

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

² СП "Основа-Солсиф", Департамент спеціальних та гідротехнічних робіт, Київ, Україна

СТАБІЛІЗАЦІЯ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІН'ЄКЦІЙНИХ АНКЕРІВ. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЕКТУВАННЯ

© N. Zuievskaya¹, V. Gubashova²

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

² JV "Osнова-Solsif", Special and Hydrotechnical Works Department, Kyiv, Ukraine

STABILIZATION OF THE SOIL MASS WITH THE INJECTION ANCHORS. COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN FEATURES

Метою роботи є ознайомлення з методами та підходами при використанні графічного методу для розташування призми обвалення при проектуванні ґрунтових анкерів, описаних в нормативних документах України, Російської Федерації та Об'єднаних Штатів Америки, також виконати порівняльний аналіз залежностей розташування коренів, довжин вільної частини ґрунтових анкерів і деформацій конструкції огороження котловану.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз нормативних документів, що діють на території України, Російської Федерації та Об'єднаних Штатів Америки та моделювання напружено-деформованного стану конструкції огороження котловану з ґрунтовими анкерами за допомогою багатofункціонального комплексу Plaxis V8.6, що використовує метод кінцевих елементів.

Результати. Для прикладу моделювання обраних підходів був обраний супіщаний ґрунтовий масив і огороження котловану, виконане з двутавра профілю 24М з кроком 0,5 м завдовжки 16 м, з двома ярусами ґрунтових ін'єкційних анкерів з кутом нахилу 25° і кроком 1,5 м. Довжини вільної частини анкерів для кожної моделі були обрані відповідно до проведеної площини обвалення. З урахуванням розглянутих підходів в трьох країнах було створено п'ять моделей та виконаний аналіз результатів. Порівняльний аналіз був здійснений для візуалізації залежностей довжин вільної частини анкерів і деформацій конструкції огороження котлованів і зусиль, що в ній виникають. З отриманих результатів зазначено, що зміна вільної довжини анкерів в меншу сторону веде до збільшення переміщень конструкції огороження, але не має такого вираженого впливу на згинаючий момент, що виникає в ній. Також був виконаний порівняльний аналіз осьових зусиль в коренях анкерів при зміні їх розташування.

Наукова новизна. Порівняльний аналіз графічного методу розташування коренів ін'єкційних анкерів у відповідності до підходів, що освітлені в нормативних документах різних країн.

Практичне значення. Ознайомлення з особливостями проектування ін'єкційних ґрунтових анкерів в Україні, Російській Федерації та Об'єднаних Штатах Америки та дослідження впливу зміни вільної довжини анкерів на деформації конструкції огороження глибоких виїмок.

Ключові слова: ґрунтовий анкер, корінь, вільна довжина, площа обвалення, нормативні документи, огороження котловану.

Актуальність. Зі стрімким зростанням і розвитком будівельної галузі та проектування сучасному інженеру геотехніку надається великий вибір програм і розрахункових комплексів, які дозволяють втілити і реалізувати найсміливіші проекти. Але, незважаючи на автоматизовану і комп'ютеризовану сферу проектування, основними робочими інструментами для інженера залишаються папір і олівець і перші рішення і наближення завжди з'являються спершу на папері. Це відноситься і до інженерів геотехніків, які працюють над проектами огорожень глибоких виїмок із застосуванням анкерного кріплення і використовують в першому підході всім відомі графічні методи. Мета даної статті - виконати порівняльний аналіз деяких підходів до розташування ін'єкційних ґрунтових анкерів при проектуванні конструкції огороження котловану в різних країнах. Для порівняння обрані нормативні документи, що діють на території України, Російської Федерації та Об'єднаних Штатів Америки.

Метою дослідження даної публікації є виконання порівняльного аналізу підходів до розташування поверхні обвалення при проектуванні анкерного кріплення огороження котловану та підпірних стін в різних країнах.

Викладення основного матеріалу. Ґрунтові анкери діляться по терміну служби на тимчасові і постійні, у напрямку - похилі і вертикальні, по типу виконання і за способом закладення анкера, за попереднім натягненням анкерів - попередньо-напружені і анкера без попереднього натягнення, за типом анкерної тяги і за способом її закладення.

