

УДК 624.131.24:38

**ПРЕСИОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТИСЛИВОСТІ ПІЩАНИХ ОСНОВ, ЗАКРІПЛЕНИХ ГРУНТОЦЕМЕНТОМ**

Асп. В.Г. Іванченко

**ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЖИМАЕМОСТИ ПЕСЧАНЫХ ОСНОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТОМ**

Асп. В.Г. Іванченко

**PRESSIOMETRIC OF RESEARCH OF SANDY BASE COMPRESSIBILITY STRENGTHENED WITH THE SOIL-CEMENT USING**

Postgraduate V.G. Ivanchenko

*У роботі наведено результати обчислювального експерименту пресіометричних випробовувань піску. Встановлено залежності горизонтальної деформації ґрунту від тиску, розмірів і співвідношення сторін зонда пресіометра в закріпленій основі. Створено метод дослідження стисливості основи, що підсилена ґрунтоцементом, шляхом проведення пресіометричних випробовувань.*

**Ключові слова:** ґрунтова основа, пресіометричний метод, ґрунтоцемент, параметри зонда, стисливість ґрунту.

*В работе приведены результаты вычислительного эксперимента прессиометрических испытаний лёссового суглинка. Установлены зависимости горизонтальной деформации грунтов от давления, размеров и соотношения сторон зонда прессиометра в закреплённой основе. Создан метод исследования основы, которая усилена грунтоцементом по буромесительной технологии, путем проведения прессиометрических испытаний.*

**Ключевые слова:** ґрунтового основание, прессиометрический метод, ґрунтоцемент, параметри зонда, сжимаемость ґрунта.

*The paper highlights the results of the calculation study of the pressiometric tests in the sandy. A stress-strain state (SSS) of the system “soil base – pressiometer probe – hard soil-cement elements” is considered in the process of calculation experiment for resolving the elastoplastic task of soil mechanics using PC PLAXIS 3D Foundation, and based on these data to define the optimum probe parameters ensuring maximum compressible mass versus the technical capabilities of the hydraulic pressiometers. The lateral soil deformation under the pressure, pressiometer probe sides and dimensions ratio, presence of soil-cement reinforcing elements in the foundation have been determined. The scientific originality stipulates development of the method allowing adequately assessing the compressibility of a base on the full depth strengthened with the reinforcing soil-cement elements prepared. Method development for assessment of the base on its complete thickness strengthened with the reinforcing soil-cement by the pressiometry tests.*

**Keywords:** soil base, pressiometric tests, soil-cement, probe parameters, soil compressibility.

**Вступ.** Сприйняття постійно зростаючих навантажень на основу сучасних будівель і споруд потребує її перевірки на надійність, тобто контролю якості даної основи. Державними будівельними нормами України [1] передбачено підсилення слабких основ шляхом армування їх жорсткими елементами, які пронизують ґрунт у вертикальному, похилому і горизонтальному напрямках для

покращення механічних властивостей основи. Використання ґрунтоцементу є ефективним напрямком зниження вартості фундаментобудування, адже використовуються ґрунти в якості матеріалу для зведення фундаментів, що залягають в основі об'єктів будівництва. Улаштування ґрунтоцементних елементів можливе в різноманітних ґрунтах: від мулів і торфів до “слабких” півскельних порід,

незалежно від їх хімічного складу, вологості, рослинних залишків, проникності та інших характеристик. Перевірка таких основ на стисливість є невід'ємною частиною при будівництві відповідальних будівель і споруд.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** У польових умовах дослідження стисливості основ проводиться штампами різних розмірів. Стандартним вважається жорсткий круглий штамп площею 5000 см<sup>2</sup>. Такий штамп використовується переважно при дослідженнях з поверхні Землі або з відмітки дна котлована. За необхідності дослідження більш глибоких шарів основи для встановлення штампів необхідно буріння свердловин великого діаметра або проходження шурфів для встановлення штампа [2, 3]. При пошаровому дослідженні основ необхідна циклічність процесу «буріння свердловини – випробування штампом». На наш погляд, більш технологічними слід вважати випробування ґрунтів пресіометрами у свердловинах, які попередньо пробурені на всю глибину досліджень. Відмінність штампових і пресіометричних досліджень полягає в навантаженні ґрунтів у перпендикулярних напрямках.

