацією форми  $\tau$  між циклами та зіставляючи варіацію  $\delta V_{zzz}$  з варіацією  $\delta\sigma$  (середньої надлишкової щільності  $\sigma$  в  $\tau$ ), одержимо на основі (4) і (6):

$$\delta\sigma = \frac{\delta V_{zzz}}{f\pi X}. \quad (7)$$

Обчислимо решту маси в  $\tau$  за формулою:

$$(m - \delta m) = 2\pi R^2 (z_2 - z_1 (\sigma' - \delta\sigma)) \quad (8)$$

Прийнявши

$$\delta m = 2\pi R^2 (z_2 - z_1) \delta\sigma = 2\pi R^2 \zeta \sigma' \quad (9)$$

Звідси одержимо основну формулу для обчислення висоти  $\zeta$  за "поміряною" варіацією третьої похідної  $\delta V_{zzz}$  в циклах спостережень та заданою формою і щільністю аномалієутворюючого тіла, які повинні бути відомі за результатами інженерно-геологічних вишукувань  $z_1, z_2, \sigma'$ :

$$\zeta = (z_2 - z_1) \frac{\delta\sigma}{\sigma'} = \frac{(z_2^2 - z_1^2)}{\pi f \sigma' X} \delta V_{zzz} (0, 0, 0). \quad (10)$$

## 2. Лабораторні дослідження процесу суфозії.

Відомо, що процес суфозії розвивається при певному гранулометричному складі. При цьому вирішальним фактором є геометричні умови, для оцінки яких запропоновані графоаналітичні побудови і розрахунки. Для розрахунку суфозійності за геометричними критеріями застосовуються наступні формули [1,3]:

$$\frac{D_3}{D_{17}} < \Pi, \quad (11)$$

де  $\Pi = (0,32 + 0,016\pi^2) \sqrt{\eta}$ ;  $D_3$  і  $D_{17}$  – діаметри часток, наявність яких у ґрунті менша 3% і 17%;  $\eta$  – коефіцієнт неоднорідності;  $n$  – пористість.

Для фізичного моделювання процесу суфозії в лабораторії використовувалися дані про інженерно-геологічні властивості ґрунтів греблі. Ґрунти представлені пісками пилюватими, які є суфозійно-небезпечними, тобто можуть виноситися через порожнини, які можуть бути утворені в ґрунті через нерівномірну укладку або при нерівномірному осіданні.

Нерівномірне осідання стимулює прогресуючий розвиток процесу суфозії і утворення спевдокарстових пустот.

Фізична модель суфозійного процесу створювався на лабораторному стенді. В моделях використовувалася ґрунтова суміш, геометричні характеристики якої відповідають необхідним умовам виникнення суфозії і спрощено представляють склад ґрунтів греблі. Згідно умов подібності, виведених із рівняння нерозривності фільтраційного потоку М.П.Павловського і рівняння Дарсі [11] можна записати:

$$\frac{T_M}{T_H} = \frac{L_M}{L_H}, \quad N_M = N_H, \quad I_M = I_H, \quad (12)$$

де  $L$  - характерний розмір – потужність основи греблі;

$T$  – початок суфозійного просідання;

$N$  - пористість;  $I$  – градієнт напору води, "м" – моделі, "н" – природи.

Так як в моделі прийняті ті ж геометричні параметри ґрунту, що і в природі, то відношення характерної тривалості процесу суфозії дорівнює відношенню характерних розмірів: потужності основи. Отже, в моделі греблі суфозія

повинна розвиватися швидше, ніж в природі в 3,2 рази.

Суфозійні властивості ґрунту моделі були перевірені на дослідах у фільтраційному приладі. Було встановлено, що суфозія в піщаному ґрунті виникає при градієнті напору більше, ніж 4,5.

В результаті випробувань однорідної моделі встановлено, що процеси виносу піску, зміни витрат води, осідання греблі відбувається нерівномірно у часі: їх значення спочатку швидко зростає, потім уповільнюється і стабілізується, при цьому вирівнюється епюра напору води. Стабілізація завершується просіданням греблі, після чого дослід переривається. Спочатку проявляється винос піску, потім осідання греблі, далі збільшення витрат води і, нарешті, осідання поверхні. Для всіх чотирьох параметрів процесу одержані апроксимуючі функції часу, які відображають взаємний зсув величин в часі. Очевидно, інерційність процесу суфозії пов'язана з процесом масопереносу.

