УДК 624.154.1:624.131.43

М.М. Фаттахов, Б.В. Гончаров, Н.Б. Гареева, О.В. Галимнурова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

МЕТОД РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА СВАЮ ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ

В статье на основе существующих теоретических положений в области расчетов горизонтальной нагрузки на сваю авторами обоснована результатами полевых исследований зависимость между величинами коэффициента постели грунта и сопротивлением погружению зонда q_c . Предлагается предельную горизонтальную нагрузку определять по средней величине q_c для всей глубины погружения сваи. Для практических расчетов по данным зондирования предельной горизонтальной нагрузки предлагается номограмма.

Ключевые слова: Статическое зондирование, коэффициент постели, отпор грунта, предельная горизонтальная нагрузка, слабый и неоднородный грунт, модуль деформации грунта.

M.M. Fattakhov, B.V. Goncharov, N.B. Gareeva, O.V. Galimnurova

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

METHOD OF ANALYSIS OF THE PILE ULTIMATE HORIZONTAL LOAD BY CPT DATA

The authors of the paper substantiate by field tests the relationship between values of the subgrade reaction coefficient and penetration resistance q_c based on existing theoretical principles of pile horizontal load analysis. The ultimate horizontal load is suggested to be evaluated according to the average value of q_c for the whole depth of pile penetration. The chart is offered for the practical analyses of the ultimate horizontal load by CPT.

Keywords. Cone penetration test (CPT), subgrade reaction coefficient, earth back pressure, ultimate horizontal load, weak and nonhomogeneous soil, modulus of soil deformation.

В материалах II Международного симпозиума по статическому зондированию [1] отмечается, что основными задачами дальнейшего развития метода является расчет несущей способности свай и методики оценки модуля деформации глинистых грунтов. Нужно отметить, что большинство разработанных методов направлены пока на расчет свай при вертикальной нагрузке, хотя развитие новых методов расчета на горизонтальные нагрузки позволит выполнять полный расчет комплекса фундамента по данным статического зондирования.

В развитие новых методов расчета свай по данным статического зондирования в России следует отметить работы ГУП «БашНИИСтрой» и ОАО «Фундаментпроект» [2, 3, 4].

Сложившаяся практика проектирования фундаментов из забивных свай длиной более 3,0 м показывает, что при расчете на горизонтальные нагрузки используются два метода в зависимости от глубины погружения сваи:

- свая некоторой конечной длины, изгибаясь, поворачивается вокруг нулевой точки;
- свая принимается гибкой бесконечно длинной, а форма изогнутой оси описывается некоторым дифференциальным уравнением.

Группы свай классифицируются по величине отношения рабочей длины сваи l в грунте к размеру ширины ее поперечного сечения $\alpha = l/d$. В табл. 1 приведены величины α для каждой группы.

Таблица 1

Классификация групп свай по величине α

Величина α	$\alpha \leq 10$	$10 \leq \alpha \leq 20$	$\alpha > 20$
Наименование группы	Абсолютно жесткие	Конечной жесткости	Гибкие

Трудности получения реальных значений предельной величины горизонтальной нагрузки на забивную сваю определены двумя основными причинами:

– для проведения статических испытаний следует выполнить погружение пробных и анкерных свай с использованием сложных сваебойных агрегатов, особенно для свай длиной более $l = 10$ м, что приводит к высокой стоимости полученной информации о величине предельной нагрузки;

– вторая причина заключается в том, что рекомендуемый метод расчета в нормативных документах не позволяет учитывать нелинейность связи «нагрузка–перемещение». Поэтому расчетные данные и результаты статических испытаний имеют значительные расхождения.

Например, в работе [5] приведены результаты сравнения данных определения величины предельного сопротивления расчетным и опытным путем.

На рис. 1 представлены графики выполненной проверки на опытной площадке в г. Новокузнецке для свай глубиной погружения $l_0 = 12$ м.

