

М. Л. ЗОЦЕНКО, Д. О. ТРОЦЕНКО (Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка), В. А. ТИТАРЕНКО (Державний НДІ будівельних конструкцій, Київ)

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ АНКЕРІВ

Викладено підсумки комплексних експериментальних досліджень впливу електрохімічного закріплення лесових ґрунтів на несучу здатність анкерів.

Изложены результаты комплексных экспериментальных исследований влияния электрохимического закрепления лесовых грунтов на несущую способность анкеров.

The results of complex experimental investigations of influence of the electrochemical stabilization of loessial soils on the bearing capacity of anchors are presented.

Недоліки найбільш поширених способів закріплення нафтогазопроводів діаметром 520, 720, 820, 1020 і 1420 мм від спливання шляхом баластування залізобетонними вантажами різної конструкції (високі трудомісткість і вартість, неуніверсальність) і влаштування над трубою армованих або неармованих перемичок із закріпленого ґрунту та призм обвалювання (значний об'єм земляних робіт, трудомісткість і можливість застосування лише в осушених траншеях) докладно проаналізовані в працях С. Я. Кушніра [1], Я. С. Марчука [2], С. В. Хазіна [3] та ін., присвячених зведенню та експлуатації магістральних нафтогазопроводів на обводнених територіях.

Сучасні ефективні рішення пальових анкерів (у вигляді козлових паль; металевого Г-подібного пристрою зі сталевих труб діаметром 160 мм з вильотом консолі 1100 мм із такої ж труби; залізобетонної призматичної палі перерізом 300×300 мм із консоллю; залізобетонної клиноподібної з пазами палі з поперечною консоллю з боку труби; металевих гарпунних і гвинтових анкерів; клиноподібної палі з виступами, оберненими розширеним боком до поверхні; анкеру в пробитій свердловині з розширеними за її довжиною) для закріплення нафтогазопроводів вимагають достатньо складного технологічного обладнання, але альтернативні способи баластування вантажами чи влаштування над трубою ґрунтових перемичок і призм обвалювання поступаються їм за матеріально-і трудомісткістю [1–3].

Тому шляхом подальшого удосконалення ґрунтових анкерів може бути спрощення технології їх зведення без зменшення надійності роботи. Для закріплення нафтогазопроводів на

обводнених ділянках є сенс застосовувати електрохімічні анкери [4–7].

Електрохімічний спосіб закріплення ґрунту [4–10] базується на спроможності іонів заліза, дисоційованих при пропусканні постійного електричного струму, вступати в реакцію з ґрунтом і утворювати з ним цементуючі з'єднання. Від пропускання струму навкруги сталевих паль міцність ґрунту підвищується за рахунок:

1) спроможності електролітично асоційованого заліза утворювати у ґрунті цементуючі новоутворення;

2) участі реакційно спроможного кремнезему, що міститься у ґрунтах і теж утворює цементуючі з'єднання внаслідок проходження електричного струму.

Поки, однак, майже не проводились натурні дослідження електрохімічних анкерів у водонасичених лесових ґрунтах, широко розповсюджених на території України, через що відсутні практичні рекомендації з їх зведення та методика розрахунку несучої здатності цих анкерів.

За **мету роботи** прийнято визначення впливу електрохімічного закріплення лесових ґрунтів на несучу здатність анкерів.

Натурні дослідження електрохімічних анкерів проведено на майданчику реконструкції шпиталю за вул. Володарського, 6 у м. Полтаві. Ґрунт несучого шару (потужністю 4 м) – суглинок лесовий, важкий пилуватий, м'якопластичний, макропористий, що має такі значення фізичних характеристик: вологість  $w = 0,28$ ; вологість на межі текучості  $W_L = 0,35$ ; вологість на межі розкочування  $W_P = 0,20$ ; число пластичності  $I_P = 0,15$ ; показник текучості  $I_L = 0,53$ ; щільність скелету ґрунту

