DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-32-38
UDC 669.017

I.V. Belmas, Ph.D., Dr.Sci, Prof.
O.V. Chernyshov, Sr. Teacher,
O.I. Bilous, Ph.D., Assoc. Prof.
G.I. Tantsura, Ph.D., Assoc. Prof.
«Dnipro State Technical University»
V.A. Yanovsky, Assoc. Prof.
Zhytomyr Polytechnic State University

Stress in the Two-Layer Soil Under the Building

In recent times, the mechanical properties of the surface layer have changed in some areas of the surface of the grant. The mechanical properties of the soil along its thickness become discretely variable. The soil ceases to be monolithic. It becomes two-layered. The conditions for the construction of structures whose foundation height does not exceed the thickness of the surface layers should take into account the latter. The purpose of the work is to substantiate and formulate an algorithm for determining the parameters of the stress-strain state of the soil of a two-layer structure and to establish the dependence of soil surface deformations on the mechanical properties of the formed soil layers. The soil of the two-layer structure is considered as a two-layer body, of unlimited height, of limited dimensions in the orthogonal direction. An external normal load acts on the soil. Soil layers were considered linearly elastic, isotropic with excellent mechanical properties. It was taken into account that the contact surfaces of the layers deform together without the formation of gaps and overlapping. The interaction forces of the layers are equal and oppositely directed. The indicators of the flat stress-strain state of the layers were determined by the method of the classical linear theory of elasticity using the biharmonic Ery stress function. We took into account the load of the limited part of the outer surface of the first layer or its movement under the action of the structure and the conditions of compatibility of deformation of the layers. Formulated linear systems of algebraic equations. By solving it, the unknown coefficients of the stress function were determined. The dependences of the parameters of the stress-strain state of the layers of the two-layer soil were formulated. It was established that the change in the compression modulus of the surface layer of the soil significantly affects the deformation of the soil surface under the action of external normal load and is practically independent of other mechanical characteristics of the surface layer of the soil.

Keywords: *two-layer soil; biharmonic stress function; mechanical properties of the material; stress-deformed state; load.*

Topicality. Since the beginning of the invasion of the Russian Federation in Ukraine, the collapse of buildings and structures has been progressing [1]. The remains of destroyed buildings, the consequences of the use of explosives lead to a change in the properties of the surface layer of the soil. Its mechanical properties cease to be unchanged in thickness. They are not variable, individually, only within the surface layer (limited thickness) and within the general soil massif (unlimited thickness) - in two layers. Consider the above, we regard the soil as two-layered. Taking into account changes in its properties is an urgent scientific and technical task. Its solution will make it possible to take into account the features of soil deformation during the construction of structures, and, accordingly, will ensure their sufficient reliability.

Analysis of the latest research and publications which the authors rely on. The problem of the interaction between the building and the soil has been studied by many authors. Let's consider the works of recent years. The importance of taking soil properties into account was emphasized in the study [2]. In [3] it is proposed to determine the parameters of the foundation based on the mechanical properties of the soil taken from under the foundation. In [4], deformations of two-layer slabs and beams on an elastic Pasternak base were investigated. On the basis of the two-parameter parabolic criterion of Mohr's flow in [5], a field of admissible static stresses of the foundation for the strip foundation was constructed, and a method of calculating the lower limit of its ability to perceive the load was proposed. In work [6], a number of numerical data were obtained using the finite difference method to assess the ability of strip, round, and square foundations to accept external loads. In the study [7], a discrete model was built by numerical methods, in which Poisson's idea of presenting a complex model by its individual components was used. In the article [8], a model was built using the PLAXIS 3D system, in [9], the ability to perceive the external load of strip single-row pile foundations was determined by a numerical method. In [10], by means of physical modeling, the joint operation of piles and grid was investigated. In [11], the redistribution of loads in strip pile foundations was studied using the boundary element method. In [12], the impact of the selected soil support model on the accuracy of establishing the stress-strain state (STS) of the pile foundation was investigated. In the monograph [13], values of settlement and the ability to perceive the external load of pile and slab foundations are analytically obtained. The publication [14] established the dependence of foundation settlement on the external load, and [15] took into account the influence of nonlinear deformation of the soil on the stress state of the structures installed on it. [16] proposed a grapho-analytic model – an analogue of the shape change of the contours of equipotential surfaces and plane sections of deformed technical objects.

