

УДК 669.017

## ДЕФОРМУВАННЯ ШАРУВАТОГО ҐРУНТУ

**І.В. Бельмас<sup>1</sup>,**

д-р техн. наук, професор

**А.І. Трикіло<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент

**О.І. Білоус<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент

**Г.І. Танцура<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент

**О.М. Фесан<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.125-131

Одним з багатьох наслідків російської військової агресії є локальна зміна механічних властивостей поверхневого шару ґрунту. Зведення споруд на таких ґрунтах можливо лише у випадку урахування в конструкції будівлі створеної їх шаруватої структури. Робота присвячена розробці методу визначення впливу відмінностей механічних властивостей шарів двошарового ґрунту за його навантаження силами взаємодії зі спорудою. Метод розроблено на засадах лінійної теорії пружності, а саме, на основі функції напружень Ері з невідомими довільними коефіцієнтами. Складові напружено-деформованих станів шарів подані як функції аргументами яких є функції напружень. Сформульовані умови впливу будівлі на поверхневий шар ґрунту. Врахована безмежна товщина основного шару ґрунту. На основі умов сумісності та нерозривності деформування шарів ґрунту сформульована система лінійних алгебраїчних рівнянь. Шляхом розв'язання системи визначені невідомі коефіцієнти функцій напружень, а відтак і напружено-деформований стан шаруватого ґрунту. Перераховане становить собою алгоритм визначення напружено-деформованого стану, включно і переміщення ґрунту під спорудою та комплексно враховує шарувату структуру, механічні властивості шарів ґрунту. Встановлені залежності максимальних деформацій поверхонь шарів під впливом споруди від механічних властивостей шарів ґрунту.

**Ключові слова:** двошарова ґрунтова основа споруди, функція напружень, механічні властивості, напруження, переміщення, деформації.

**Постановка проблеми.** З початком повномасштабного вторгнення РФ в Україні явище прогресуючого обвалення будівель та споруд набуло масового характеру [1]. Рештки споруд зумовлених їх руйнацією, застосування вибухових речовин в процесі військових дій локально спричинило утворення на поверхні ґрунту шару з відмінними механічними властивостями. Вплив шаруватої структури на параметри жорсткості системи показано в статті [2]. Встановлення механізму деформування шаруватого ґрунту з відмінними механічними їх властивостями за дією зовнішнього навантаження актуальна задача. Її розв'язання дозволить враховувати характер деформування поверхні ґрунту як двошарової структури під дією зовнішнього навантаження в процесі проектування споруд зведених на таких ґрунтах що дозволить забезпечити достатній рівень їх надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням взаємодії ґрунту та споруди присвячена значна кількість робіт. Серед останніх робіт відзначимо наступні. Чисельним методом [3] досліджено спроможність стрічкових однорядних пальових фундаментів сприймати зовнішнє навантаження. В статті [4] встановлені залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції. В роботі [5] враховано вплив нелінійного деформування ґрунту на напружений стан встановлених на ньому конструкцій. В [6] досліджено деформації двошарових плит, балок на пружній основі Пастернака. З використанням узагальненої двопараметричної моделі в [7] досліджено основні закономірності деформації нескінченного в'язку пружного шару на жорсткій основі під дією зосереджених навантажень. На основі двопараметричного параболічного критерію текучості Мора у [8] побудовано поле допустимих статичних напружень

під стрічковим фундаментом та запропоновано методику розрахунку нижньої межі здатності фундаменту сприймати навантаження. В роботі [9], методом кінцевих різниць, отримано ряд чисельних даних для оцінки здатності стрічкових, круглих і квадратних фундаментів сприймати зовнішнє навантаження за м'яких порід. Запропоновано, під час проведення реконструкцій будівель враховувати значення розрахункового опору ґрунту визначеного на основі аналізу декількох методик. В [10] запропоновано враховувати фізико-механічні властивостей ґрунту відібраного з під подошви фундаменту. На важливість забезпечення умов експлуатації будівель і споруд на мало жорстких ґрунтах шляхом урахування типу ґрунтів за їх деформуванням наголошено в дослідженні [11]. В статті [12], в програмному середовищі PLAXIS 3D, для масиву ґрунту призматичної форми побудована модель стрічкового пальового фундаменту навантаженого вертикальним зусиллям. В дослідженні [13] числовими методами побудована дискретна модель. В ній використана ідея Пуассона подачі складної моделі окремими її складовими. В роботі [14], на підставі фізичного моделювання, досліджена сумісна робота паль та низького ростверку. В монографії [15] наведені результати теоретичних досліджень осідань та спроможності сприймати навантаження пальових, плитних фундаментів за їх взаємодії з ґрунтом. В статті [16] досліджено вплив обраної моделі ґрунтового середовища на точність визначення напружено-деформованого стану пальового фундаменту.