$\rho_d = 1,45 \text{ г/см}^3$ ; щільність ґрунту  $\rho = 1,86 \text{ г/см}^3$ ; коефіцієнт пористості  $e = 0,86$ ; коефіцієнт водонасичення  $S_r = 0,87$ . Розрахункові значення показників механічних властивостей ґрунту склали: кут внутрішнього тертя  $\varphi_{II} = 16^\circ$ ; питоме зчеплення  $c_{II} = 15 \text{ кПа}$ ; модуль деформації  $E = 3,3 \text{ МПа}$ ; питомий опір penetрації ґрунту  $R = 170 \text{ кПа}$ . Підстильний шар – суглинок важкий пілуватий, тугопластичний, що має такі властивості:  $w = 0,235$ ;  $W_L = 0,34$ ;  $W_p = 0,20$ ;  $I_p = 0,14$ ;  $I_L = 0,25$ ;  $\rho_d = 1,56 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho = 1,925 \text{ г/см}^3$ ;  $e = 0,73$ ;  $S_r = 0,85$ ;  $\varphi_{II} = 21^\circ$ ;  $c_{II} = 23 \text{ кПа}$ ;  $E = 7 \text{ МПа}$ . Рівень ґрунтових вод склав менше 3 м від поверхні землі. Водневий показник середовища склав  $\text{pH} = 8,0$ .

Програма досліджень включала п'ять серій випробувань на дію вертикального статичного висмикуючого навантаження. Кожна серія містила випробування п'яти анкерів-близнюків: перша – до закріплення; друга-п'ята – аналогічні навантаження анкерів після їх електрохімічного закріплення при різних (та однакових для кожної серії) затратах електроенергії. Загальна кількість випробуваних анкерів склала 25.

У якості елементів (електродів) використано стрижні з арматури АІ діаметром 20 мм і довжиною 5000 мм (з полу підвалу), що забивались вертикально молотом вагою 63 Н, який падав із висоти 0,8 м. Електроди розміщували двома паралельними рядами по 10...12 штук на кожному полюсі. Відстань між сусідніми електродами в ряду становила 500 мм, між їх рядами – 1700 мм.

Як джерело постійного струму застосовували зварювальний випрямляч електричного струму ВС-600. У період обробки ґрунту струмом робоча напруга складала 60 В, сила струму – 20...40 А, максимальний час обробки однієї захватки (п'ята серія) електродів – 16 діб (включаючи час на періодичні зміни полярності). Затрати електроенергії на один електрод склали: у другій серії – 30 кВт/год; у третій – 60 кВт/год; у четвертій – 90 кВт/год; у п'ятій – 120 кВт/год.

Для створення висмикуючого навантаження на елемент використано анкерну платформу, що служила упором гідравлічному домкрату. Статичні випробування анкерів проводили за вимогами ДСТУ Б В.2.1-1-95 за допомогою гідравлічного домкрата ДГ-10 ступенями по 1...2 кН. Для вимірювання деформацій елементів на реперній системі зі сталюго прокату встановлювали по два прогиноміри з ціною по-

ділки 0,01 мм. Тиск у домкраті створювали за допомогою насосної станції НС-400 (максимальний тиск 40 МПа). На станції встановлено зразковий манометр на 40 МПа з ціною поділки 0,4 МПа. Кожний ступінь навантаження, крім останнього, доводився до умовної стабілізації деформації. Усі анкери випробувані до «зриву».

У польових умовах дослідження будівельних властивостей ґрунту та геометричних розмірів «зони впливу» навколо електрохімічного анкеру проводилося за penetраційною методикою [11], яка базується на порівнянні значень питомого опору penetрації  $R$  ущільненого (чи закріпленого) й природного ґрунту. Для цього після завершення процесу закріплення зона ґрунту навколо електроду розроблялася по горизонтах у діаметрі, достатньому з точки зору виконання робіт (близько 1 м). Використовувався пенетрометр ЛП-1 з конічним наконечником із кутом розкриття  $30^\circ$  при 6...8 ступенях навантаження. Щоб одержати низку даних про міцність ґрунту через кожні 10 мм від стрижня, розташування точок penetрації було прийнято за спіраллю.

