

УДК 624.131.5:624.15

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-20-35

**РОЗРАХУНОК ВІДПІРНОЇ ЗДАТНОСТІ ДВОШАРОВОЇ ОСНОВИ
ПРИЧАЛЬНИХ СПОРУД ГРАВІТАЦІЙНОГО ТИПУ
З КАМ'ЯНОЮ ПОСТІЛЛЮ**

Н.Н. Хонелія

к.т.н., доцент, завідувач кафедри «Морське та цивільне будівництво і архітектура»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4323-0293>

khonelianatela@gmail.com

К.О. Лопатін

аспірант, кафедра «Морське та цивільне будівництво і архітектура»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0794-8366>

SLodessa80@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті розглядається методика розрахунку відпірної здатності двошарової ґрунтової основи причальних споруд гравітаційного типу, що влаштовуються на кам'яній постелі.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності оцінювання відпірної здатності ґрунтових основ для оцінки фактичного технічного стану зазначених споруд.

Запропонована методика базується на положеннях теорії граничного напруженого стану та враховує особливості взаємодії споруди з двошаровою ґрунтовою основою.

На відміну від існуючих методів, у розрахунковій схемі передбачено формування в ґрунтовій основі двох зон напруженого стану ґрунту – граничного та дограничного, що дозволяє більш адекватно описати реальні умови роботи ґрунтової основи під навантаженням.

Зручні практичні методи розрахунку відпірної здатності основи для випадків нашарувань ґрунтів з різними фізико-механічними характеристиками в межах зон граничного та дограничного напружених станів до теперішнього часу ще не розроблені, що зумовлює необхідність створення нових підходів і методик.

Особливу увагу приділено врахуванню тертя по контакту кам'яної постелі з ґрунтовою основою, яке істотно впливає на величину відпірної здатності та трансформацію зон граничного та дограничного напружених станів.

© Хонелія Н.Н., Лопатін К.О., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні, реконструкції та експлуатації причальних споруд гравітаційного типу, а саме при визначенні допустимих експлуатаційних навантажень і оцінці резервів їх несучої здатності.

Ключові слова: *відпірна здатність ґрунтової основи, причальні споруди гравітаційного типу, граничний та дограничний напружений стан ґрунту, двошарова ґрунтова основа.*

UDK 624.131.5:624.15

DOI 10.47049/2226-1893-2026-2-20-35

BEARING CAPACITY CALCULATION OF A TWO-LAYER SOIL BASE FOR GRAVITY-TYPE QUAY WALL WITH STONE BEDDING

Natela Khoneliia

PhD in Engineering, Associate Professor,
Head of the Department «Marine, civil engineering and architecture»
khonelianatela@gmail.com

Kostiantyn Lopatin

graduate student, the Department «Marine, civil engineering and architecture»
SLodessa80@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *The paper presents a method for calculating the bearing capacity of a two-layer soil base of gravity-type quay walls constructed on a stone bedding. The relevance of the study is determined by the need to improve the accuracy of evaluating the bearing capacity of soil bases for assessing the actual technical condition of the mentioned structures.*

The proposed method is based on the principles of limit stress state theory and takes into account the interaction between the structure and a two-layer soil base. In contrast to existing approaches, the computational scheme considers the formation of two stress-state zones in the soil base – limit and sublimit zones, which allows for a more adequate representation of the actual working conditions of the soil base under loading.

At present, convenient practical methods for calculating the bearing capacity of bases in layered soils with different physical and mechanical properties within limit and sublimit stress-state zones have not yet been developed, which necessitates the development of new approaches and methods.

Particular attention is given to the consideration of friction at the interface between the stone bedding and the soil base, which significantly affects the bearing capacity and the transformation of limit and sublimit stress-state zones.

The obtained results can be used in the design, reconstruction, and operation of gravity-type quay walls, particularly for determining allowable operational loads and assessing their bearing capacity reserves.

Keywords: *bearing capacity of soil base, gravity-type quay walls, limit and sublimit stress state of soil, two-layer soil base.*

Вступ. В умовах воєнного конфлікту на території України значна частина портової інфраструктури зазнала руйнувань і пошкоджень, що негативно вплинуло на функціонування транспортно-логістичної системи держави. Морські порти відіграють ключову роль у забезпеченні зовнішньоекономічної діяльності, транзитних перевезень та постачання стратегічно важливих галузей економіки. Порушення їх функціонування призводить до зниження пропускної спроможності транспортних коридорів, обмеження міжнародних торговельних зв'язків та ускладнення забезпечення критично важливих поставок.

Відновлення та технічне переоснащення морських портів розглядаються як один із пріоритетних напрямів забезпечення економічної стійкості та логістичної безпеки країни. Особливого значення при цьому набувають питання реконструкції причальних споруд, які є ключовими елементами портової інфраструктури.

