

Расчет сооружений башенного типа на динамические воздействия с учетом податливости свайного фундамента и основания

К.т.н., профессор В.А. Соколов;*

к.т.н., профессор Д.А. Страхов;

к.т.н., доцент Л.Н. Сияков,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ключевые слова: сооружения башенного типа; свайные фундамента; основание; податливость сваи; динамические воздействия

При расчете зданий и сооружений учитывается совместная работа этих объектов и грунтового основания [1, 2, 3]. Игнорирование этого учета приводит к весьма искаженным результатам при вычислении усилий в надземной части сооружений, а также не позволяет правильно оценить их перемещения.

Для сооружений башенного типа на свайных фундаментах расчеты выполняются на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента. Результаты расчетных и экспериментальных исследований, посвященных совместному действию указанных усилий на сваи и свайные фундамента сооружений при статических нагрузках, приведены в работах отечественных и иностранных авторов [4–14], при динамических нагрузках – в работах [15–19]. При расчете башен одной из существенно влияющих на работу объекта динамических нагрузок является ветровая, оказывающая также пульсационное и резонансное вихревое действие. Воздействие ветра на сооружения определяется по методикам, приведенным в работах [20–23].

При расчетах стержневых конструкций на свайных фундаментах последние зачастую моделируются жесткой заделкой, при которой отсутствуют все компоненты перемещений в сопряжении стержневых элементов с основанием, или же в расчетной модели допускается только вертикальное перемещение сваи, а остальные возможные компоненты перемещений игнорируются. Кроме того, расчет осложнен наличием свайного ростверка малой жесткости, учет податливости которого также может быть существенен.

При расчете таких сооружений, как башни для размещения оборудования мобильной связи или радиосвязи, моделируемых стержневыми элементами, учет податливости основания не сказывается на величине изгибающих моментов и поперечных сил при действии статической нагрузки. При действии динамической нагрузки (сейсмике, пульсационной составляющей ветровой нагрузки и резонансном вихревом возбуждении) податливость фундамента и основания сказывается на величине самой нагрузки и, соответственно, на усилиях в элементах башни. Значительная часть таких сооружений выполняется на фундаментах с винтовыми сваями.

В связи с этим авторами статьи поставлена научная задача – выполнить расчетно-теоретические исследования и проанализировать работу сооружений башенного типа при динамических нагрузках с учетом податливости свайных фундамента и основания в зависимости от конструктивных параметров свай. Учет указанных факторов составляет научную новизну выполненного исследования.

Для более обоснованного расчета таких сооружений, как башни, следует учитывать совместную работу конструкций самого сооружения, свайного фундамента и грунтового основания, для чего необходимо определять податливость (жесткость) свай в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Согласно приложению 4 СНиП 2.02.03-85 [2] податливость отдельной сваи с уширением (винтовой сваи) в вертикальном направлении может быть определена по формуле:

$$S = 0,22 / (G_2 d_b) + l / (EA), \quad (1)$$

где G_2 – модуль сдвига грунта; d_b – диаметр уширения сваи; l, E, A – соответственно длина, модуль упругости и площадь сечения ствола сваи, а жесткость – по формуле:

$$i = 1 / S. \quad (2)$$

Податливость сваи без уширения в вертикальном направлении также может быть определена в соответствии с формулами приложения 4 [2]. При выполнении расчетов с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD моделирование работы свай в вертикальном направлении может быть выполнено с использованием специального элемента конечной жесткости (элемента №51 в SCAD).

В соответствии с приложением 1 [2] перемещение верха сваи в горизонтальном направлении u_0 и угол поворота ψ_0 (в предположении совпадения отметки головы сваи с уровнем поверхности грунта) могут быть определены по формулам:

$$u_0 = H_0 \varepsilon_{hh} + M_0 \varepsilon_{hm}, \quad (3)$$

$$\psi_0 = H_0 \varepsilon_{mh} + M_0 \varepsilon_{mm}, \quad (4)$$

где ε_{hh} и ε_{hm} – соответственно горизонтальные перемещения от горизонтальной силы $H_0 = 1$ и момента $M_0 = 1$; ε_{mh} и ε_{mm} – соответственно углы поворота от силы $H_0 = 1$ и момента $M_0 = 1$.