Актуальним є розроблення методу, що адекватно дає змогу оцінити стисливість основи, яку підсилено армуючими ґрунтоцементними елементами, що виготовлені за бурозмішувальним методом, за усією її глибиною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз низки досліджень вчених [4, 5] показує, що пресіометричний метод випробування застосовується в глинистих ґрунтах природнього стану, при цьому використовується конструкція з малим діаметром зонда пресіометра. У роботі [6] розглянуто пресіометричні дослідження у природньому ґрунті без підсилення. Для перевірки якості армованих ґрунтів частіше за все застосовують метод статичного вдавлювання штампа [2]. Стандартний штамп економічно і технічно недоцільно встановлювати в шурфах і свердловинах [3]. Використання штампів великих розмірів для оцінювання стисливості армованої основи дозволяє оцінити лише невелику її товщу. Для квадратних штампів вказаних розмірів ця

товща складає лише два їх діаметра, тобто 2,0–2,5 м [7]. Для південних районів України товща просадочних ґрунтів складає 25 м і навіть більше. Великий штамп недоцільно встановлювати на такій глибині. Тому необхідно використовувати інші методи визначення стисливості армованих основ.

При цьому виникає необхідність використання зонда пресіометра з достатніми розмірами стислої товщі [8]. Для штампів численними дослідженнями встановлено, що глибина стислої товщі залежить від розмірів, співвідношення сторін прямокутного штампа, величини тиску на ґрунт [7]. Причому в публікаціях [8-10] питання випробувань основ, армованих ґрунтоцементними елементами за бурозмішувальним методом, не розглядалося. Для пресіометричних досліджень необхідно встановлювати експериментально залежність параметрів зонда від модуля деформації армованої основи.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Мета роботи полягає в оцінці напружено-деформованого стану (НДС) системи «Основа – зонд пресіометра – ґрунтоцементні елементи» шляхом проведення обчислювального експерименту за допомогою ПК PLAXIS 3D Foundation.

Для досягнення поставленої мети треба виконати такі завдання:

- провести моделювання пресіометричного дослідження у природньому стані ґрунту;
- встановити оптимальні параметри зонда, тобто такі, що забезпечують максимальну стисливу товщу при технічних можливостях пресіометра конструкції Д-76 [4] в армованому масиві (рис. 1);
- порівняти результати обчислювального експерименту з натурними випробуваннями, проведеними на будівельному майданчику.

У геотехнічній практиці для оцінювання механічних властивостей ґрунтів у польових умовах використовують методи статичного і динамічного зондування та випробування пресіометрами різних конструкцій. Всі ці методи можна використовувати для оцінювання стисливості армованих ґрунтів, коли користуються принципом, що за наявності горизонтальної складової напружень, яка створюється в процесі випробувань (при зондуванні це розпір при зануренні конуса, а при пресіометрії взагалі маємо справу лише з горизонтальними напруженнями), тобто зонд

відчуває перепону, яка знаходиться в межах горизонтально орієнтованої стисливої товщі. При цьому опір стисненню ґрунту збільшується. Модуль деформації такої основи буде вищим, ніж подібної, але без перепони. У даному випадку такою перепорою слугують ґрунтоцементні елементи армування основи (рис. 1).

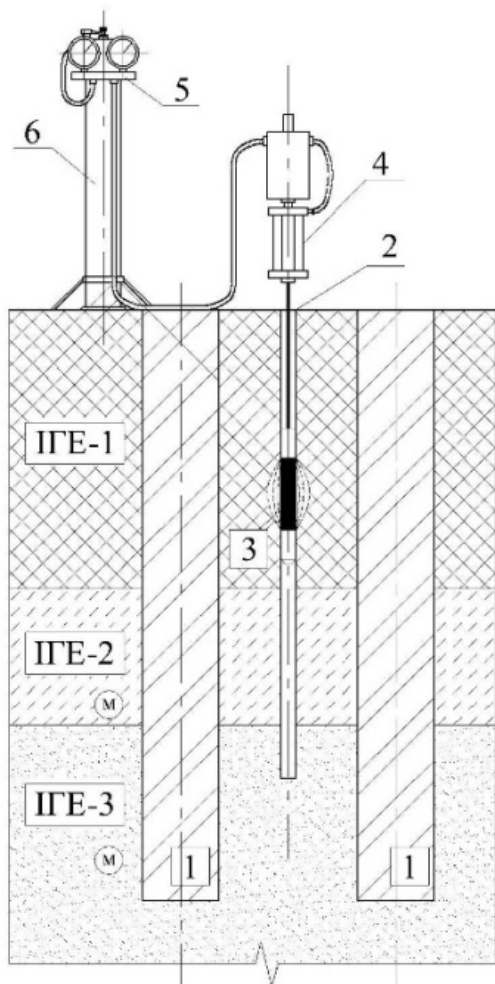


Рис. 1. Схема встановлення зонда пресіометра в армованому масиві:

