

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.122:[624.136:624.131.542]

В. Г. ШАПОВАЛ¹, О. М. ШАШЕНКО², О. В. СКОБЕНКО^{3*},
В. Д. ШУМІНСЬКИЙ⁴, С. М. ГАПСЄВ⁵

¹ Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 471 81 92, ел. пошта shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

² Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 587 62 60, ел. пошта al.shashenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7012-6157

^{3*} Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 451 79 73, ел. пошта skobenkoavdn@gmail.com, ORCID 0009-0002-4509-7152

⁴ Лабораторія досліджень територій з небезпечними геологічними процесами, ДП «Державний науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, м. Київ, Україна, 03037, тел. +38 (096) 617 55 70, ел. пошта shumikvd@gmail.com, ORCID 0000-0002-8751-1983

⁵ Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 362 04 47, ел. пошта harpieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОФІЛІВ ОСІДАНЬ ОСНОВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТА АВТОДОРОЖНИХ НАСИПІВ, ГРЕБЕЛЬ ТА ДАМБ ІЗ ҐРУНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета. Визначення осідань основ залізничних, автодорожніх та інших насипів, а також гребель та дамб із ґрунтових матеріалів при їх проектуванні, будівництві та експлуатації є обов'язковим. При цьому якщо основа складена ґрунтами з малим модулем загальної деформації (мули, торфи, заторфовані і подібні до них ґрунти), то слід визначати не тільки середнє осідання та його нерівномірність, а й визначати профілі осідань за межами споруд. Це обумовлено тим, що у даному випадку осідання основи мають один порядок з висотою насипу (греблі, дамби), тому при визначенні необхідного для будівництва насипу (греблі, дамби) додаткового об'єму матеріалу, пов'язаного з осіданням споруди, ці деформації обов'язково слід враховувати. При написанні даної статті переслідувалась мета розробити алгоритм розрахунку профілів осідань залізничних, автодорожніх та інших насипів, гребель та дамб із ґрунтових матеріалів. **Методика.** Теоретичні дослідження геомеханічних процесів з використанням аналітичних та чисельних математичних методів. Аналіз та узагальнення результатів теоретичних досліджень. **Результати.** Запропоновано алгоритм, що дозволяє з використанням простих аналітичних залежностей визначати такі необхідні для розрахунку, проектування, будівництва та експлуатації параметри системи «ґрунтова основа гребель (дамб) та насипів з ґрунтових матеріалів з трапецеїдальним перерізом та ядром жорсткості»: – нижню межу стисненої товщі; – осідання основи в межах підшви основи греблі, дамби або насипу та за її межами. **Наукова новизна.** Встановлено, що осідання основи на вертикалі що проходить через центр греблі, дамби або насипу із симетричним профілем не менше осідань на розрахункових вертикалях, що проходять через будь-яку точку греблі, дамби або насипу з несиметричним профілем. **Практична значимість.** Основний практичний результат роботи – більш повне (порівняно з діючими нормативними документами) врахування особливостей прояву осідань системи «гребля, дамба (або насип) із ґрунтових матеріалів – ґрунтова основа» при значному скороченні обсягу обчислень.

Ключові слова: залізниця; ґрунтова основа; ґрунтові насипи; трапецеїдальний переріз; профілі осідань

Вступ

Визначення осідань основ залізничних, автодорожніх та інших насипів, а також гребель та дамб із ґрунтових матеріалів при їх проектуванні, будівництві та експлуатації обов'язково виконується відповідно до вимог (ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016, 2016; ДСТУ XXXX:202X, 202X).

Також слід зазначити, що згідно із даними натурних випробувань, переміщення основ гребель відбуваються як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках (Clough, & Woodward, 1967; Gikas, & Sakellario, 2008; Karoui, & Bouassida, 2016; Luo, Zhang, Liang, & Xiang, 2018).