Графіки залежності вертикального переміщення (підйому)  $\Delta$  анкерів (кожної з 5 дослідних серій: перша – до електрохімічного закріплення ґрунтів; друга – при затратах електроенергії на один електрод  $Q = 30 \text{ кВт/год}$ ; третя –  $Q = 60 \text{ кВт/год}$ ; четверта –  $Q = 90 \text{ кВт/год}$ ; п'ята –  $Q = 120 \text{ кВт/год}$ ) від дії статичного висмикуючого навантаження  $P$  на них  $\Delta = f(P)$  за підсумками їх випробувань надані на рис. 1.

З графіків  $\Delta = f(P)$ , зокрема, видно, що:

1) всі графіки мають лише дві майже прямолінійні гілки (початкову, котра відповідає пружним деформаціям, у межах яких реалізується опір ґрунту за бічною поверхнею стрижня, та різкий «зрив», тобто вичерпання несучої здатності анкеру), а нелінійна (відповідає пружнопластичній стадії роботи ґрунту основи) ділянка – відсутня;

2) «зрив» графіків відбувається при підйомі анкерів, величина якого як до, так і після зміцнення ґрунту складає  $\Delta \leq 1 \text{ см}$  (але, якщо для стрижня до пропускання струму «зрив» відбувався при  $\Delta \leq 0,25 \text{ см}$ , то після закріплення ґрунту «зрив» реалізовувався вже при  $\Delta = 0,35...0,85 \text{ см}$ );

3) при збільшенні затрат електроенергії на обробку кожного електроду несуча здатність анкерів також зростала.