Процеси відновлення та розвитку портової інфраструктури, а також збільшення пропускної спроможності морських портів визначаються сукупністю природних, економічних та інженерних чинників. До основних чинників належать характер і ступінь пошкоджень портових споруд, зміна експлуатаційних навантажень, можливе погіршення інженерно-геологічних умов, а також необхідність прискореного введення об'єктів в експлуатацію в умовах обмежених ресурсів. У таких умовах зростає роль науково обґрунтованих інженерних рішень, спрямованих на забезпечення надійності та довговічності портових споруд під час їх реконструкції та подальшій експлуатації.

Особливого значення в цих умовах набуває забезпечення надійності конструкцій, що взаємодіють із ґрунтовим середовищем, на всіх етапах проектування, розрахунку, реконструкції та експлуатації. Надійність таких споруд визначається їхньою здатністю виконувати функціональні завдання протягом розрахункового строку служби, а також протистояти дії зовнішніх навантажень.

Таким чином, відновлення портової інфраструктури морських портів є комплексним інженерно-науковим завданням, що потребує застосування сучасних методів розрахунку, проектування та оцінювання надійності споруд. Вирішення цього завдання формує основу забезпечення стійкого функціонування портів у короткостроковій перспективі та створює передумови їхнього подальшого розвитку у післявоєнний період.

В умовах збільшення розмірів суден, зміни вимог до глибин акваторій та портових операцій (комплексу заходів, спрямованих на підвищення ефективності

роботи порту, швидкості обробки суден та вантажів) причальні споруди гравітаційного типу найчастіше не відповідають сучасним експлуатаційним вимогам. У зв'язку з цим виникає необхідність їх реконструкції та модернізації. Одним із ключових заходів при реконструкції причальних споруд гравітаційного типу є виконання днопоглиблювальних робіт, спрямованих на забезпечення необхідних навігаційних глибин біля причальної лінії. Проте проведення таких робіт суттєво впливає на загальну стійкість споруди. При виборі раціональної схеми реконструкції причальної споруди гравітаційного типу ключовим етапом є оцінювання її загальної стійкості. Стійкість цих споруд значною мірою визначається роботою ґрунтової основи, що сприймає експлуатаційні навантаження, а також дією власної ваги конструкції та тиску ґрунту.

У зв'язку з цим обґрунтування схеми реконструкції має ґрунтуватися на визначенні несучої здатності ґрунтової основи або відпірного опору. Оцінка відпірної здатності ґрунтової основи дозволяє визначити максимальні навантаження, які вона здатна сприймати без ризику руйнування, втрати стійкості, надмірних осідань або деформацій. Таким чином, розрахунок відпірної здатності ґрунтової основи є необхідною умовою для вибору раціональної схеми реконструкції причалу гравітаційного типу та прийняття інженерно обґрунтованих проєктних рішень, що забезпечують надійність і безпеку подальшої експлуатації споруди.

Постановка проблеми. Фундаментальним методом для розрахунку несучої здатності основ є теорія граничної рівноваги ґрунтів, яка є однією з класичних і найбільш поширених для визначення несучої здатності ґрунтових основ шляхом встановлення максимального навантаження, при якому ґрунт переходить у стан руйнування. Вона базується на законі Кулона-Мора. При оцінюванні несучої здатності передбачається, що ґрунт у зоні підшви споруди переходить у граничний напружений стан – момент, коли напруження в ґрунті досягають значень, при яких виникають зони зсуву (ковзання). Методи граничної рівноваги широко застосовуються при розрахунках основ підпірних стін та причальних споруд гравітаційного типу, що відображено як у навчальній, так і в нормативній літературі [1-5].

До основних недоліків теорії граничної рівноваги належать необхідність задання форми поверхні ковзання та складність урахування неоднорідності та шаруватості ґрунтів. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях методи граничної рівноваги часто доповнюються чисельними підходами, зокрема методом скінченних елементів, що детально викладено в роботі [6].

Більшість існуючих методів розрахунку несучої здатності базується на припущенні про однорідний і ізотропний ґрунт основи. Насправді більшість природних основ є шаруватими, з горизонтальним чи похилим заляганням шарів,

що відрізняються міцнісними та деформаційними характеристиками. Водночас під впливом природних і техногенних чинників (підтоплення, штучне ущільнення тощо) однорідна основа може трансформуватися на дво- або багат шарову.

Традиційні однорідні моделі недооцінюють вплив параметрів нижнього шару ґрунту на несучу здатність основи, особливо за значної різниці в міцнісних характеристиках між шарами.

У роботі [7] на основі теорії Мейєргофа, з використанням методу аналізу граничної рівноваги та припущення про єдину логарифмічну спіральну поверхню ковзання, отримано формулу для визначення граничної несучої здатності шаруваті основи при шорсткій підшві стрічкового фундаменту, основа якого складається з верхнього шару. Проведено чисельне моделювання для дослідження впливу параметрів міцності двошарового ґрунту та товщини верхнього шару на несучу здатність основи.

У розвиток чисельних методів аналізу несучої здатності двошарових основ присвячено низку робіт [8-11], які спрямовані на встановлення впливу конст-руктивних і геотехнічних параметрів шаруватих ґрунтів на величину граничної несучої здатності основ, а також на аналіз напружено-деформованого стану та його впливу на формування зон руйнування.