Аналіз відомих досліджень показав що шарувата структура ґрунту не враховується в роботах пов'язаних з навантаженнями фундаментів споруд.

Формулювання мети статті. В межах задачі плоского деформування, з використанням методів лінійної теорії пружності, розробити алгоритм визначення та основні закономірності напружено-деформованого стану (НДС) двошарового ґрунту локально навантаженого нормальною, довільно розподіленою силою.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо фундамент та ґрунт як двошаровий композит довжиною  $a$ . Висота першого шару ґрунту -  $H$ . Другого - безмежна. На поверхневий шар локально діє зовнішнє розподілене за довільним законом нормальне навантаження  $P$ .

Віднесемо шари ґрунту до прямокутної системи координат. Початок осі координат  $z$  розташуємо на зовнішній поверхні першого шару. Шари з'єднані поміж собою, знаходяться в рівновазі. Переміщення торців шарів не обмежені в напрямі осі  $z$ . Вони обмежені в переміщеннях в напрям осі  $x$ . Встановимо розподіл напружень в шарах та їх переміщення. Skorистаємося алгоритмом [17] визначення НДС шаруватих конструкцій. В межах задачі плоского деформування складові НДС довільного шару в прямокутній системі координат

$$u_x = -\frac{\mu_i + 1}{E} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z}, \quad u_z = \frac{\mu_i + 1}{E} \left( 2(1 - \mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, \quad X_x = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \varphi, \\ Z_z = \frac{\partial}{\partial z} \left( (2 - \mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, \quad Z_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( (1 - \mu) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi, \quad (1)$$

де  $\Delta^2(\dots) = \frac{\partial^2 \dots}{x^2} + \frac{\partial^2 \dots}{z^2}$ ;  $E$  – модуль пружності матеріалу.

Прийmemo що на середню частину поверхні першого шару довжиною  $b$  діє, рівномірно розподілене, нормальне навантаження. Задамо його рядом Фур'є

$$f(Z_z) = \sigma + \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon_m \cos(\rho_m x), \quad (2)$$

де  $\sigma$  – середнє розподілене навантаження шару;  $\varepsilon_m$  – коефіцієнти ряду Фур'є,

$$\varepsilon_m = \frac{2}{a} \int_{\frac{a-b}{2}}^{\frac{a+b}{2}} \cos(\rho_m x) dx.$$

Відсутність дотичного навантаження поверхневого шару задамо умовою

$$\text{коли } z=0 \quad X_{1,z} = 0. \quad (3)$$

Номери шарів занесемо у нижні індекси величин яких вони стосуються. Врахуємо прийняту форму навантаження поверхневого шару (2). Для шарів ґрунту прийmemo наступні бігармонійні

функції напружень

$$\varphi_i = \sum_{m=1}^{\infty} \left( A_{i,m} e^{\rho_m z} + B_{i,m} e^{-\rho_m z} + C_{i,m} e^{\rho_m z} z + D_{i,m} e^{-\rho_m z} z \right) \cos(\rho_m x), \quad (4)$$

де  $m$  цілі натуральні числа;  $\rho_m = \pi m a^{-1}$ ;  $A_{i,m}$ ,  $B_{i,m}$ ,  $C_{i,m}$ ,  $D_{i,m}$  – вектори значень невідомих коефіцієнтів функцій напружень.

Обраним функціям напружень відповідають наступні значення складових НДС шарів ґрунту