При вивченні вихідних даних при проектуванні заглиблених споруд, підпірних і огорожувальних конструкцій на перший план, безсумнівно, виступають достовірні інженерно-геологічні вишукування з повним спектром даних про фізико-механічні характеристики ґрунтів, топографічні дані, розташування комунікацій та інших підземних споруд, будівлі та споруди, розташовані в безпосередній близькості до проектованої підземної або огорожуючої конструкції. І беручи до уваги всі перераховані вище вхідні дані - після вибору типу огорожуючої конструкції стає питання розташування ґрунтових анкерів, вибору типу тяги, вільної довжини і довжини кореня.

Вибираючи тип, розміри та розташування кореня ґрунтового анкера інженер-проектувальник бере до уваги тип ґрунту, слабкі прошарки ґрунтового масиву, рівень ґрунтових вод і його сезонне коливання, розташування поблизу активної зони кореня фундаментів і комунікацій.

Беручи до уваги всі пункти, якими необхідно керуватися при розташуванні кореня анкера, основна вимога - корінь анкера повинен розташовуватися за межами призми обвалення.

Розрахунок загальної стійкості і знаходження поверхні призми обвалення для заанкерених стінок виконують для отримання коефіцієнта безпеки для всіх типів обвалення підпірної стінки (рис. 1): втрата стійкості стіни внаслідок ґрунту з низькою несучою здатністю нижче п'яти стінки (toe bearing failure), м'який ґрунт в основі виїмки (bottom failure), клиновидне руйнування і загальне руйну-

вання за граничною рівновагою (wedge or generalized failure), надмірні деформації підпірної конструкції (excessive deformation), руйнування анкера (anchor failure), руйнування конструкції підпірної стінки (wall failure) [10].

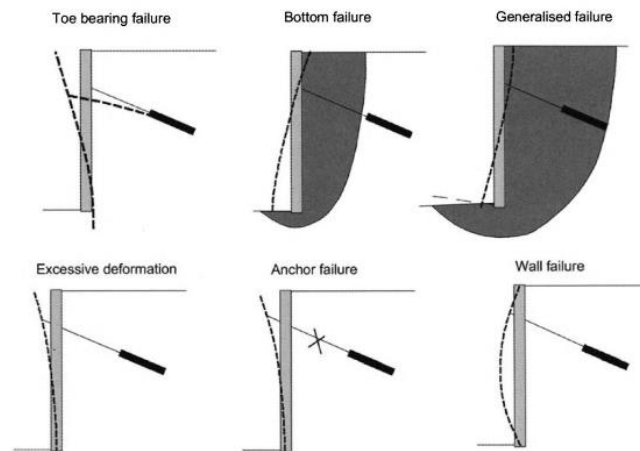


Рис. 1. Типи руйнування підпірної стінки

Клиноподібний тип руйнування може бути проаналізований за допомогою методу клина (wedge method), загальне руйнування за граничною рівновагою аналізується за допомогою круглоциліндричних або полігональних поверхонь ковзання.

Метод клина (призми обвалення) - спрощений підхід до розрахунку стійкості в простих випадках. Кранц (1953) був першим, хто застосував цю техніку до підпірних стін з анкерами. Пізніше професор А.Ж.С Нунс запроєктував і побудував перше в Бразилії огородження з анкерами і успішно застосував метод одиночного клина для розрахунку стійкості (НУНС і Веллосо 1963). Німецькі автори (Йелинек і Остермейер 1966 1967; Ранки і Остермейер 1968) виступали на підтримку використання методу двох клинів, де другий клин перетинає корінь анкера [10].

При аналізі загальної стійкості конструкції огородження за круглоциліндричними і полігональними методами домагаються розташування ґрунтових анкерів таким чином, щоб коефіцієнт стійкості кривої ковзання був вище значень, зазначених в діючих будівельних нормах і стандартах.

