

УДК 620.19

**Матченко Т.І. к.т.н., Шаміс Л.Б.,
Первушова Л.Ф., ПАТ КІЕП, м. Київ,
Матченко П.Т. ДНТЦ ЯРБ ДП
Держатомрегулювання, м. Київ**

**МЕТОДИКА ОЦІНКИ МЕХАНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВИ СПОРУД
ПОСИЛЕНОЇ ЦЕМЕНТАЦІЄЮ**

Викладені співвідношення, які дозволяють визначати розрахунковим методом механічні характеристики основи споруд після цементації на визначений термін її експлуатації. В методиці враховані такі явища, як відмова свердловини і процес корозії 1-ого виду. Розроблена методика оцінки механічних характеристик цементованої основи на визначений термін її експлуатації та оцінки довговічності цементованої основи за параметром – опір основи. Розроблена методика розрахунку дозволяє визначити усереднені характеристики основи споруд після цементації без проведення польових випробувань та лабораторних досліджень зразків ґрунту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: цементація, довговічність, основи споруд.

Вступ. Одним з видів закріплення шарів ґрунту є їх цементація. Цементація застосовується для якісного закріплення тріщинуватих скельних, в тому числі ґрунтів з карстами, а також техногенного шару ґрунту шляхом нагнітання через свердловину розчинів в межах закріплююмого масиву і заповнення всіх тріщин, каналів, пустот, розмір яких достатній для проникнення розчину. Роботи з цементації виконуються способом послідового зближення свердловин, починаючи з максимальних відстаней, при яких між ними, при нагнітанні розчину, практично відсутній гідравлічний зв'язок. Нагнітання розчину виконується під навантаженням, в якості якого використовуються ґрунти, що залягають над областю ін'єкції ґрунту;

сама споруда, або спеціально укладені бетонні плити, або моноліт, який за вагою і міцністю не повинен руйнуватися в процесі нагнітання в ґрунт реагентів і не допускати виходу розчинів на поверхню. Такий вид цементації застосований [13] для забезпечення однорідних характеристик техногенного ґрунту основи споруд Нового Безпечного Конфайменту (НБК) на майданчику ЧАЕС.

Проект з виконання робіт з цементації основи передбачає досягнення основою фізичної та механічної однорідності з певними значеннями наступних механічних характеристик: густина або питома вага ґрунту (ρ); модуль деформації ґрунту в вертикальному напрямку (E); опору основи (R); кута внутрішнього тертя ґрунту (φ); коефіцієнт зчеплення ґрунту (C); для пісків: характеристика щільності складання (I_D); коефіцієнт пористості (e); для глинистих ґрунтів: показник текучості (консистенції) (I_L); число пластичності (I_p).

Якість виконання робіт з цементації також передбачає зберігання мінімально (максимально) допустимих значень цих характеристик протягом проектного ресурсу, та прогнозування їх зміни в часі.

Контроль якості робіт з посилення основи цементацією виконується двома методами:

1) Методом ультразвукового контролю ґрунту. Визначається модуль деформації ґрунту, суцільність, однорідність, розташування, форма і розміри (радіус і висота) елементів посилення ґрунту.

2) Методом буріння свердловин і відбором керну. В подальшому виконується візуальний огляд, дослідження кернів і лабораторні випробування зразків ґрунтів вилучених з кернів.

Відібрані керни повинні мати шарову структуру, яка складається з шарів цементного каменя і ущільненого ґрунту. Керни відбираються із свердловин для ін'єкції, заповнених цементним каменем і з свердловин в ґрунті, що розташовані на рівних відстанях від свердловин для ін'єкції. Статистична обробка результатів досліджень виконується окремо для кернів відібраних із свердловин ін'єкції і для кер-

нів цементованого ґрунту за вимогами [8].

Середні значення основи приведеної до умовно однорідної з довірчим ймовірнісним забезпеченням $\alpha=0,5$ повинні мати наступні характеристики: середня щільність основи в сухому стані $\rho_d \geq 1,7 \text{ т/м}^3$; середній коефіцієнт пористості $e \leq 0,54$; середній модуль статичної деформації основи в вертикальному напрямку $E \geq 30 \text{ МПа}$; кута внутрішнього тертя ґрунту $\varphi \geq 300$ (при $\alpha=0,5$). Контроль якості посилення ґрунту основи виконується в два етапи: після виконання цементації на ділянках основи під будівлі і споруди визначених для випробування; після виконання усього комплексу робіт з цементації основи на кожному об'єкті.