The review showed that the two-layer structure of the soil was not taken into account in the reviewed works.

The purpose of the article is to create an algorithm for calculating the VAT of soil of a two-layer structure and to establish the dependence of soil surface deformations on the mechanical properties of its surface layer.

Presentation of the main material. We consider the soil as two linearly elastic prismatic bodies with a square base. The side size is a. The height of the first layer of soil with excellent properties is H. The second is unlimited. In the general case, the first layer is under the influence of a distributed normal load P, or its surface is given a displacement u.

We refer the two-layer soil support to the orthogonal coordinate system. The origin of the z coordinate axis is aligned with the surface of interaction of the layers. The ends of the layers are not limited in movement along the z axis. They do not move in the directions of the x and y axes.

We will use the algorithm for determining the VAT of a layered elastic material [12]. Within the planar problem in the article using the *Ery stress function* φ, we determine the VAT of a two-layer support.

The layers will be numbered 1 and 2. The first number will be the surface layer. We enter the numbers of the layers in the indices of the quantities they relate to. For a plane problem, we will take the following biharmonic *Ery stress function*:

$$\varphi_i = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} A_{i,m} \exp(\rho_m z) + B_{i,m} \exp(-\rho_m z) + C_{i,m} \times \\ \times \exp(\rho_m z)\, z + D_{i,m} \exp(-\rho_m z)\, z \end{pmatrix} \cos(\rho_m x), \tag{1}$$

where m is integers; i is layer number; $\rho_m = \pi \frac{m}{a}$; A_m, B_m, C_m, D_m are coefficients, the value of which is subject to determination.

The VAT indicators of the layers as a function of the *Ery stresses* (1) have the form:

$$u_{i,z} = \frac{1+\mu_i}{E_i} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} (A_{i,m} \exp(\rho_m z) + B_{i,m} \exp(-\rho_m z))\rho_m + \\ +C_{i,m} \exp(\rho_m z) \times (4\mu_i + \rho_m z - 2) + \\ +D_{i,m} \exp(-\rho_m z)(2 + \rho_m z - 4\mu_i) \end{pmatrix} \rho_m \cos(\rho_m x),$$

$$u_{i,x} = -\frac{1+\mu_i}{E_i} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} (A_{i,m} \exp(\rho_m z) - B_{i,m} \exp(-\rho_m z))\rho_m + \\ +C_{i,m} \exp(\rho_m z)\, (\rho_m z + 1) + \\ +D_{i,m} \exp(-\rho_m z)(1 - \rho_m z) \end{pmatrix} \rho_m \sin(\rho_m x),$$

$$u_{i,z} = -\sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} (-A_{i,m} \exp(\rho_m z) + B_{i,m} \exp(-\rho_m z))\rho_m - \\ -C_{i,m} \exp(\rho_m z)\, (2\mu_i - 1 + \rho_m z) - \\ -D_{i,m} \exp(-\rho_m z)(2\mu_i - 1 - \rho_m z) \end{pmatrix} \rho_m^2 \cos(\rho_m x), \tag{2}$$

$$X_{i,x} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} (-A_{i,m} \exp(\rho_m z) + B_{i,m} \exp(-\rho_m z))\rho_m - \\ -C_{i,m} \exp(\rho_m z)\, (2\mu_i + 1 + \rho_m z) - \\ -D_{i,m} \exp(-\rho_m z)(2\mu_i + 1 - \rho_m z) \end{pmatrix} \rho_m^2 \cos(\rho_m x),$$

$$X_{i,z} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{pmatrix} (-A_{i,m} \exp(\rho_m z) + B_{i,m} \exp(-\rho_m z))\rho_m - \\ -C_{i,m} \exp(\rho_m z)\, (2\mu_i + \rho_m z) - \\ -D_{i,m} \exp(-\rho_m z)(\rho_m z - 2\mu_i) \end{pmatrix} \rho_m^2 \sin(\rho_m x),$$

where E_i, μ_i are the tensile modulus, *Poisson*'s *ratio* of the $i-$ the layer of material.