На кафедре «Автомобильные дороги» Уфимского государственного нефтяного технического университета предложен метод расчета на горизонтальную нагрузку по данным статического зондирования для свай классификационной группы $\alpha > 20$ [6].

Рис. 1. График зависимости перемещений от величины горизонтальной нагрузки (Б.В. Бахолдин, Е.В. Труфанова)

Основные положения методики предлагаемого расчета:

- величина предельной горизонтальной нагрузки на сваю пропорциональна величине коэффициента постели K ;
- величина коэффициента постели принимается как для узкой гибкой балки на упругом основании согласно [7, 8].

Предлагается расчетная зависимость для определения величины коэффициента постели K

$$K = \frac{\pi E}{2(1 - \mu^2)d[\ln 4\alpha]}, \quad (1)$$

где E – модуль деформации; μ – коэффициент Пуассона; d – ширина поперечного сечения свай; α – отношение глубины погружения сваи к ширине поперечного сечения свай.

Были обработаны результаты парных испытаний грунта штампом и зондом II типа, предложена расчетная формула для определения модуля деформации по данным зондирования [9]

$$E = 7,12q_c. \quad (2)$$

И тогда расчетная зависимость (1) будет иметь вид

$$K = \frac{\pi 7,12q_c}{2(1 - \mu^2)d[\ln 4\alpha]}, \quad (3)$$

где q_c – средняя величина лобового сопротивления зонда по глубине погружения сваи.

При устройстве свайных фундаментов в слабых грунтах для прохождения массива обычно используют сваи длиной до 12–13 м. Для обоснования предлагаемого метода расчета свай по данным зондирования использованы материалы испытаний свай и данные зондирования на полигоне, расположенном в пригороде г. Уфы на пологом берегу р. Шугуровки. Покровная толща грунтов полигона представлена суглинками и глинами полутвердой тугопластичной и мягкопластичной консистенции, мощностью яруса слоя до 15 м, подстилаемой коренными породами уфимского яруса пермского возраста.

Опытные работы проведены на трех площадках. Результаты зондирования приведены на рис. 2.

Зондирование выполнено с использованием установки С-832М конструкции института БашНИИстрой, имеющей зонд II типа. Результаты испытаний и лабораторных исследований образцов грунта основной площадки № 2 приведены в табл. 2.

На площадке № 2 также получены результаты статических испытаний шести свай с глубиной погружения от $l_0 = 3,5$ до $l_0 = 8,0$ м на действие горизонтальной нагрузки. Результаты испытаний приведены на рис. 2, в. Так как погружение забивных свай длиной более 8,0 м осложнено дефицитом мобильных сваебойных агрегатов предложено на базе полученной опытной зависимости (см. рис. 2, в), подобрать математическую функцию для расчета в подобных грунтовых условиях свай длиной $l_0 = 12$ м.

Рис. 2. Результаты испытаний на площадках: а – статическое зондирование основной площадки № 2; б – статическое зондирование площадок № 1 и № 3; в – статические испытания свай на площадке № 2

Таблица 2

Результаты испытаний и лабораторных исследований образцов
грунта основной площадки № 2

Глубина отбора, м	Наименование грунта	Естественная влажность	Удельный вес $\gamma/\text{см}^3$	Объемный вес $\gamma/\text{см}^3$	Пределы пластичности			Коэффициент пористости e	Индекс текучести I_L	Штамповый модуль деформации E , мПа
					W_p	W_L	I_p			
2,0	суглинок	26,0	2,72	2,01	18,4	36,7	18,3	0,69	0,40	12,5
4,0	суглинок	26,1	2,71	1,92	21,8	32,3	10,5	0,72	0,45	–
6,0	суглинок	26,2	2,66	1,98	21,5	32,6	18,0	0,77	0,32	–

На рис. 3 показаны совмещенные результаты опытной зависимости предельной нагрузки от длины свай и расчетной зависимости с использованием параболической функции [10]

$$y = x^n, \quad (4)$$

где y – величина предельной горизонтальной нагрузки по заданному перемещению в уровне поверхности грунта; x – рабочая длина погружения сваи; n – показатель степени $n < 1,0$.

