

УДК 624.154.536

**АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ УЩІЛЬНЕННЯ ПРОШАРКУ З ГІДРО-ФОБИЗОВАНОГО ГРУНТУ ПРИ БЕТОНУВАННІ БУРОНАБИВНОЇ ПАЛІ**

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ УПЛОТНЕНИЯ ПРОСЛОЙКИ ИЗ ГИДРОФОБИЗИРОВАННОГО ГРУНТА ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ**

**ANALYTICAL DETERMINATION OF ZONE SEAL INTERLAYER OF WATER REPELLING GROUND DURING CONCRETING OF BORED PILE**

**Грецький Д.В., к.т.н.,** (Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси)

**Грецкий Д.В., к.т.н.,** (Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси)

**Gretskiy D.V., candidate of technical sciences** (Cherkasy State Technological University)

**В цій статті аналітичним шляхом визначено зміну щільності прошарку гідрофобізованого ґрунту при влаштування буронабивних паль напірним методом. Це в свою чергу дає можливість визначити значення необхідного діаметру та мінімальної відстані між палями.**

**В этой статье аналитическим путем определено изменение плотности прослойки гидрофобизированного грунта при производстве буронабивных свай напорным методом. Это в свою очередь дает возможность определять значение необходимого диаметра и минимального расстояние между сваями.**

**This article analytically determined change in the density of soil layer repellent in the manufacture of bored piles pressurized method. This in turn makes it possible to determine the value of the required diameter and the minimum distance between piles.**

**Ключові слова:**

Гідрофобізований ґрунт, буронабивні палі, напірний метод бетонування.

Гидрофобизированный грунт, буронабивные сваи, напорный метод бетонирования.  
Repellent soil, bored piles, concreting pressure method.

**Вступ.** При влаштуванні буронабивних паль з прошарком з гідрофобізованого ґрунту, після бетонування тіла палі бетонна суміш отримує радіальне розширення, звідси прошарок з гідрофобізованого ґрунту витісняється, при цьому утворюються зони із щільністю вищою, ніж природна. При визначенні розмірів зон та величини ущільнення прийємо наступні припущення:

- природний коефіцієнт пористості ґрунту постійний по глибині в межах одного шару ґрунту;
- випір гідрофобізованого ґрунту на поверхню неможливий;
- коефіцієнт пористості просадочного ґрунту зростає від границі з гідрофобізованим матеріалом вглиб масиву за кривою другого порядку.

**Аналіз останніх досліджень.** Вирішенню питань по вдосконаленню технології бетонування та підвищення якості бетону при влаштуванні буронабивних паль присвячений ряд робіт радянських і закордонних вчених І.Н. Ахвердов, В.І. Дмитрієвський, Г.А. Захарченко, С.Н. Курочкін, П.В. Проценко Д.А. Романов та інші.

**Постановка мети та завдань досліджень.** Аналітично визначити межі зон ущільнення прошарку з гідрофобізованого ґрунту при влаштуванні буронабивної палі

**Методика досліджень.** Розглянемо переріз елементарного об'єму основи ( $V$ ), що включає прошарок гідрофобізованого ґрунту в зовнішній оболонці та бетонну суміш в середині свердловини. Після ущільнення бетонної суміші, її діаметр збільшується, в результаті маємо радіальне притискання гідрофобізованого прошарку і тим самим його ущільнення.

Виділений об'єм свердловини буде мати форму циліндра (рис. 1). Прийємо висоту циліндра рівну  $\Delta h$ . Площа основи виділеного циліндричного об'єму після ущільнення навколишнього гідрофобізованого прошарку буде включати площу поперечного перерізу готової буронабивної палі та зони оболонки ущільненого ґрунту навколо палі, та визначатися радіусом  $R_{новн}$ :

$$R_{новн} = R_{палі} + t_{зфг}, \quad (1)$$

де  $R_{новн}$  – радіус виділеного об'єму, включаючи палю і прошарок гідрофобізованого ґрунту, м;

$R_{палі}$  – радіус палі, м;

$t_{зфг}$  – товщина прошарку гідрофобізованого ґрунту навколо палі, м.