Перемещения ε_{hh} , ε_{hm} , ε_{mh} и ε_{mm} вычисляются по формулам:

$$\varepsilon_{hh} = A_0 / (\alpha_\varepsilon^3 El), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{hm} = \varepsilon_{mh} = B_0 / (\alpha_\varepsilon^2 El), \quad (6)$$

$$\varepsilon_{mm} = C_0 / (\alpha_\varepsilon El), \quad (7)$$

в которых El – жесткость ствола сваи при изгибе; $\alpha_\varepsilon, A_0, B_0, C_0$ – коэффициенты, определяемые по таблицам и формулам приложения 1 [2].

При использовании комплекса SCAD моделирование податливости в горизонтальном направлении и угла поворота с использованием элементов №51 не представляется возможным, так как неизвестно соотношение между H_0 и M_0 .

Однако можно осуществить моделирование работы свай в горизонтальном направлении (учитывающее отпор грунта) посредством использования эквивалентных стержневых элементов, например, консольных стержней, единичные перемещения и углы поворота которых выражаются с помощью обычных формул сопротивления материалов:

$$\varepsilon_{hh} = l^3 / 3B, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{hm} = l^2 / 2B, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{mm} = l / B. \quad (10)$$

В системе уравнений (8)–(10) перемещения ε_{hh} , ε_{hm} , ε_{mm} от единичных сил и моментов определяются по формулам (5)–(7), а длина консольных стержней l и изгибная жесткость B являются неизвестными. Такая система из трех уравнений с двумя неизвестными является «переопределенной». Ее решение возможно лишь с некоторой погрешностью, которая, будучи разнесенной по всем трем уравнениям, мало влияет на окончательные результаты.

В рамках комплекса SCAD жесткостные характеристики консольных стержней могут быть назначены с помощью численного описания. При этом продольная жесткость EA определяется в соответствии с формулой (2) независимо от решения системы (8)–(10).

Моделирование податливости свай в горизонтальном направлении и угла поворота можно осуществить и другим способом. В соответствии с приложением В СП 24.13330.2011 [3] допускается применение программ, описывающих механическое взаимодействие балок (свай) и упругого основания. При этом грунт можно рассматривать как упругую среду, характеризуемую коэффициентом постели C_z

$$C_z = Kz / \gamma_c, \quad (11)$$

где K – коэффициент, зависящий от вида грунта, окружающего сваю, и принимаемый по таблице В.1 [3]; z – глубина расположения сечения сваи в грунте; γ_c – коэффициент условий работы (для отдельно стоящей сваи $\gamma_c = 3$).

При использовании комплекса SCAD целесообразно разделить сваи на несколько участков по высоте, назначая C_z для середины участков посредством опции «назначение коэффициентов упругого основания». При этом податливость в вертикальном направлении также можно моделировать посредством элементов №51, определяя жесткость по формуле (2).

Следует отметить, что результаты расчетов, полученные двумя способами, достаточно близки.

Предложенный подход был реализован при выполнении расчетов строительных конструкций башни, предназначенной для размещения антенн радиоэлектронного оборудования мобильной связи и расположенной в Володарском районе Нижегородской области. Расчеты выполнены в рамках проведения комплексного инженерно-диагностического обследования технического состояния сооружения.

Геометрические размеры башни приняты по чертежам ООО «АРТГОРОДЕЦ». Высота башни составляет около 47 м. Ствол башни выполнен из круглых электросварных труб по ГОСТ 10704-91. Наружный диаметр труб изменяется ступенчато от 1420 мм в нижней части башни до 325 мм в верхней части, а толщина стенки – соответственно от 12 до 8 мм.

Диаметр, количество и расстановка винтовых свай, а также характеристики грунтов, необходимые для расчета системы «башня – свайный фундамент – грунтовое основание» приняты по проектной документации ООО «Сириус». Конструкция свайного ростверка принята по проекту ООО «ПКФ «Стройреконструкция».

В соответствии с проектом свайный фундамент с низким ростверком состоит из шести свай, расположенных в вершинах вписанного в окружность радиусом 2,5 м правильного шестиугольника, и одной сваи в центре окружности. Для свай, имеющих достаточно большой диаметр (в данном случае 530 мм) и работающих в составе куста, в целях учета их взаимодействия коэффициент K в формуле (11) умножается на коэффициент α_i , определяемый по формуле (В.5) [3].