При цьому якщо основа складена ґрунтами з малим модулем загальної деформації (мули, торфи, заторфовані і подібні до них ґрунти), то слід визначати не тільки середнє осідання та його нерівномірність (так, як це рекомендується для звичайних фундаментів (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДБН В.2.1-10-2018, 2018), а й визначати профілі осідань за межами споруд. Це обумовлено тим, що осідання основи мають один порядок з висотою насипу (греблі, дамби), а тому при визначенні необхідного для будівництва насипу (греблі, дамби) додаткового об'єму матеріалу, пов'язаного з осіданням споруди, ці деформації обов'язково слід враховувати. Тому виникає необхідність будувати профілі осідань основи як у межах подошви насипу (греблі або дамби) так і за її межами (ДСТУ ХХХХ:202Х, 202Х; ДБН В.2.1-10-2018, 2018; Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022; Sharoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023; Шаповал, Шумінський, Скобенко, & Кулівар, 2024). Слід особисто підкреслити, що у діючих в Україні будівельних нормах відсутні будь – які вказівки щодо цього питання.

Мета

Метою наукової статті є ознайомлення наукової спільноти з розробленим нами методом розрахунку профілів осідань залізничних, автодорожніх та інших насипів, а також гребель та дамб із ґрунтових матеріалів, який рекомендовано для впровадження в Українські державні норми (ДСТУ ХХХХ:202Х, 202Х).

Основною відмінністю даного методу від інших методів розрахунку (зокрема методу скінчених елементів) є застосування точних аналітичних рішень (точніше задачі про напружено – деформований стан пружної напівплощини що знаходиться під впливом прикладеного до її поверхні трапецеїдального навантаження) (ДСТУ ХХХХ:202Х, 202Х; ДБН В.2.1-10-2018, 2018; Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022; Sharoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023). Це дозволило уникнути властивих чисельним методам недоліків (Sharoval, Shashenko, Skobenko, Konoval, & Shuminskyi, 2024).

Тому даний метод слід застосовувати як за призначенням, так і для валідації отриманих з використанням чисельних методів результатів.

Для визначення профілів осідань основ залізничних, автодорожніх та інших насипів, а також гребель та дамб із ґрунтових матеріалів нами застосовано методику, близьку до прийнятої у Українських державних нормах (тобто схему напівпростору з умовним обмеженням нижньої границі стисненої товщі) (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДБН В.2.1-10-2018, 2018).

При цьому у нашому випадку мають місце такі відмінності:

- напівпростір було замінено на напівплощину;

- замість фундаментального розв'язання задачі про прикладену до денної поверхні основи Буссінеска було використано розв'язання Фламана;

- прикладене до поверхні основи рівномірно-розподілене навантаження було замінено на трапецеїдальне;

- шляхом урахування різної питомої ваги ядра та обвалування насипів було враховано вплив на їх осідання різномірності матеріалів, з яких їх виготовлено;

- процедуру пошарового підсумовування осідань у межах ґрунтового шару з однаковими властивостями було замінено процедурою інтегрування (тобто точним значенням);

- було уніфіковано процедуру визначення нижньої границі стисненої товщі для насипів з симетричними та асиметричними профілями з різними кутами закладення відкосів.

Методика

Для кращого розуміння матеріалу досліджень спочатку проаналізуємо досягнення у даній області.

Для визначення осідань насипу, гребель, дамби в діючих будівельних нормах (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДБН В.2.1-10-2018, 2018) використовують або графоаналітичний спосіб (отримані з його використанням результати дуже приблизні), або табличний метод, коли розрахунок осідань можливий лише на вертикалі, що проходить через центр, або через кут завантаженого рівномірним розподіленням навантаження прямокутної області) (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016, 2016; ДБН В.2.1-10-2018, 2018).

Цих даних явно недостатньо для побудови профілів осідань гребель, дамб та інших насипів із ґрунтових матеріалів.

Тому слід взяти до уваги одержані авторами робіт (Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022; Shapoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023) результати, суть яких полягає в наступному.

1. Для визначення осідань ними запропоновано використовувати метод пошарового підсумовування, основні положення якого викладено в (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДБН В.2.1-10-2018, 2018).