Суть проблеми. Механічні характеристики основи після цементації можна визначити шляхом польових випробувань окремих елементів основи, лабораторних досліджень зразків ґрунту та зразків цементних розчинів в свердловинах та методами розрахунків. Массив основи після цементації є анізотропним внаслідок відмінних характеристик матеріалу свердловин і матеріалу ґрунту. Цементация масивів ґрунту виконується за певною схемою і на певну глибину. Тому характеристики основи після цементації можуть відрізнятися для окремих ділянок. При нагнітанні розчинів в свердловини заздалегідь невідомо, як заповнюються тріщини, пустоти і пори, їх щільність в залежності від відстані до свердловини, наявність прошарків торфу або мулу. Внаслідок цього будь які методи визначення характеристик основи після цементації дозволяють отримати дуже приближені значення, які суттєво відрізняються одне від одного в залежності від місця випробування, відстані від свердловини, глибини, з якої вилучені зразки. В процесі експлуатації основи рух ґрунтових вод, наявність хімічної і біологічної агресивності ґрунту може призвести до корозії цементного каменю та руйнування цементованих свердловин, що призводить до зміни в часі характеристик

окремих елементів цементованої основи і усереднених значень характеристик масиву. На сьогодні є необхідність в наявності методики визначення усереднених значень масиву основи, посиленої цементацією на заданий термін експлуатації t .

Огляд норм з вирішення проблеми.

У п.14 [1] викладені основні вимоги щодо виконання робіт з цементації основи. В додатку 2 [1] перелічені види прихованих робіт, які необхідно контролювати при виконанні робіт з цементації. А саме, необхідно контролювати: буріння свердловин усіх видів; занурення ін'єкторів усіх видів; приготування ін'єкційних і тампонажних розчинів і їх нагнітання. В тексті змін до п.11.35 і 11.35б [1] йдеться про методи контролю буроін'єкційних паль діаметром більше 0,4 м, які не розповсюджуються на палі, що використовуються при цементації діаметром менше 0,2 м.

Контроль якості виконання окремих видів робіт і збудованих споруд повинен виконуватися у відповідності до [9-11].

В інших нормативних документах не викладені вимоги і метод із визначення механічних характеристик основи після цементації з урахуванням її композитної структури.

Ціль роботи – викласти методику оцінки механічних характеристик основи після цементації за даними інженерно-геологічних вишукувань ґрунту до цементації та за даними технології виконання робіт з цементації та визначення їх зміни протягом експлуатації.

Розрахункова оцінка осередненого за масивом кута внутрішнього тертя масиву ґрунту після цементації ($\varphi_{цн}$).

Свердловини, заповнені цементним розчином і розташовані за певною системою по площині масиву, що цементується, збільшують стійкість до зсуву масиву і тим самим збільшують кут внутрішнього тертя $\varphi_{цн}$, приведений до середнього за масивом. Нормативне значення опір зсуву ґрунту можна визначити за формулами:

$$R_{r1} = [(\gamma_r \times h_r \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{III}} + C_{\text{III}}) \times A_r + (n \times A_{\text{II}}^2 \times R_{\text{bтн}})] / A_M, \quad (1)$$

$$R_{r2} = \gamma_r \times h_r \times \operatorname{tg} \varphi_{\text{III}} + C_{\text{III}}, \quad (2)$$

де γ_r – осереднене значення об'ємної ваги ґрунту в межах глибини цементації;

h_r – глибина цементації;

φ_{III} – осереднене в межах глибини цементації значення кута внутрішнього тертя ґрунту, розташованого між свердловинами, в розрахунках за другою групою критичних станів;

φ_{III} – осереднене за масивом значення кута внутрішнього тертя масива ґрунту після цементації;

C_{III} – осереднене в межах глибини цементації значення коефіцієнта зчеплення ґрунту в розрахунках за другою групою критичних станів;

A_r – площа масива цементації за виключенням сумарної площі перерізів свердловин;

A_{II} – площа перерізу однієї свердловини;

n – кількість свердловин на масиві цементації;

A_M – площа масиву цементації;

$R_{\text{bтн}}$ – нормативне значення опору осьового розтягнення розчину свердловини. Порівнюючі ці рівняння з $R_{r1} = R_{r2}$, отримаємо:

$$\varphi_{\text{III}} = \arctg[(R_{r1} - C_{\text{III}}) / (\gamma_r \times h_r)] \quad (3)$$

Розрахункова оцінка осередненого за масивом коефіцієнта Пуассона масиву ґрунту після цементації (ν_{II}). Для пісків значення коефіцієнта Пуассона масиву ґрунту після цементації (ν_{II}) може бути вираховане за формулою:

$$\nu_{\text{II}} = \frac{\operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_{\text{III}} / 2)}{1 + \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi_{\text{III}} / 2)}, \quad (4)$$

де φ_{III} – кут внутрішнього тертя ґрунту після цементації, визначений з довірчим ймовірнісним забезпеченням $\alpha = 0,85$. При відсутності статистичних даних в розрахунках за деформаціями можна

прийняти $\varphi_{\text{III}} = \varphi_{\text{III}}$.

Для глинистих ґрунтів значення коефіцієнта Пуассона можна визначити за залежністю:

$$\nu_r = \nu_r = 0,15 - 0,12 \times I_p + 12 \times I_p^2 + 0,27 \times I_L, \quad (5)$$

де I_L – показник текучості ґрунту;

I_p – число пластичності ґрунту.