При широкому виборі розрахункових програм і комплексів, що дозволяють отримати загальну стійкість огороджувальної або підпірної конструкцій, змоделювати поведінку системи "огородження - ґрунтовий анкер", а також змоделювати поведінку напружено-деформованого стану навколишнього ґрунтового масиву, в першу чергу залишається застосування графічного методу, а саме побудова поверхні обвалення.

І саме підходи до побудови поверхні обвалення і їх відмінності в деяких країнах будуть розглянуті в даній статті.

На території України проектування і виконання ґрунтових анкерів описано в наступних нормативних документах: ДСТУ-Н Б В.2.1-32-2014 "Настанова з проектування котлованів для улаштування фундаментів і заглиблених споруд", ДСТУ-Н Б В.2.1-31: 2014 "Настанова з проектування підпірних стін", ДСТУ Б EN 1537:2016 "Виконання спеціальних геотехнічних робіт. Ґрунтові анкери" [2, 3, 4].

Відповідно до українських будівельних норм корінь буроін'єкційного анкера повинен бути розташований за границею призми обвалення у всіх ґрунтах, окрім глинистих текучої і текучепластичної консистенції, мулу і торфу. Границя призми обвалення проходить від низу конструкції огороження під кутом $45^\circ + \phi/2$ по відношенню до горизонтальної поверхні, де ϕ - кут внутрішнього тертя ґрунту.

Згідно відомчим будівельним нормам ВСН 506-88 "Проектування і влаштування ґрунтових анкерів" [1], що діють на території Російської Федерації, закладення анкерів, що застосовуються для огороження котлованів і підпірних стін, слід розташовувати за уявної площиною, що проходить через низ стінки під кутом 45° .

В області технічної та спеціалізованої літератури, представленої на території Сполучених Штатів Америки, виділимо для порівняльного аналізу наступні:

- Інженерні рекомендації EM 1110-2-2504 "Проектування шпунтових стін", Корпус інженерів Армії Об'єднаних штатів [5]. Згідно рекомендаціям корінь ґрунтового анкера повинен виходити за площину, проведену від низу підпірної або огорожуючої стінки під кутом $45^\circ + \phi/2$ по відношенню до вертикалі (рис. 2);

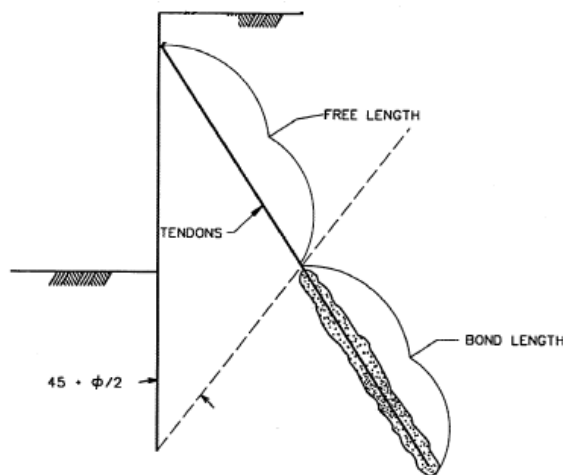


Рис. 2. Розташування кореню анкера у відповідності до інженерних рекомендацій EM 1110-2-2504

- FHWA-IF-99-015 Геотехнічний Інженерний Циркуляр №4 "Ґрунтові анкери та анкерні системи", Департамент Транспорту Сполучених Штатів [7], GDP-11 "Порядок геотехнічного проектування для систем гнучких

стін" [9], ERDC/ITL TR-01-1 "Стан практики в проектуванні високих, жорстких і гнучких підпирних стін" [6]. В яких описано, що потенційна поверхня обвалення проводиться від нижньої позначки дна котловану і зміщується на 1.5 м або на відстань, рівну $0,2 \cdot H$ (рис. 3)