2. У загальному вигляді визначено напружено-деформований стан напівплощини, до верхньої границі якої прикладене розподілене за законом трикутника та трапеції навантаження (Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022; Shapoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023).

Ці результати мають великий науковий інтерес, проте при їх практичному використанні виникли такі проблеми:

1. Процес визначення осідань методом пошарового дуже трудомісткий. Це питання потребує свого вирішення.

2. При розрахунку осідань гребель, дамб та насипів із ґрунтових матеріалів необхідно знати таку глибину осідання, починаючи з якої осіданнями можна знехтувати (тобто визначити так звану нижню межу стисненої товщі). Якщо цей параметр визначити на кожній із розрахункових вертикалей, на яких розраховуються осідання, процес визначення профілю осідань суттєво ускладнюється.

3. Отримані авторами робіт (Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022; Shapoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023) розрахункові формули потребують трансформації та покращення їх структури.

Нами розглядався випадок – насип (гребля або дамба) необмеженої довжини. Оскільки в даному випадку основа знаходиться в стані плоскої деформації, за інших рівних умов її осідання завжди будуть більшими, ніж осідання гребель, дамб та насипів кінцевої довжини. Таким чином, буде забезпечено певний запас.

При розробці алгоритму розрахунку осідань гребель, дамб та насипів із ґрунтових матеріалів були прийняті такі вихідні положення, припущення та міркування (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016, 2016; ДБН В.2.1-10-2018, 2018):

1. Навантаження на основу від ваги матеріалу насипу, дамб (греблі) має форму трапеції (такий вид навантаження не розглянуто у чинних нормах).

2. Навантаження на основу від матеріалу жорсткого ядра греблі, дамби (насипу) також має форму трапеції. Такий вид навантаження також не розглянуто у чинних нормах.

3. При проектуванні насипів (гребель та дамб) із ґрунтових матеріалів на основах із слабого ґрунту слід будувати профілі осідань їх основ. Це необхідно, наприклад, для визначення додаткових витрат матеріалів, пов'язаних із будівельним підйомом профілю гребель, дамб або насипів (після їх осідання) до проектного, що не враховано в існуючих документах.

4. Прийнятий в будівельних нормах для визначення осідань метод пошарового підсумовування (ДБН В.2.1-10-2009, 2011; ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016, 2016; ДБН В.2.1-10-2018, 2018) є дуже трудомістким і мало підходить для побудови профілів осідань у межах ґрунтових гребель, дамб або насипів та за їх межами. Тому слід модифікувати цей метод таким чином, щоб кількість обчислень знизилася до деякої розумної межі.

Далі наведено рекомендований нами алгоритм побудови профілів осідань ґрунтових гребель, дамб та насипів. Розрахунок осідання основи ґрунтового насипу (греблі) на розрахунковій вертикалі S_j , що проходить через точку S_j (рисунк 1) згідно із запропонованою нами методикою слід виконувати за формулами:

$$\left. \begin{aligned} S_j &= 0,8 \cdot \sum_{i=1}^n S_i(x_j); \\ S_i(x_j) &= \frac{W(x_j, z_{i+1}) - W(x_j, z_i)}{E_i} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де: S_j – осідання підосви греблі (насипу) на розрахунковій вертикалі, розташованій на відстані x_j від лівого краю греблі (насипу) (тобто початку координат; рис. 1); $\beta = 0,8$; $S_i(x_j)$ – осідання шару основи товщиною $h_i = z_{i+1} - z_i$, покрівля якого знаходиться на глибині z_i , а підосва – на глибині z_{i+1} ; $W(x, z)$ – переміщення основи в точці з координатами x по горизонталі та z по вертикалі; $W(x_j, z_i)$ та $W(x_j, z_{i+1})$ – осідання відповідно покрівлі та підосви i -того ґрунтового шару основи з модулем деформації E_i .