**Результати досліджень.** Умовно виділимо в основі до ущільнення той же одиничний об'єм, радіусом  $R_{зфз}$ . Зіставимо рівняння стану ґрунту у виділеному об'ємі до та після ущільнення. Тому зовнішня границя виділеного об'єму прийнята постійною ( $R_{зфз} = \text{const}$ ), при збільшенні в результаті ущільнення радіуса палі ( $R_1$ ) до кінцевого радіуса палі ( $R_{нали}$ ) виникає збільшення об'єму палі, з цим відповідно зменшується об'єм ґрунту ( $V_{зфз}$ ) у виділеному об'ємі основи (рис. 1). При цьому зменшується кількість пор у ґрунті ( $V_{пустот}$ ), а кількість часток ( $V_u$ ) залишається незмінним.

До ущільнення маємо:

$$V'_{зфз} = V_u + V'_{пустот} \quad (2)$$

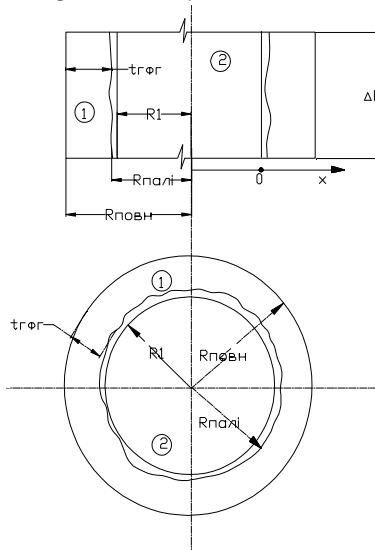


Рис. 1. Поперечний переріз буронабивної палі з гідрофобізованим прошарком: 1 – прошарок гідрофобізованого ґрунту; 2 – буронабивна палія;  $R_1$  – радіус буронабивної палі до ущільнення;  $R_{нали}$  – радіус буронабивної палі після ущільнення;  $t_{зфз}$  – товщина прошарку гідрофобізованого ґрунту;  $R_{повн}$  – радіус виділеного об'єму ґрунту, включаючи буронабивну палю та прошарок гідрофобізованого ґрунту

Після ущільнення маємо:

$$V_{зфз} = V_u + V_{пустот} \quad (3)$$

Після врахування виразу (3) об'єм ґрунту у виділеному об'ємі основи:

До ущільнення:

$$V'_{зфз} = \pi \Delta h (R_{повн}^2 - R_1^2), \quad (4)$$

$$V'_{z\phi z} = \pi\Delta h(R_{nali} + t_{z\phi z})^2 - R_1^2) . \quad (5)$$

Після ущільнення:

$$V'_{z\phi z} = \pi\Delta h(R_{nali}^2 - R_{nali}^2) , \quad (6)$$

$$V_{z\phi z} = \pi\Delta h((R_{nali} + t_{z\phi z})^2 - R_{nali}^2) . \quad (7)$$

Так як об'єм пор в одиниці об'єму ґрунту рівний:

$$n = \frac{\mathcal{E}}{1 + \mathcal{E}} , \quad (8)$$

де  $\mathcal{E}$  – коефіцієнт пористості ґрунту.

Тоді кількість пор у ґрунті в межах виділеного об'єму після ущільнення буде дорівнювати:

$$V'_{пустот} = V'_{z\phi z} \frac{\mathcal{E}}{1 + \mathcal{E}_0} , \quad (9)$$

де  $\mathcal{E}_0$  – коефіцієнт пористості ґрунту природної структури.

Підставивши в (5) вираз (9) визначимо кількість часток ґрунту в межах виділеного об'єму до ущільнення:

$$V'_{пустот} = V'_{z\phi z} \left[ \frac{\mathcal{E}}{1 + \mathcal{E}_0} \right] . \quad (10)$$

З врахуванням (9) вираз (10) має вигляд:

$$V_{ч} = \pi\Delta h((R_{nali} + t_{z\phi z})^2 - R_1^2) \frac{\mathcal{E}}{1 + \mathcal{E}_0} . \quad (11)$$