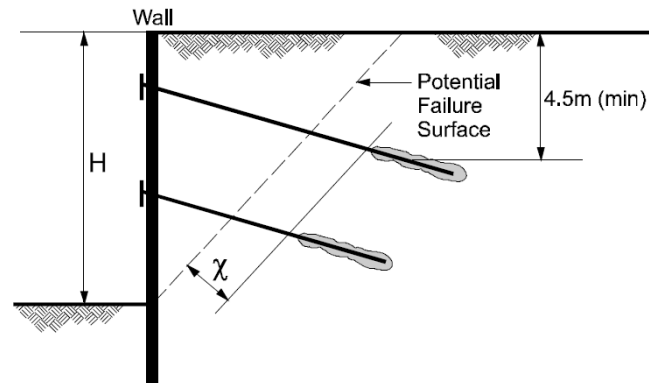


Рис. 3. Розташування кореня анкера у відповідності до FHWA-IF-99-015, GDP-11, ERDC/ITL TR-01-1

- FHWA-RD-75-128 "Системи з бічними опорами і підсилення фундаментів" [8]. В якому говориться, що корінь анкера зазвичай розташовується за лінією під кутом від 30° до 45° від вертикалі від низу виїмки у напрямку до поверхні. В сипучих ґрунтах частіше використовується кут нахилу від 35° до 40° , в зв'язному ґрунті - 45° .

Для прикладу моделювання розглянутих підходів був обраний супіщаний ґрунтовий масив ($\gamma=1,83 \text{ т/м}^3$, $c=12 \text{ кПа}$, $\phi=28^\circ$, $E=15 \text{ МПа}$), і огороження котловану, виконане з двутавра профілю 24М з кроком 0,5 м завдовжки 16 м, з двома ярусами ґрунтових ін'єкційних анкерів з кутом нахилу 25° і кроком 1,5 м. Відмітки ярусів анкерів: -1,5 і -4,0; відмітка дна котловану: -8,0 м.

Моделювання виконувалось за допомогою багатофункціонального геотехнічного комплексу Plaxis. Ґрунтова модель - Hardening soil model.

Довжини вільної частини анкерів для кожної моделі були обрані відповідно до проведеної площинною обвалення (рис. 4). З урахуванням розглянутих вище підходів в трьох країнах було створено п'ять моделей.

Результати моделювання представлені в таблиці 1. В таблиці 2 можна побачити загальні переміщення розрахункової моделі, епюри горизонтальних переміщень конструкції огороження та згинальний момент, який в ній виникає.