При цьому переміщення основи $W(x, z)$ на розрахунковій глибині слід визначати за формулами:

$$W(x, z) = k_1 \left(\begin{array}{l} \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 + \xi_5 + \xi_6 \\ + \xi_7 + \xi_8 + \xi_9 + \xi_{10} - \xi_{11} + \xi_{12} \end{array} \right); \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{\gamma_r \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot L_1 \cdot y_4}; \quad y_1 = -L_1 - b_1 + x_j;$$

$$y_2 = -L_1 + x_j; \quad y_3 = b - x_j;$$

$$y_4 = b - L_1 - b_1;$$

$$\xi_1 = -L_1 \cdot y_1^2 \cdot \ln(y_1^2 + z^2);$$

$$\xi_2 = -y_2^2 \cdot y_4 \cdot \ln(y_2^2 + z^2);$$

$$\xi_3 = L_1 \cdot y_3^2 \cdot \ln(y_3^2 + z^2);$$

$$\xi_4 = -2 \cdot z \cdot L_1 \cdot y_1 \cdot \arctg\left(\frac{y_1}{z}\right);$$

$$\xi_5 = -2 \cdot z \cdot y_2 \cdot y_4 \cdot \arctg\left(\frac{y_2}{z}\right);$$

$$\xi_6 = 2 \cdot z \cdot L_1 \cdot y_3 \cdot \arctg\left(\frac{y_3}{z}\right);$$

$$\xi_7 = x_j^2 \cdot y_4 \cdot \ln(x_j^2 + z^2);$$

$$\xi_8 = 2 \cdot x_j \cdot z \cdot y_4 \cdot \arctg\left(\frac{x_j}{z}\right);$$

$$\xi_9 = 2 \cdot L_1 \cdot y_1^2 \cdot \ln(-y_1);$$

$$\xi_{10} = 2 \cdot y_2^2 \cdot y_4 \cdot \ln(-y_2);$$

$$\xi_{11} = 2 \cdot L_1 \cdot y_3^2 \cdot \ln(y_3);$$

$$\xi_{12} = 2 \cdot x_j^2 \cdot y_4 \cdot \ln(x_j).$$

нижньої границі стисненої товщі, на розрахунковій вертикалі слід визначати за формулою:

$$\sigma_{zp}(z) = \frac{2\gamma_r h}{\pi(b-b_1)} \left[b \operatorname{arctg}\left(\frac{b}{2z}\right) - b_1 \operatorname{arctg}\left(\frac{b_1}{2z}\right) \right], \quad (3)$$

де геометричні параметри греблі (насіпу) d_n, h, b, b_1 та L_1 наведено на рисунку 1; 2; γ_r – густина матеріалу греблі (насіпу); якщо розрахункова глибина z дорівнює нулю, то у формулах 2 і 3 слід приймати $z = 0,0001$ м.

Формули (1), (2) та (3) дозволяють визначати осідання основи у межах підшви однорідної греблі (насіпу) (рис. 1) або за її межами, а також визначати осідання неоднорідних гребель або за її межами (рис. 2). Осідання за межами гребель з ґрунтових матеріалів (дамб) важливо знати для врахування їх впливу на розташовані поблизу них будівлі та споруди.

Розрахунок осідань слід виконувати у такій послідовності:

1. Визначається проектне положення розрахункової вертикалі « X_j » (зазвичай цей параметр вказують у технічному завданні). Розрахункова вертикаль може знаходитись як в межах, так і за межами підшви греблі, дамби або насіпу.

Додаткові напруження в основі від ваги греблі (насіпу) $\sigma_{zp}(z)$, необхідні для визначення