Рис. 3. Совмещенные результаты опытной зависимости предельной нагрузки от длины сваи и расчетной зависимости с использованием параболической функции

Выполненные расчеты по формуле (4) показали, что наиболее тесная сходимость получена при значении показателя степени $n = 0,55$, в этом случае расчетным путем опытная графическая зависимость $H = f(l)$ может быть дополнена до длины сваи 12 м.

Для разработки расчетной номограммы более удобно рассматривать выровненные графики параболической зависимости с использованием полулогарифмической сетки [11]. На рис. 4 представлен выровненный график $H = f(l_0)$ для грунтовых условий основной опытной площадки № 2, а также площадок № 1 и № 3. При построении графиков принято, что каждую площадку характеризует среднеарифметическая величина сопротивления зонду q_c по всей рабочей длине сваи. За предельную величину горизонтальной нагрузки принимается нагрузка, при которой перемещение сваи в уровне поверхности грунта составляет $\Delta = 10$ мм.

Рис. 4. Выровненные графики результатов испытаний для грунтовых условий площадок №1, №2, №3

Рис. 5. Номограмма для расчета экспресс-методом горизонтальной нагрузки на сваю по данным статического зондирования

Совместная обработка данных, полученных на трех опытных площадках, позволила предложить номограмму с полулогарифмической сеткой для оценки величины предельной горизонтальной нагрузки [11]. На рис. 5 приведены результаты расчета предельной нагрузки для случая: глубина погружения сваи $l_0 = 9$ м, средняя величина q_c по всей глубине погружения $q_c = 2$ МПа. Для данного случая величина предельной нагрузки $H_p = 44$ кН.

По опыту строительства свайных фундаментов при погружении забивных свай на глубину 12–13 м бездефектное погружение обеспечивается в грунтовом массиве при сплошном или послойном залегании глинистых от тугопластичной до текучепластичной консистенции грунтов.

Таким образом, предлагаемый экспресс-метод оценки предельной горизонтальной нагрузки по результатам статического зондирования массива может иметь достаточно широкое применение при проектировании фундаментов на сваях с глубиной погружения до 12–13 м. Например, для грунтовых условий нефтяных районов Тюменской области характерны строительные площадки с мощными слоями слабых глинистых грунтов, что обеспечивает достаточно точные данные осредненных значений статического зондирования и предельной нагрузки на сваю.

Библиографический список

1. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов на современном этапе по материалам // Материалы международного симпозиума по статическому зондированию. ОФМГ. – 2012. – № 1. – С. 28–32.
2. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. – М.: АСВ, 2010. – 405 с.
3. Трофименков Ю.Г., Воробков Л.Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. – М.: Стройиздат, 1981. – 212 с.
4. Гольдфельд И.З., Смирнова Е.А. Графоаналитическая обработка результатов статических испытаний грунтов забивными сваями и зондированием // ОФМГ. – 2011. – № 5.
5. Бахолдин Б.В., Труфанова Е.В. Некоторые сравнительные сопоставления расчета свай на горизонтальную нагрузку с экспериментальными данными // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: материалы конф. «БашНИИ-строй». – Уфа, 2006. – С 23–28.

6. Гончаров Б.В., Хабибуллин И.И., Галимнурова О.В. О работе предельной горизонтальной нагрузки на сваи-колонны по данным статического зондирования // ОФМГ. – 2012. – № 1.

7. Горбунов-Пасадов М.И. Маликова Т.А. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат. – 1984. – 635 с.

8. Сорочан Е.А., Трофименков Ю.Г. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М: Стройиздат, 1985. – 479 с.

9. Гареева Н.Б., Рыжков И.Б. Об определении модуля деформации грунтов статическим зондированием // Сб. трудов НИИПромстрой. – Уфа, 1984. – С. 94–9.