$$\begin{aligned} u_{i,z} &= \frac{1 + \mu_i}{E_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &\left( A_{i,m} e^{\rho_m z} + B_{i,m} e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + \\ &+ C_{i,m} e^{\rho_m z} (4\mu_i + \rho_m z - 2) + \\ &+ D_{i,m} e^{-\rho_m z} (2 + \rho_m z - 4\mu_i) \end{aligned} \right) \rho_m \cos(\rho_m x), \\ u_{i,x} &= -\frac{1 + \mu_i}{E_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &\left( A_{i,m} e^{\rho_m z} - B_{i,m} e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + C_{i,m} e^{\rho_m z} \times \\ &\times (\rho_m z + 1) + D_{i,m} e^{-\rho_m z} (1 - \rho_m z) \end{aligned} \right) \rho_m \sin(\rho_m x), \\ Z_{i,z} &= -\sum_{m=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &\left( A_{i,m} e^{\rho_m z} - B_{i,m} e^{-\rho_m z} \right) \rho_m + C_{i,m} e^{\rho_m z} \times \\ &\times (2\mu_i - 1 + \rho_m z) + D_{i,m} e^{-\rho_m z} (2\mu_i - 1 - \rho_m z) \end{aligned} \right) \rho_m^2 \cos(\rho_m x), \\ X_{i,x} &= \sum_{m=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &\left( -A_{i,m} e^{\rho_m z} + B_{i,m} e^{-\rho_m z} \right) \rho_m - C_{i,m} e^{\rho_m z} \times \\ &\times (2\mu_i + 1 + \rho_m z) - D_{i,m} e^{-\rho_m z} (2\mu_i + 1 - \rho_m z) \end{aligned} \right) \rho_m^2 \cos(\rho_m x), \\ X_{i,z} &= \sum_{m=1}^{\infty} \left( \begin{aligned} &\left( -A_{i,m} e^{\rho_m z} + B_{i,m} e^{-\rho_m z} \right) \rho_m - C_{i,m} e^{\rho_m z} \times \\ &\times (2\mu_i + \rho_m z) - D_{i,m} e^{-\rho_m z} (\rho_m z - 2\mu_i) \end{aligned} \right) \rho_m^2 \sin(\rho_m x), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $E_i$ ,  $\mu_i$  - модулі пружності на розтяг та коефіцієнти Пуассона  $i$ -того шару матеріалу.

Умови (2) та (3), вирази складових НДС поверхневого шару (1) дозволяють сформулювати наступні співвідношення

$$(A_{1,m} - B_{1,m}) \rho_m + (2\mu_1 - 1)(C_{1,m} + D_{1,m}) = \frac{\varepsilon_m}{\rho_m^2}, \quad (A_{1,m} + B_{1,m}) \rho_m + 2\mu_1 (C_{1,m} - D_{1,m}) = 0.$$

З отриманих співвідношень визначимо окремі коефіцієнти функції напружень (1) через інші

$$A_{1,m} = \frac{\varepsilon_m}{2\rho_m^3} + \frac{D_{1,m} - C_{1,m} (4\mu_1 - 1)}{2\rho_m}, \quad B_{1,m} = -\frac{\varepsilon_m}{2\rho_m^3} + \frac{D_{1,m} (4\mu_1 - 1) - C_{1,m}}{2\rho_m}. \quad (6)$$

З умов сумісності та нерозривності деформування шарів - рівності переміщень та напружень ( $u_{1,z} = u_{2,z}$ ,  $u_{1,x} = u_{2,x}$ ,  $Z_{1,z} = Z_{2,z}$ ,  $X_{1,z} = X_{2,z}$ ) коли  $z=H$  маємо:

$$\begin{aligned} &(A_{1,m} e^{\rho_m H} + B_{1,m} e^{-\rho_m H}) \rho_m + C_{1,m} e^{\rho_m H} (4\mu_1 + \rho_m H - 2) + D_{1,m} e^{-\rho_m H} (2 + \rho_m H - 4\mu_1) = \\ &= \frac{G_1}{G_2} \left( B_{2,m} e^{-\rho_m H} \rho_m + D_{2,m} e^{-\rho_m H} (2 + \rho_m H - 4\mu_2) \right), \\ &(A_{1,m} e^{\rho_m H} - B_{1,m} e^{-\rho_m H}) \rho_m + C_{1,m} e^{\rho_m H} (\rho_m H + 1) + D_{1,m} e^{-\rho_m H} (1 - \rho_m H) = \\ &= \frac{G_1}{G_2} \left( -B_{2,m} e^{-\rho_m H} \rho_m + D_{2,m} e^{-\rho_m H} (1 - \rho_m z) \right), \\ &(-A_{1,m} e^{\rho_m H} + B_{1,m} e^{-\rho_m H}) \rho_m - C_{1,m} e^{\rho_m H} (2\mu_1 - 1 + \rho_m H) - D_{1,m} e^{-\rho_m H} (2\mu_1 - 1 - \rho_m H) = \\ &= B_{2,m} e^{-\rho_m H} \rho_m - D_{2,m} e^{-\rho_m H} (2\mu_2 - 1 - \rho_m H), \\ &(A_{1,m} e^{\rho_m H} + B_{1,m} e^{-\rho_m H}) \rho_m + C_{1,m} e^{\rho_m H} (2\mu_1 + \rho_m H) + D_{1,m} e^{-\rho_m H} (\rho_m H - 2\mu_1) = \\ &= B_{2,m} e^{-\rho_m H} \rho_m + D_{2,m} e^{-\rho_m H} (\rho_m H - 2\mu_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Отримані чотири рівняння становлять собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь з чотирма невідомими для  $m$ -тих складових сум у функціях напружень. Кількість членів сум у виразах (2), (4) безмежна. В практиці кількість складових обмежують умовою досягнення достатньої точності результатів. Розв'язок систем (7) дозволяє визначити невідомі значення коефіцієнтів функції напружень  $E_i$ , відповідно складові НДС двошарового ґрунту навантаженого зусиллям (2).