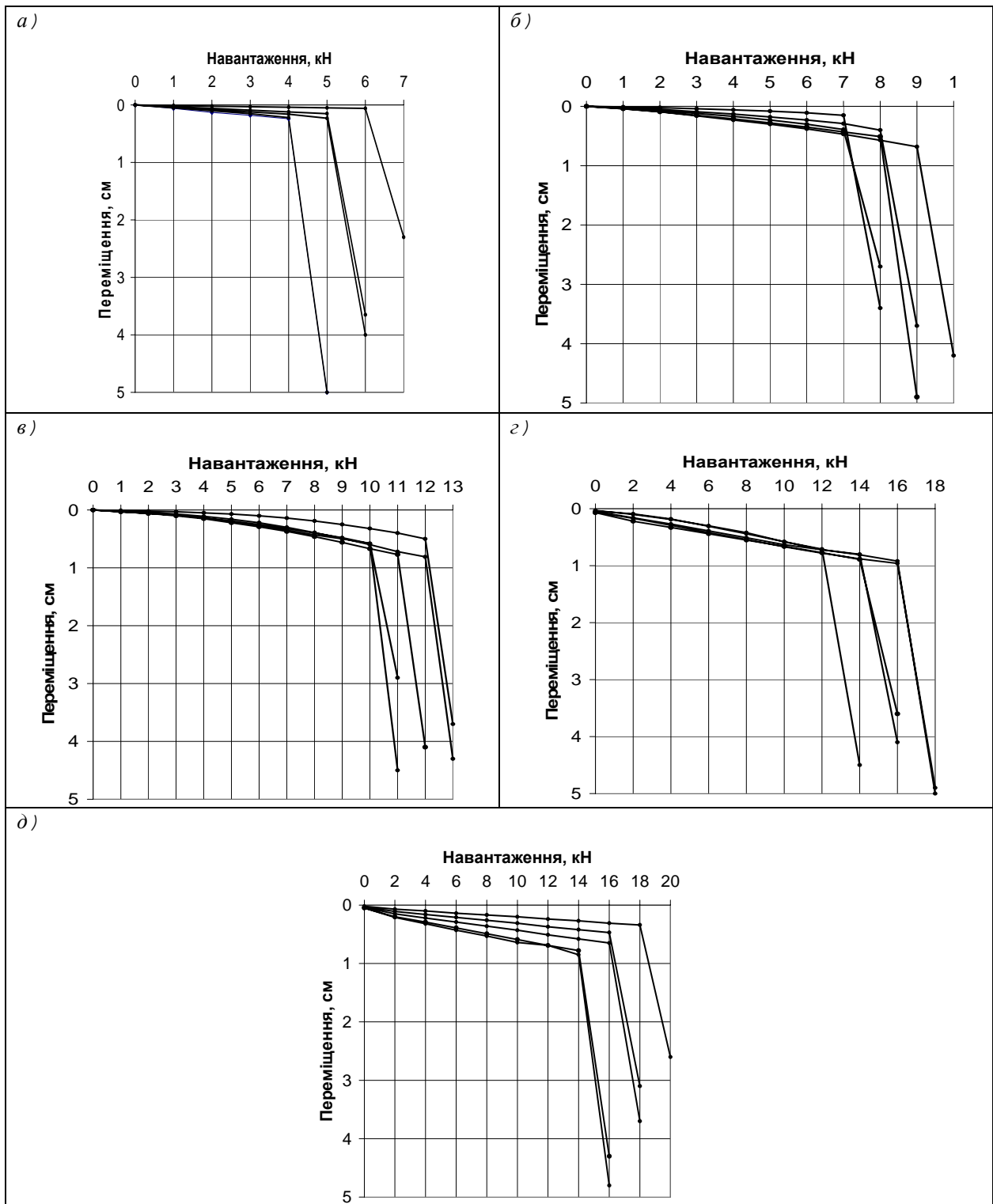


Рис. 1. Графіки залежності підйому анкерів від висмикуючого навантаження для дослідних серій:  
 а) – до закріплення ґрунтів; б) – при затратах електроенергії на електрод 30 кВт/год; в) – 60 кВт/год;  
 з) – 90 кВт/год; д) – 120 кВт/год

Для анкерів до обробки струмом ґрунту окремі граничні значення опору елементів висмикуванню склали  $F_u = 4...6$  кН при кінцевому переміщенні  $\Delta = 2,3...5,8$  см. Статистична обробка даних показала, що розрахункова величина їх несучої здатності –  $F_d = 4,5$  кН при

коефіцієнті варіації  $v = 0,174$ . Для інших анкерів після обробки ґрунту струмом визначено показники зростання несучої здатності анкерів. При:  $Q = 30$  кВт/год  $F_u = 7...9$  кН при  $\Delta = 2,7...4,9$  см;  $F_d = 7,0$  кН ( $v = 0,107$ );  $Q = 60$  кВт/год  $F_u = 10...12$  кН при

$\Delta = 2,9 \dots 4,5$  см;  $F_d = 10,05$  кН ( $\nu = 0,091$ );  
 $Q = 90$  кВт/год  $F_u = 14 \dots 18$  кН при  
 $\Delta = 3,6 \dots 5,0$  см;  $F_d = 14,8$  кН ( $\nu = 0,102$ );  
 $Q = 120$  кВт/год  $F_u = 16 \dots 20$  кН при  
 $\Delta = 2,6 \dots 4,8$  см;  $F_d = 17,5$  кН ( $\nu = 0,096$ ).

Таким чином, відповідно до проведених досліджень і статистичної обробки їх результатів, кінцевий ефект зростання несучої здатності анкерів внаслідок закріплення водонасиченого лесоподібного ґрунту постійним електричним струмом навколо електродів складає  $17,5/4,5 \approx 3,9$  рази.

На рис. 2 наведено графік зміни питомого опору penetрації з віддаленням від електрода. Межу «зони впливу» в площині поперечного перерізу анкера визначають за графіком у точці, де крива зміни  $R$  переходить у пряму, паралельну осі абсцис. Математично цей факт установлено статистичними розрахунками для визначенням точності  $R$ . Коли  $R_i$  перевищить величину  $R_n + \sigma$  (де  $R_n$  – питомий опір penetрації природного ґрунту,  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення даної величини), це відповідає умовам закріпленого ґрунту.