Расчеты строительных конструкций башни при действии ветровых нагрузок выполнены в соответствии с СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» [20] с учетом статической и динамической составляющих и резонансного вихревого возбуждения (резонансных колебаний в поперечном направлении).

Серия расчетов осуществлена с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD. Конструктивные элементы ствола самой башни и свайного ростверка моделировались стержневыми конечными элементами с соответствующими длиной и размерами поперечного сечения.

В результате расчета башни с приведенными выше характеристиками установлено, что при резонансном вихревом возбуждении прочность ствола башни может быть не обеспечена, вследствие чего было предложено установить гасители колебаний.

Заключение

На основании выполненных расчетных исследований и их анализа получены научные закономерности относительно учета влияния податливости свайного фундамента и основания, сформулированные в следующих выводах.

1. Для винтовых свай (свай с уширением) наиболее существенное влияние на результаты расчета оказывает диаметр уширения (диаметр лопасти). Так, при увеличении диаметра уширения с 350 мм до 650 мм период собственных колебаний по первой форме уменьшается примерно на 13%, максимальное горизонтальное перемещение башни – на 20%, относительная разность осадок свайного ростверка – на 35%. Влияние на изгибающие моменты в поперечных сечениях башни менее значительно; например, максимальный момент от пульсационной составляющей ветровой нагрузки уменьшается лишь на 3,5%.

2. Влияние изменения диаметра ствола винтовых свай или их длины сказывается на величине перечисленных выше параметров расчета в значительно меньшей степени, что неудивительно, так как эти характеристики винтовых свай не входят в первую часть формулы (1) для определения их вертикальной податливости.

3. Для забивных свай (свай без уширения) влияние изменения диаметра ствола более существенно, чем для винтовых. Так, например, при увеличении диаметра свай с 219 мм до 530 мм наибольшее горизонтальное перемещение башни снижается приблизительно на 10–12%.

4. Влияние податливости свай в вертикальном направлении намного более существенно, чем влияние податливости в горизонтальном направлении как для свай с уширением, так и без уширения.

5. Учет влияния податливости свай является весьма существенным. Так, если не учитывать податливость и считать башню жестко защемленной в основании, то в результате расчета период собственных колебаний и максимальное перемещение башни оказываются на 25% меньше, чем даже при весьма жестких сваях, но при учете их податливости.

Приведенную выше методику расчетов предлагается использовать для диагностики состояния конструкций сооружений подобного типа и обоснованного определения диагностических признаков, связанных с проведением поверочных расчетов.

Литература

1. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. М., 2011.
2. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. М., 1995.
3. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. М., 2011.
4. Саргсян А.Е., Геращенко В.С., Шапошников Н.Н. Расчетная модель свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой // Вестник МГСУ. 2012. №4. С. 69–72.
5. Уткин М.М., Махнатов С.А., Скворцов С.Я. Проблемы расчета свай на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента // Приволжский научный журнал. 2012. №2. С. 63–68.
6. Бахолдин Б.В., Труфанова Е.В. Корректировка существующих методик оценки сопротивления свай горизонтальным нагрузкам // Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». М.: НИИОСП, ПИ «Геореконструкция», 2010. Том 4. С. 1325–1330.
7. Бахолдин Б.В., Ястребов П.И., Труфанова Е.В. Прогноз сопротивления свай при их нагружении горизонтальной нагрузкой. Сборник научных трудов НИИОСП. М.: ЭСТ, 2006. С. 119–125.
8. Самородов А.В., Лучковский И.Я., Евель С.М. Несущая способность свай на сочетание выдергивающих и горизонтальных нагрузок // Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов» Том 4. М.: НИИОСП, ПИ «Геореконструкция», 2010. С. 1344–1347.
9. Барвашов В.А. О рекомендациях по расчету осадок в актуализированных нормативных документах по основаниям зданий и сооружений и свайным фундаментам. Критический анализ и предложения // Инженерные изыскания. 2011. №9. С. 10–21.