Питання оцінювання несучої здатності ґрунтових основ є одним із ключових у сучасній геотехніці та залишається предметом активних наукових досліджень. Незважаючи на наявність класичних теоретичних підходів, складність реальних інженерно-геологічних умов, неоднорідність ґрунтових масивів і змінний характер навантажень зумовлюють необхідність подальшого розвитку методів аналізу несучої здатності основ.

Мета роботи полягає у розробленні методу розрахунку відпірної здатності двошарової ґрунтової основи причальних споруд гравітаційного типу на кам'яній постелі, який базується на теорії граничного напруженого стану, але, на відміну від інших наближених методів, враховує наявність у ґрунтовій основі двох зон напруженого стану ґрунту – граничного та дограничного, а також тертя на контакті кам'яної постелі та ґрунтової основи.

Виклад основного матеріалу. У роботі розглянуто випадок, коли постіль із кам'яної накидки виступає над вільною поверхнею зв'язної двошарової ґрунтової основи (рис. 1). У роботі [12] наведено рішення для випадку залягання в основі однорідного зв'язного ґрунту. Окремі передумови для розрахунку відпірної здатності однорідної ґрунтової основи застосовані для випадку наявності кам'яної постелі та двошарової ґрунтової основи. На основі зазначених передумов отримано розрахункові формули для визначення відпірної здатності ґрунтової основи при змішаній постановці задачі (з урахуванням граничного та дограничного напружених станів в основі). Значення відпірної здатності для зони граничного напру-

женого стану та відповідні параметри позначені індексом «е», для зони дограничного напруженого стану – штрихом.

За відсутності навантаження над ділянкою ЕД кут нахилу до горизонталі лінії ковзання $D_2'D$ становить $45^\circ - \varphi_{1e}/2$, до горизонталі лінії ковзання $D_1'D$ складає $45^\circ - \varphi_1'/2$, кут нахилу до горизонталі лінії ковзання C_1D_2' складає $45^\circ - \varphi_{2e}/2$, а до горизонталі лінії ковзання $C_1'D_1'$ складає $45^\circ - \varphi_2'/2$. Враховуючи шаруватість основи, кути відхилення рівнодіючих реактивних тисків масиву ґрунту $R_{1e}, R_{2e}, R_{3e}, R_{4e}, R_1', R_2', R_3', R_4'}$ по поверхні ковзання від нормалі до меж зон граничного та дограничного напружених станів першого та другого шарів ґрунтової основи визначаються параметрами $\varphi_{1e}, \varphi_1', \varphi_{2e}, \varphi_2'$. При цьому кути φ_1', φ_2' визначаються відповідно до виразів $\varphi_1' = \varphi_o + n_1(\varphi_{1e} - \varphi_{o1})$, $\varphi_2' = \varphi_o + n_2(\varphi_{2e} - \varphi_{o2})$, де $\varphi_{o1}, \varphi_{o2}$ – значення кутів внутрішнього тертя у стані спокою, які можуть бути прийняті відповідно до рекомендацій роботи [12].

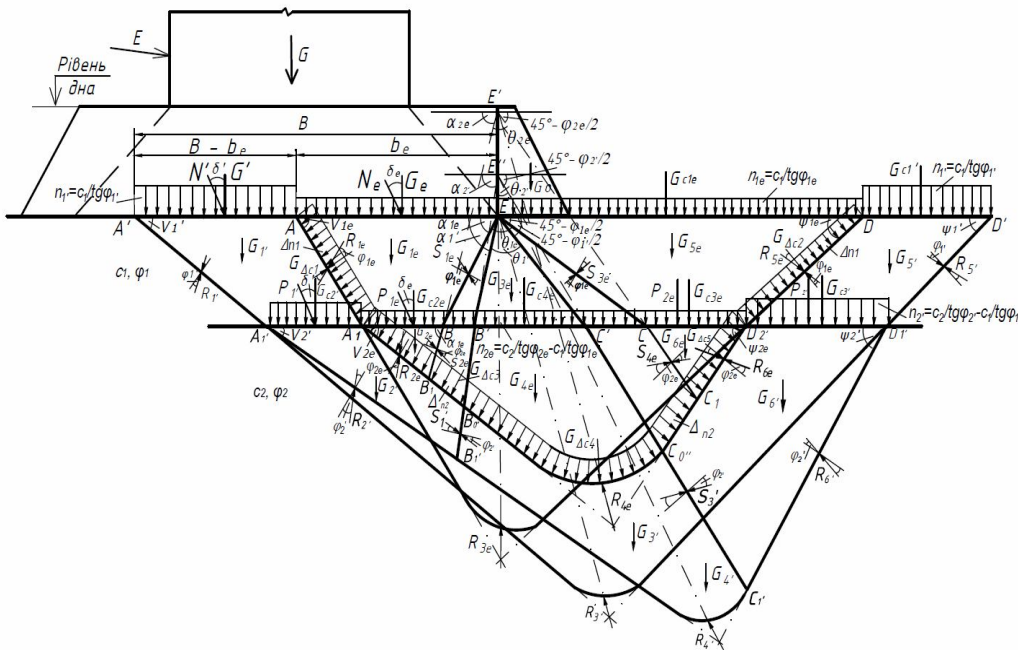


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення відірної здатності двошарової ґрунтової основи

Параметри n_1, n_2 , що залежать від співвідношення розмірів зон граничного та дограничного напружених станів першого та другого шару ґрунтової основи визначаються залежностями: $n_1 = V_{e1}/V_1$, $n_2 = V_{e2}/V_2$, де V_{e1} , V_{e2} , V_1 , V_2 – відповідно обсяги призм ґрунту, що перебувають у граничному стані, та всього ґрунтового масиву, які встановлюються з геометричних міркувань.