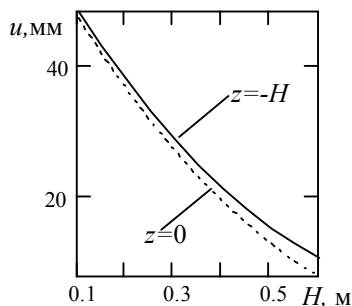


Рис. 1. Залежність максимальних прогинів від товщини першого шару за різних значень координати  $z$

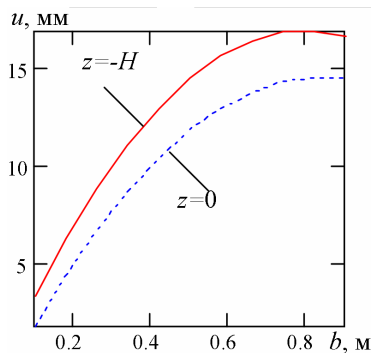
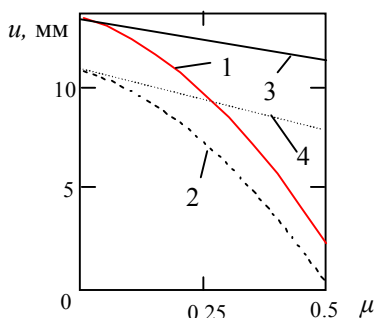


Рис. 2. Залежність максимальних прогинів від довжини ділянки навантаження  $b$  за різних значень координати  $z$



- 1  $z=-H$  коефіцієнт Пуассона матеріалу другого шару  $\mu_2=0$
- 2  $z=0$  коефіцієнт Пуассона матеріалу другого шару  $\mu_2=0$
- 3  $z=-H$  коефіцієнт Пуассона матеріалу першого шару  $\mu_1=0$
- 4  $z=0$  коефіцієнт Пуассона матеріалу першого шару  $\mu_1=0$

Рис. 3. Залежність максимальних прогинів від коефіцієнтів Пуассона матеріалу шарів  $\mu$

Найбільший вплив на споруду спричиняють переміщення поверхні ґрунту під спорудою. Відоме переміщення поверхні взаємодії шарів дозволяє оцінити характер впливу поверхневого шару ґрунту на найвідповідальніший показник - переміщення (просідання) споруди. З метою отримання результатів які можна співставляти прийняли розміри прийнятої частини ґрунтової опори ( $a$ ) рівними одиниці. Нормальне навантаження на ґрунт прийняли рівномірно розподіленим одиничної інтенсивності. Інші параметри розглядали такими що можуть приймати значення в заданих межах. Коефіцієнт Пуассона матеріалу основного шару опори прийняли в межах  $\mu_2 = 0,49 \dots 0,049$ . Довжину ділянки прикладення нормального навантаження як частину розміру  $a=1$  м, а саме  $b = 0.05 \dots 0.45$  м. Модулі пружності на розтяг: матеріалу шарів  $E_1=10^1 \dots 10^4$  МПа,  $E_2=1 \dots 10^5$  МПа. Коефіцієнт Пуассона матеріалу першого шару прийняли в межах  $\mu_1 = 0 \dots 0,5$ . Товщину першого шару розглядали в межах від 0,05м до 0,6 м.