Соколов В.А., Страхов Д.А., Сняжков Л.Н. Расчет сооружений башенного типа на динамические воздействия с учетом податливости свайного фундамента и основания

10. Труфанова Е.В., Ястребов П.И. Экспериментальное исследование воздействия горизонтально нагруженной сваи на окружающий массив грунта // Инженерные изыскания. 2012. №10. С. 48–53.
11. Заикин И.В., Носков И.В., Коробова О.А. Исследование работы многовитковых винтовых свай и грунтов основания на совместное действие горизонтальных сил и изгибающих моментов // Ползуновский вестник. 2012. №1–2. С.65–69.
12. Купчикова Н.В. Методика расчета свай с уширениями, основанная на свойствах изображений Фурье финитных функций // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №8. С. 24–26.
13. Cairo R., Conte E. Settlement analysis of pile groups in layered soils // Canadian Geotechnical Journal. 2006. Vol. 43(8). Pp. 788–801.
14. Premalatha K., Panneerselvam J., Srilakshmi M. Interaction studies on axially loaded piles and pile groups // Proceedings of the International Geotechnical Conference, Saint Petersburg – Moscow, 2005. Vol. 1. Pp. 259–263.
15. Столяров В.Г. Остаточные сейсмические смещения грунта, горизонтальные воздействия на здание, сейсмостойкие свайные фундаменты // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2006. №3. С. 70–74.
16. Boulanger R.W., Curras C.J., Kutter B.L., Wilson D.W., Abghari A. Seismic soil-pile-structure interaction: experiments and analyses // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 125. Issue 9. Pp. 750–759.
17. Nicolaou S., Mylonakis G., Gazetas G., Tazoh T. Kinematic pile bending during earth-quakes: analysis and field measurements // Geotechnique. 2001. Vol. 51. Issue 5. Pp. 425–440.
18. Brandl H. Cyclic preloading of piles and box-shaped deep foundations // Proceedings of the International Geotechnical Conference. Moscow, 2010. Vol. 1. Pp.3–28.
19. Maugeri M., Motta E., Raciti E. Kinematic interaction for piles embedded in soils with a shear modulus increasing with depth // Proceedings of the International Geotechnical Conference. Moscow, 2010. Vol. 3. Pp. 895–902.
20. СП 20. 13330. 2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2011.
21. Гордеев В.Н. [и др.] Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. Киев: Сталь, 2005. 478 с.
22. Бирбраер А.Н. Динамика зданий и сооружений. Воздействие ветра на сооружения. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 113 с.
23. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.

**Владимир Алексеевич Соколов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)878-83-99; эл. почта: sva0808@rambler.ru*

© Соколов В.А., Страхов Д.А., Синяков Л.Н., 2013

doi: 10.5862/MCE.39.5

Design of tower type structures to dynamic effects taking into account flexibility of the pile foundation and the base

V.A. Sokolov;
D.A. Strakhov;
L.N. Sinyakov,

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(921)878-83-99; sva0808@rambler.ru

Key words

tower type structures; pile foundation; base, flexibility of piles; dynamic effects

Abstract

The necessity to take into account flexibility of pile foundation in design of such structures as towers for mobile communication or radio equipment especially under dynamic loads (seismic, fluctuating component of wind load and the resonant vortex excitation) has been considered.

The specific features of modeling of pile ductility, using program complex SCAD, were discussed and examples of corresponding calculations are given. The influence of pile parameters on internal forces and deflections of structure were also discussed. It was found, that for screw piles in the calculation results are mostly influenced by diameter of the broadening; the influence of trunk diameter of piles is considerably less. The effect of trunk pile diameter is much more important for piles without the broadening than for screw piles. It was also found that in most cases the effect of pile ductility in the vertical direction is much more significant than in horizontal.