За наявності привантаження від кам'яної постелі G_0 слід визначити кути нахилу Ψ_{1e} лінії ковзання $D_2'D$, Ψ_{1e}' лінії ковзання $D_1'D'$, Ψ_{2e} лінії ковзання C_1D_2' і Ψ_{2e}' лінії ковзання $C_1'D_1'$ що відповідають найбільш невигідному випадку, який забезпечує мінімальне значення відпірної здатності основи N . Рівнодіюча відпірної здатності ґрунту N визначається як векторна сума двох складових: граничної N_e , що діє на ділянці b_e , і дограничної N' , що діє на ділянці шириною $B - b_e$, відповідно до рекомендацій [12].

Дослідження питання визначення кута Ψ_e для випадку однорідного ґрунту коли весь ґрунт основи переходить у стан граничної рівноваги розглянуто у роботах [13; 14]. Розроблене рішення щодо визначення цього кута застосовано для випадку двошарової основи з урахуванням зон граничного та дограничного напружених станів ґрунту.

Для визначення меж зон граничного та дограничного напружених станів ґрунтової основи відповідно до рекомендацій [13] виконано заміну трапецеїдальної епюри під кам'яною постіллю шириною b та інтенсивністю $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ на розрахункову рівномірну епюру шириною B і тиском σ (рис. 2). Центри тяжіння обох епюр повинні розташовуватися на одній вертикалі.

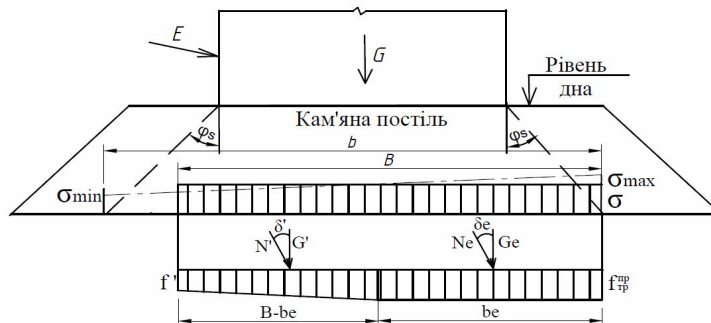


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення ширини зон граничного та дограничного напружених станів ґрунтової основи у випадку наявності кам'яної постелі

Використовуючи ці умови, можна отримати вирази

$$B = \frac{2 \cdot b \cdot (\sigma_{\max} + 2 \cdot \sigma_{\min})}{3 \cdot (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{b \cdot (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2 \cdot B} \quad (2)$$

Ширина b_e зони контакту ґрунту, що знаходиться в граничному напруженому стані визначається відповідно до виразу

$$b_e = \frac{E - 0.5 \cdot B \cdot (f' + f_{cp}^{mp})}{2 \cdot (f_{cp}^{mp} - f')} \quad (3)$$

де b_e – ширина зони контакту ґрунтової основи та кам'яної постелі, що перебуває у граничному напруженому стані;

B – ширина, на яку передається тиск від споруди на кам'яну постіль;

f_{cp}^{mp} – інтенсивність сил тертя по контакту кам'яної постелі та ґрунтової основи в межах зони граничного напруженого стану;

f' – інтенсивність сил тертя по контакту кам'яної постелі та ґрунтової основи в межах зони дограничного напруженого стану.

Кути відхилення складових N_e та N' (рис. 2) приймаються рівними: для зони граничного напруженого стану шириною b_e відповідно δ_e ; для зони дограничного напруженого стану шириною $B - b_e$ відповідно δ' . Кути δ' , δ_e можуть бути визначені згідно з рекомендаціями [12].

Зв'язність ґрунту можна врахувати шляхом прикладання на поверхні першого шару ґрунту в межах зони граничного напруженого стану фіктивного рівномірно розподіленого навантаження інтенсивністю $n_{1e} = c_1 / \operatorname{tg} \varphi_{1e}$, в межах зони дограничного напруженого стану – інтенсивністю $n_1' = c_1 / \operatorname{tg} \varphi_1'$ (рис 1). Рівнодійні зазначених рівномірно розподілених навантажень у першому випадку становлять G_{cle} , у другому – G_{c1}' . При цьому слід враховувати тиск зв'язності на межі зон граничного та дограничного напруженого стану, що визначається за формулою

$$\Delta n_1 = c_1 \cdot \operatorname{ctg} (\varphi_1' - \varphi_{1e}) .$$

При підрахунку сил G_1' і G_5' слід враховувати рівнодіючі навантаження $G_{\Delta c1} = \Delta n_1 \cdot AA_1$ і $G_{\Delta c1} = \Delta n_1 \cdot DD_2'$ на межі зон граничного та дограничного напруженого стану верхнього шару ґрунту. При обчисленні сил G_5' і G_{5e}' , окрім ваги ґрунту в обсягах відповідних зон $DD_1'D_2'$ і $EDD_2'C$, необхідно враховувати також сили G_{cle} і G_{cl}' інтенсивністю $n_{1e} = c_1 / \operatorname{tg} \varphi_e$ і $n_1' = c_1 / \operatorname{tg} \varphi_1'$. Тоді $G_{cle} = n_{1e} \cdot ED$, $G_{cl}' = n_1' \cdot DD'$.