Let's pay attention to the expressions of displacements $u_{i,z}$ and stresses $Z_{i,z}$ that do not take into account the displacement of layers as rigid bodies, and the average normal stresses in them. The second layer is infinite in the direction of the $z-$axis. Indicators of its VAT cannot grow indefinitely if $z \to \infty$. Let's put $A_{2,m}=C_{2,m}=0$.

In practice, in the general case, the load or movement of the soil surface under the action of the structure may be known, that is, one of the boundary conditions may occur when ($z = 0$):

$$f(u_z) = U_{1,z} + \sum_{m=1}^{\infty} \eta_m \cos(\rho_m x), \tag{3}$$

$$f(Z_z) = \sigma_1 + \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon_m \cos(\rho_m x), \tag{4}$$

where σ_1, $U_{1,z}$– are the average distributed load, and the displacement of the first layer as an absolutely rigid body; η_m, ε_m are coefficients.

The building, as a rule, is not loaded with tangential forces. The absence of tangential loads of the first layer is another condition.

When ($z = 0$), then:

$$X1,z= 0. \tag{5}$$

For the case of application of a specified load (3), absence of a tangential load (5), the boundary conditions allow determining the ratio between the coefficients of the *Ery stress function* of the first layer for arbitrary $m-$ components:

$$A_{1,m} = \frac{p_m}{2\rho_m^3} - C_{i,m}\frac{4\mu_1 - 1}{2\rho_m} + D_{i,m}\frac{1}{2\rho_m}, \tag{6}$$

$$B_{1,m} = \left(D_{1,m} - C_{i,m}\right)\frac{2\mu_1}{\rho_m} - A_{1,m.} \tag{7}$$

The layers deform together. Let us formulate the conditions for the simultaneous deformation of the layers when: $z = H$ $u_{1,z} = u_{2,z}$, $u_{1,x} = u_{2,x}$, $Z_{1,z} = Z_{2,z}$, $X_{1,z} = X_{2,z}$.

Under the given conditions, we have four relations:

$$\begin{gathered}
(A_{1,m}\exp(\rho_m H) + B_{1,m}\exp(-\rho_m H))\rho_m + \\
+C_{1,m}\exp(\rho_m H) \times (4\mu_i + \rho_m H - 2) + \\
+D_{1,m}\exp(-\rho_m H)(2 + \rho_m H - 4\mu_i) = \\
= \frac{E_1}{E_2} exp(-\rho_m H)\left(B_{2,m}\rho_m + D_{2,m}(2 + \rho_m H - 4\mu_2)\right),
\end{gathered}$$

$$\begin{gathered}
(A_{1,m}\exp(\rho_m H) - B_{1,m}\exp(-\rho_m H))\rho_m + C_{1,m}\exp(\rho_m H) \times \\
\times (\rho_m H + 1) + D_{1,m}\exp(-\rho_m H)(1 - \rho_m H) = \\
= \frac{G_1}{G_2} exp(-\rho_m H)\left(D_{2,m}(1 - \rho_m z) - B_{2,m}\rho_m\right),
\end{gathered}$$

$$\begin{gathered}
(B_{1,m}\exp(-\rho_m H) - A_{1,m}\exp(\rho_m H))\rho_m - C_{1,m}\exp(\rho_m H) \times \\
\times (2\mu_1 - 1 + \rho_m H) - D_{1,m}\exp(-\rho_m H)(2\mu_1 - 1 - \rho_m H) = \\
= \exp(\rho_m H)\left(B_{2,m}\rho_m - D_{2,m}(2\mu_1 - 1 + \rho_m H)\right),
\end{gathered}$$

$$\begin{gathered}
(A_{1,m}\exp(\rho_m H) + B_{1,m}\exp(-\rho_m H))\rho_m + C_{1,m}\exp(\rho_m H) \times \\
\times (2\mu_1 + \rho_m H) + D_{1,m}\exp(-\rho_m H)(\rho_m H - 2\mu_1) = \\
= \exp(-\rho_m H)\left(B_{2,m}\rho_m + D_{2,m}(\rho_m H - 2\mu_2)\right),
\end{gathered} \tag{8}$$

Relations (8) constitute m systems of linear algebraic equations with four unknowns. Solutions of the systems make it possible to determine the remaining unknown coefficients of the *Ery stress function* for an arbitrary value of m . The *Erie function* and further expressions assume an infinite number of components in the sums. In practice, the number of sum members is limited to a certain value. With a limited number of sum terms in expressions (1) and (2), it becomes possible to determine the VAT indicators of soil layers.