Розрахункова оцінка коефіцієнта пружного рівномірного стиснення (коефіцієнта ліжка) цементованої основи в вертикальному напрямку C_{zi} (кН/м³). Цементована основа у вигляді заповнених розчином свердловин, завантажених «силовою» плитою, можна розглядати, як комбінований пальово-плитний фундамент. Методика визначення жорсткості комбінованого пальово-плитного (КПП) фундаменту викладена в п. 7.4.10-7.4.12 [6]. Загальна жорсткість КПП фундаменту K_f (кН/м) вираховується за формулою:

$$K_f = K_p + K_C, \quad (6)$$

де K_p – жорсткість усіх паль, або свердловин заповнених розчином, кН/м; K_C – жорсткість ґрунту, на який спирається силова плита, кН/м.

У свою чергу:

$$K_p = K_1 \times n / R_s, \quad (7)$$

де K_1 – жорсткість однієї палі (свердловини) в вертикальному напрямку; n – кількість свердловин, заповнених розчином; R_s – визначається за таблицею 7.19 [6], або за таблицею 1.

Жорсткість одиночної палі K_1 визначається за формулою:

$$K_1 = P_1 / S_1, \quad (8)$$

де P_1 – навантаження на одиночну палу, яке викликає її осідання S_1 . При відсутності експериментальних даних значення S_1 можна вирахувати за п.1 додатку П [5].

Таблиця 1

Значення коефіцієнту збільшення осідання R_s

Кількість Свердловин (паль)	$L/D=10$ або $E_{II}/E_I=100$		$L/D=25$ або $E_{II}/E_I=1000$		$L/D=50$ або $E_{II}/E_I=10000$	
	$a/D=7$	$a/D=10$	$a/D=7$	$a/D=10$	$a/D=7$	$a/D=10$
4	1,25	1,10	1,80	1,70	2,00	1,80
9	1,90	1,80	2,90	2,65	3,15	2,85
16	2,35	2,25	3,65	3,30	4,00	3,60
25	2,75	2,60	4,25	3,90	4,70	4,25
36	3,10	2,90	4,80	4,30	5,25	4,70
49	3,30	3,15	5,10	4,70	5,60	5,10
100	4,00	3,70	6,10	5,50	6,70	6,00
196	4,50	4,25	7,00	6,35	7,65	6,90
400	5,10	4,85	7,90	7,20	8,70	7,80
1000	6,00	5,55	9,15	8,25	10,05	9,00

Примітка 1. У кожному стовпчику при інших значеннях n коефіцієнт R_s визначається за формулою $R_s = 0,5 \times R_s(E_{II}/E_I = 100) \times \lg(n)$.

Примітка 2. Таблиця складена для груп свердловин, що утворюють квадратну форму. Для груп прямокутної форми кількість свердловин n приймається такою, що дорівнює квадрату з кількості паль (свердловин) по короткій стороні фундаменту.

Жорсткість ґрунту під плитою K_C визначають за формулою:

$$K_C = E_I \times A_{II} / [(1 - \nu^2) \times m_0 \times A_{II}^{0,5}], \quad (9)$$

де E_I – середній модуль деформації ґрунту в вертикальному напрямку на глибину до B , м (B – ширина плити навантаження при цементзації), кПа;

A_{II} – площа плити фундаменту споруди, розташованій на плиті навантаження цементованої основи ($A = B_{\phi} \times L$, де B_{ϕ} і L – ширина і довжина плити фундаменту, м), м²;

A_{II} – площа штампу для визначення E_I методом штампових випробувань основи. $A_{II} = 0,5$ м²;

m_0 – коефіцієнт, який залежить від відношення L/B і його значення приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнту m_0

L/B	m_0
1	0,88
2	0,86
3	0,83
5	0,77
10	0,67

Коефіцієнт пружного рівномірного стиснення C_{ZI} цементованої основи визначається за формулою, кН/м³:

$$C_{ZI} = K_I / A_I. \quad (10)$$

Приведений модуль деформації цементованої основи E_{II} визначається за формулою:

$$E_{II} = C_{II} \times (1 - \nu^2) \times m_0 \times A_{II}^{0,5} \quad (11)$$

Визначення коефіцієнта пружного рівномірного стиснення C_{ZD} цементованої основи в вертикальному напрямку при розрахунках на дію динамічних або сейсмічних навантажень. При відсутності експериментальних даних значення C_{ZD} , кН/м³, для фундаментів на цементованій основі з площею підшви фундаменту (A_{II}) не більшою за 200 м² допускається визначати за формулою:

$$C_{ZD} = b_0 \times E_{II} \times (1 + (A_{10} / A_{II})^{0,5}), \quad (12)$$

де b_0 – коефіцієнт, м⁻¹, який приймається для цементованої основи рівним 1,5 як для крупнообломочних ґрунтів; $A_{10} = 10$ м². Для фундаментів з площею A_{II} більшою за 200 м² значення C_{ZD} приймаються як для фундаментів з площею підшви $A_{II} = 200$ м².

Розрахункова оцінка усередненого опору основи після цементзації. Свердловини, що заповнені цементним

розчином, збільшують опір основи, усереднений за площею фундаменту. Усереднений або приведений нормативний опір основи під подошвою фундаменту $R_{цф}$ визначається за формулою:

$$R_{цф} = R_{це} \times B_{ф} / a_E, \quad (13)$$

де a_E – ширина елемента цементованої основи – відстань між двома сусідніми свердловинами, заповненими цементним розчином, м;

$B_{ф}$ – ширина фундаменту;

$R_{це}$ – приведений нормативний опір елемента цементованої основи шириною a_E .