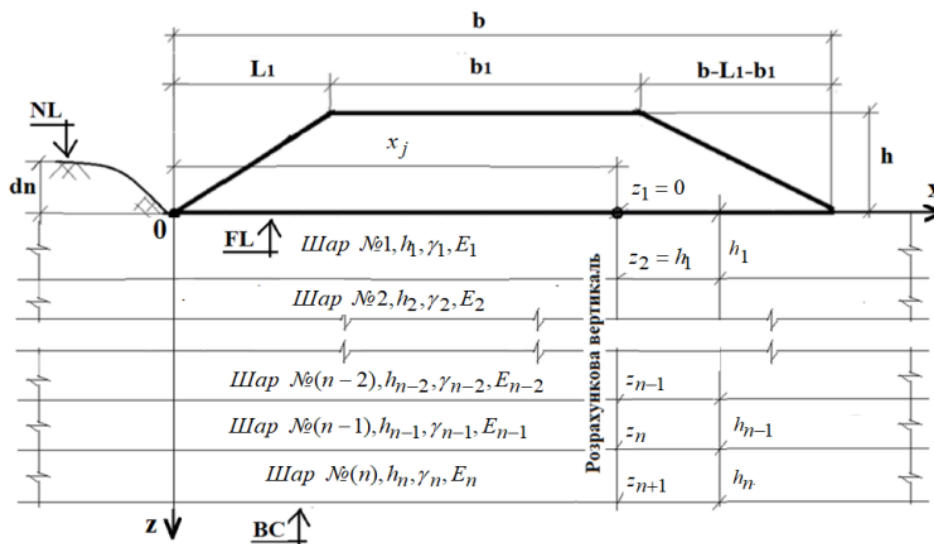


Рис. 1. Схема до визначення осідань основи ґрунтової греблі (насіпу)

Примітка 1. Якщо відстань $x_j < 0$ або $x_j > b$, то розрахункова вертикаль знаходиться за межами підшви греблі (насіпу).

Примітка 2. $E_{1...n}; \gamma_{1...n}$ – відповідно модулі деформацій та щільності (1...n) шарів ґрунту.

2. Осідання основи греблі (насіпу) S_j на розрахунковій вертикалі x_j визначають за формулами (1) та (2).

3. Розрахунок осідань слід виконувати до

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

глибини H_{st} , (тобто до так званої нижньої межі стисненої товщі), на якій виконується умова:

$$\sigma_{zp}(0, H_{st}) = k \cdot \sigma_{zq}(x_j, H_{st}), \quad (4)$$

де: $k = 0,2$ при $b \leq 5$ м; $k = 0,5$ при $b > 20$ м; при $5 < b \leq 20$ м коефіцієнт k слід визначати за інтерполяцією;

$\sigma_{zp}(0, H_{st})$ – вертикальне додаткове напруження від власної ваги греблі (насипу) на розрахунковій вертикалі слід визначати за формулою 3;

$\sigma_{zq}(0, H_{st})$ – вертикальне напруження від власної ваги ґрунту на розрахунковій вертикалі визначають за формулою:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zq}(0, H_{st}) &= \gamma \cdot d_n + \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i; \\ H_{st} &= d_n + \sum_{i=1}^n h_i. \end{aligned} \right\} (5)$$

де γ – густина ґрунту, розташованого вище подошви греблі (насипу); γ_i та h_i – відповідно густина та товщина i -го шару ґрунту; d_n – висота пояснення до рисунку 1.

4. Якщо точка, у якій розраховують напруження від власної ваги ґрунту, знаходиться нижче рівня ґрунтових вод, то замість густини γ_i слід приймати густину ґрунту у зваженому стані у воді, яку слід розраховувати за формулою $\gamma_{sb,i} = \frac{\gamma_{s,i} - \gamma_w}{1 + e_i}$, де $\gamma_{s,i}$ – густина частинок ґрунту; γ_w – густина води; e_i – коефіцієнт пористості ґрунту; i – номер елементарного шару ґрунту.