При двошаровій основі слід враховувати тиск зв'язності на межі шарів. У межах зони граничного напруженого стану враховується тиск зв'язності інтенсивністю $n_{2e} = c_2 / \operatorname{tg} \varphi_{2e} - c_1 / \operatorname{tg} \varphi_{1e}$, у межах зони дограничного напруженого стану – інтенсивністю $n_2' = c_2 / \operatorname{tg} \varphi_2' - c_1 / \operatorname{tg} \varphi_1'$. Якщо $c_2 > c_1$, то сили $G_{c2}', G_{c2e}, G_{c3e}, G_{c4e}, G_{c3}'$ є позитивними величинами і спрямовані зверху вниз. Якщо $c_2 < c_1$, вони спрямовані знизу вгору, тобто буде зі знаком «мінус».

При цьому слід враховувати приріст тиску зв'язності Δn_2 на межі зон граничного та дограничного напруженого стану нижнього шару ґрунту, що визначається за формулою $\Delta n_2 = c_2 \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_2' - \varphi_{2e})$. При визначенні сил G_2', G_3' і G_6' слід враховувати рівнодіючі навантаження $G_{\Delta c3} = \Delta n_2 \cdot A_1 B_o''$, $G_{\Delta c4} = \Delta n_2 \cdot B_o'' C_o''$ і $G_{\Delta c5} = \Delta n_2 \cdot C_o'' D_2'$ на межі зон граничного та дограничного напруженого стану нижнього шару ґрунту.

При визначенні сил $G_2', G_{2e}, G_{4e}, G_{6e}, G_6'$ слід враховувати, що, крім ваги ґрунту, діють також рівнодіючі навантаження інтенсивністю $n_{2e} = c_2 / \operatorname{tg} \varphi_{2e} - c_1 / \operatorname{tg} \varphi_{1e}$ і $n_2' = c_2 / \operatorname{tg} \varphi_2' - c_1 / \operatorname{tg} \varphi_1'$. Тоді $G_{c2}' = n_2' \cdot A_1 A_1$, $G_{c2e} = n_{2e} \cdot A_1 B$, $G_{c4e} = n_{2e} \cdot BC$, $G_{c3e} = n_{2e} \cdot CD_2'$ та $G_{c3}' = n_2' \cdot D_2' D_1'$.

Для ґрунту на всіх майданчиках паралельних AE і $A'A$, у тому числі і на граничних майданчиках $A_1'A_1$ та A_1B , тиск відхиляється від нормалі на кути δ_e та δ' .

Для визначення складових N_e і N' , що діють під кутами δ_e і δ' , послідовно розглядаються умови рівноваги кожної із зон напруженого стану двошарового ґрунту основи з урахуванням їх силової взаємодії. Розв'язання задачі полягає у встановленні об'ємної поверхні ковзання та встановлення розмірів зон мінімального, максимального та проміжного напружених станів.

Зона граничного напруженого стану.

Формули для обчислення складових ваги розглянутої призми, обумовлені дією сил тяжіння ґрунту в межах цієї призми, наведено нижче.

З умови рівноваги призми ґрунту $AEBA_1$ визначається вага ґрунту G_{1e}

$$G_{1e} = \left(\frac{AE + A_1B}{2} \right) \cdot h_1 \cdot \gamma_1. \quad (4)$$

З умови рівноваги призми ґрунту A_1BB_1 визначається вага ґрунту G_{2e}

$$G_{2e} = \frac{1}{2} \cdot A_1B \cdot BB_1 \cdot \sin \alpha_{2e} \cdot \gamma_2 + n_{2e} \cdot A_1B. \quad (5)$$

З умови рівноваги призми ґрунту $EDD_2'C$ визначається вага ґрунту G_{5e}

$$G_{5e} = \left(\frac{ED + CD_2'}{2} \right) \cdot h_1 \cdot \gamma_1 + n_{1e} \cdot ED. \quad (6)$$

З умови рівноваги призми ґрунту $CD_2'C_1$ визначається вага ґрунту G_{6e}

$$G_{6e} = \frac{1}{2} \cdot CC_1 \cdot C_1D_2' \cdot \sin(90 + \phi_{2e}) \cdot \gamma_2 + n_{2e} \cdot CD_2'. \quad (7)$$