The main factor affecting the soil on the structure is the deformation of the soil surface. With the use of the given algorithm, the VAT indicators of a layered soil support of a square shape in plan and a side of a square of 100 m were determined. A uniformly distributed load of 1 MPa over a square with an area of 4 m^2 acts on the support. The sides of the support square and the load action square are parallel.

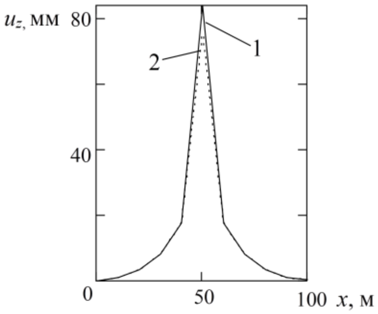

Fig. 1. Distribution of displacements of layer surfaces along the $x-$ axis in the direction of the $z-$ axis (1 – the first layer, 2 – the second layer).

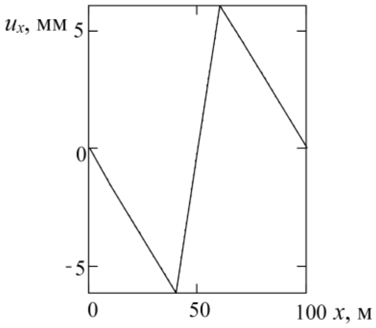

Fig. 2. Distribution of displacements of layer surfaces along the $x-$ axis in the direction of the $x-$ axis.

The square of the load is equidistant from the edges of the support. The thickness of the first layer is 1 m. *Poisson*'s *ratios* of the layer material were taken as $\mu_1 = \mu_2 = 0{,}25$. The modulus of elasticity of the soil layers was assumed equal to E_1 = 5МПа, E_2 = 20МПа. The calculation results are shown in Fig. 1 through Fig. 4.

The analysis shows that the change in the values of the modulus of elasticity leads to inversely proportional deformations and stresses. The thickness of the first layer of soil is not significantly affected.

Conclusions and prospects for further research. Military actions in some areas have changed the properties of the surface layer of the soil, which must be taken into account during construction in these areas. Using the biharmonic *Ery stress function*, the algorithm for determining the VAT parameters of the soil of a two-layer structure is substantiated by the methods of the classical linear theory of elasticity. The difference in the compressive modulus of the surface layer of the soil significantly affects the deformation of the soil surface under the action of the external normal load and is practically independent of other mechanical characteristics of the surface layer of the soil.

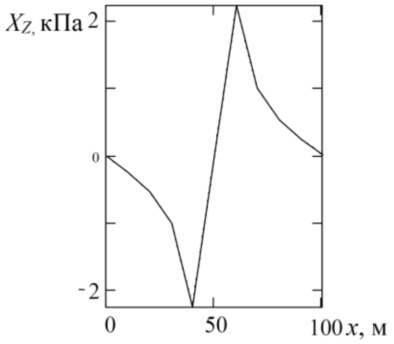

Fig. 3. Distribution of tangential stresses acting on the surfaces of the layers along the $x-$ *axis.*

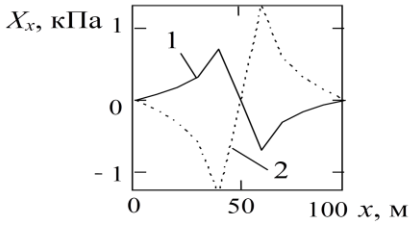

Fig. 4. Distribution of normal stresses acting on the surfaces of the layers along the the $x-$ *axis.the x axis (1 – the first layer, 2 – the second layer).*

Excellent mechanical characteristics of the surface layers, their thickness should be taken into account during the construction of structures on such soils, especially when the height of their foundations is less than the thickness of the surface layer. The developed algorithm, accordingly, and the obtained results within the limits of linear deformation can be considered reliable because they were obtained analytically, using the methods of the classical linear theory of elasticity. In the future, it is advisable to investigate the impact of tangential loads on the soil.

