

2.Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 568 с.

3.СНИП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

4.ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації. – К.: Держбуд України, 1992. – 46 с.

5.Семко В.О. Оцінка надійності сталевих балок з дефектами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ПолтНТУ. – Полтава., 2007. – 20 с.

Отримано 24.11.2009

УДК 624.138.5

М.Л.ЗОЦЕНКО, д-р техн. наук

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

М.І.ЛАПІН

ТОВ «ЕКФА», м.Полтава

Д.О.ТРОЦЕНКО

БМФ «Укргазпромбуд», м.Полтава

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ЛЕСОВИХ ГРУНТІВ

Розглядаються результати лабораторних досліджень впливу електрохімічного закріплення лесових ґрунтів на їх пластичні властивості. Пропонується можливість наближеного прогнозування відповідного зростання розрахункового опору закріплених таким чином ґрунтів навколо паль чи пальових анкерів.

Рассматриваются результаты лабораторных исследований влияния электрохимического закрепления лесовых грунтов на их пластические свойства. Предлагается возможность приближенного прогноза соответствующего роста расчетного сопротивления закреплённых таким образом грунтов вокруг свай или свайных анкеров.

The results of laboratory investigation of influence the electrochemical loessial soil stabilization to his plastic properties are examining. The possibility of approximate prediction of corresponding growth of design strength of stabilization soils around the piles ore pile anchors is proposing.

Ключові слова: лесові ґрунти, суглинок, закріплення, електричний струм.

Існуючі ґрунтові анкери для закріплення нафтогазопроводів або мають невисоку несучу здатність, або вимагають складного технологічного обладнання. Пошук ефективних шляхів розв'язання проблеми доцільно вести у напрямі створення анкерів підвищеної несучої здатності, що забезпечують зниження матеріаломісткості й трудомісткості робіт без зменшення надійності їх роботи. Для закріплення нафтогазопроводів на обводнених ділянках є сенс застосовувати електрохімічні анкери.

Електрохімічний спосіб закріплення ґрунту [1-7] 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.

Встановлено, що закріплений ґрунт повністю зберігає набуті значення характеристик міцності в нейтральному водному, а також лужному при $pH = 13$ і кислому при $pH = 2$ середовищі протягом тривалого часу.

Зокрема, М.Ю.Трушинський [3] зафіксував дві чітко виражені концентричні зони закріплення мореного суглинку навколо частково розкладеного стрижня: перша – товщиною 5-30 мм насичена з'єднаннями двохвалентного залізу, які надають їй чорного кольору, з міцністю на стиснення $R = 5$ МПа; друга – природного кольору, але з підвищеною міцністю $R = 1-5$ МПа, причому ближче до стрижня міцність ґрунту вища.

Результати впливу електрохімічного закріплення ґрунту перевірено в 1998 р. М.Л.Зоценком і В.М.Передерієм [1, 5]. У водонасичені лесові ґрунти на глибину 9,5 м були занурені 25 металевих паль. Відстань між палями становила 1 м. Їх було прийнято за аноди, як катоди використовували занурені на ту ж глибину арматурні стрижні з сталі А-І діаметром 20 мм. Як джерело постійного струму застосовували зварювальний випрямляч електричного струму ВС-600. У період обробки ґрунту електричним струмом робоче напруження складало 60 В, а сила струму – біля 100 А.

Палі були розділені на п'ять груп залежно від кількості струму, що пройшов крізь ґрунт біля кожної палі: без обробки струмом, витрати струму 90, 186, 284, 324 кВт/год. Статичні випробовування паль показали, що зі збільшенням кількості електроенергії їх несуча здатність зросла до 3 разів.

Щодо електрохімічних анкерів, через відсутність їх натурних досліджень у широко розповсюджених на Україні водонасичених лесах, не розроблені практичні рекомендації з їх зведення і методика розрахунку несучої здатності цих анкерів на вертикальне висмикуюче навантаження.

На цьому етапі комплексних експериментальних досліджень впливу електрохімічного закріплення лесових ґрунтів на несучу здатність анкерів у лабораторії геотехніки ПолтНТУ за мету було поставлено вивчення впливу постійного електричного струму на властивості лесового суглинку.