Винесення піску описується функцією  $B = 38.5 t^{1.121}$  з коефіцієнтом кореляції 0,876, осідання греблі – функцією  $S_{г.} = 0.049 t^{1.054}$  з коефіцієнтом кореляції 0,940, витрати води – функцією  $Q = 0.034 t^{0.807}$  з коефіцієнтом кореляції 0,813, осідання поверхні – функцією  $S_{п} = 1.28 t^{0.495}$  з коефіцієнтом кореляції 0,964.

Кореляція між винесенням піску і рештою параметрів характеризувалася наступними коефіцієнтами:

- винос піску – осідання греблі - 0,902;
- винос піску – осідання поверхні -0,904;
- винос піску – витрати води - 0,960.

У другому варіанті двошарової моделі основна особливість процесів суфозії мала місце в останній стадії, перед просіданням, і відсутність різкого просідання. Епюра напорів води вирівнюється у другій моделі швидше, ніж у першій, а послідовність прояву суфозійних процесів відрізняється від послідовності їх в першому варіанті: спочатку проявляється одне просідання поверхні, потім осідання греблі, далі – виносення піску і, нарешті, збільшення витрат води. Апроксимуючі функції цих величин мають вигляд: для осідання поверхні  $S_{п} = 0.41 t^{0.478}$ , коефіцієнт кореляції 0,978; для осідання греблі  $S_{г.} = 0.353 t^{0.449}$ , коефіцієнт кореляції 0,882; для виносу піску  $B = 4.50 t^{0.311}$ , коефіцієнт кореляції 0,942; для витрат води  $Q = 0.609 t^{0.142}$  коефіцієнт кореляції 0,867

В результаті для першого варіанту моделі одержана залежність просадки від масопереносу піску

$$S_{г} = 1.61 \cdot 10^{-3} B^{0.935} \quad (13)$$

і осідання поверхні від маси винесеного піску

$$S_{п} = 0.257 \cdot 10^{-3} B^{0.439} \quad (14)$$

Для другого варіанту – двошарової основи – залежність осідання від маси винесеного піску

$$S_T = 0.217 \cdot 10^{-3} B^{1,210} \quad (15)$$

і осідання поверхні від маси винесеного піску

$$S_{\Pi} = 0.157 \cdot 10^{-3} B^{0,558} \quad (16)$$

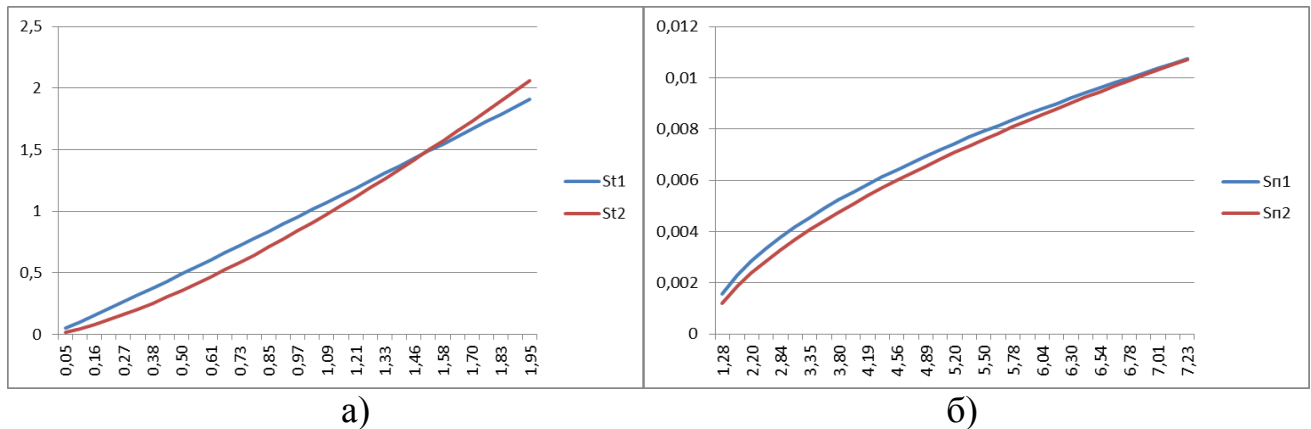


Рис. 2. Залежності просадки від масопереносу піску (а) та осідання поверхні від маси винесеного піску (б) отримані за двома моделями