References

1. SP 22.13330.2011. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83** [Building specifications and codes of practice. Bases of buildings and structures. Actualized edition of 2.02.01-83*]. Moscow, 2011. (rus)
2. SNiP 2.02.03-85. *Svaynyye fundamenty* [Building specifications and codes of practice. Pile foundations]. Moscow, 1995. (rus)
3. SP 24.13330.2011. *Svaynyye fundamenty. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.03-85*. [Building specifications and codes of practice. Pile foundations. Actualized edition of Code 2.02.03-85]. Moscow, 2011. (rus)
4. Sargsyan A.E., Gerashchenko V.S., Shaposhnikov N.N. *Vestnik MGSU*. 2012. No.4. Pp. 69–72. (rus)
5. Utkin M.M., Makhnatov S.A., Skvortsov S.Ya. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2012. No.2. Pp. 63–68. (rus)
6. Bakholdin B.V., Trufanova E.V. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po geotekhnike «Geotekhnicheskiye problemy megapolisov»* [Proceeding of the international geotechnical conference "Geotechnical challenges in megalopolises"]. 2010. Vol.4. Pp. 1325–1330. (rus)
7. Bakholdin B.V., Yastrebov P.I., Trufanova E.V. *Sbornik nauchnykh trudov NIIOSP* [Collection of scientific papers NIIOSP] Moscow: EST, 2006. Pp. 119–125. (rus)
8. Samorodov A.V., Luchkovskiy I. Ya., Evel S.M. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po geotekhnike «Geotekhnicheskiye problemy megapolisov»* [Proceeding of the international geotechnical conference "Geotechnical challenges in megacities"]. 2010. Vol.4. Pp. 1344–1347. (rus)
9. Barbashov V.A. *Inzhenernyye izyskaniya*. 2011. No.9. Pp. 10–21. (rus)
10. Trufanova E. V., Yastrebov P. I. *Inzhenernyye izyskaniya*. 2012. No.10. Pp. 48–53. (rus)
11. Zaikin I.V., Noskov I.V., Korobova O.A. *Polzunovskiy vestnik*. 2012. No.1–2. Pp. 65–69. (rus)
12. Kupchikova N.V. *Industrial and Civil Engineering*. 2012. No.8. Pp. 24–28. (rus)
13. Cairo R., Conte E. Settlement analysis of pile groups in layered soil. *Canadian Geotechnical Journal*. 2006. Vol. 43(8). Pp.788–801.

Sokolov V.A., Strakhov D.A., Sinyakov L.N. Design of tower type structures to dynamic effects taking into account flexibility of the pile foundation and the base

14. Premalatha K., Panneerselvam J., Srilakshmi M. Interaction studies on axially loaded piles and pile groups. *Proceedings of the International Geotechnical Conference*. Saint-Petersburg–Moscow, 2005. Vol. 1. Pp. 259–263.
15. Stolyarov V. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskii nauki*. 2006. No.3. Pp. 70–74. (rus)
16. Boulanger R. W., Curras S. J., Kutter B. L., Wilson D. W., Abhari A. Seismic soil–pile–structure interaction: experiments and analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. 1999. Vol. 125(9), Pp. 750–759.
17. Nicolaou S., Mylonakis G., Gazetas G., Tazoh T. Kinematic pile bending during earth–quakes: analysis and field measurements. *Geotechnique*. 2001. Vol. 51(5), Pp. 425–440.
18. Brandl H. Cyclic preloading of piles and box–shaped deep foundations. *Proceedings of the International Geotechnical Conference*. Moscow, 2010. Vol. 1. Pp. 3–28.
19. Maugari M., Motta E., Raciti E. Kinematic interaction for piles embedded in soils with a shear modulus increasing with depth. *Proceedings of the International Geotechnical Conference*. Moscow, 2010. Vol. 3. Pp. 895–902.
20. SP 20.13330.2011. *Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85** [Loads and effects. Actualized edition of Code 2.01.07-85*]. Moscow, 2011. (rus)
21. Gordeev V. N., Landukh- Lyashchenko A. I., Mikitarenko M. A. *Nagruzki i and vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya* [Loads and effects on buildings and structures]. Kiev: Stal, 2005. 205 p. (rus)
22. Birbrayer A. N. *Dinamika zdaniy i sooruzheniy. Vozdeystviye vetra na sooruzheniya. Uchebnoe posobiye* [Dynamics of buildings and structures. Wind effects on structures. Textbook]. Saint-Petersburg: SPbGPU, 2008. 113 p. (rus)
23. Simiu E., Scanlan P. *Vozdeystviye vetra na sooruzheniya* [Wind effects on structures]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 154 p. (rus)

Full text of this article in English: pp. 46–50