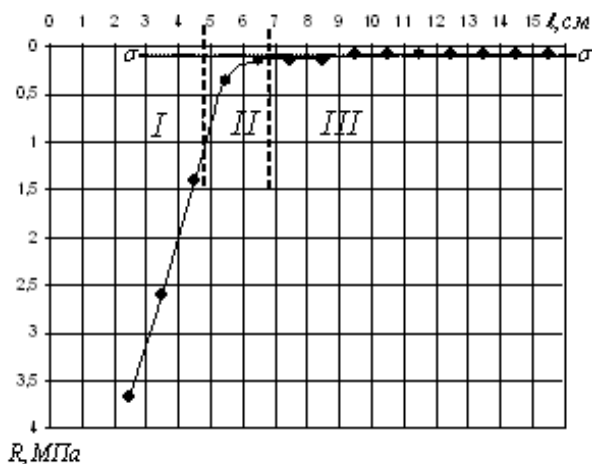


Рис. 2. Залежність питомого опору ґрунту penetрації  $R$ , МПа, від відстані  $l$ , см, до центра стрижня:  
 I – зона закріплення; II – перехідна зона;  
 III – природний ґрунт

Діаметр «зони впливу» – 136 мм, що перебільшує значення, встановлене вимірами елемента (рис. 3), де ця величина склала 98 мм. Для розрахунків вважаємо зоною закріплення навколо анкера ту частину «зони впливу», яка утримується при стрижні після його виймання з основи. Мінімальне значення питомого опору penetрації ґрунту в зоні закріплення  $R = 0,90$  МПа.

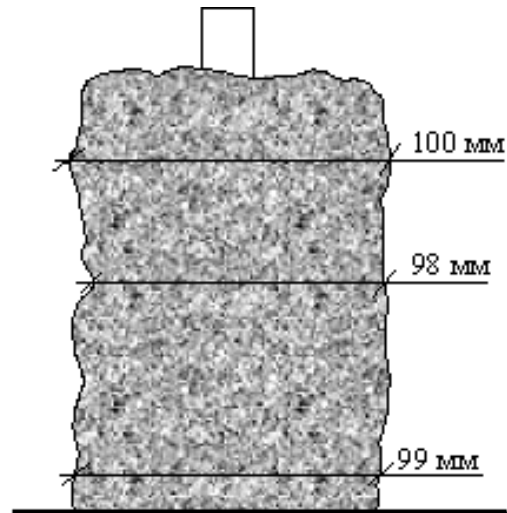


Рис. 3. Фрагмент електрода із закріпленим навколо нього ґрунтом, вийнятого з масиву

У процесі розкриття «зони впливу», яка безпосередньо прилягала до стрижнів, відбирались зразки для лабораторних випробувань, аналогічні зразкам ґрунту природного складу. Гранулометричний склад ґрунту визначався методом піпетки з використанням у якості диспергатора 10 % розчину пірофосфату натрію, а також із додатковим кип'ятінням ґрунту. Після закріплення глинистого ґрунту в його гранулометричному складі на 10...15 % збільшилася кількість пилюватих частинок (за рахунок зменшення глинистих). Це свідчить про утворення нових агрегатів розміром пилюватих частинок із глинистих за рахунок їх цементації. Як цементи можна розглядати гідрати оксидів заліза, алюмінію і кальцію.

Структурні зв'язки між глинистими частинками, утворені за їх допомогою, витримали дію 10 % розчину пірофосфату натрію, який до 20 % додавався до дистильованої води, і наступного кип'ятіння. Це свідчить про стійкість нових цементаційних зв'язків, котрі утворилися внаслідок електрохімічного закріплення ґрунту. У табл. 1 показано зіставлення величин властивостей для природного й закріпленого ґрунту.