1 – ґрунтоцементні елементи; 2 – бурова свердловина; 3 – зонд пресіометра; 4 – водомірний вузол; 5 – манометри; 6 – балон зі стиснутим газом

Проведення таких експериментальних досліджень потребує виготовлення додаткового обладнання, достатньої кількості випробовувань у польових умовах. Слід також зважати на той факт, що розміри зонда, з одного боку, обмежуються розмірами свердловини, а з іншого – потужністю

навантажувальної системи пресіометра. Вирішити поставлене завдання можливо шляхом проведення обчислювального експерименту з використанням одного з сучасних програмних комплексів, який використовує метод скінченних елементів.

**Основна частина дослідження.** Програмний інструментарій, який входить до складу ПК PLAXIS 3D Foundation, дозволяє виконувати геометричне й скінченно-елементне моделювання фізичних конструкцій, задавати початкові та остаточні граничні умови навантаження, які безпосередньо є крайовими задачами для їх подальшого розрахунку [10].

На вибір моделі впливають вимоги використання фізичних рівнянь, які спираються на основні параметри механічних властивостей ґрунтів, що визначають за стандартними чи близькими до них методиками. У моделі використано відомі гіпотези механіки ґрунтів:

1. Ґрунт у межах СЕ приймають за однорідне ізотропне середовище.

2. При деформаціях зберігається суцільність ґрунтового масиву.

3. Зміна значень фізико-механічних властивостей ґрунту за інших рівних умов є функцією зміни його коефіцієнта пористості.

4. Як і в інших сучасних теоріях, деформації формозміни в загальному випадку нелінійні, тобто зв'язок між компонентами девіатора напружень і деформацій нелінійний. Навантаження – просте (компоненти девіатора напружень зростають пропорційно одному параметру). Зберігається співвісність тензорів напружень і деформацій.

Розрахункова схема являє собою ідеалізовану модель об'єкта (рис. 2).

Вона автоматично розділяється на скінченні елементи. У результаті такого ділення з'являються вузли. Елементи і вузли нумеруються починаючи з нижніх і с початку системи координат.

Розміри розрахункової зони встановлено таким чином:

– бічні межі прямокутної розрахункової зони прийняті на достатній відстані від бічної поверхні стінки свердловини з урахуванням максимально очікуваної потужності стисливої товщі зонда з умови заборони горизонтальних переміщень, концентрації напружень і ущільнення ґрунту на контакті з зовнішньою межею розрахункової зони;

– верхню горизонтальну межу розрахункової зони розміщують на рівні поверхні землі (котлована);

– за глибину розрахункової зони прийнято нижню межу стисливої товщі підсиленої основи.