Приведений нормативний опір елемента цементованої основи $R_{це}$ вираховується за формулою:

$$R_{це} = (R_{п} \times A_{п} + \sigma_{г} \times A_{г}) / A_E, \quad (14)$$

де $R_{п}$ – нормативний опір палі (свердловини), МПа;

$A_{п}$ – площа поперечного перерізу палі, м²;

$\sigma_{г}$ – напруження в ґрунті під подошвою фундаменту у мить відмови палі або свердловини заповненої цементним розчином, МПа;

A_E – площа елемента основи, яка дорівнює площі чотирьохкутника, вершинами якого є свердловини, м²;

$A_{г}$ – площа, яка дорівнює:

$$A_{г} = A_E - A_{п}. \quad (15)$$

Таким чином для визначення $R_{це}$ необхідно, по-перше, визначити $R_{п}$ і $\sigma_{г}$.

Розрахункова оцінка опору свердловини, заповненої цементним розчином $R_{п}$. Відмова буроін'єкційної палі малого діаметру або свердловини, заповненої розчином, може виникнути за однією з наступних причин:

1) руйнування матеріалу палі при її стисканні;

2) втрата стійкості палі при її стисканні;

3) порушення несучої здатності палі за ґрунтом при її вертикальному навантаженні.

За відмову палі приймається найменше значення $R_{п}$ із розрахованих для кожного із трьох випадків. В першому випадку $R_{п} = R_{bn}$ (де R_{bn} – призматична міцність розчину, що заповнює свердловину). В другому випадку:

$$R_{п} = \pi^2 \times E_{п} \times I_{п} / [A_{п} \times (\mu \times l_m)^2], \quad (16)$$

де $E_{п}$ – модуль пружності матеріалу палі, МПа; μ – безвимірний коефіцієнт приведеної довжини палі l_m (з консервативних міркувань $\mu=2$);

$I_{п}$ – момент інерції поперечного перерізу палі, м⁴, визначається за формулою:

$$I_{п} = \pi \times D^4 / 64; \quad (17)$$

l_m – довжина згинаємої частини палі, м, визначається за формулою:

$$l_m = k_2 / \alpha_d, \quad (18)$$

де $k_2 = 2,2$;

$$\alpha_d = (K \times b_p / (\gamma_c \times E_{п} \times I_{п}))^{1/5}, \quad (19)$$

де K – усереднене за довжиною палі значення коефіцієнту пропорційності в відповідності до таблиці Н.8.1 [5], але в одиницях виміру, МПа/м⁴;

b_p – умовна ширина палі, $b_p = 1,5 \times D + 0,5$, м; γ_c – коефіцієнт умов роботи, $\gamma_c = 3$ у випадку, якщо основа розглядається як пружне лінійно-деформоване середовище. В третьому випадку, а саме при порушенні несучої здатності палі за ґрунтом:

$$R_{п} = F_D / A_{п}. \quad (20)$$

Несуча здатність за ґрунтом висячих набивних і бурових паль, а також свердловин, заповнених цементним розчином F_D . У відповідності з п. Н.3 [5] несуча здатність висячих набивних і бурових паль визначається за формулою:

$$F_D = \gamma_c \times (\gamma_{cr} \times R_c \times A_{п} + u \times \sum \gamma_{ci} \times f_i \times h_i). \quad (21)$$

Умовні позначення приведені в [5].

Розрахунковий опір i-го шару ґрунту на бічній поверхні стовбура свердловини, заповненої цементним розчином f_i . Розрахунковий опір i-го

шару ґрунту на бічній поверхні стовбура палі визначається за формулою Н.2.2 [5]:

$$f_i = \sigma_{zqi} \times [v_i / (1 - v_i)] \times tg \varphi_{III} + C_{III}, \quad (22)$$

Значення f_i також можна вирахувати за формулою:

$$f_i = \sigma_{zqi} \times tg^2(45^\circ - \varphi_{III} / 2) \times tg \varphi_{III} + C_{III}, \quad (23)$$

де σ_{zqi} – вертикальне напруження від власної ваги ґрунту в середині i -го шару ґрунтової основи, МПа.

У свою чергу:

$$\sigma_{zqi} = \sum_{i=1}^m \Delta h_i \times \rho_{0i}, \quad (24)$$

де Δh_i – товщина i -го шару ґрунту, м, з урахуванням зважувальної дії води (сила Архімеда), МН/м³;

m – кількість шарів ґрунту, що розташовані від розглядаємого шару до поверхні ґрунту. Питому вагу або густину ґрунту можна вирахувати за формулами:

$$\rho_{0i} = (\rho_{Si} - \rho_B) \times (1 - n_i), \quad (25)$$

або

$$\rho_{0i} = (\rho_{Si} - \rho_B) / (1 - e_i), \quad (26)$$

де ρ_{Si} – питома вага твердих часток i -го шару ґрунту, МН/м³;

ρ_B – питома вага води, МН/м³;

n_i – пористість i -го шару ґрунту, доли;

e_i – коефіцієнт пористості i -го шару ґрунту, безвимірний.