Тобто, констатуємо, що від закріплення в ґрунті утворилися нові жорсткі зв'язки. За їх рахунок у середньому щільність скелету ґрунту зросла на  $0,08$  г/см<sup>3</sup> (на 5,5 %), підвищилась міцність ґрунту (розрахункові значення кута внутрішнього тертя зросли на  $6^\circ$ , а питомого зчеплення – майже в 3 рази), а його деформативність зменшилась у 2,7 рази, питомий опір penetрації  $R$  збільшився приблизно в 2,5 раз.

За даними досліджень, простежується й продовження зміцнення лесоподібного ґрунту й

після завершення пропускання постійного електричного струму крізь водонасичений ґрунт.

Таблиця 1

**Зіставлення величин фізико-механічних характеристик природного й закріпленого ґрунту**

| Характеристики ґрунту          | одиниці виміру    | природний ґрунт | закріплений ґрунт |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Вологість                      | %                 | 28              | 22                |
| Вологість на межі текучості    | %                 | 35              | 29                |
| Вологість на межі розкочування | %                 | 20              | 19                |
| Число пластичності             | %                 | 15              | 10                |
| Показник текучості             | -                 | 0,55            | 0,30              |
| Щільність скелету              | г/см <sup>3</sup> | 1,45            | 1,53              |
| Коефіцієнт пористості          | -                 | 0,86            | 0,76              |
| Коефіцієнт водонасичення       | -                 | 0,87            | 0,78              |
| Кут внутрішнього тертя         | °                 | 16              | 22                |
| Питоме зчеплення               | кПа               | 15              | 44                |
| Модуль деформації              | МПа               | 3,3             | 9,0               |
| Питомий опір penetрації        | кПа               | 170             | 420               |

Зменшення меж пластичності і числа пластичності відповідає зміні гранулометричного складу ґрунту. Питоме зчеплення ґрунту збільшилося (а його показник текучості відповідно знизився) внаслідок дії електрохімічних процесів, тобто за рахунок виникнення додаткових нерозчинних цементацийних зв'язків, відповідно підвищився модуль деформації. Збільшення кута внутрішнього тертя відбулося за рахунок збільшення площі контактів частинок. Щільність скелету зросла за рахунок утворення додаткових цементацийних зв'язків і, можливо, дії електрокінетичних процесів.

Дослідженнями одержано нові дані про розміри і будову «зони впливу» при електрохімічному закріпленні ґрунту. Навколо електрода виділено три області: I – область закріплення ґрунту розміром у 5 діаметрів поперечного перерізу стрижня (питомий опір penetрації у ній зменшується пропорційно відстані від стрижня і коливається від  $36,7R_n$  до  $10R_n$ ); II – перехідна область товщиною, що приблизно дорівнює діаметру стрижня (питомий опір penetрації у

цій зоні зменшується зі збільшенням відстані від стрижня і коливається від  $10R_n$  до  $R_n + \sigma$ ); III – область природного ґрунту.

«Зона впливу» при електрохімічному закріпленні ґрунту складається з двох частин (закріплення та перехідної) і становить 6,8 діаметра поперечного перерізу електроду.

За даними змінності граничних значень опорів  $F_u$ , кН, і розрахункових значень несучої здатності  $F_d$ , кН, електрохімічних анкерів від витрат електроенергії  $Q$ , кВт/год, на закріплення ґрунту навколо електродів побудовано графіки залежності  $F_u = f(Q)$  та  $F_d = f(Q)$ , які можливо апроксимувати лінійними функціями:

$$F_u = a + b \cdot Q, \quad (1)$$

де  $a = 4,68$  кН, та  $b = 0,114$  кН/кВт/год – емпіричні коефіцієнти, при коефіцієнтах кореляції  $r = 0,96$  і варіації  $v = 0,13$ ;

$$F_d = a + b \cdot Q, \quad (2)$$

де  $a = 4,00$  кН, та  $b = 0,113$  кН/кВт/год при коефіцієнтах кореляції  $r = 0,99$  і варіації  $v = 0,06$ .