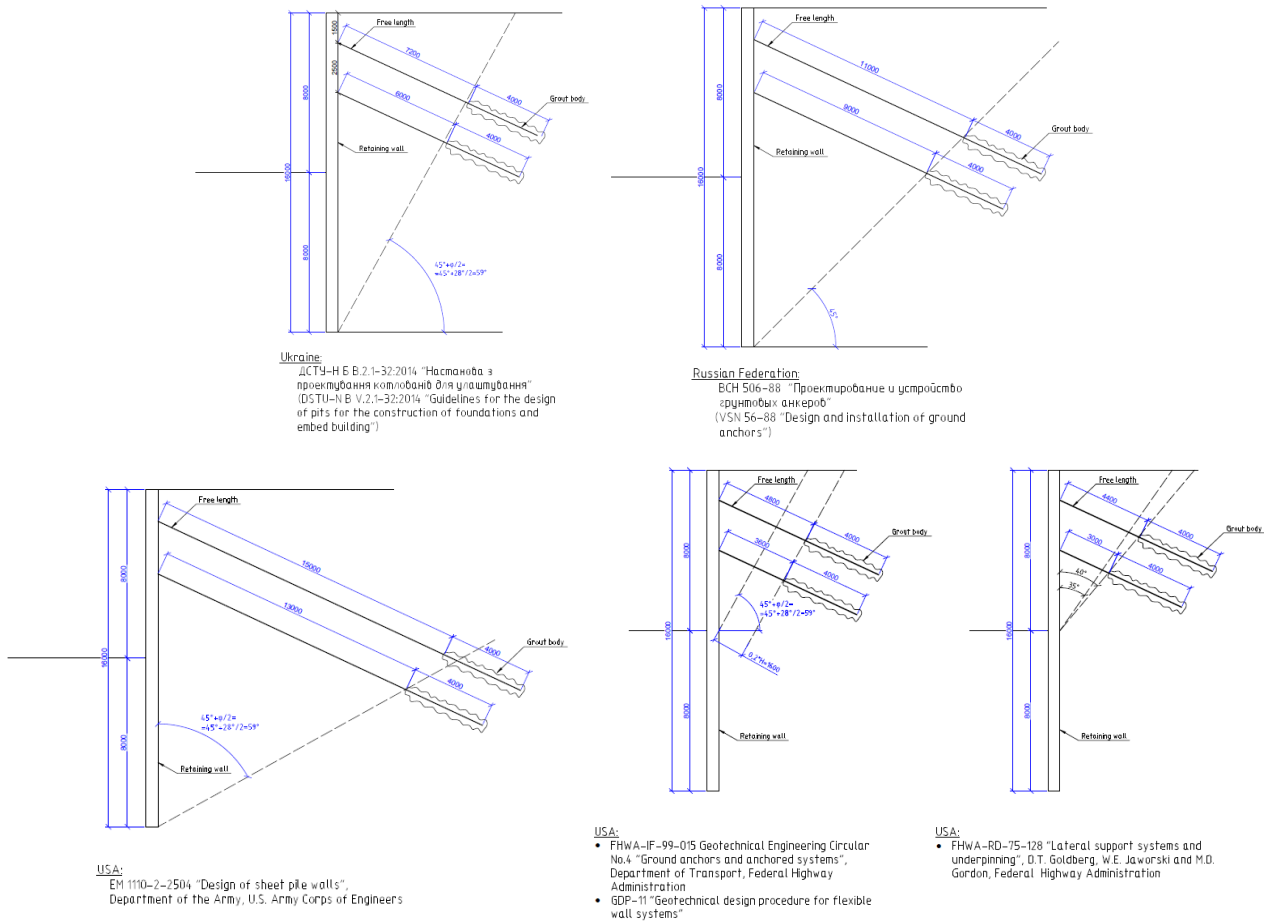


Рис. 4. Розрахункові моделі

Таблиця 1

Результати моделювання

| № моделі | Країна та відповідний нормативний та технічний документ | Довжина анкерів | Результати розрахунку | | | |
|----------|---|-----------------|--|-------------------------|--|-----------------------------------|
| | | | Горизонтальні переміщення стіни, Δ_{max} , мм | Згинаючий момент, М, тм | Загальні переміщення кореня анкера, мм | Осьове зусилля в корені анкера, т |
| Модель 1 | Ukraine DSTU-N B V.2.1-32:2014 | 7,2+4 | 16,8 | 6,1 | 1,5 | 10,2 |
| | | 6+4 | | | 13,3 | 21,9 |
| Модель 2 | Russian Federation VSN 56-88 | 11+4 | 12,0 | 5,6 | 6,4 | 10,1 |
| | | 9+4 | | | 8,4 | 21,0 |
| Модель 3 | USA EM 1110-2-2504 | 15+4 | 10,6 | 5,6 | 5,2 | 9,7 |
| | | 13+4 | | | 6,5 | 20,4 |
| Модель 4 | USA FHWA-IF-99-015, GDP-11 | 4,8+4 | 23,9 | 7,3 | 17,3 | 10,1 |
| | | 3,6+4 | | | 21,7 | 21,9 |
| Модель 5 | USA FHWA-RD-75-128 | 4,4+4 | 29,7 | 8,6 | 22,5 | 10,3 |
| | | 3,0+4 | | | 27,9 | 21,3 |

Загальні переміщення розрахункової моделі

| № розрахункової моделі | Загальні деформації розрахункової моделі | Горизонтальні деформації палі огородження | Згинаючий момент палі |
|------------------------|--|---|-----------------------|
| Модель 1 | | | |
| Модель 2 | | | |
| Модель 3 | | | |
| Модель 4 | | | |
| Модель 5 | | | |

Перед тим як зробити порівняльний аналіз результатів, відзначимо деякі особливості моделювання:

- При розрахунку першої моделі, відповідно до українських норм і стандартів, на поверхні ґрунту було застосоване рівномірно розподілене навантаження 1 т/м^2 . Далі для збереження ідентичності моделей це навантаження було залишене для інших;
- Попередні натягіння анкерів були 15 т і 30 т відповідно для верхнього і нижнього ярусів анкерів і не змінювалися у всіх моделях;
- При реальному проектуванні в кожен розрахункову модель були б внесені зміни відповідно до отриманих перших результатів: була б скоригована довжина палі, змінений тип профілю шпунтової палі або збільшений крок, і

змінені величини попереднього натягіння відповідно до епюр загальних переміщень палі;

- Модель не є розрахунком реального проекту огороження котловану.

Отже, відповідно до отриманих результатів, найменші числові значення деформацій і зусиль, які виникають в конструкції огороження - в моделі 3, далі ці значення приймемо за 100% для порівняльного аналізу інших результатів (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняльний аналіз інших результатів

| № моделі | Країна та відповідний нормативний та технічний документ | Довжина анкерів | Горизонтальні деформації стіни, Δ_{\max} , мм | Згинаючий момент, М, тм |
|----------|---|-----------------|--|-------------------------|
| Модель 1 | <i>Ukraine</i> DSTU-N B V.2.1-32:2014 | 7,2+4 6+4 | 159% | 109% |
| Модель 2 | <i>Russian Federation</i> VSN 56-88 | 11+4 9+4 | 113% | 100% |
| Модель 3 | <i>USA</i> EM 1110-2-2504 | 15+4 13+4 | 100% | 100% |
| Модель 4 | <i>USA</i> FHWA-IF-99-015,GDP-11 | 4,8+4 3,6+4 | 226% | 130% |
| Модель 5 | <i>USA</i> FHWA-RD-75-128 | 4,4+4 3,0+4 | 280% | 154% |

Значення результатів моделей 1 (вільні довжини 7,2 і 6 м) і 2 (вільні довжини 11 і 9 м) близькі за значенням з огляду на схожість підходу, як і моделі 4 (вільні довжини 4,8 і 3,6 м) і 5 (вільні довжини 4,4 і 3,0 м).

Зміна вільної довжини анкерів в меншу сторону веде до закономірного збільшення переміщень конструкції огороження котловану (рис. 5), а на згинаючий момент такого різкого і характерного впливу не має.

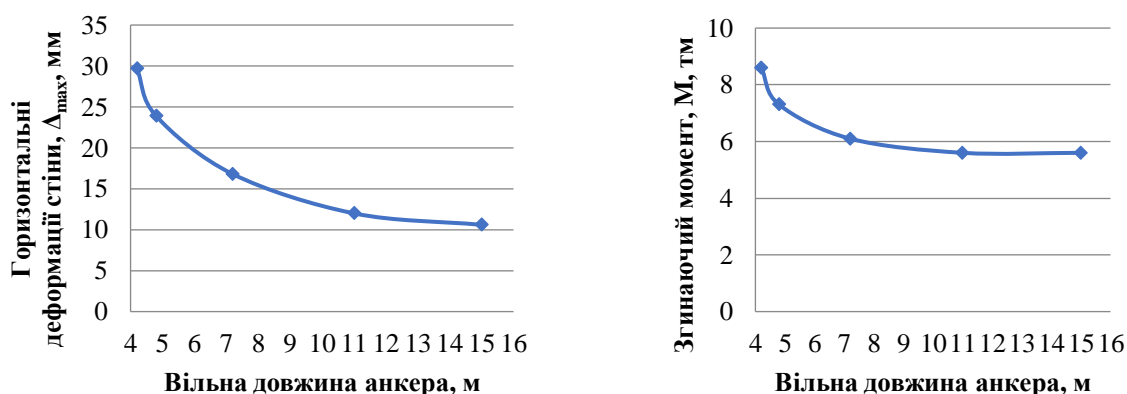


Рис. 5. Залежність деформацій та згинаючого моменту конструкції огороження від зміни вільної довжини анкера (графіки побудовані для верхнього ярусу анкерів)

Слід зазначити, що для моделей 1, 2 і 3 переміщення коренів анкерів варіюються в межах 6...13 мм, для моделей 4 і 5 загальні переміщення різко зросли до 17...27 мм, що можна простежити на загальних переміщеннях розрахункової моделі в таблиці 2.