Для дослідів з глибини 3 м відбирали моноліти природної структури суглинку лесового, важкого пилуватого, тугопластичного, макропористого. В лабораторії визначали величини фізичних і механічних властивостей ґрунту: щільність ρ ; щільність частинок ρ_s ; щільність скелету ґрунту ρ_d ; коефіцієнт пористості e ; вологість w ; коефіцієнт водонасичення S_r ; вологість на межі текучості W_L і на межі розкочування W_p ; число пластичності I_p ; показник текучості I_L ; модуль деформації ґрунту E ; його кут внутрішнього тертя ϕ і питоме зчеплення C . Зокрема, деформаційні показники досліджувались у приладах для компресійних випробувань КПр-1, а характеристики міцності – в приладах для випробування ґрунту на прямий зріз із фіксованою площиною зрушення ПСГ-2М.

Лабораторним аналізом зразків встановлені такі характеристики ґрунту: вологість $w = 0,270$; вологість на межі текучості $W_L = 0,357$; вологість на межі розкочування $W_p = 0,225$; число пластичності $I_p = 0,132$; показник текучості $I_L = 0,341$; щільність частинок $\rho_s = 2,67 \text{ г/см}^3$; щільність ґрунту $\rho = 1,820 \text{ г/см}^3$; щільність скелету $\rho_d = 1,433 \text{ г/см}^3$; коефіцієнт пористості $e = 0,863$; коефіцієнт водонасичення $S_r = 0,835$; модуль деформації $E = 6 \text{ МПа}$; кут внутрішнього тертя $\phi = 18^\circ$; питоме зчеплення $c = 20 \text{ кПа}$.

Досліди було поділено на дві складові: перша – пропускання постійного електричного струму крізь зразки ґрунту природної структури; друга – визначення кількісних змін його відповідних характеристик при цьому. Електрохімічне закріплення ґрунту здійснювали за наступною схемою: зразки суглинку діаметром 46 мм і висотою 55-65 мм піддавали обробці постійним електричним струмом з використанням джерела струму і двох металевих електродів-пластин. Напруга в замкненому контурі підтримувалась постійною й складала 15 В. Оскільки пропускання електричного струму крізь ґрунт супроводжується явищем електроосмосу, тобто рухом води від аноду до катоду, то для того, щоб зразок не пересихав, до аноду забезпечувався вільний приток води. Принципова схема досліду показана на рис.1. До її складу входили: лабораторний автотрансформатор (рис.2); прилад для замірів режимів випробувань (рис.2), який, зокрема, мав амперметр і вольтметр; з'єднувальні дроти; діелектричну трубку зі зразком ґрунту всередині, яка розташована між анодом і катодом, та ін.

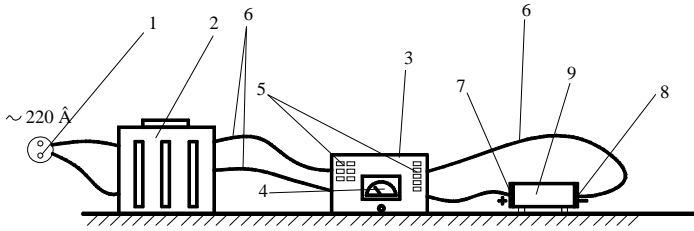


Рис.1 – Принципова схема проведення лабораторного дослідку з електрохімічного закріплення лесового суглинку:

1 – розетка; 2 – лабораторний автотрансформатор; 3 – прилад для призначення та замірів режимів випробувань; 4 – амперметр і вольтметр; 5 – перемикачі; 6 – з'єднувальні дроти; 7 – анод; 8 – катод; 9 – трубка з діелектричного матеріалу зі зразком ґрунту всередині, котра розташована між анодом і катодом.



Рис.2 – Прилад для призначення та замірів режимів пропускання електричного струму крізь ґрунт (ліворуч) і лабораторний автотрансформатор (праворуч)

Було сплановано одночинниковий модельний експеримент (за його умовами: фізико-механічні характеристики ґрунту в лабораторних і натурних умовах максимально близькі; процеси зміцнення ґрунту в них також подібні). Відповідно до його програми всі, первинно однакові, зразки лесового суглинку за режимами закріплення було поділено на чотири групи:

- перша група – зразки ґрунту електричним струмом не оброблялись;
- друга – кожний зразок ґрунту отримав 30 кВт·год/м³ електричної енергії;
- третя – кожний зразок отримав 60 кВт·год/м³ електричної енергії;

- четверта – кожний зразок отримав 100 кВт·год/м³ електричної енергії.