Список використаної літератури:

1. *Вабіщевич М.О.* Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи / *М.О. Вабіщевич, І.К. Фесун* // Опір матеріалів і теорія споруд : наук.-тех. збірник. – К. : КНУБА, 2023. – № 110. – С. 256–263. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.256-263.
2. *Блащук Н.В.* Перерозподіл зусиль між елементами однорядного стрічкового пальового фундамента / *Н.В. Блащук, І.В. Маєвська* // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 43–52. DOI: 10.31649/2311-1429-2019-1-43-52.
3. *Тімченко Р.О.* Влаштування основ і фундаментів на просідаючих ґрунтах / *Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, Т.А. Барон* // Гірничий вісник. – 2021. – Вип. 109. – С. 41–45.
4. *Skorodyns'kyi I.S.* Stressed State of a Viscoelastic Layeron the Rigid Foundation Under the Action of Concentrated Cyclic Loads / *I.S. Skorodyns'kyi, O.V. Maksymuk* // Materials Science. – 2020. – Vol. 56. – P. 82–89.
5. *Ma Z.* Effect of Intermediate Principal Stress on the Bearing Capacity of Footingsin Soft Rock / *Z.Ma, F.Dang, H.Liao* // Coatings. – 2021. – Vol. 11. DOI: 10.3390/coatings11091019.
6. *Гранько О.В.* Особливості визначення розрахункового опору ґрунту при реконструкції будівель і споруд на лесових замоклих ґрунтах за різними методиками / *О.В. Гранько* // Збірник наукових праць ПолтНТУ. – 2012. – Вип. 4 (1). – С. 102–106.

7. *Маєвська І.В.* Різниця в роботі коротких і довгих паль у складі стовпчастого пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання / *І.В. Маєвська, М.М. Попович, Ю.О. Кремінська* // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2023. – Т. 33, № 2. – С. 108–118. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-2-108-118.
8. Прогнозування несучої спроможності плитного фундамента за числовим методом граничних елементів / *А.С. Моргун, І.М. Меть, Я.Чен, А.В. Колесник* // СучТехнБудів. – 2023. – Т. 34, № 1. – С. 79–83. DOI: 10.31649/2311-1429-2023-1-79-83.
9. *Тімченко Р.О.* Дослідження напружено-деформованого стану основи під структурними фундаментами за допомогою математичного моделювання / *Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко* // Вісник Криворізького національного університету. – 2019. – Вип. 49. – С. 69–74. DOI: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-69-75.
10. *Моргун А.С.* Залишкові деформації ґрунту та розрахункові методи їх визначення за МГЕ : монографія / *А.С. Моргун, І.М. Меть, В.Л. Підлуцький*. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 120 с.
11. *Моргун А.С.* Вивчення перерозподілу зусиль в стрічкових пальових фундаментах методом граничних елементів / *А.С. Моргун, Е.О. Мойсеєнко* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 3. – С. 7–12. DOI: 10.31649/1997-926.
12. *Бельмас І.В.* Визначення напружено-деформованого стану багатошарового композиту / *І.В. Бельмас, О.І. Білоус, Г.І. Танцура* // Опір матеріалів і теорія споруд : наук.-тех. збірник. – К. : КНУБА, 2022. – № 109. – С. 426 – 440. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.426-440.
13. *Носенко В.С.* Числове моделювання експерименту випробування групи паль з використанням різних моделей ґрунтової основи / *В.С. Носенко, О.О. Кашоїда* // Опір матеріалів і теорія споруд : наук.-тех. збірник. – К. : КНУБА, 2022. – № 109. – С. 441–454. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.
14. *Вабіщевич М.О.* Аналіз напружено-деформованого стану фундаменту-оболонки при взаємодії із пружнопластичним середовищем / *М.О. Вабіщевич, Г.А. Затилюк* // 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.
15. *Карнаухова Г.С.* Розрахунок будівельних конструкцій круглих плит на змінній пружній основі : дис. … канд. техн. наук : 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди / *Г.С. Карнаухова*. – Одеса : Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2021. – 208 с.
16. Узагальнення досліджень формозміни еквіпотенціальних поверхонь напружено-деформованих об’єктів / *Б.А. Шелудченко, В.Р. Білецький, В.М. Боровський та інші* // Технічна інженерія. – 2023. – № 1 (91). – С. 110–118. DOI: 10.26642/ten-2023-1(91)-110-118.