З умови рівноваги призми ґрунту EBC визначається вага ґрунту G_{3e}

$$G_{3e} = \frac{(EC)^2 - (EB)^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_{1e}} \cdot \gamma_1. \quad (8)$$

З умови рівноваги призми ґрунту BCC_1B_1 визначається вага ґрунту G_{4e}

$$G_{4e} = (S_{4e}' - S_{3e} - S_{4e1}' - S_{4e2}') \cdot \gamma_2 + n_{2e} \cdot BC; \quad (9)$$

$$S_{4e}' = \frac{(E'C_1)^2 - (E'B_1)^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_{2e}}; \quad (10)$$

$$S_{3e} = \frac{(EC)^2 - (EB)^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_{1e}}; \quad (11)$$

$$S'_{4e1} = \frac{1}{2} \cdot E' B \cdot EB \cdot \sin(\alpha_{2e} - \alpha_{1e}); \quad (12)$$

$$S'_{4e2} = \frac{1}{2} \cdot EC \cdot E' C \cdot \sin(\phi_{1e/2} - \phi_{2e/2}). \quad (13)$$

З умови рівноваги граничних призм можна отримати всі необхідні розрахункові залежності для визначення граничної складової Ne та реакцій з боку нижчерозташованих призм ґрунту, що перебувають у дограничному стані $R_{1e}, R_{2e}, R_{3e}, R_{4e}, R_{5e}, R_{6e}$.

Зона дограничного напруженого стану ґрунту.

Розглядаючи вагу дограничних призм кожного шару ґрунту як різницю між загальною вагою шару та вагою граничних призм, після нескладних перетворень можна отримати формули для визначення ваги дограничних призм, зумовленої дією сил тяжіння ґрунту.

З умови рівноваги призми ґрунту $A'AA_1 A'_1$ визначаємо вагу ґрунту G_1'

$$G_1' = G_1 - G_{1e}'; \quad (14)$$

$$G_{1e}' = \left(\frac{AE + A_1 B'}{2} \right) \cdot h_1 \cdot \gamma_1; \quad (15)$$

$$G_1 = \left(\frac{A'E + A'_1 B'}{2} \right) \cdot h_1 \cdot \gamma_1. \quad (16)$$

З умови рівноваги призми ґрунту $A'_1 A_1 B''_0 B'_1$ визначаємо вагу ґрунту G_2'

$$G_2' = G_2 - G_{2e}' + n_2' \cdot A'_1 A_1; \quad (17)$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \cdot A'_1 \cdot B' B' B'_1 \cdot \sin \alpha'_2 \cdot \gamma_2; \quad (18)$$

$$G_{2e}' = \frac{\sin \alpha'_2 \cdot \gamma_2}{2} (A'_1 B' \cdot B' B'_1 - A_1 B' \cdot B' B''_0). \quad (19)$$

З умови рівноваги призми ґрунту $B''_0 B'_1 C'_1 C''_0$ визначаємо вагу ґрунту G_3^I

$$G_3^I = (S_3 - S_{3e}^I) \cdot \gamma_2 + \Delta G_1 + \Delta G_{1e} + \Delta G_2 + \Delta G_{2e}; \quad (20)$$

$$S_3 = \frac{(E^{\parallel}C_1^{\perp})^2 - (E^{\parallel}B_1^{\perp})^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_2^{\perp}}; \quad (21)$$

$$S_{3e}^{\perp} = \frac{(E^{\parallel}C_0^{\parallel})^2 - (E^{\parallel}B_0^{\parallel})^2}{4 \cdot \operatorname{tg} \phi_2^{\perp}}; \quad (22)$$

$$\Delta G_1 = G_{AEB^{\perp}A_1} - G_{AEB A_1}; \quad (23)$$

$$\Delta G_{1e} = G_{EDD_1C^{\perp}} - G_{EDD_1C}; \quad (24)$$

$$\Delta G_2 = G_{A_1B^{\perp}B_0^{\parallel}} - G_{A_1BB_1}; \quad (25)$$

$$\Delta G_{2e} = G_{C^{\perp}D_1C_0^{\parallel}} - G_{CD_1C_1}. \quad (26)$$

З умови рівноваги призми ґрунту $DD'D_1D_2'$ визначаємо вагу ґрунту G_5'

$$G_5' = (G_5 - G_{5e}') + n_1' \cdot DD'; \quad (27)$$

$$G_5 = \left(\frac{ED' + C'D_1'}{2} \right) \cdot h_1 \cdot \gamma_1; \quad (28)$$

$$G_{5e}' = \left(\frac{ED + C'D_1}{2} \right) \cdot h_1 \cdot \gamma_1. \quad (29)$$

З умови рівноваги призми ґрунту $Co''D_2'D_1'C_1'$ визначаємо вагу ґрунту G_6'

$$G_6^{\perp} = (G_6 - G_{6e}^{\perp}) + n_2^{\perp} \cdot \overline{D_1D_1'} \quad (30)$$

$$G_6 = \frac{1}{2} C^{\perp} C_1^{\perp} \cdot C_1^{\perp} D_1^{\perp} \cdot \sin(90 + \phi_2^{\perp}) \cdot \gamma_2 \quad (31)$$

$$G_{6e}^{\perp} = \frac{1}{2} \cdot C^{\perp} C_0^{\parallel} \cdot C_0^{\parallel} D_1 \cdot \sin(90 + \frac{\phi_2^{\perp}}{2} + \frac{\phi_{2e}}{2}) \cdot \gamma_2 \quad (32)$$

Замінюючи дію вищерозташованих призм ґрунту, що перебувають у граничному напруженому стані, відповідними реакціями R_{1e} , R_{2e} , R_{3e} , R_{4e} , R_{5e} ,

R_{6e} , з умови рівноваги дограничних призм можна отримати всі необхідні розрахункові залежності для визначення дограничної складової відпірної здатності ґрунтової основи.