Для визначення кількості часток ґрунту у межах виділеного об'єму після ущільнення розрахуємо кількість пустот у ґрунті. Для цього розглянемо нескінченно тонкий циліндр висотою  $\Delta h$ , основою якого є кільце радіуса  $R_{nali} + x$  і товщини  $dx$ . Об'єм цього елементарного циліндра дорівнює:

$$dV = 2\pi(R_{nali} + x)dx\Delta h . \quad (12)$$

Об'єм пустот в ньому буде рівним:

$$dV = 2\pi(R_{nali} + x)dx\Delta h \frac{\mathcal{E}(x)}{1 + \mathcal{E}(x)} = 2\pi(R_{nali} + x) \left( 1 - \frac{1}{1 + \mathcal{E}(x)} \right) dx\Delta h , \quad (13)$$

де  $\mathcal{E}(x)$  – коефіцієнт пористості ущільненого ґрунту, що змінюється в межах зони ущільнення навколо палі.

Закон зміни коефіцієнта пористості в межах зони ущільненого ґрунту навколо палі [1] для розглянутого завдання запишемо у вигляді:

$$\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}_{\min} + 2 \frac{(\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_{\min})}{t_{\text{зфз}}} x - \frac{(\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_{\min})}{t_{\text{зфз}}^2} x^2, \quad (14)$$

де  $\mathcal{E}_{\min}$  – мінімальний коефіцієнт пористості ущільненого ґрунту на границі з ущільненим матеріалом;

$\mathcal{E}_0$  – коефіцієнт пористості ґрунту природної структури на границі з ущільненою зоною;

$t_{\text{зфз}}$  – товщина зони ущільненого ґрунту;

$x$  – координата в межах зони ущільнення.

Таким чином, підставивши (13) у вираз (14), одержимо:

$$V_{\text{пор}} = 2\pi\Delta h \int_0^{t_{\text{зфз}}} (R_{\text{нали}} + x) dx - 2\pi\Delta h \int_0^{t_{\text{зфз}}} \frac{(R_{\text{нали}} + x) dx}{1 + \mathcal{E}(x)}. \quad (15)$$

Введемо безрозмірні координати  $x' = \frac{x}{t_{\text{зфз}}}$ ,  $R'_{\text{нали}} = \frac{R_{\text{нали}}}{t_{\text{зфз}}}$ :

$$V_{\text{нустом}} = 2\pi\Delta h t_{\text{зфз}}^2 \left( \int_0^1 (R'_{\text{нали}} + x') dx' - \int_0^1 \frac{(R'_{\text{нали}} + x') dx'}{1 + \mathcal{E}_{\min} + 2(\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_{\min})x' - 2(\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_{\min})x'^2} \right). \quad (16)$$

Далі обраховуємо окремі інтеграли виразу (16):

$$\int_0^1 (R'_{\text{нали}} + x') dx' = R'_{\text{нали}} + \frac{1}{2}, \quad (17)$$

$$\int_0^t \frac{dx'}{1 + \varepsilon_{\min} + 2(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})x' - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})x'^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}} \int_0^t \frac{dx'}{\frac{1 + \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}} + 2x' - x'^2} =$$

$$= \frac{1}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}} \int_0^t \frac{dx'}{x'^2 - 2x' - \alpha} \quad (18)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{1 + \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}.$$

Тоді:

$$\int_0^t \frac{dx'}{1 + \varepsilon_{\min} + 2(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})x' - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})x'^2} =$$

$$\frac{1}{2\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \quad (19)$$

Аналогічно отримаємо:

$$\int_0^t \frac{x' dx'}{1 + \varepsilon_{\min} + 2(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})x' - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})x'^2} = -\frac{1}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}} \ln \frac{1 + \alpha}{\alpha} +$$

$$\frac{1}{2\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \quad (20)$$

Підставимо (17), (19), (20) у вираз (15), маємо:

$$V_{\text{вистом}} = 2\pi \Delta h t^2_{\text{зфз}} \left[ R'_{\text{нав}} \left( 2 - \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \right) + \right. \quad (21)$$

$$\left. + \left( 1 + \frac{1}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \right) \ln \frac{1 + \alpha}{\alpha} - \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \right]$$

Замінімо безрозмірні координати  $x'$  та  $R'$  :

$$V_{\text{вистом}} = \pi \Delta h \left[ \begin{aligned} & R'_{\text{нали}} t_{\text{зфз}} \left( 2 - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) + \\ & + t_{\text{зфз}} \left( 1 + \frac{1}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{1+\alpha}{\alpha} - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) \end{aligned} \right] \quad (22)$$