10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1964. – 608 с.

11. Хованский Г.С. Основы номографии. – М.: Наука, 1976. – 351 с.

References

1. Ryzhkov I.B., Isaev O.N. Staticheskoe zondirovanie gruntov na sovremennom etape [Modern step of soil CPT]. *Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma po staticheskomu zondirovaniyu*, 2012, no. 1, pp. 28-32.

2. Ryzhkov I.B., Isaev O.N. Staticheskoe zondirovanie gruntov [Soil CPT]. Moscow: ASV, 2010. 405 s.

3. Trofimenkov Yu.G., Vorobkov L.N. Polevye metody issledovaniya stroitel'nykh svoystv gruntov [Field measurements of soil construction properties]. Moscow: Strojizdat, 1981. 212 s.

4. Goldfeld I.Z., Smirnova E.A. Grafoanaliticheskaya obrabotka rezul'tatov staticheskikh ispytaniy gruntov zabivnymi svayami i zondirovaniem [Conjugate processing of results of soil static tests with driven piles and penetration test]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, no. 5, 2011.

5. Bakholdin B.V., Trufanova E.V. Nekotorye sravnitel'nye sopostavleniya rascheta svay na gorizontal'nuyu nagruzku s eksperimental'nymi dannymi. *Konferentsiya BashNIIsroy «Problemy mekhaniki gruntov i fundamentostroeniya v slozhnykh gruntovykh usloviyakh»*. Ufa, 2006, pp. 23–28.

6. Goncharov B.V., Khabibullin I.I., Galimnurova O.V. O rabote predel'noy gorizontal'noy nagruzki na svai-kolonny po dannym staticheskogo zondirovaniya [On the influence of the ultimate horizontal load onto pile-columns by CPT data]. *OFG*, 2012 no. 1.

7. Gorbunov-Pasadov M.I., Malikova T.A. Raschet konstruktsiy na uprugom osnovanij [Analysis of structures on the elastic foundation]. Moscow: Strojizdat, 1984. 635 s.

8. Sorochan E.A., Trofimenkov Yu.G. Spravochnik proektirovshchika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya. Moscow: Strojizdat, 1985. 479 s.

9. Gareeva N.B., Ryzhkov I.B. Ob opredelenii modulya deformatsii gruntov staticheskim zondirovaniem [On evaluation of modulus of soil deformation with CPT]. *Sbornik trudov NIIPromstroy*, Ufa, 1984, pp. 94-99.

10. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike [Directory on mathematics]. Moscow: Nauka, 1964. 608 s.

11. Khovanskiy G.S. Osnovy nomografii [Principles of nomography]. Moscow: Nauka, 1976. 351 s.

Об авторах

Фаттахов Мухарям Минниyarovich (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» Уфимского государственного нефтяного технического университета; e-mail: asfugntu@yandex.ru

Гончаров Борис Васильевич (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Гареева Наталия Борисовна (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» Уфимского государственного нефтяного технического университета; e-mail: natagon56@mail.ru

Галимнурова Ольга Витальевна (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» Уфимского государственного нефтяного технического университета; e-mail: galimnurova@mail.ru, e-mail: ugntu_tsp@list.ru

About the authors

Fattakhov Mukharyam Minniyarovich (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department «Highways and technology of construction production», Ufa State Petroleum Technical University; e-mail: asfugntu@yandex.ru

Goncharov Boris Vasiljevich (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Highways and technology of construction production», Ufa State Petroleum Technical University.

Gareeva Natalya Borisovna (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Highways and technology of construction production», Ufa State Petroleum Technical University; e-mail: natagon56@mail.ru

Galimnurova Olga Vitaljevna (Ufa, Russian Federation) – Ph. D in Technical Sciences, Reader of the Department «Highways and technology of construction production», Ufa State Petroleum Technical University; e-mail: galimnurova@mail.ru, e-mail: ugntu_tsp@list.ru

Получено 12.03.2014