### Висновки:

1. За результатами лабораторних досліджень встановлено високі значення коефіцієнтів кореляції, які вказують на те, що причиною осідання греблі ХАЕС є винос піску
2. Для всіх чотирьох параметрів процесу (винос піску, осідання греблі, збільшення витрат води, осідання поверхні) одержані апроксимуючі функції, які відображають взаємний зсув величин в часі.
3. Встановлені важливі залежності осідання від масопереносу піску, осідання поверхні від маси винесеного піску для двох варіантів моделей.
4. Обидві розглянуті методики показали свою ефективність та збіжність результатів.

### Література

1. Косовцева Л.В. Фильтрационный расчет высоких плотин из местных материалов с учетом напряженно деформированного состояния: дис. ... канд. техн. наук. 05.23.07 / Косовцева Л.В.; ВНИИ «ВОДГЕО».- М., 1977. -141 с.
2. Кузнецов Г.И. Экспериментальные исследования фильтрации на контакте грунта с бетоном / Г.И. Кузнецов // Вопросы проектирования водопропускных сооружений. М.- ВНИИ ВОДГЕО.- 1963. сб. 4 С. 153-163.
3. Справочное пособие для фильтрационных расчетов земляных плотин ч. 1. Однородные земляные плотины. Труды ОВХП ВНИИ «ВОДГЕО», Харьков.- 1970.- 242 с.
4. Хлапук М.М. Теоретичні основи фільтрації в середовищах, що деформуються, та їх застосування в області дренажу: автореф. дис.... д-ра техн.

наук: 05.23.16 / Хлапук М.М. – Рівне: Рівнен. держ. техн. ун-т, 1999. – 34 с.

5. Поляков В. Л. Промачивание суффозионных грунтов. 1. Суффозия / В.Л. Поляков // Прикладна гідромеханіка, 2003, т. 5 (77), № 3, С. 72-82.

6. Polyakov V.L. Modelling hydrodynamic deformations of a soil due to ground-water to a sink / V.L Polyakov // Flow and transport processes in complex obstructed geometries from cities and vegetative canopies to industrial problems NATO ASI. – Kyiv. – 2004. – P.158-160.

7. Хлапук М.М. Моделювання впливу градієнтів напору на фільтрацію із зволожувачів в ґрунт / Хлапук М.М., Дмитрієв Д.А.// Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво. - 2000. – Вип.25. – С.92-103.

8. Мельник В.М. Електронно-мікроскопічні та рентгенодифрактометричні дослідження ґрунтової греблі водосховища Хмельницької АЕС// Мельник В.М., Рудик О.В., Мельник О.В.// Матеріали І Міжнародої науково-практичної конференції «Озера та штучні водойми України: сучасний стан й антропогенні зміни.-Луцьк,-2008. С.91-97.

9. Melnyk V.M. Method of stereoidentification with the use of walsh descriptors / Melnyk V.M., Rudik O.V., Melnyk O.V. // II Konferencja GIS I GPS w Praktyce.-Chelm.-2007.-p.47-54

10. Мельник О.В. Про причини деформаційних процесів ґрунтової греблі ХАЕС // Зб. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.-вип.19.-Львів,-2010. С.67-74.

11. Левицький Б.Ф., Лещій Н.П. Гідравліка. Загальний курс / Левицький Б.Ф., Лещій Н.П. // — Львів: Світ, 1994. - 264с.

### **Аннотация**

В статье рассматриваются вопросы исследования течения суффозионных процессов в почвенном материале тела плотины водохранилища Хмельницкой АЭС. Установлены важные зависимости осадки от массопереноса песка, оседание поверхности от массы вынесенного песка для двух вариантов моделей. Получены аппроксимирующие функции, которые отражают взаимное смещение величин во времени для четырех параметров процесса.

### **Annotation**

The article examines the current research suffusion processes in the soil material of the dam reservoir Khmelnitsky NPP. Established important depending on the fallout from the mass transport of sand, surface subsidence of the mass rendered sand for two model variants. Preparation of approximating functions that reflect the values of the mutual displacement in time to the four process parameters.