Методом планування експерименту, в наведених межах, в табличній формі розробили план другого порядку розрахунку. За цим планом, для кожної з перерахованих величин визначили поліноміальну залежність максимальних прогинів навантаженої поверхні першого та поверхні взаємодії шарів. Прогини визначали як різницю переміщень середньої та крайніх точок. Результати визначення значень максимальних прогинів, для усереднених значень не задіяних при розгляді параметрів, надані в графічній формі на рисунках 1-3.

Згідно графіків закономірності залежності максимальних прогинів поверхні першого шару близькі. Залежність максимальних прогинів від товщини першого шару  $H$  спадає. З безмежним зростанням товщин  $H$  її значення наближаються до сталих величин. Залежності максимальних прогинів від довжини ділянки дії нормального навантаження  $b$  мають максимум. Він зумовлений тим що з наближенням розміру  $b$  до розміру опори вигин зменшується до нуля. Опора лише стискається рівномірно розподіленим навантаженням. Її перерізи плоскі до навантаження залишаються плоскими після навантаження. Залежності максимальних прогинів від значень коефіцієнтів Пуассона першого шару спадає. Залежність прогинів другого шару від коефіцієнта Пуассона лінійна. Більший вплив має коефіцієнт Пуассона матеріалу першого шару. Максимальні прогини, як наслідок лінійної постановки задачі, зворотно пропорційні модулям пружності матеріалів шарів.

**Висновки.** Методами лінійної теорії пружності сформульовано алгоритм визначення деформування ґрунту шаруватої структури під впливом локального навантаження нормальною розподіленою силою. Алгоритм комплексно враховує двошарову структуру ґрунту, механічні властивості шарів. Встановлено наступне. Максимальні прогини зменшуються зі зростанням товщини поверхневого шару. Просідання поверхні ґрунту та границі його шарів зменшуються зі зростанням коефіцієнта Пуассона. Для першого шару - лінійно. Отримані результати, в межах лінійної постановки, можна вважати достатньо достовірними тому що вони отримані методами лінійної теорії пружності, аналітично та узагальнені з використанням методу планування експерименту.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вабіщевич М.О., Фесун І.К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи. Опір матеріалів та теорія споруд. Київський національний університет будівництва і архітектури 2023, номер 110 с. 256-263 DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.256-263.
2. Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupiiiev, O.L., & Polushyna, M.V. (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. (5), 54– 63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.
3. Моргун А. С., Мойсенко Е. О. Вивчення перерозподілу зусиль в стрічкових пальових фундаментах методом граничних елементів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. № 3 с.7-12. ISSN 1997 <https://doi.org/10.31649/1997-926>.
4. Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В., Дослідження напружено-деформованого стану основи під структурними фундаментами за допомогою математичного моделювання. Вісник Криворізького національного університету, 2019 вип. 49. с. 69-74. doi:10.31721/2306-5451-2019-1-49-69-75.
5. Вабіщевич М.О., Затилко Г.А. Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту-оболонки при взаємодії із пружнопластичним середовищем // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2021. – Вип. 106. – С. 105-112. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.105-112.
6. Карнаухова Г.С. Розрахунок будівельних конструкцій круглих плит на змінній пружній основі : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 - Будівельні конструкції, будівлі та споруди / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2021. 208 с.
7. Skorodyns'kyi I. S.Maksymuk O. V. Stressed State of a Viscoelastic Layer on the Rigid Foundation Under the Action of Concentrated Cyclic Loads. *Materials Science* 2020, volume 56, p. 82–89.
8. Fang Wei, Shi Li-jun. Lower Bound Solution of Foundation Bearing Capacity beneath Strip Footing Based on Parabolic Mohr Failure Criterion *Advances in Civil Engineering*. Volume 2020 | Article ID 8897777 | <https://doi.org/10.1155/2020/889777>.
9. Ma Z., Dang F., Liao, H. Effect of Intermediate Principal Stress on the Bearing Capacity of Footings in Soft Rock. *Coatings* 2021, 11, 1019. <https://doi.org/10.3390/coatings11091019>.
10. Гранько О.В. Особливості визначення розрахункового опору ґрунту при реконструкції будівель і споруд на лесових замочких ґрунтах за різними методиками. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). ПолтНТУ. 2012. Вип. 4(34). Т.1– С.102-106.
11. Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Барон Т.А., Влаштування основ і фундаментів на просідаючих ґрунтах. Гірничий вісник, 2021, вип. 109, с.41-45.
12. Блащук Н. В., Маєвська І. В. Перерозподіл зусиль між елементами однорядного стрічкового пальового фундаменту. Науково-технічний журнал “Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві” 2019 том 26 №1. с.43-52. DOI 10.31649/2311-1429-2019-1-43-52.
13. Моргун А. С., Меть І. М., Чен Я., А. В. Колесник А. В. Прогнозування несучої спроможності плитного фундаменту за числовим методом граничних елементів. *СучТехнБудів*, 2023, вип. 34, вип. 1, с. 79–83. DOI:<https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-79-83>.
14. Маєвська І. В., Попович М. М., Кремінська Ю. О. Різниця в роботі коротких і довгих паль у складі стовпчастого пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання, *СучТехнБудів*, вип. 33, вип. 2, с. 108–118, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-108-118>.
15. Моргун А.С., Меть І.М., Підлуцький В.Л. Залишкові деформації ґрунту та розрахункові методи їх визначення за МГЕ. Монографія, Вінниця, ВНТУ, 2023, 120 с. ISBN 978-966-641-932-6.
16. Носенко В.С., Кашоїда О.О. Числове моделювання експерименту випробування групи паль з використанням різних моделей ґрунтової основи. Опір матеріалів та теорія споруд. Київський національний університет будівництва і архітектури 2022, номер 109 с. 441-454. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.
17. Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцупра Г.І. Визначення напружено-деформованого стану багатошарового композиту. Опір матеріалів та теорія споруд. Київський національний університет будівництва і архітектури 2022, номер 109 с.426 - 440 DOI : 10.32347/2410-2547.2022.109.426-440.