3. При визначенні осідань неоднорідних гребель слід використовувати схему, наведену на рисунку 2. У цьому випадку розрахунки слід виконувати у такій послідовності:

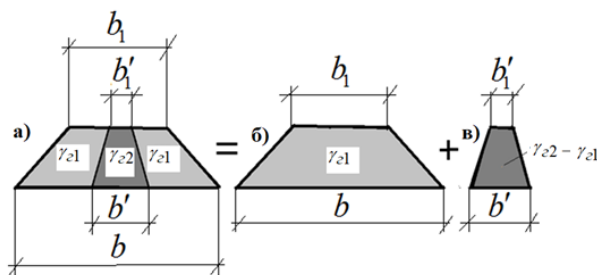


Рис. 2. Схема до розрахунку осідань неоднорідних гребель:
а) схема неоднорідної греблі (насипу) для визначення напружень і осідань;
б) схема однорідної греблі (насипу) для визначення напружень і осідань;
в) схема ядра греблі (насипу) для визначення напружень і осідань

Примітка 1. На рисунку 2 прийнято такі позначення: γ_{r1} – густина тіла греблі (насипу); γ_{r2} – густина ядра греблі (насипу).

Примітка 2. Висоти елементів греблі (насипу) з різною густиною однакові.

1. Визначають значення напружень і осідань для розрахункової схеми на рисунку 2, б). При цьому густину матеріалу греблі (насипу) слід приймати γ_{r1} .

2. Розраховують значення напружень і осідань для розрахункової схеми на рисунку 2, в). Густина матеріалу греблі (насипу) слід прийняти рівною $\gamma_{r2} - \gamma_{r1}$.

3. Отримані у такий спосіб пошарові осідання греблі, дамби (насипу) слід скласти. За сумарними осіданнями основи визначають необхідний будівельний підйом греблі, дамби (насипу), необхідний для уточнення об'єму робіт по її зведенню.

Результати

У цілому у ході виконання наведеного у даній статті дослідження було отримано такі результати:

1. Вдалося адаптувати для вирішення інженерної задачі визначення профілів осідань насипів з ґрунтових матеріалів отримане авторами робіт (Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022 Sharoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023) теоретичне розв'язання задачі про напружено-деформований стан пружної напівплощини, що знаходиться під впливом прикладеного до її верхньої границі довільного трапецеїдального навантаження.

2. Отримані в (Шаповал, Шашенко, Скобенко, Гапєєв, & Коновал, 2022 Sharoval, Pavluchenko, Shuminsky, Skobenko, & Barsukova, 2023) аналітичні залежності трансформовано до зручного для практичного застосування виду.

3. Значно спрощено процедуру визначення нижньої границі стисненої товщі основ насипів та гребель із ґрунтових матеріалів.

4. До потреб вирішення задачі про визначення осідань основ дамб, гребель та насипів із ґрунтових матеріалів адаптовано процедури ураховання таких факторів:

- зважуючого тиску води;
- наявності в основі водоупору;
- відмінності питомої ваги ядра та обваловки греблі або насипу.

Наукова новизна та практична значимість

Встановлено, що вертикальне нормальне напруження на довільній глибині та на довільній вертикалі у пружній напівплощині, до верхньої границі якої прикладено довільне навантаження у формі трапеції, не перевищує аналогічних на вертикалі, що проходить через центр навантаження яке має вигляд рівнобічної трапеції, якщо її характерні розміри (тобто верхня, нижня сторони та висота) співпадають з аналогічними розмірами довільної трапеції.

З практичної точки зору отримані нами результати дозволяють розрахунковим шляхом визначити такі необхідні для розрахунку, проектування, будівництва, економіки та експлуатації гребель, дамб та насипів із ґрунтових матеріалів характеристики, а саме:

- нижню границю стисненої товщини основи;
- осідання основи в межах і за межами завантаженої області (тобто в межах і за межами підшови греблі, дамби або насипу);
- профіль осідань основи насипу, греблі (або дамби) із ґрунтових матеріалів;
- середнє осідання насипу греблі (або дамби);
- додатковий обсяг матеріалу, необхідного для забезпечення проектного профілю насипу, греблі (або дамби) при їх осіданні в період будівництва та експлуатації споруд на слабких ґрунтах (це важливо для визначення фактичного об'єму та вартості необхідного для будівництва матеріалу а також тривалості будівництва).

Висновки

В статті викладено результати комплексу досліджень, направлених на розробку державних будівельних норм «ДСТУ ХХХХ:202Х: Греблі з ґрунтових матеріалів».