З умови, що об'єм часток ґрунту в межах виділеного об'єму до і після ущільнення зберігається, підставимо у (3) вирази (5) та (22) та привівнявши до правої частини виразу (11), отримаємо:

$$\begin{aligned} \pi \Delta h ((R_{\text{нали}} + t_{\text{зфз}})^2 - R_1^2) \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon_0} &= \pi \Delta h ((R_{\text{нали}} + t_{\text{зфз}})^2 - R_{\text{нали}}^2) - \\ & t_{\text{зфз}}^2 \left[ \begin{aligned} & \left( 2 - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) + \\ & + t_{\text{зфз}} \left( 1 + \frac{1}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{1+\alpha}{\alpha} - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) \end{aligned} \right] \quad (23) \\ & - R_{\text{нали}} t_{\text{зфз}} \left( 2 - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) \end{aligned}$$

Після перетворень маємо:

$$\begin{aligned} & t_{\text{зфз}} \left( \frac{1}{1 + \varepsilon_0} + \frac{1}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{1+\alpha}{\alpha} - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) + \\ & + R_{\text{нали}} t_{\text{зфз}} \left( \frac{2}{1 + \varepsilon_0} - \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}})} \ln \frac{\sqrt{1+\alpha}+1}{\sqrt{1+\alpha}-1} \right) + \frac{1}{1 + \varepsilon_0} (R_{\text{нали}}^2 - R_1^2) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

Отримане квадратне рівняння запишемо для безрозмірної товщини

$$t'_{\text{зфз}} = \frac{t_{\text{зфз}}}{R_{\text{нали}}} :$$

$$t'_{z\phi z}{}^2 \left( 1 + \frac{1 + \varepsilon_0}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{1 + \alpha}{\alpha} - \frac{1 + \varepsilon_0}{\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \right) +$$

$$+ t_{z\phi z} \left( 2 - \frac{1 + \varepsilon_0}{\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \right) + \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_{nali}} \right)^2 \right) = 0 \quad (25)$$

Розв'язуючи отримане рівняння відносно  $t'_{\bar{a}\bar{a}}$  та замінивши безрозмірну товщину отримаємо формулу (26):

$$\frac{t_{z\phi z}}{R_{nali}} = \frac{\left( \left( \frac{1 + \varepsilon_0}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}}{\sqrt{1 + \varepsilon_0} - \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}} \right) - 2 - \right.}{\left. - \left( 2 - \frac{1 + \varepsilon_0}{\sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})}} \ln \frac{\sqrt{1 + \varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}}{\sqrt{1 + \varepsilon_0} - \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}} \right)^2 + \right.}$$

$$+ 4 \left( \frac{1 + \varepsilon_0}{\sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})}} \ln \frac{\sqrt{1 + \varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}}{\sqrt{1 + \varepsilon_0} - \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}} - \frac{1 + \varepsilon_0}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{1 + \varepsilon_0}{1 + \varepsilon_{\min}} - 1 \right) \left( 1 - \left( \frac{R_1}{R_{nali}} \right)^2 \right)$$

$$\left. \frac{1 + \varepsilon_0}{\sqrt{1 + \alpha}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{\sqrt{1 + \alpha} + 1}{\sqrt{1 + \alpha} - 1} \right) \cdot (26)$$

$$2 \left( \frac{1 + \varepsilon_0}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})} \ln \frac{1 + \varepsilon_0}{1 + \varepsilon_{\min}} - \sqrt{\frac{1 + \varepsilon_0}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min})}} \ln \frac{\sqrt{1 + \varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}}{\sqrt{1 + \varepsilon_0} - \sqrt{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}}} \right)$$

## Висновки

Рішенням формули (26) є визначення розмірів зон ущільненого гідрофобізованого ґрунту навколо буронабивних паль, що дає значення необхідного діаметру палі, мінімальної відстані між палями та дозволяє визначити раціональний склад засобів технічної оснастки при виконанні робіт по влаштуванню буронабивних паль в просадочних ґрунтах II типу.

1. Бартоломей А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А. Бартоломей, И.М. Омельчук, Б.С. Юшков. – М. : Стройиздат, 1994. – 103 с.