Під час проведення експерименту через кожні 30 хв. фіксували відліки за амперметром, які заносили у журнал випробувань. Суглинок для подальших лабораторних досліджень відбирали як з анодної, так і катодної зон. Кількість зразків-близнюків ґрунту в кожній групі складала шість.

Після закріплення суглинку і проведення лабораторних досліджень з визначення індикаційних характеристик (вологості на межі текучості W_L методом балансірного конусу та вологості на межі розкочування W_p способом розкочування) отримано наступні підсумки, що зведені в таблиці.

Підсумки досліджень зміни індикаційних характеристик
лесового суглинку внаслідок електрохімічного закріплення

Зона відбору ґрунту	Витрати електроенергії, кВт·год/м ³	Вологість на межі текучості W_L	Вологість на межі розкочування W_p	Число пластичності I_p	Показник текучості I_L
Природний ґрунт	0	0,357	0,225	0,132	0,341
Катод	30	0,359	0,231	0,128	0,305
	60	0,340	0,249	0,091	0,231
	100	0,337	0,262	0,075	0,107
Анод	30	0,379	0,243	0,136	0,199
	60	0,380	0,254	0,126	0,127
	100	0,385	0,250	0,135	0,148

Для наочного представлення кількісних змін стану (показника текучості I_L чи консистенції ґрунту) лесового суглинку від проходження крізь нього постійного електричного струму, окремо для анодної і катодної зон, на рис.3, 4 побудовано відповідно графіки залежності вологості (%) на межі розкочування W_p і текучості W_L від витрат електроенергії (кВт·год/м³) Q , що пропустили крізь зразок ґрунту.

З аналізу підсумків лабораторних досліджень встановлено, що в катодній зоні із збільшенням витрат електроенергії величина W_L знижується, а значення W_p , навпаки, зростає, тобто, ґрунт фактично втрачає пластичні властивості. Як видно з рис.5, важкий пилуватий суглинок з числом пластичності $I_p = 13,2\%$ наблизився до пилуватого суглиску $I_p = 7,5\%$.

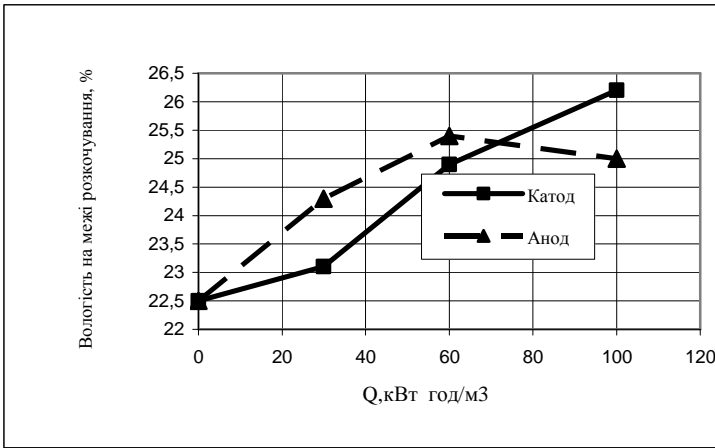


Рис.3 – Графік залежності вологості на межі розкошування W_p від витрат електроенергії, що пропустили крізь зразок ґрунту

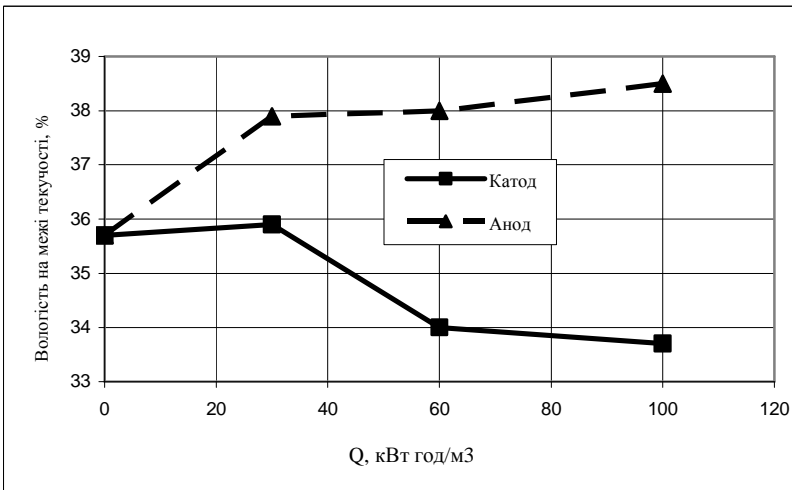


Рис. 4 – Графік залежності вологості на межі текучості W_L від витрат електроенергії, що пропустили крізь зразок ґрунту