Опір ґрунту під нижнім кінцем свердловини, заповненої цементним розчином R_C . Розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем палі або свердловини, заповненої цементним розчином, R_C слід визначати за рекомендацією Н.3.2 [5]. У випадку наявності даних польових або лабораторних випробувань з визначення $\varphi_H, C_H, \rho_S, \rho_D, n, W, I_L, I_P$ розрахунковий опір R_C можна визначити за формулою:

$$R_C = \sigma_{Bi} \times tg^2(45^\circ + \varphi_{III} / 2) + 2 \times C_{III} \times tg^2(45^\circ + \varphi_{III} / 2), \quad (27)$$

де σ_{Bi} – вертикальне напруження в ґрунті

обіч палі на рівні її кінця на глибині довжини палі з урахуванням ущільнення або розрихлення ґрунту. При відсутності ущільнення або розрихлення ґрунту

$$\sigma_{Bi} = \sigma_{zqi}.$$

Розрахункова оцінка напруги в ґрунті під підшвою фундаменту у мить відмови свердловини, заповненої цементним розчином (σ_r). Напруга в ґрунті у мить відмови свердловини, заповненої цементним розчином, визначається залежністю:

$$\sigma_r = C_z \times S_D, \quad (28)$$

де S_D – осідання ґрунту, яке відповідає зусиллю відмови свердловини, заповненої розчином P_D . P_D приймається найменшим із значень, які відповідають значенням трьох опорів палі R_{II} за формулою:

$$P_D = R_{II} \times A_{II}. \quad (29)$$

Значення S_D вираховуються за формулою:

$$S_D = S_E / 0,25, \quad (30)$$

яка відповідає формулі П.1.1 [5]. Значення S_E визначається за формулою П.1.2 [5], в якій $P_E = 0,5 \times 1,25 \times P_D = 0,625 \times P_D$.

Оцінка маси гідроксиду кальцію (СаО), який розчиняється і вимивається із цементованого масиву ґрунту внаслідок корозії 1-ого виду [2]. Цементний розчин, який при цементації заповнює свердловини, тріщини, пустоти і пори ґрунту і який знаходиться нижче рівня ґрунтових вод, протягом експлуатації основи піддається поступовому розчиненню і вимиванню гідроксиду кальцію СаО. Розчинення СаО відбувається навіть у неагресивних водах. Швидкість розчинення СаО залежить від: швидкості руху підземних ґрунтових вод; температури ґрунту на глибині, що розглядається; гідростатичного тиску; а також властивостей цементних розчинів, що використовуються при цементації.

Масу гідроксиду кальцію M_1 , кг, що вимивається з одного кубічного метра цементованого масиву, можна вирахувати за формулою:

$$M_1 = \tau \times v_0 \times \prod_{i=1}^n k_i, \quad (31)$$

де τ – час експлуатації цементованої основи, рік;

v_0 – швидкість розчинення CaO в лабораторних умовах для зразка цементного розчину, кг/рік;

Π – знак добутку;

k_i – коефіцієнти впливу на швидкість розчинення і вимивання CaO різних факторів;

n – кількість врахованих факторів з тих, що впливають на розчинення;

i – порядковий номер фактору.

У свою чергу:

$$v_0 = C_{II} \times Q, \quad (32)$$

де C_{II} – гранична рівноважна концентрація гідроксиду кальцію в водному розчині (табл.3.);

Q – об'єм води, що просочується крізь цементний розчин цементованої основи в одному кубічному метрі за один рік, м³/рік, і визначається за формулою:

$$Q = k_f \times k_{II} \times A \times b_1 \times b_2, \quad (33)$$

де k_f – коефіцієнт фільтрації (см/с) вологи в цементному розчині (значення коефіцієнтів фільтрації вологи в цементному розчині k_f або показники проникненості цементних розчинів і бетонів в відповідності з СНіП 2.03.11-85 див. табл. 4); площа перерізу одного кубічного метру цементного розчину поперек руху ґрунтових вод ($A=1\text{м}^2$);

b_1 – коефіцієнт переходу одиниці вимірювання (м/см) $b_1=10^{-2}$;

b_2 – коефіцієнт переходу одиниці вимірювання (с/рік) $b_2=31557600$;

k_{II} – коефіцієнт відношення об'єму цементного розчину в об'ємі цементованого масиву ґрунту, визначається за формулою:

$$k_{II} = m \times \pi \times (D/a)^2 / 4, \quad (34)$$

де a – відстань між двома сусідніми свердловинами діаметром D , м;

m – коефіцієнт потрапляння цементу в тріщини, пористості і пори ($m=1,5\dots3$); $\pi=3,14$.