#### REFERENCES

1. Vabishchevych M.O., Fesun I.K. Pidkhdody shchodo zabezpechennia stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel ta sporud. Suchasnyi stan ta perspektyvu. Opir materialiv ta teoriia sporud. Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury 2023, nomer 110 s. 256-263 DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.256-263.
2. Zabolotnyi, K.S., Panchenko, O.V., Zhupiiiev, O.L., & Polushyna, M.V. (2018). Influence of parameters of a rubber-rope cable on the torsional stiffness of the body of the winding. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. (5), 54– 63. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/11.

3. Morhun A. S., Moiseienko E. O. Vyvchennia pererозpodilu zusyvl v strichkovykh palovykh fundamentakh metodom hranychnykh elementiv (Study the redistribution of forces in strip pile foundations using the boundary element method). Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2019. No 3 s.7-12. ISSN 1997. <https://doi.org/10.31649/1997-926>.
4. Timchenko R.O., Krishko D.A., Khoruzhenko I.V., Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu osnovy pid strukturnymy fundamentamy za dopomohoiu matematychnoho modeliuвання (Study the base's stress-strain state under structural foundations using mathematical modeling). Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu, 2019 vyp. 49. s. 69-74. [doi:10.31721/2306-5451-2019-1-49-69-75](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2019-1-49-69-75).
5. Vabishchevych M.O., Zatyliuk H.A. Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu fundamentu-obolonky pry vzaiemodii iz pruzhnoplastychnym seredovysshchem (Analysis of the stress-strain state of the foundation shell when interacting with an elastoplastic environment). Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk – K.: KNUBA, 2021. – Vyp. 106. – S. 105-112. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.105-112.
6. Karnaukhova H.S. Rozrakhunok budivelnnykh konstruksii kruglykh plyt na zmynii pruzhni osnovi (Calculation of building structures of round slabs on a variable elastic base): dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 - Budivelni konstruksii, budivli ta sporudy / Odeska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury. Odesa, 2021. 208 s.
7. Skorodyn's'kyi I. S.Maksymuk O. V. Stressed State of a Viscoelastic Layer on the Rigid Foundation Under the Action of Concentrated Cyclic Loads. Materials Science 2020, volume 56, p. 82–89.
8. Fang Wei, Shi Li-jun. Lower Bound Solution of Foundation Bearing Capacity beneath Strip Footing Based on Parabolic Mohr Failure Criterion Advances in Civil Engineering. Volume 2020 | Article ID 8897777 | <https://doi.org/10.1155/2020/8897777>.
9. Ma Z., Dang F., Liao, H. Effect of Intermediate Principal Stress on the Bearing Capacity of Footings in Soft Rock. Coatings 2021, 11, 1019. <https://doi.org/10.3390/coatings11091019>.
10. Hranko O.V. Osoblyvosti vyznachennia rozrakhunkovoho oporu gruntu pry rekonstruksii budivel i sporud na lesovykh zamoklykhykh gruntakh za ryznymy metodykamy (Peculiarities of determining the estimated resistance of the soil during the reconstruction of buildings and structures on soaked soils using various methods). Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budvnytstvo). PolNTU. 2012. Vyp. 4(34). T.1- S.102-106.
11. Timchenko R.O., Krishko D.A., Baron T.A., Vlashtuvannia osnov i fundamentiv na prosidaiuchykh gruntakh (Arrangement of bases and foundations on subsiding soils). Hirnychi visnyk, 2021, vyp. 109, s.41-45.
12. Blashchuk N. V., Maievska I. V. Pererозpodil zusyvl mizh elementamy odnoridnogo strichkovoho palovoho fundamenta (Redistribution of efforts between elements of a single-row strip pile foundation). Naukovo-tekhnichni zhurnal "Suchasni tekhnologii, materialy i konstruksii v budivnytstvi" 2019 tom 26 №1. s.43-52. DOI 10.31649/2311-1429-2019-1-43-52