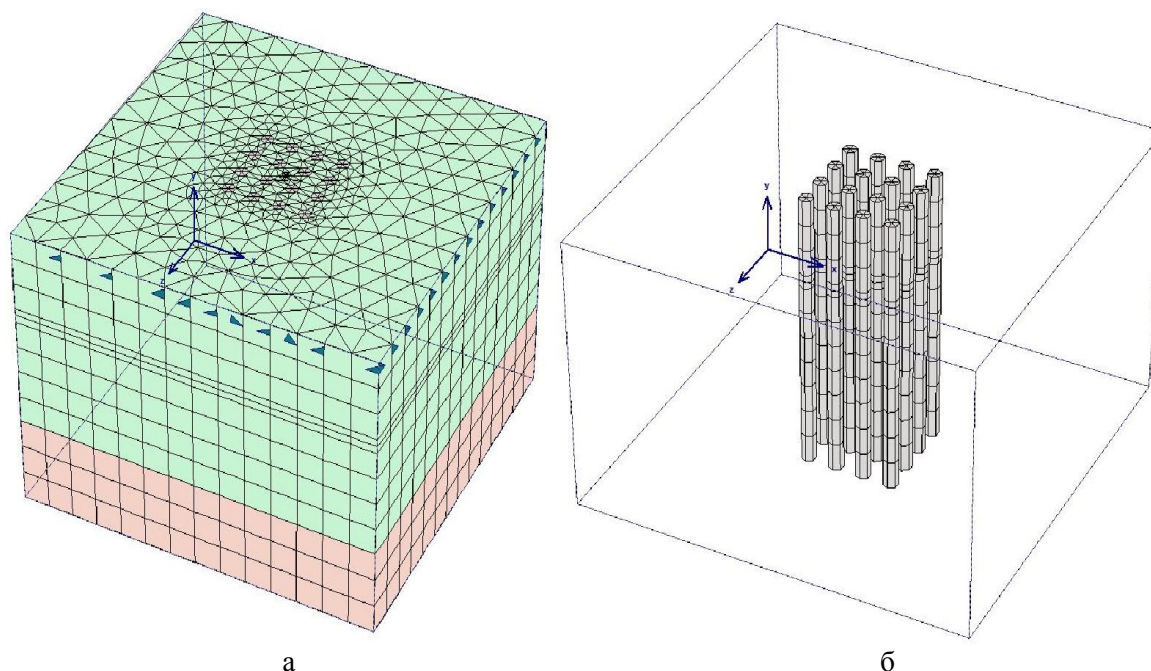


Рис. 2. Розрахункова схема системи «основа – зонд пресіометра – ґрунтоцементні елементи»: а – загальний вигляд; б – положення ГЦЕ

Вихідні дані для розрахунку приймалися за даними лабораторних досліджень відповідно до ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) і ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96). Призову

міцність  $\sigma_{пр}$  і модуль деформації  $E$  ґрунтоцементу визначали за результатами випробовувань зразків на одноосьове стиснення. Ці дані наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики матеріалів для розрахунку в Plaxis 3D Foundation

Матеріал	Питома вага $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Модуль деформації $E$ , МПа	Питоме зчеплення $c$ , кПа	Кут внутрішнього тертя $\phi$ , град	Коефіцієнт Пуассона $\nu$
Пісок пилюватий	18,8	8	8	25	0,3
Ґрунтоцемент	18,2	80	100	22	0,2

Розрахункові області подано прямокутниками на площині. Границям області задано такі умови, які виключають будь-яке переміщення. За вертикальними границями встановлено лише горизонтальні опори, які дозволяють тільки вертикальне переміщення, верхня границя без в'язів. Навантаження приймалися з розрахунку несучої здатності основи.

На рис. 3 у вигляді тестової задачі наведено результати обчислювального експерименту пресіометричних випробовувань для встановлення залежностей горизонтальної деформації ґрунту  $u$ , см, у природній основі (до її армування ГЦЕ) при постійному діаметрі зонда 10.8 см, і змінних висоті циліндричного зонда  $h$ , см, площі  $A$ , см<sup>2</sup>, і тиску за його поверхнею  $\sigma$ , МПа.