Коефіцієнти впливу на швидкість розчинення і вимивання гідроксиду кальцію з цементного каменя: k_1 – коефіцієнт впливу швидкості руху ґрунтових вод визначається за формулою:

$$k_1 = (1 + b_3), \quad (35)$$

де b_3 – коефіцієнт, який є функцією швидкості руху ґрунтової води (значення коефіцієнту b_3 – впливу швидкості руху ґрунтової води v_B на розчинність CaO див. табл. 5), безвимірний;

k_2 – коефіцієнт впливу температури ґрунту, визначається за формулою:

$$k_2 = (1 + b_4 \times (t - 20)), \quad (36)$$

де $b_4 = 0,007, 1^\circ\text{C}$; t – температура ґрунту в $^\circ\text{C}$;

k_3 – коефіцієнт впливу гідростатичного тиску, який визначається за формулою:

$$k_3 = 1 + H/10, \quad (37)$$

де H – висота гідростатичного стовбура починаючи вимірювання від рівня ґрунтових вод до перерізу який досліджується, м; 10 – 10 метрів.

Таблиця 3

Значення граничної рівноважної концентрації CaO

Формула мінералу цементного каменя	C_{II} – гранична рівноважна концентрація CaO, кг/м ³
2CaO×SiO ₂ ×aq	1,18
3CaO×2SiO ₂ ×aq	1,18
CaO×SiO ₂ ×aq	0,052
4CaO×Al ₂ O ₃ ×19H ₂ O	1,08
3CaO×Al ₂ O ₃ ×6H ₂ O	0,56
2CaO×Al ₂ O ₃ ×aq	0,36
4CaO×Fe ₂ O ₃ ×aq	Більше 1,06
2CaO×Fe ₂ O ₃ ×aq	0,64
Розкладання на Ca(OH) ₂ і Fe(OH) ₃	Менше 0,64
3CaO×Al ₂ O ₃ ×3CaO×SiO ₂ ×aq	0,045

Таблиця 4
Значення коефіцієнту фільтрації k_f

Марка бетону або цементного розчину за водонепроникністю	Коефіцієнт фільтрації k_f при рівноважній вологості, см/с
W4	Понад 2×10^{-9} до 7×10^{-9}
W6	Понад 6×10^{-10} до 2×10^{-9}
W8	Понад 1×10^{-10} до 6×10^{-10}

Таблиця 5
Значення коефіцієнту b_3

v_B , м/добу	b_3 , безвимірний
0	0
0,001	0,01
0,01	0,1
0,1	1
0,5	5

Таким чином масу (кг) гідроксиду кальцію, що розчиняється у воді (корозія розчину першого роду), можна визначити за формулою:

$$M_1 = \tau \times C_{II} \times k_f \times k_{II} \times A \times b_1 \times b_2 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \quad (40)$$

Оцінка об'єму гідроксиду кальцію (СаО), що вступає в хімічну реакцію з агресивною рідиною і вимивається із цементованого масиву ґрунту [3]. Якщо ґрунт або ґрунтова вода, або поверхнева вода мають ступінь агресивності по відношенню до цементних розчинів від 1 до 4 [12], тоді гідроксид кальцію вступає в хімічну реакцію з агресивними елементами середовища і відбувається корозія цементного розчину (корозія розчину другого роду). Внаслідок корозії цементний камінь втрачає свою структурну міцність і вимивається ґрунтовими водами із цементованого масиву ґрунту. Об'єм втрачаємого цементного каменя можна вираховувати за формулою:

$$V_{II} = v_2 \times A \times b_1 \times \left(\prod_{i=1}^n N_i \right) \times k_{II} \times \tau, \quad (41)$$

де v_2 – швидкість корозії цементного розчину, см/рік (швидкість корозії цементного розчину в рідині або в ґрунтових водах див. табл. 6);

A – площа перерізу масиву ґрунту, m^2 , $A=1 m^2$; b_1 – коефіцієнт переходу одиниці вимірювання (м/см), $b_1=10^{-2}$;

k_{II} – коефіцієнт відношення об'єму цементного розчину в об'ємі цементованого масиву ґрунту; τ – час експлуатації цементованої основи, рік;

$\prod_{i=1}^n N_i$ – добуток коефіцієнтів впливу на

швидкість корозії цементного каменя;

N_1 – коефіцієнт впливу температури середовища, без вимірний, який визначається за формулою:

$$N_1 = 1 + (t^0 C - 20^0 C) \times 0,05; \quad (42)$$

N_2 – коефіцієнт впливу швидкості руху рідини на швидкість корозії, без вимірний, який визначається за формулою:

$$N_2 = v_B / 0,1. \quad (43)$$

Маса втрати цементного каменя внаслідок корозії другого виду визначається за формулою:

$$M_2 = V_{II} \times \rho_{II}, \quad (44)$$

де ρ_{II} – густина цементного каменя, kg/m^3 .

Методика оцінки механічних характеристик цементованої основи на визначений термін її експлуатації. Протягом експлуатації цементованої основи внаслідок корозії і вимивання цементного каменя змінюється пористість ґрунту і, як наслідок цього, змінюються усі механічні характеристики. Відомо, що пористість (n) визначається залежністю:

$$n = V_{пор} / V_{gp} = 1 - \rho_{ск} / \rho_s, \quad (45)$$

де $V_{пор}$ – об'єм пор в m^3 ґрунту, m^3 ;

V_{gp} – об'єм ґрунту, m^3 , $V_{gp}=1 m^3$;

$\rho_{ск}$ – питома вага твердих часток, t/m^3 ;

ρ_s – питома вага скелету ґрунту, t/m^3 .