13. Morhun A.S., Met I.M., Chen Ya., A.V. Kolesnyk A.V. Prohnozuvannia nesuchoi spromozhnosti plytnoho fundamenta za chyslovyim metodom hranychnykh elementiv (Forecasting the bearing capacity of a slab foundation by the numerical method of boundary elements). SuchTekhnBudiv, 2023, vyp. 34, vyp. 1, s. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-79-83>.
14. Maievska I. V., Popovych M. M., Kreminska Yu. O. Ryznytisia v roboti korotkykh i dovykh pal u skladi stovpchastoho palovoho fundamentu za rezultatamy fizychnoho modeliuвання (The difference in the operation of short and long piles as part of a columnar pile foundation according to the results of physical modeling), SuchTekhnBudiv, vyp. 33, vyp. 2, s. 108–118, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-108-118>.
15. Morhun A.S., Met I. M., Pidluts'kyi V.L. Zalyshkovi deformatsii gruntu ta rozrakhunkovi metody yikh vyznachennia za MHE (Residual deformations of soil and calculation methods for their determination according to MGE (method of boundary elements)). Monohrafiia, Vinnytsia, VNTU, 2023, 120 s. ISBN 978-966-641-932-6.
16. Nosenko V.S., Kashoida O.O. Chyslove modeliuвання eksperymentu vyprovuvannia hrupy pal z vykorystanniam ryznykh modelei gruntovoi osnovy (Numerical simulation of the pile group test experiment using different soil base models. Resistance of materials and theory of structures). Opir materialiv ta teoriia sporud. Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury 2022, №109 s. 441-454. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.
17. Belmas I.V., Bilous O.I., Tantsura H.I. Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu bahatosharovoho kompozytu. Opir materialiv ta teoriia sporud (Determination of the stress-deformed state of a multilayer composite). Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury 2022, nomer 109 s.426 - 440 DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.426-440.

Стаття надійшла 23.02.2024

Бельмас І.В., Трикіло А.І., Білоус О.І., Танцюра Г.І., Фесан О.М.

#### ДЕФОРМУВАННЯ ШАРУВАТОГО ГРУНТУ

Одним з наслідком агресії рф в Україні є зміна властивостей окремих ділянок ґрунту. Зведення споруд на таких ділянках має здійснюватися з урахуванням вказаного. З метою створення передумов для урахування штучно створеної шаруватості ґрунту, в лінійній постановці в межах плоского деформування розроблено алгоритм аналітичного визначення напружено-деформованого стану двошарового ґрунту. Шари розглянуті як лінійно пружні тіла об'єданих розмірів в плані. Алгоритм базується на функції напружень Ері з довільними коефіцієнтами, на залежності показників напружено-деформованого стану шарів ґрунту від неї та від механічних показників матеріалу шарів, товщини штучно утвореного поверхнього шару. Алгоритм передбачає формулювання умов навантаження нормальною розподіленою силою частини поверхні ґрунту, умов взаємодії шарів та безмежну товщину основного шару ґрунту. Перераховані умови та особливості шарів становлять собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Розв'язок системи рівнянь надає можливість визначення коефіцієнтів функції напружень та, відповідно, визначення показників напружено-деформованого стану двошарової ґрунтової опори. Узагальнення результатів, здійснене методом планування експерименту для обраних меж можливих реалізацій механічних властивостей шарів ґрунту дозволяє визначити прогини поверхонь шарів в залежності від окремих чинників. Встановлено наступне. Характери залежностей прогинів поверхонь шарів від інших параметрів близькі. Максимальні прогини зменшуються зі зростанням товщини поверхнього шару. Прогини поверхні взаємодії шарів ґрунту лінійно залежать від коефіцієнта Пуассона основного шару ґрунту, зменшуються зі зростанням коефіцієнта. отримані результати, в межах лінійної постановки, можна вважати достатньо достовірними тому що вони отримані методами лінійної теорії пружності, аналітично та узагальнені методом планування експерименту.