Не дивлячись на те, що моделі не відповідають реальному проекту огородження котловану, а дані розрахунку не застосовувалися б на практиці, жодні з отриманих результатів переміщень огорожувальної конструкції не перевищують критичних, це стосується і зусиль, що виникають в конструкції огородження.

Висновки:

Основна вимога до розташування ін'єкційних ґрунтових анкерів – корінь анкера повинен розташовуватися за межами призми обвалення. У статті були розглянуті п'ять підходів до побудови поверхні обвалення. Для моделювання були обрані нормативні та технічні документи України, Російської Федерації та Об'єднаних Штатів Америки. Причини не розглянутих норм інших країн - в схожості підходів.

В результаті виконаного моделювання та аналізу отриманих даних зазначимо наступне:

- Зміна вільної довжини анкерів в меншу сторону веде до збільшення переміщень конструкції огородження котловану, а на згинаючий момент різкого впливу не має;
- Для моделей 1, 2 і 3 переміщення коренів анкерів варіюються в межах 6...13 мм, для моделей 4 і 5 загальні переміщення різко зросли до 17...27 мм, що можна простежити на загальних переміщеннях розрахункової моделі, отриманих за допомогою розрахункового геотехнічного комплексу Plaxis ;
- Не дивлячись на те, що моделі не відповідають реальному проекту огородження котловану – жодні з отриманих результатів переміщення конструкції огородження не перевищують критичних, це стосується і зусиль, що в ній виникають.

Результати моделювання та аналізу даної роботи не є а ні критикою, а ні рекомендаціями до вибору того або іншого підходу до розташування ґрунтових анкерів при проектуванні огорожень котловану або підпірних конструкцій. Дана робота виконана для ознайомлення з методами і підходами, що застосовуються в різних країнах. Порівняльний аналіз здійснено для візуалізації залежностей довжин вільної частини анкерів і деформацій конструкції огородження котлованів і зусиль, що виникають в ній.

При використанні графічного методу як попереднього, необхідно не забувати, що при розташуванні коренів ґрунтових анкерів слід враховувати такі фактори, як рівень ґрунтових вод і його сезонне коливання, слабкі прошарки ґрунтового масиву, розташування поблизу активної зони кореня фундаментів і комунікацій.

Після вибору типу конструкції і розташування ґрунтових анкерів обов'язковий розрахунок загальної стійкості конструкції "стіна-анкер-ґрунт" з подальшим коригуванням елементів конструкції огороження глибоких виїмок.

Перелік посилань

1. Ведомственные строительные нормы ВСН 506-88 "Проектирование и устройство ґрунтовых анкеров" (1989), Москва, Россия.
2. Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.1-32-2014 "Настанова з проектування котлованів для улаштування фундаментів і заглиблених споруд".
3. Державний стандарт України ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014 "Настанова з проектування підпирних стін".
4. Державний стандарт України ДСТУ Б EN 1537:2016 " Виконання спеціальних геотехнічних робіт. Ґрунтові анкери".
5. Engineer Manual EM 1110-2-2504 "Design of sheet pile walls" (1994), Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, USA.
6. Storm, R., & Ebeling, R.M. (2001). ERDC/ITL TR-01-1 "State of the practice in the design of tall, stiff and flexible tieback retaining wall", U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, USA.
7. Sabatini, P.J., Pass, D.G., & Bachus, R.C. (1999). FHWA-IF-99-015 Geotechnical Engineering Circular No.4 "Ground anchors and anchored systems", U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology, Washington, USA.
8. Goldberg, D.T., Jaworski, W.E., & Gordon, M.D (1976). FHWA-RD-75-128 "Lateral support systems and underpinning", Federal Highway Administration, Washington, USA.
9. Geotechnical design procedure GDP-11 "Geotechnical design procedure for flexible wall systems" (2015), Revision 4, Department of Transport, New York, USA.
10. Ortigao, J.A.R., & Sayao, A.S.F.J. (2004). *Handbook of slope stabilization*, 330-345.