В анодній зоні дослідного суглинку проходять процеси, що призводять до підвищення як вологості на межі текучості W_L (рис.4), так і на межі розкошування W_p (рис.3). Оскільки їх зростання відбувається нерівномірно, то фіксуються незначні (до 8,0%) коливання числа

пластичності ґрунту I_p (рис.5) в той чи інший бік. У підсумку величина I_p ґрунту в зоні навколо аноду лише на 2,3% змістилась у бік більшої вологості.

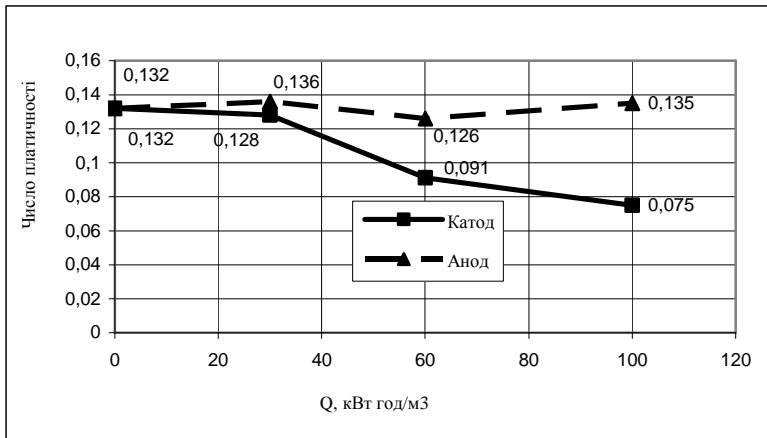


Рис. 5 – Графік залежності числа пластичності ґрунту I_p від витрат електроенергії, що пропустили крізь зразок ґрунту

Відомо, що на показник текучості ґрунту I_L і відповідно на W_L і W_p впливають такі фактори: 1) мінералогічний склад; 2) гранулометричний склад; 3) форма часток ґрунту; 4) склад обмінних катіонів; 5) склад і концентрація порового розчину [1]. Для пояснення зміни консистенції розглянемо процеси, що відбуваються в ґрунті при пропусканні крізь нього постійного електричного струму при участі металевих електродів: 1) молекули води рухаються від аноду до катоду (явище електроосмосу); 2) іони заліза відокремлюються від аноду й, маючи достатньо велику енергію обміну, заміщають іони кальцію, магнію та ін. (залежить від хімічного складу глинистого ґрунту), що знаходяться в дифузійних оболонках глинистих часток; 3) обмінні катіони Са, Mg та ін., що вивільнились, рухаються разом з молекулами води в бік катоду; 4) колоїдні частки, виважені в поровому розчині, рухаються від катоду до аноду.

Отже, звуження меж пластичності ґрунту в катодній зоні можна пояснити зменшенням вмісту глинистих часток, які надають йому пластичні властивості. Крім того, в цій зоні накопичуються солі кальцію, бо він звичайно домінує серед обмінних катіонів. Ці солі, цементують ґрунт, зменшуючи його пластичність.

Що стосується анодної зони, то в ній процеси дещо складніші. Глинисті частки, що надходять з катодної зони, збільшують пластичність ґрунту. Та заміщення обмінних катіонів іонами заліза викликає зменшення гідрофільності й зниження пластичних властивостей. За [2] пластичність ґрунту, що має в своєму складі різні іони, змінюється так: $\text{Li} > \text{Na} > \text{NH}_4 > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Ba} > \text{Fe} > \text{Al}$. Отже, в анодній зоні пластичні властивості одночасно зростають і зменшуються, що певною мірою підтверджується результатами дослідів.

При проведенні експерименту до анодної зони мав місце вільний притік води. Це певною мірою моделює натурні умови проведення дослідів, оскільки при відкачуванні води у водонасиченому ґрунті з однієї точки вона прибуває з сусідніх ділянок зі швидкістю, що залежить від коефіцієнта фільтрації ґрунту.