Вирішено науково-технічну проблему з адаптації теоретичного розв'язання задачі про напружено – деформований стан пружного напівпростору до верхньої границі якої прикладене вертикальне трапецеїдальне навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Clough, R. W., & Woodward, R. J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of*

the Soil Mechanics and Foundations Division, 93(4), 4529-549. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.00010>

Gikas, V., & Sakellario, M. (2008). Horizontal deflection Analysis of a large earth dam using geodetic and geotechnical methods. *13th FIGinternational symposium on deformation measurements and analysis and 4th IAG symposium on geodesy for geotechnical and structural engineering*. Portuguese, Lisbon, 27-81.

Karoui, H., & Bouassida, M. (2016). Assessment of observed behavior of Sidi El Barrak Dam (Tunisia). *Innovative Infrastructure Solutions*, 1, 34-44.

Luo, J., Zhang, Q., Liang, L., & Xiang, W. (2018). Monitoring and characterizing the deformation of an earth dam in Guangxi Province, China. *Engineering Geology*, 248, 50-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.11.007>

Shapoval, V. H., Pavluchenko, A. V., Shuminsky, V. D., Skobenko, O. V., & Barsukova, S. O. (2023). *Stressed-deformed state of dam foundation made of soil material with a trapezoidal transverse profile*. Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 212-227.

Shapoval, V., Shashenko, O., Skobenko, O., Konoval, V., & Shuminsky, V. (2024). Numerical methods in soil mechanics and geomechanics. *Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development: a collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch, 91-107.

ДБН В.2.1-10-2009 (2011). *Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДБН В.2.1-10-2018 (2018). *Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування*. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.

ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016 (2016). *Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення*.

ДСТУ ХХХХ:202Х (202Х). *Греблі з ґрунтових матеріалів. Загальні вимоги (на розгляді)*.

Шаповал, В., Шашенко, О., Скобенко, О., Гапєєв, С., & Коновал, В. (2022). Напружено-деформований стан основ гребель із ґрунтового матеріалу з трапецеїдальним поперечним профілем. *Scientific foundations for research in engineering: a collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch, 646-660.

Шаповал, В. Г., Шумінський, В. Д., Скобенко, О. В., & Кулівар, В. В. (2024). Розрахунок осідань основ гребель із ґрунтових матеріалів. *Матеріали регіональної науково-практичної конференції «До Всесвітнього дня води»*, 101-103.

V. H. SHAPOVAL¹, O. M. SHASHENKO², O. V. SKOBENKO^{3*},
V. D. SHUMINSKYI⁴, S. M. HAPIEIEV⁵

¹ Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornitskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 471 81 92, e-mail shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

² Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornitskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 587 62 60, e-mail al.shashenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7012-6157

^{3*} Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornitskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 451 79 73, e-mail skobenkoavn@gmail.com, ORCID 0009-0002-4509-7152

⁴ Laboratory of research of territories with dangerous geological processes, State Enterprise «The State Research Institute of Building Constructions», st. Preobrazhenska, 5/2, 03037, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (096) 617 55 70, e-mail shumikvd@gmail.com, ORCID 0000-0002-8751-1983

⁵ Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, D. Yavornitskoho Ave, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 362 04 47, e-mail hapieiev.s.m@nmu.one, ORCID 0000-0003-0203-7424

DETERMINATION OF SUBSIDENCE PROFILES OF THE RAILWAY AND HIGHWAY EMBANKMENTS FOUNDATIONS, DAMS AND LEVEES MADE OF SOIL MATERIALS