Для використання отриманих розрахункових залежностей необхідно знати величини кутів ϕ'_1, ϕ'_2 і δ' , тобто визначити параметри n_1 і n_2 , які залежать від співвідношення розмірів зон граничного та дограничного напружених станів ґрунту. Розміри цих зон залежать від зростання інтенсивності рівномірно розподіленого навантаження q та значення бічного тиску ґрунту засипки. Збільшення рівномірно розподіленого навантаження q призводить до зростання активного тиску ґрунту засипки та трансформації областей граничного і дограничного напружених станів ґрунтової основи, що супроводжується збільшенням розмірів перших і зменшенням розмірів других.

Параметри n_1 і n_2 прийнято залежними від співвідношення розмірів зон із різним напруженим станом

$$n_1 = \frac{V_{1e} + V_{3e} + V_{5e}}{V_{1e} + V_{3e} + V_{5e} + V'_1 + V'_3 + V'_5} \quad (33)$$

$$n_2 = \frac{V_{2e} + V_{4e} + V_{6e}}{V_{2e} + V_{4e} + V_{6e} + V'_2 + V'_4 + V'_6}, \quad (34)$$

де $V_{1e}, V_{2e}, V_{3e}, V_{4e}, V_{5e}, V_{6e}$ – обсяги призм ґрунту, що знаходиться в граничному напруженому стані;

$V'_1, V'_2, V'_3, V'_4, V'_5, V'_6$ – обсяги призм ґрунту, що перебуває у дограничному напруженому стані.

Для розв'язання поставленої задачі з визначення відпірної здатності двошарової ґрунтової основи при змішаній постановці необхідно визначити:

- навантаження від бічного тиску ґрунту, зростання якого призводить до формування зон граничного напруженого стану, зменшення розмірів зон дограничного напруженого стану та зміни конфігурації поверхонь ковзання;

- сили тертя, що відповідають станам граничної f_{cp}^{mp} та дограничної f' рівноваги ґрунту;

- ширину зони контакту ґрунтової основи з підшвою кам'яної постелі be , яка перебуває у граничному напруженому стані;

- трансформацію областей граничного та дограничного напружених станів для кожного шара ґрунтової основи;

- складові відпірної здатності ґрунтової основи N_e, N' ;

- рівнодійну відпірної здатності двошарової ґрунтової основи N .

Висновки. Теоретичний аналіз наукових джерел свідчить, що проблема визначення відпірної здатності ґрунтових основ досліджувалася достатньо широко. Водночас низка важливих питань, пов'язаних із визначенням відпірної здатності в умовах зміни кута внутрішнього тертя в товщі основи (зокрема за наявності кам'яної постелі в причальних спорудах або прошарків ґрунту з іншими характеристиками), залишається недостатньо вивченою. Практично відсутні дослідження, у яких комплексно враховується формування та трансформація зон граничного і дограничного напруженого стану ґрунтової основи, що взаємодіє з підшовною споруди. Наявні окремі експериментальні роботи свідчать, що відпірна здатність основи визначається не лише міцнісними характеристиками ґрунту, а й параметрами, що описують його поведінку в дограничному стані.

Проведений аналіз дозволяє виділити перспективні напрями подальших досліджень, зокрема: урахування шаруватості основи; наявності кам'яної постелі під спорудою; формування в основі двох зон напруженого стану (граничного та дограничного); урахування сил тертя на контакті кам'яної постелі та ґрунтової основи (при визначенні меж зазначених зон); а також урахування тиску зв'язності на межах зон граничного та дограничного напружених станів ґрунтової основи.

Таким чином, аналіз досліджень, присвячених визначенню відпірної здатності двошарових основ, показує, що коли шари мають різні фізико-механічні характеристики, розв'язання задачі істотно ускладнюється, оскільки зміна кута внутрішнього тертя впливає на форму поверхонь ковзання. У таких умовах необхідно розглядати рівновагу кожного шару ґрунту в межах зон граничного та дограничного напружених станів з використанням приведених тисків на поверхні основи, а також на межах шарів і зон.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням рішень для випадків частково або повністю заглибленої кам'яної постелі причальних споруд гравітаційного типу за довільної кількості шарів ґрунту з різними фізико-механічними характеристиками. Отримані результати відкривають можливості для чисельного розв'язання прикладних задач у проєктній практиці при оцінюванні відпірної здатності ґрунтових основ у складних інженерно-геологічних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ВСН 3-80. Інструкція по проєктуванню морських причальних споруд. Чинний від 01.07.1980. Вид. офіц.: Проєктно-вишукувальний і науково-дослідний інститут морського транспорту «Союзмордипроєкт», 1980. 132 с.
2. Шутенко Л.М., Рудь О.Г., Кічаєва О.В. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 563 с.