Зміни значень показника текучості ґрунту I_L від витрат електроенергії, що пропустили крізь зразок, в анодній і катодній зонах подано на рис.6, з якого, зокрема, видно, що в анодній зоні величина показника I_L від витрат електроенергії зменшується за лінійною функцією (1) від 0,341 до 0,107, тобто на 68,6%, при коефіцієнтах кореляції $r = 0,984$ і варіації $v = 0,093$.

$$I_L = a + b(Q/Q_0), \quad (1)$$

де $Q_0 = 1 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$; $a = 0,359$; $b = -2,380 \cdot 10^{-3}$ – емпіричні коефіцієнти.

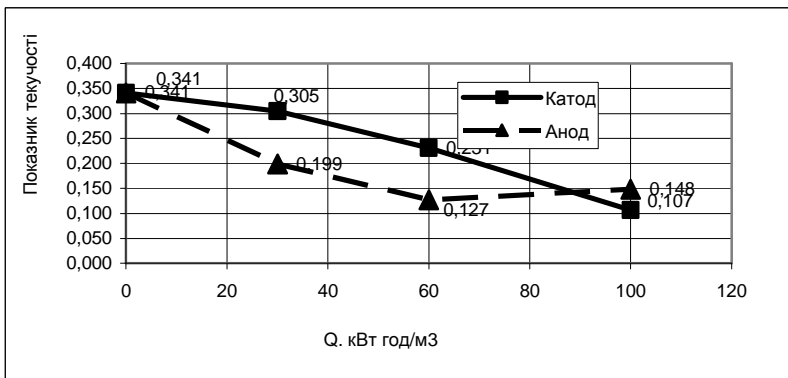


Рис.6 – Графік залежності показника текучості ґрунту I_L від витрат електроенергії, що пропустили крізь зразок ґрунту

В катодній зоні аналогічний процес відбувається лише до значен-

ня витрат електроенергії 60 кВт·год/м³ (а, взагалі, I_L зменшився до величини 0,140, тобто на 58,9%).

Тепер з'явилась можливість за табл.1, 2 [8] оцінити вплив електрохімічного закріплення лесового суглинку (за рахунок зниження його показника текучості I_L) на зростання розрахункового опору ґрунту за бічною поверхнею пальового анкеру чи палі f , кПа, і під їх вістрями R , кПа. Для вищеписаних умов при глибині шару 3 м значення f зростає для ґрунту катодної зони приблизно в два рази, анодної – в 1,9 разів, а величина R відповідно збільшується в 2,35 і 2,15 разів тощо.

Таким чином, на базі лабораторних досліджень можна зробити висновок, що пропускання постійного електричного струму через водонасичений лесовий суглинок знижує його пластичні властивості як у зоні навколо аноду, так і біля катоду, що викликає зміцнення цього ґрунту. При цьому за зміною індикаційних характеристик глинистого ґрунту можна наближено спрогнозувати також відповідне зростання його розрахункового опору навколо паль чи пальових анкерів.

1.Инженерная геология. Механика грунтов, основы та фундаменти / М.Л.Зоценко, В.І.Коваленко, А.В.Яковлев, О.О.Петраков, В.Б.Швец, О.В.Школа, С.В.Біда, Ю.Л.Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.

2.Жинкин Г.Н., Калганов В.Ф. Электрохимическая обработка глинистых грунтов в основаниях зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 196 с.

3.Трушинский М.Ю. Электрохимические анкеры и сваи в фундаментостроении // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1996. – №3. – С.9-11.

4.Бугаев В.Т., Мироненко И.Н. Экспериментальная установка для исследования электроосмоса при погружении моделей свай // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. Вип.53. Кн.2 – К.: НДІБК, 2000. – С.39-42.

5.Передерій В.М. Електрохімічне закріплення глинистих ґрунтів // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Вип.2. – Рівне: РДТУ, 1999. – С.197-203.

6.Алпатов Ю.В., Зоценко М.Л. Поліпшення властивостей основи фундаментів армуванням ґрунтовими палями, утворенням електрохімічним закріпленням // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. Вип.55. – К.: НДІБК, 2001. – С.203-210.

7.Лапін М.І. Моделювання роботи квадратного штампуг на основі, армованій похилими елементами, які утворені внаслідок електрохімічного закріплення // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. Вип.66. – К.: НДІБК, 2007. – С.128-135.

8.СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.

Отримано 12.11.2009