Purpose. Determination of foundations subsidence of railways, roads, and other embankments, as well as dams and levees made of soil materials during their design, construction, and operation, is mandatory. At the same time, if the foundation is composed of soils with a small modulus of general deformation (silt, peat, peaty, and similar soils), then not only the average subsidence and its unevenness should be determined, but also determine the profiles of subsidence outside the structures. This is because the subsidence of the foundation has the same order as the height of the embankment (dams, levees); therefore, when determining the additional volume of material required for the construction of an embankment (dams, levees), these deformations must be considered. The purpose of the article was to develop an algorithm for calculating the subsidence profiles of railways, roads, and other embankments, as well as dams and levees made of soil materials. **Methodology.** Theoretical studies of geomechanical processes using analytical and numerical mathematical methods. Analysis and generalization of theoretical research results. **Findings.** An algorithm is proposed that allows using simple analytical dependencies to determine those necessary for calculation and design, construction and operation parameters of the system "soil base of dams (levees) and embankments made of soil materials with a trapezoidal cross-section and a rigid core": – the lower limit of the compressed stratum; – subsidence of the foundation within the sole of the base of the dam, levees, or embankment. **Originality.** It is established that the foundation subsidence on the vertical passing through the center of the dam, levees, or embankment with a symmetrical profile is not less than the subsidence on the calculated verticals passing through any point of the dam, levees, or embankment with an asymmetric profile. **Practical value.** The main practical result of the work is a more complete (compared to the current regulatory documents) consideration of the features of subsidence of the system "dam, levees (or embankment) made of soil materials – soil base" with a significant reduction in the number of calculations. The results we obtained allow us to determine those necessary for the calculation, design, construction, and operation of dams, levees and embankments made of soil materials characteristics.

Keywords: railways; soil base; soil embankments; trapezoidal cross-section; subsidence profiles

REFERENCES

- Clough, R. W., & Woodward, R. J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(4), 4529-549. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.00010> (in English)
- Gikas, V., & Sakellario, M. (2008). Horizontal deflection Analysis of a large earth dam using geodetic and geotechnical methods. *13th FIGinternational symposium on deformation measurements and analysis and 4th IAG symposium on geodesy for geotechnical and structural engineering. Portuguese, Lisbon*, 27-81. (in English)
- Karoui, H., & Bouassida, M. (2016). Assessment of observed behavior of Sidi El Barrak Dam (Tunisia). *Innovative Infrastructure Solutions*, 1, 34-44. (in English)
- Luo, J., Zhang, Q., Liang, L., & Xiang, W. (2018). Monitoring and characterizing the deformation of an earth dam in Guangxi Province, China. *Engineering Geology*, 248, 50-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.11.007> (in English)
- Shapoval, V. H., Pavluchenko, A. V., Shuminsky, V. D., Skobenko, O. V., & Barsukova, S. O. (2023). *Stressed-*

deformed state of dam foundation made of soil material with a trapezoidal transverse profile. Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 212-227. (in English)

Shapoval, V., Shashenko, O., Skobenko, O., Konoval, V., & Shuminskyi, V. (2024). Numerical methods in soil mechanics and geomechanics. *Technical, agricultural and physical sciences as the main sciences of human development: a collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch, 91-107. (in English)

DBN V.2.1-10-2009 (2011). *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)

DBN V.2.1-10-2018 (2018). *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia*. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. (in Ukrainian)

DSTU-N B V.1.1-38:2016 (2016). *Nastanova shchodo inzhenerneho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia*. (in Ukrainian)

DSTU KhKhKhKh:202Kh (202Kh). *Hrebli z gruntovykh materialiv. Zahalni vymohy (na rozghliadi)*. (in Ukrainian)

Shapoval, V., Shashenko, O., Skobenko, O., Hapiciev, S., & Konoval, V. (2022). Napruzhenodeformovanyi stan osnov hrebel iz gruntovoho materialu z trapetseidalnym poperechnym profilem. *Scientific foundations for research in engineering: a collective monograph*. Boston: Primedia eLaunch, 646-660. (in Ukrainian)

Shapoval, V. H., Shuminskyi, V. D., Skobenko, O. V., & Kulivar, V. V. (2024). Rozrakhunok osidan osnov hrebel iz gruntovykh materialiv. *Materialy rehionalnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Do Vsesvitnoho dnia vody»*, 101-103. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 19.09.2024.

Прийнята до друку 07.10.2024.