3. Bowle P. E., Bowle S.E. Foundation Analysis and Design. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 1168 p.
4. Braja M. Das, Nagaratnam Sivakugan. Principles of Foundation Engineering. 9th ed. Stamford: Cengage Learning, 2018. 944 p.
5. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Чинний від 01.01.2019. Вид. офіц. Київ: ДП НДІБК, 2019.
6. СНиП 2.02.02-85*. Основи гідротехнічних споруд. Чинний від 01.01.1987.
7. David M Potts, Lidija Zdravkovic, Lidija Zdravkovic. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. London: Thomas Telford, 2001, 427 p.
8. Liu G., Liu C. Derivation of the Ultimate Bearing Capacity Formula for Layered Foundations Based on Meyerhof's Theory. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 12. Art. 5121. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125121>
9. Khan S., Khan A., Majeed N., Khan N., Mandokhail S. J. Effect of Shallow Foundation Size on Bearing Capacity of Layered Soil: 3D Numerical Simulations. *Construction Technologies and Architecture*. 2025. Vol. 17. P. 249-254. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-0v8ZUi>
10. Chen H., Wang L., Tian Y., Qi C. Probabilistic bearing capacities of strip foundation on two-layered clay. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 269 (4). Art. 113572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113572>
11. Michalowski R.L., Shi L. Bearing Capacity of Footings over Two-Layer Foundation Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1995. Vol. 121, no. 5. P. 421-428. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:5\(421\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:5(421))
12. Khoneliia N., Bugaeva S. The reactive capacity of the soil bases of gravity-type quay wall. *World Science*. 9(49), Vol.1. DOI: 10.31435/rsglobal_ws/30092019/6696. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092019/6696
13. Яковлев П.И., Бибічков А.Г., Бибічков А.А. Взаємодія споруд із ґрунтом. М.: Недра, 1997. 464 с.
14. Яковлев П.И. Технічна теорія граничного напруженого стану ґрунтового середовища: монографія. Одеса: Астропрінт, 2008. 232 с.

REFERENCES

1. VSN 3-80. (1980). *Instruction for the design of marine berthing structures* (effective from July 1, 1980). Soyuzmorniiproekt. (in Russian).
2. Shutenko, L. M., Rud, O. H., Kichaieva, O. V. (2017). *Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenti* [Soil mechanics, bases and foundations]. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. (in Ukrainian)

3. Bowles, J.E. (1995). *Foundation Analysis and Design*. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
4. Das, Braja M., Sivakugan, Nagaratnam. (2018). *Principles of foundation engineering* (9th ed.). Stamford: Cengage Learning.
5. DBN V.2.1-10:2018. (2019). *Foundations of buildings and structures. Basic provisions* (effective from January 1, 2019). Kyiv: DP NDIBK (in Ukrainian)
6. SNiP 2.02.02-85*. (1987). *Foundations of hydraulic structures* (effective from January 1, 1987). Soyuzmorniiproekt (in Russian).
7. Potts, D.M., Zdravković, L. (2001). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. London: Thomas Telford.
8. Liu, G., Liu, C. (2024). Derivation of the Ultimate Bearing Capacity Formula for Layered Foundations Based on Meyerhof's Theory. *Applied Sciences*, 14(12):5121. <https://doi.org/10.3390/app14125121>
9. Khan, S., Khan, A., Majeed, N., Khan, N., Mandokhail, S.J. (2025). Effect of Shallow Foundation Size on Bearing Capacity of Layered Soil: 3D Numerical Simulations. *Construction Technologies and Architecture*, 17, 249 – 254. <https://doi.org/10.4028/p-0v8ZUi>
10. Chen, H., Wang, L., Tian, Y., Qi, C. (2023). Probabilistic bearing capacities of strip foundation on two-layered clay. *Ocean Engineering*, 269 (4): 113572. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113572>
11. Michalowski, R.L., Shi, L. (1995). Bearing Capacity of Footings over Two-Layer Foundation Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 421 – 428. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:5\(421\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:5(421))
12. Khoneliia, N., Bugaeva, S. (2019). The reactive capacity of the soil bases of gravity-type quay wall. *World Science*, 1(9(49), 16 – 19. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092019/6696
13. Yakovliev, P.I., Bibichkov, A.H., Bibichkov, A.A. (1997). *Vzaimodeistvie sooruzhenii s gruntom* [Interaction of structures with soil]. M: Nedra (in Russian)
14. Yakovliev, P.I. (2008). *Tekhnicheskaya teoriya granichnogo napryazhennogo sostoyaniya gruntovogo sredy* [Technical theory of the limit stress state of soil base]. Odesa: Astroprint. (in Russian)

Дата надходження статті: 10.06.2026

Дата прийняття статті: 12.06.2026

Дата публікації статті: 16.06.2026