Отже, встановлено, що величина несучої здатності електрохімічних анкерів на дію статичного висмикуючого навантаження лінійно залежить від витрат електроенергії на закріплення ґрунту навколо електродів.

### Висновки

Несуча здатність занурених у водонасичений лесоподібний ґрунт арматурних елементів на дію вертикального висмикуючого навантаження після електрохімічного закріплення збільшилася у 3,9 разу. Зростання значення несучої здатності анкерів лінійно залежить від витрат електроенергії постійного електричного струму на закріплення ґрунту навколо електродів.

«Зона впливу» навколо стрижня-електроду при електрохімічному закріпленні ґрунту складається з двох областей: закріплення, діаметр якої не перевищує 5 діаметрів поперечного перерізу електроду, та перехідної, діаметр якої досягає 6,8 діаметра поперечного перерізу електроду. У межах області закріплення внаслідок дії електрокінетичних й електрохімічних процесів змінюється гранулометричний склад за рахунок зменшення кількості глинистих частинок і відповідно збільшення пилуватих, збіль-

шується площа контактів частинок. Ці ефекти є наслідком незворотної цементації глинистих частинок в агрегати пилюватої фракції.

Простежується зростання у 2,5...3 рази показників міцності та зменшення деформативності ґрунту в області закріплення.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кушнір, С. Я. Особенности расчета и проектирования призм обвалования магистральных газопроводов в условиях Ямала [Текст] / С. Я. Кушнір // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях : тр. межд. науч.-техн. конф. – Уфа: «БашНИИстрой», 2006. – т. 2. – С. 191-195.
2. Марчук, Я. С. Діагностування технічного стану газопроводу під час капітального ремонту – науковий підхід [Текст] / Я. С. Марчук, Л. С. Шлапак // Нафт. і газова промисловість. – 2004. – № 4. – С. 44-45.
3. Хазин, С. В. Свайные анкеры для закрепления нефтегазовых трубопроводов [Текст] / С. В. Хазин, В. И. Хазин, Ю. Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – 252 с.
4. Трушинский, М. Ю. Электрохимические анкеры и сваи в фундаментостроении [Текст] / М. Ю. Трушинский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1996. – № 3. – С. 9-11.
5. Зоценко, Н. Л. Влияние постоянного электрического тока на пластические свойства лессовидного суглинка [Текст] / Н. Л. Зоценко, Н. И. Лапин // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях : тр. межд. науч.-техн. конф. – Уфа: «БашНИИстрой», 2006. – т. 2. – С. 60-66.
6. Троценко, Д. О. Баластування трубопроводів анкерами за допомогою електричного струму [Текст] / Д. О. Троценко // Інформаційний огляд. – ДК «Укртрансгаз», 2003. – № 1 (19). – С. 19-20.
7. Троценко, Д. О. Натурні дослідження електрохімічних анкерів для закріплення нафтогазопроводів [Текст] / Д. О. Троценко // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр. – Полтава: ПолтНТУ, 2008. – Вип. 22. – С. 103-110.
8. Бондаренко, В. И. Электрохимическое закрепление пород в горном деле [Текст] / В. И. Бондаренко, С. Ф. Власов, В. В. Захаров. – Д.: Вид-во ДДУ, 1993. – 212 с.
9. Бугаев, В. Т. Экспериментальная установка для исследования электроосмоса при погружении моделей свай [Текст] / В. Т. Бугаев, И. Н. Мироненко // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 53, Кн. 2. – К.: НДІБК, 2000. – С. 39-42.
10. Передерій, В. М. Електрохімічне закріплення глинистих ґрунтів [Текст] / В. М. Передерій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне: РДТУ, 1999. – Вип. 2. – С. 197-203.
11. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти [Текст] : підручник / М. Л. Зоценко та ін. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.

Надійшла до редколегії 15.03.2010.

Прийнята до друку 22.03.2010.