**Ключові слова:** двошарова ґрунтова опора споруди, функція напружень, механічні властивості матеріалу, напруження, переміщення, деформації.

*Belmas I.V., Trikiло A.I., Bilous O.I., Tantsura H.I., Fesan O.M.*

#### **DEFORMATION OF LAYERED SOIL**

One of the consequences of the aggression of the Russian Federation in Ukraine is a change in the properties of the surface layers of some regions of the soil. Construction of structures in such areas must be carried out considering the above. In order to create prerequisites for taking into account the artificially created layering of the soil, an algorithm for analytical determination of the stress-strain state of a two-layered soil was developed in a linear setting within the limits of plane deformation. Layers are considered as linear elastic bodies of limited dimensions in the plan. The algorithm is based on the Ery stress function with arbitrary coefficients, on the dependence of the indicators of the stress-strain state of the soil layers on it and on the mechanical indicators of the material of the layers, the thickness of the artificially formed surface layer. The algorithm provides for the formulation of the load conditions by the normally distributed force of part of the soil surface, the conditions of the interaction of the layers, and the unlimited thickness of the main soil layer. The listed conditions and features of the layers constitute a system of linear algebraic equations. The solution of the system of levels provides an opportunity to determine the coefficients of the stress function and, accordingly, to determine the indicators of the stress-strain state of the two-layer soil support. The generalization of the results, carried out by planning the experiment for the selected limits of possible realizations of the mechanical properties of the soil layers, allows for determining the deflections of the surfaces of the layers depending on individual factors. The following is established. The characteristics of the dependences of the deflections of the layer surfaces on other parameters are similar. Maximum deflections decrease with increasing surface layer thickness. Deflections of the interaction surface of the soil layers are linearly dependent on the Poisson ratio of the main soil layer and decrease as the ratio increases. The results obtained within the limits of the linear formulation can be considered sufficiently reliable because they are obtained analytically and generalized by the methods of the linear theory of elasticity and the method of planning the experiment.

**Keywords:** two-layer soil support of the structure, stress function, mechanical properties of the material, stress, displacement, deformations.

УДК 669.017

*Бельмас І.В., Трикіло А.І., Білоус О.І., Танцюра Г.І., Фесан О.М. Деформування шаруватого ґрунту // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 125-131. – Укр.*

*Rozgljadatsya algoritm viznachennya napruzheno-deformovanogo stanu dvoшарового ґрунту під спорудою.*

Табл. 0. Іл. 3. Бібліогр. 17 назв.

UDC 669.017

*Belmas I.V., Trikiло A.I., Bilous O.I., Tantsura H.I., Fesan O.M. Deformation of layered soil // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2024. – Issue 112. – P. 125-131.*

*The algorithm for determining the stress-deformed state of the two-layer soil under the structure is considered*

Tabl. 0. Fig. 3. Ref. 17.

**Автор** (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та зварювання

**Адреса робоча:** 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», БЕЛЬМАС Іван Васильович

**Мобільний тел.:** +38098 5412812

**E-mail:** belmas09@meta.ua

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0003-2112-0303>

**Автор** (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, Секретар механічного факультету, доцент кафедри галузеве машинобудування

**Адреса робоча:** 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», ТРИКІЛЮ Алік Іванович

**Мобільний тел.:** +380676044318.

**E-mail:** Trukilo@i.ua

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-5203-5948>

**Автор** (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри галузеве машинобудування

**Адреса робоча:** 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», БІЛОУС Олена Іванівна

**Мобільний тел.:** +380978786830

**E-mail:** bilouselena66@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-6398-8843>

**Автор** (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та зварювання

**Адреса робоча:** 51900, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2, ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет», ТАНЦУРА Ганна Іванівна

**Мобільний тел.:** +380971939382

**E-mail:** hannaivan71@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-8672-1153>

**Автор** (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник КНУБА ФЕСАН Олександр Миколайович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, КНУБА, НДІ будівельної механіки, ФЕСАН Олександр Миколайович

**E-mail:** olexandr12@gmail.com