АННОТАЦІЯ

Целью работы является ознакомление с методами и подходами при использовании графического метода для размещения призмы обрушения при проектировании ґрунтовых анкеров, описанных в нормативных документах Украины, Российской Федерации и Объединенных Штатов Америки, также выполнить сравнительный анализ зависимостей расположения корневой, длин свободной части ґрунтовых анкеров и деформаций конструкции ограждения котлована

Методы исследования. Теоретический анализ нормативных документов, действующих на территории Украины, Российской Федерации и Объединенных Штатов Америки и моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции ограждения котлована с ґрунтовыми анкерами с помощью многофункционального комплекса Plaxis V8.6, который использует метод конечных элементов.

Результаты. Для примера моделирования выбранных подходов был избран супесчаный ґрунтовый массив и ограждения котлована, выполненное из двутавра профиля 24М с шагом 0,5 м длиной 16 м, с двумя ярусами ґрунтовых инъекционных анкеров с углом наклона 25° и шагом 1,5 м. Длины свободной части анкеров для каждой модели были выбраны в соответствии с проведенной плоскостью обрушения. С учетом рассмотренных подходов в трех странах было создано пять моделей и выполнен анализ результатов. Сравнительный анализ был осуществлен для визуализации зависимостей длин свободной части анкеров и деформаций конструкции ограждения котлованов и усилий, возникающих в ней. Из полученных результатов отмечено, что изменение свободной длины анкеров в меньшую сторону ведет к увеличению перемеще-

ний конструкции ограждения, но не имеет такого выраженного влияния на изгибающий момент, возникающий в ней. Также был выполнен сравнительный анализ осевых усилий в корнях анкеров при изменении их расположения.

Научная новизна. Сравнительный анализ графического метода расположения корней инъекционных анкеров в соответствии с подходами, освещенными в нормативных документах различных стран.

Практическое значение. Ознакомление с особенностями проектирования инъекционных грунтовых анкеров в некоторых странах и исследования влияния изменения свободной длины анкеров на деформации конструкции ограждения глубоких выемок.

Ключевые слова: *грунтовый анкер, корень, свободная длина, плоскость обрушения, нормативные документы, ограждения котлована.*

ABSTRACT

The aim of research is to familiarize ourselves with the methods and approaches when using the graphical method to place a collapse prism when designing soil anchors described in the regulatory documents of Ukraine, the Russian Federation and the United States of America, also to perform a comparative analysis of the dependences of the root location, the length of the free part of soil anchors and structural deformations foundation pit fencing.

Research methods. Theoretical analysis of regulatory documents in force in Ukraine, the Russian Federation and the United States of America and modeling of the stress-strain state of the construction of the foundation pit fence with soil anchors using the multifunctional complex Plaxis V8.6, which uses the finite element method.

Results. For the example of modeling of the selected approaches, a loamy soil mass and a retaining structure, made of 24M profile double-step with a length of 0.5 m 16 m, with two tiers of soil injection anchors with a slope of 25° and a step of 1.5 m, were selected. For each model were selected according to the conducted plane of collapse. Taking into account the approaches considered, five models were created and the results analyzed. A comparative analysis was carried out to visualize the dependences of the lengths of the free part of the anchors and the deformations of the construction of the deep excavation and the forces in it. From the obtained results, it was noted that a smaller change in the free length of the anchors leads to an increase in the displacement of the fence structure, but does not have such a pronounced effect on the bending moment arising in it. A comparative analysis of the axial forces in the grout bodies of the anchors when changing their location was also performed.

Scientific novelty. Comparative analysis of the graphical method of locating the grout bodies of injection anchors in accordance with the approaches highlighted in the regulations of different countries.

Practical meaning. Familiarity with the design features of injection ground anchors in some countries and the study of the effect of changing the free length of anchors on the deformation of the design of the deep excavations.

Keywords: *ground anchor, grout body, free length, plane of collapse, normative documents, excavation of the pit.*