У свою чергу:

$$\rho_s = m_T / V_T; \quad \rho_{ск} = \rho_d = m_T / V_{gp}; \quad (46)$$

де m_T – маса твердих часток ґрунту, t ;

V_T – об'єм твердих часток ґрунту, m^3 .

Значення швидкості корозії цементного розчину v_2

		Значення v_2 (см/рік ^{0,5}) в рідині					
Ступінь агресивності рідини для марок бетону		Клас бетону					
		B10	B15	B20	B25	B30	B40
W2	не агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	слабо агресивна	1,474	0,867	0,51	0,30	0,176	0,104
	середньо агресивна	4,42	2,60	1,53	0,90	0,53	0,311
	сильно агресивна	8,85	5,20	3,06	1,80	1,059	0,623
W4	не агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	слабо агресивна	0,736	0,433	0,255	0,15	0,088	0,52
	середньо агресивна	1,47	0,867	0,51	0,30	0,176	0,104
	сильно агресивна	2,95	1,73	1,02	0,60	0,353	0,207
W6	не агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	слабо агресивна	0,210	0,1214	0,0714	0,042	0,025	0,014
	середньо агресивна	0,042	0,024	0,0144	0,085	0,05	0,030
	сильно агресивна	0,83	0,05	0,289	0,17	0,10	0,058
W8	не агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	слабо агресивна	0,042	0,024	0,0144	0,0085	0,005	0,0030
	середньо агресивна	0,083	0,050	0,030	0,017	0,010	0,0058
	сильно агресивна	0,172	0,10	0,06	0,035	0,020	0,0121
W10	не агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	слабо агресивна	0,005	0,003	0,0017	0,001	0,0006	0,00
	середньо агресивна	0,0147	0,0086	0,0051	0,003	0,0017	0,001
	сильно агресивна	0,030	0,017	0,01	0,006	0,0035	0,002
W12	не агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	слабо агресивна	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	середньо агресивна	0,0024	0,0014	0,0008	0,0005	0,00	0,00
	сильно агресивна	0,0050	0,0030	0,0017	0,001	0,00	0,00

При вимиванні зруйнованого цементного каменя із цементованого ґрунту змінюється маса твердих часток ґрунту m_T і, як наслідок, змінюється його пористість. На час експлуатації τ маса твердих часток дорівнює:

$$m_T(\tau) = m_T(\tau = 0) - \Delta m_T(\tau), \quad (47)$$

де $m_T(\tau = 0)$ – маса твердих часток на початку експлуатації, т;

$\Delta m_T(\tau)$ – маса вимитого цементного каменя, т;

$m_T(\tau)$ – залишкова маса твердих часток на час експлуатації τ .

Маса вимитого цементного каменя дорівнює сумі мас втраченого цементного каменя при корозії першого (M_1) і другого (M_2) виду:

$$\Delta m_T(\tau) = (M_1 + M_2) \times b_5, \quad (48)$$

де b_5 – коефіцієнт переходу одиниць виміру (т/кг), $b_5 = 10^{-3}$.

Питома вага твердих часток ґрунту і повний об'єм ґрунту протягом експлуатації не змінюються:

$$\rho_s(\tau) = \rho_s(\tau = 0); \quad V_{GP}(\tau) = V_{GP}(\tau = 0). \quad (49)$$

Тоді:

$$\rho_{CK}(\tau) = \frac{m_T(\tau = 0)}{V_{GP}(\tau = 0)} - \frac{\Delta m_T(\tau)}{V_{GP}(\tau = 0)}; \quad (50)$$

$$n(\tau) = \frac{1 - m_T(\tau = 0)}{V_{GP}(\tau = 0) \times \rho_s(\tau = 0)} + \frac{\Delta m_T(\tau)}{V_{GP}(\tau = 0) \times \rho_s(\tau = 0)}; \quad (51)$$

$$\Delta n(\tau) = \frac{\Delta m_T(\tau)}{V_{GP}(\tau = 0) \times \rho_s(\tau = 0)}; \quad (52)$$

де $\Delta n(\tau)$ – прирощення пористості ґрунту протягом експлуатації.

Тоді:

$$E(\tau) = E(\tau = 0) \times n(\tau = 0) / n(\tau); \quad (53)$$

$$\varphi(\tau) = \varphi(\tau = 0) \times n(\tau = 0) / n(\tau); \quad (54)$$

$$C(\tau) = C(\tau) = C(\tau = 0) \times n(\tau = 0) / n(\tau); \quad (55)$$

де $n(\tau = 0)$ і $n(\tau)$ – пористість на початку і на час експлуатації τ цементованої основи; $E(\tau)$, $\varphi(\tau)$,

$C(\tau)$ – відповідно модуль деформації, кут внутрішнього тертя і коефіцієнт зчеплення основи на час експлуатації τ .