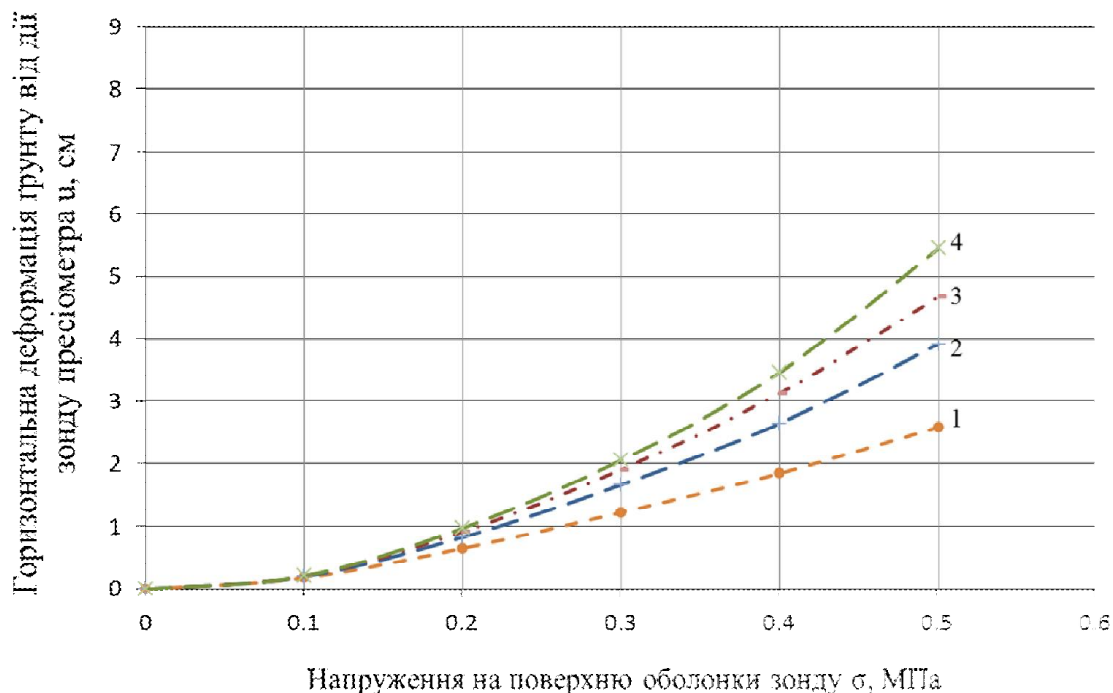


Рис. 3. Графіки залежності деформацій піщаного ґрунту від напружень і відстані між осями ГЦЕ: 1 – 80 см; 2 – 100 см; 3 – 120 см; 4 – 150 см

У результаті проведеного обчислювального експерименту отримано пресіометричні криві, за даними яких складено табл. 2, у якій значення модуля деформації  $E_n$  розраховано за рівнянням, складеним на основі формули Шлейхера та  $E_p$  – рекомендаціями ДБН [1]:

$$A_l = (1 + \nu) b \frac{\sigma}{u}, \quad (1)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  
 $b$  – довжина кола зонда пресіометра, см;  
 $\sigma$  – тиск на ґрунт за поверхнею зонда пресіометра;  
 $u$  – горизонтальна деформація ґрунту.

Таблиця 2

Співставлення значень модулів деформації, отриманих за пресіометрією і розрахунком за ДБН [1]

Крок ГЦЕ $l$ , см	Модуль деформації за пресіометрією $E_n$ за рівнянням (1) при тиску зонда пресіометра на ґрунт $\sigma$ , МПа						Модуль деформації $E_p$ за ДБН
	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	
150	4.33	3.33	2.85	2.57	2.39	2.25	16,11
120	4.54	3.53	3.023	2.74	2.56	2.43	19,54
100	4.89	3.86	3.36	3.08	2.90	2.78	23,74
80	5.88	4.85	4.33	4.05	3.88	3.76	31,48

Коефіцієнт  $\lambda$  дорівнює співвідношенню розрахункового модуля деформацій ( $E_p$ ) до пресіометричного модуля ( $E_n$ ). Рівняння двофакторного аналізу з результатом співвідношення ( $\lambda = E_p/E_n$ ) на 28 значення:

$$\lambda = 16,43 \sigma - 0,022 l + 4,49 \quad (2)$$

за умови, що  $E_n$  змінюється від 2,25-5,88 МПа,  $\sigma$  від 0,15-0,4 МПа та  $l$  від 80-150 см; коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,94$ , кореляції  $r = 0,96$ ;

критерій Фішера  $F_p = 172,5$ ,  $a=0,05$ , звідки  $F_{кр}(2;25) = 3,38$  – рівняння значуще;  $t$  – критерій Стьюдента:  $t_{\sigma} = 17,5$ ;  $t_l = 6,12$ ;  $t_0 = 9,37$  при  $t_{кр}(0,05;25) = 2,06$  – коефіцієнти значущі.

У табл. 3 наведено значення масштабного коефіцієнта  $\lambda$  у розглянутих діапазонах

параметрів рівняння (2). Оцінюючи отримані результати в табл. 3, маємо значення масштабного коефіцієнта  $\lambda=3,72 - 8,37$  МПа, який враховує зміну відстані між армуючими елементами та величину анізотропії.