References:

1. Vabishchevych, M.O. and Fesun, I.K. (2023), «Pidkhody shchodo zabezpechennia stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel ta sporud. Suchasnyi stan ta perspektyvy», *Opir materialiv i teoriia sporud*, nauk.-tekh. zbirnyk, KNUBA, K., No. 110, pp. 256–263, doi: 10.32347/2410-2547.2023.110.256-263.
2. Blashchuk, N.V. and Maievska, I.V. (2019), «Pererozpodil zusyl mizh elementamy odnoriadnoho strichkovoho palovoho fundamenta», *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi*, Vol. 26, No. 1, pp. 43–52, doi: 10.31649/2311-1429-2019-1-43-52.
3. Timchenko, R.O., Krishko, D.A. and Baron, T.A. (2021), «Vlashtuvannia osnov i fundamentiv na prosidaiuchykh gruntakh», *Hirnychyi visnyk*, Issue 109, pp. 41–45.
4. Skorodyns’kyi, I.S. and Maksymuk, O.V. (2020), «Stressed State of a Viscoelastic Layeron the Rigid Foundation Under the Action of Concentrated Cyclic Loads», *Materials Science*, Vol. 56, pp. 82–89.
5. Ma, Z., Dang, F. and Liao, H. (2021), «Effect of Intermediate Principal Stress on the Bearing Capacity of Footingsin Soft Rock», *Coatings*, Vol. 11, doi: 10.3390/coatings11091019.
6. Hranko, O.V. (2012), «Osoblyvosti vyznachennia rozrakhunkovoho oporu gruntu pry rekonstruktsii budivel i sporud na lesovykh zamoklykh gruntakh za riznymy metodykamy», *Zbirnyk naukovykh prats PoltNTU*, Issue 4 (1), pp. 102–106.
7. Maievska, I.V., Popovych, M.M. and Kreminska, Yu.O. (2023), «Riznytsia v roboti korotkykh i dovhykh pal u skladi stovpchastoho palovoho fundamentu za rezultatamy fizychnoho modeliuvannia», *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi*, Vol. 33, No. 2, pp. 108–118, doi: 10.31649/2311-1429-2022-2-108-118.
8. Morhun, A.S., Met, I.M., Chen, Ya. and Kolesnyk, A.V. (2023), «Prohnozuvannia nesuchoi spromozhnosti plytnoho fundamenta za chyslovym metodom hranychnykh elementiv», *SuchTekhnBudiv*, Vol. 34, No. 1, pp. 79–83, doi: 10.31649/2311-1429-2023-1-79-83.
9. Timchenko, R.O., Krishko, D.A. and Khoruzhenko, I.V. (2019), «Doslidzhennia napruzheno-deformovanoho stanu osnovy pid strukturnymy fundamentamy za dopomohoiu matematychnoho modeliuvannia», *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, Issue 49, pp. 69–74, doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-69-75.
10. Morhun, A.S., Met, I.M. and Pidlutskyi, V.L. (2023), *Zalyshkovi deformatsii gruntu ta rozrakhunkovi metody yikh vyznachennia za MHE*, monohrafiia, VNTU, Vinnytsia, 120 p.
11. Morhun, A.S. and Moiseienko, E.O. (2019), «Vyvchennia pererozpodilu zusyl v strichkovykh palovykh fundamentakh metodom hranychnykh elementiv», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, No. 3, pp. 7–12, doi: 10.31649/1997-926.
12. Belmas, I.V., Bilous, O.I. and Tantsura, H.I. (2022), «Vyznachennia napruzheno-deformovanoho stanu bahatosharovoho kompozytu», *Opir materialiv i teoriia sporud*, nauk.-tekh. zbirnyk, KNUBA, K., No. 109, pp. 426–440, doi: 10.32347/2410-2547.2022.109.426-440.