Оцінка довговічності цементованої основи за параметром – опір основи (R_{II}). Довговічність за параметром R_{II} визначається залежністю:

$$\tau_D = [R_{II}(\tau = 0) - R_{IIU}(\tau)] / \nu_R, \quad (56)$$

де τ_D – довговічність цементованої основи, рік;

$R_{II}(\tau = 0)$ – опір цементованої основи на початку експлуатації, МПа;

$R_{IIU}(\tau)$ – мінімально допустимий опір основи, який не може бути менше за середній тиск під підшвою фундаменту в відповідності з п.7.6.7 [4], МПа;

ν_R – швидкість деградації цементованої основи за параметром її опору, МПа/рік. Швидкість деградації цементованої основи за параметром її опору визначається за формулою:

$$\nu_R = [R_{II}(\tau_1) - R_{II}(\tau_2)] / [\tau_2 - \tau_1], \quad (57)$$

де $R_{II}(\tau_1)$ і $R_{II}(\tau_2)$ – відповідні опори основи на час експлуатації τ_1 і τ_2 . Опір $R_{II}(\tau)$ визначається за методикою, викладеною вище з урахуванням втрат цементного каменя, зміни пористості $n(\tau)$, і зміни $E(\tau)$, $\varphi(\tau)$, $C(\tau)$. Рекомендується приймати $\tau_1 = 0$ а $\tau_2 = 50$ років.

Висновок. В данній роботі викладена методика, що дозволяє визначати розрахунковим методом усереднені механічні характеристики основи споруд

після цементації на визначений термін її експлуатації без проведення польових випробувань та лабораторних досліджень зразків ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения. Основания и фундаменты.
2. Матченко П.Т. Методика оцінки довговічності залізобетонних конструкцій, що працюють в ґрунті. // Будівельні конструкції, 2010, Випуск 73, с. 617-628.
3. Матченко П.Т. Методика оцінки корозійного ресурсу бетону, що працює в агресивній рідині. // Будівництво України, 2011, № 1, с. 36-39.
4. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.
5. Зміна № 1 ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.
6. СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов.
7. Бирюков Н.С., Казарновский В.Д., Мотылев Ю.Л. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов. М.: «Недра», 1975, 174 с.
8. ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96) Грунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань.
9. ДБН А 3.1-5-2009 Организация строительного производства. Госкомградостроительства Украины.
10. СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции Госстрой СССР.
11. СНиП 24297-87 Входной контроль продукции. Госстрой СССР.
12. Матченко Т.І., Матченко П.Т. Визначення ступеня агресивного впливу середовища експлуатації по відношенню до бетону.// Промислове будівництво та інженерні споруди, 2015, № 1, с. 22-27.
13. SIP-N-AT-22-D0210-COP-060-01 Цементация грунтов основания Технологического здания и вспомогательных объектов НБК. Рабочий проект. Проект организации строительства.

АННОТАЦИЯ

Изложены соотношения, позволяющие определять расчетным методом механические характеристики основания сооружений после цементации на определенный срок ее эксплуатации. В методике учтены такие явления, как отказ скважины и процесс коррозии первого вида. Разработана методика оценки механических характеристик цементуемого основания на определенный срок эксплуатации и оценки долговечности цементуемого основания с параметром - сопротивление основания. Разработанная методика расчета позволяет определить усредненные характеристики основания сооружений после цементации без проведения полевых испытаний и лабораторных исследований образцов грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементация, долговечность, основание сооружения.

ANNOTATION

Ratio for defining with the calculation method the mechanical characteristics of the base of the structures after cementation for a certain period of its exploitation are set out. The methodology takes into account such things as the well refusal and corrosion process of the first type. The method of evaluation of the mechanical characteristics of the cemented base for a certain period of exploitation and evaluation of the durability of cemented base with the parameter- the resistance of the base, is developed. The calculation method of determination of the average characteristics of the base of structures after cementation without conducting field trials and laboratory tests of soil samples is developed.

KEYWORDS: cementation, durability, the base of structures.

УДК 621.315.1:624.014

Танасогло А.В., к.т.н., ООО «Содружество», г. Мариуполь, Прядко Ю.Н., к.т.н., доц., КНУСА, г. Киев, Бакаев С.Н., к.т.н., ООО «Укрпроектстрой», г. Мариуполь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКИХ СЕКЦИЙ СТВОЛА ОПОРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ 110 КВ

В статье выполнен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований действительной работы фрагментов стальных башенных опор ВЛ 110 кВ. Акцентируется внимание на опорах высокого напряжения, эксплуатирующихся на территории Украины. Описывается принцип проведения статических экспериментальных исследований плоских ферм на разработанной специализированной экспериментальной установке, позволяющей исследовать действительную работу фрагментов опор ВЛ. Приводится методика и результаты расчета плоской модели опоры в программном комплексе «SCAD». Представлены численные результаты расчета экспериментальной установки совместно с испытываемой моделью. Получены экспериментальные значения напряжений в элементах решетки и горизонтальных и вертикальных перемещений узлов крепления раскосов. При определении перемещений анализируется совместная работа элементов решетки экспериментальных образцов, учитывается поддерживающее влияние растянутых раскосов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушная линия электропередачи, напряженно-деформированное состояние, статическое испытание, экспериментальная установка, металлическая опора, тензометрия.

Конструкции металлических опор высокого напряжения. Стальные опоры,