Таблиця 3

Значення масштабного коефіцієнта  $\lambda$  залежно від відстані між ГЦЕ

Крок ГЦЕ $l$ , см	Масштабний коефіцієнт $\lambda$ залежно від тиску на ґрунт $\sigma$ , МПа					
	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
150	3.721	4.838	5.653	6.268	6.741	7.160
120	4.304	5.535	6.464	7.131	7.633	8.041
100	4.855	6.150	7.065	7.708	8.186	8.540
80	5.354	6.491	7.270	7.773	8.113	8.372

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Будівельними нормами України передбачено армовані основи. Для контролю за їх якістю передбачено низку заходів, серед яких стисливість таких основ рекомендовано оцінювати за результатами штампових випробовувань. На наш погляд, штампові випробовування недостатньо висвітлюють стисливість армованої основи за глибиною масиву, тому що штамп можливо встановити лише на поверхню армованого масиву, а стислива зона не перевищує двох його діаметрів.

Проведені дослідження спрямовано на встановлення закономірностей деформування армованих ґрунтів під тиском, що створює зонд

пресіометра. Методом досліджень використано обчислювальний експеримент, який проведено за допомогою програмного комплексу PLAXIS 3D Foundation. Складено розрахункову схему і вихідні дані для розрахунків. Внаслідок проведених досліджень встановлено залежності горизонтальної деформації ґрунту від тиску, розмірів і співвідношення сторін зонда, наявності ґрунтоцементних елементів армування. На підставі цих даних встановлено, що ці залежності взагалі відповідають аналогічним рівнянням для штампів, а кількісну різницю між ними можливо коригувати масштабним коефіцієнтом. Встановлено формулу для визначення модуля деформації армованих основ за даними пресіометричних випробовувань.

**Список використаних джерел**

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель і споруд. Основні положення проектування. Зміна № 1. Зміна № 2 [Текст]. – К.: Мінрегіобуд України, 2009. – 83 с.
2. Степура, И.В. Армирование лессовых грунтов оснований зданий и сооружений [Текст] / И.В. Степура, В.С. Шокарев, А.С. Трегуб [и др.] // Международная конференция по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь: ПГТУ, 2004. – С. 213-219.
3. Текучев, Ю.Б. О полевых испытаниях грунтов штампом малой площади [Текст] / Ю.Б. Текучев, Е.П. Канашиная // Инженерные изыскания. – 2010. – № 8. – С. 24-25.
4. Бондарик, Г.К. Методические рекомендации по определению деформационных и прочностных свойств глинистых пород методом прессиометрии [Текст] / Г.К. Бондарик, С.Л. Коренева, Д.С. Горячева. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1971. – 96 с.
5. Bahar, R. Undrained strength of clays derived from pressuremeter tests [Text] / R. Bahar, F. Baidi, O. Belhassani, E. Vincens. // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2012. – Vol. 16, Issue 10. – P. 1238-1260.

6. Goh, K. Understanding the Stiffness of Soils in Singapore from Pressuremeter Testing [Text] / K. Goh, K. Jeyatharan, D. Wen // Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. – 2012. – Vol. 43, Issue 4. – P. 21–29.
7. Цытович, Н. А. Механика грунтов [Текст] / Н. А. Цытович. – М.: Стройиздат, 1983. – 635 с.
8. Messaoud, F. Pencil pressuremeter test evaluation for developing p-y curves for driven piles [Text] / F. Messaoud, M. Nouaouria, P. Cosentino // International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 1, Issue 6. – P. 20–24.
9. Varaksin, S. Pressuremeter for design and acceptance of challenging ground improvement works [Text] / S. Varaksin, B. Hamidi // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013. – P. 1283-1286.
10. Pruska, J. Comparison of geotechnic software – Geo FEM, Plaxis, Z-soil [Text] // Geotechnical problems with man-made and man influenced grounds. – Proceedings of the XIII-th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Prague, 2003. – P. 819 – 824.

Рецензент д-р техн. наук, професор Ю.Л. Винников

---

Іванченко Володимир Григорович, аспірант, кафедра видобування нафти і газу та геотехніки, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. E-mail: [zaw78@mail.ru](mailto:zaw78@mail.ru). Тел.: 099 37-80-977, 097 512 66 15.

Ivanchenko Vladimir, Postgraduate student, department of oil and gas industry and geotechnique, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. E-mail: [zaw78@mail.ru](mailto:zaw78@mail.ru).

Стаття прийнята 03.11.2015 р.