13. Nosenko, V.S. and Kashoida, O.O. (2022), «Chyslove modeliuvannia eksperymentu vyprobuvannia hrupy pal z vykorystanniam riznykh modelei gruntovoi osnovy», *Opir materialiv i teoriia sporud*, nauk.-tekh. zbirnyk, KNUBA, K., No. 109, pp. 441–454, doi: 10.32347/2410-2547.2022.109.
14. Vabishchevych, M.O. and Zatyliuk, H.A. (2021), «Analiz napruzheno-deformovanoho stanu fundamentu-obolonky pry vzaiemodii iz pruzhnoplastychnym seredovyshchem», *Opir materialiv i teoriia sporud*, nauk.-tekh. zbirnyk, KNUBA, K., Issue 106, pp. 105–112, doi: 10.32347/2410-2547.2021.106.105-112.
15. Karnaukhova, H.S. (2021), *Rozrakhunok budivelnykh konstruktsii kruhlykh plyt na zminnii pruzhnii osnovi*, Ph.D. Thesis of dissertation, 05.23.01 Budivelni konstruktsii, budivli ta sporudy, Odeska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury, Odesa, 208 p.
16. Sheludchenko, B.A., Biletskyi, V.R., Borovskyi, V.M. et al. (2023), «Uzahalnennia doslidzhen formozminy ekvipotentsialnykh poverkhon napruzheno-deformovanykh obiektiv», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 110–118, doi: 10.26642/ten-2023-1(91)-110-118.

Belmas Ivan –Professor, Head of the Department, Dnipro State Technical University.
https://orcid.org/0000-0003-2112-0303.
Scientific interests:
– mechanics of composite materials.

Bilous Olena – Associate Professor, Dnipro State Technical University.
https://orcid.org/0000-0001-6398-8843.
Scientific interests:
– mechanics of composite materials,

Tantsura Hanna – Associate Professor, Dnipro State Technical University.
https://orcid.org/0000-0002-8672-1153.
Scientific interests:
– mechanics of composite materials,

Chernyshov Oleksandr – Senior Lecturer, Dnipro State Technical University.
https://orcid.org/0000-0001-5457-258X.
Scientific interests:
– energy resource conservation;

Yanovsky Valery – Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University.
http://orsid.org/0009-0003-3540-3942
Scientific interests:
– energy resource conservation.

Бельмас І.В., Чернишов О.В., Білоус О.І., Танцура Г.І., Яновський В.А.

Напруження в двошаровому ґрунті під спорудою

Внаслідок військових дій на окремих ділянках поверхні грунту змінилися механічні властивості поверхневого шару. Зведення споруд на таких ґрунтах має враховувати останнє. Метою роботи є обґрунтування та формулювання алгоритму визначення параметрів напружено-деформованого стану ґрунту двошарової структури та встановлення залежності деформацій поверхні ґрунту від механічних властивостей утворених шарів грунту. Ґрунт двошарової структури розглянуто як двошарове тіло, безмежної висоти, обмежених розмірів в ортогональному напрямі. На грунт діє зовнішнє нормальне поверхні навантаження. Шари ґрунту розглядали як лінійно пружні та ізотропні. Врахували що поверхні контакту шарів деформується сумісно без утворення зазорів та накладання. Сили взаємодії шарів рівні та протилежно спрямовані. Показники плоского напружено-деформованого стану шарів визначили методом класичної лінійної теорії пружності з використанням бігармонійної функції напружень Ері. Врахували навантаження обмеженої частини зовнішньої поверхні першого шару або його переміщення під дією споруди та умови сумісності деформування шарів. Сформулювали лінійні системи алгебраїчних рівнянь. Шляхом її розв'язку визначили невідомі коефіцієнти функції напружень. Сформулювали залежності параметрів напружено-деформованого стану шарів двошарового ґрунту. Встановили що зміна модулю стиску поверхневого шару ґрунту суттєво впливає на деформацію поверхні ґрунту під дією зовнішнього нормального навантаження та практично не залежить від інших механічних характеристик поверхневого шару ґрунту.

Ключові слова: Двошаровий ґрунт; бігармонійна функція напружень; механічні властивості матеріалу; напружено-деформований стан; навантаження.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2024.