УДК 624.131: 624.15

© В. В. Лушников, д-р техн. наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

© В. М. Кириллов, д-р техн. наук, профессор

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: lushnikov.v37@yandex.ru, geotechnica@spbgasu.ru,

v.konyushkov@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-119-124

© V. V. Lushnikov, Dr. Sci. Tech., Professor, Honored
Worker of Science of the Russian Federation

© В. М. Кириллов, Dr. Sci. Tech., Professor

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: lushnikov.v37@yandex.ru, geotechnica@spbgasu.ru,

v.konyushkov@yandex.ru

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ФУНДАМЕНТОВ И ОСНОВАНИЙ

ADAPTIVE MANAGEMENT OF FUNDAMENT AND BASE PARAMETERS

Адаптивное управление — это система, постепенно приспосабливающаяся к меняющимся в процессе строительства обстоятельствам. Под обстоятельствами подразумеваются характеристики грунтов, скорость и последовательность производства работ, климатические и температурные воздействия. Адаптивное управление дает возможность регулировать напряженно-деформированное состояние оснований и фундаментов на всех этапах строительства.

Ключевые слова: система «основание – фундамент – здание», мониторинг, башня «Мессетурм», Пизанская башня, Невьянская башня, аэропорт Кансай.

Adaptive management is a system that is gradually adapting to the changing circumstances during construction. Under circumstances are meant soil characteristics, speed and sequence of works, climatic and temperature effects. Adaptive management makes it possible to regulate the stress-strain state of bases and foundations at all stages of construction.

Keywords: system «base – foundation – building», monitoring, the Messeturm, Tower of Pisa, Leaning Tower of Nevyansk, Kansai Airport.

Строительство и последующая эксплуатация зданий и сооружений сопровождаются различными внешними природными и техногенными воздействиями. Дополнительными факторами риска могут быть отсутствие достоверной информации о прочностных и деформационных характеристиках грунтов, их изменчивость в результате внешних воздействий, предположения, допущения и несовершенство в расчетных схемах, низкое качество производства работ и др.

Внешние воздействия, как правило, хорошо известны, и проектировщик вводит в конструктивно-технологические решения необ-

ходимые запасы, исходя из требований первой и второй групп предельных состояний. Для фундаментов основным условием является обеспечение деформаций, не превышающих предельно допустимых значений, устанавливаемых техническими регламентами. В большинстве случаев при обеспечении требований второго предельного состояния (предельно допустимые значения деформаций) требования первого предельного состояния (несущая способность) также обеспечиваются.

Рис. 1. Конструкции комбинированного свайно-плитного фундамента КСПФ: а — с жестким сопряжением плиты 1 и свай 2; б — узел А (с последующим заполнением полости 3 над сваями 2); в — узел А (с упругими прокладками 4 над сваями 2)

Примеры адаптивного управления в строительстве

1. Свайно-плитный фундамент

Рассмотрим пример свайно-плитного фундамента (СПФ) (рис. 1).

В первом варианте СПФ (рис. 1, а) сваи и ростверк связаны жестким сопряжением. В результате ростверковая плита воспринимает до 15 % от общей нагрузки, а консоли плиты могут быть перегруженными до величин более чем в три раза за счет концентрации нагрузок на сваях, расположенных по периметру.

Во 2-м варианте (рис. 1, б) [5] в плите предусматриваются технологические отверстия над верхней частью свай. Отверстия заполняются бетоном после передачи на СПФ доли нагрузки, в результате чего ростверковая плита воспринимает значительную часть нагрузки и разгружает сваи.

В 3-м варианте (рис. 1, в) [5, 6] предлагается над головами свай укладывать упругие резиновые опорные части, толщина и сжимаемость которых специально подбирается, чтобы ростверковая плита до контакта с грунтом воспринимала часть нагрузок, а после сжатия прокладок передавала нагрузки на головы свай.

2. Башня «Мессeturм» в Германии

Высотное сооружение башня «Мессeturм» (рис. 2) имеет 60 этажей. Общая его высота составляет 256 м. Небоскреб был построен в 1999 г. во Франкфурте-на-Майне. Фундамент под него получил название комбинированного свайно-плитного фундамента (КСПФ) [8]. В качестве свай были подобраны буровые сваи длиной 30 м.

В течение всего периода строительства на объекте проводилось научно-техническое сопровождение. В подземной части фундамента башни были предусмотрены так называемые

подушки давления (рис. 2, б). При развитии ненормативного крена башни в эти конструкции предусматривалась подача воды под давлением, в результате этого противодействия башня должна была получить обратный подъем и выпрямиться. Полевые измерения показали, что

Рис. 2. Башня «Мессeturм» (а), ее фундамент (б) и доля плиты в формировании несущей способности КСПФ (в)

ростверковая плита воспринимает порядка 56 % от общего веса башни (рис. 2, в). Как было установлено, при эксплуатации никаких мероприятий по выравниванию или стабилизации развития деформаций основания и фундаментов не потребовалось.

3. Выправление наклона Пизанской башни

Пизанская башня была построена в 1350 г. Однако вместо проектной высоты 98 м было построено здание высотой 57 м. Причиной послужил крен башни из-за недоучета наличия неравномерных слабых грунтов в основании фундаментов. Крен развивался на протяжении 550 лет! В 1990 г. горизонтальное смещение верхней части башни составило до 5 м. Ситуация была аварийной и грозила потерей устойчивости башни.

Для стабилизации крена в 1995 г. со стороны, противоположной наклону, были смонтированы свинцовые грузы массой 690 т. Однако этого мероприятия оказалось недостаточно для выправления сверхнормативного смещения, развивавшегося более 500 лет.

В 1999–2001 гг. приступили к реализации альтернативного проекта, предусматривающего выемку грунта из-под подошвы фундамента (рис. 3). Перед выполнением этих работ был выполнен опытный эксперимент и произведено моделирование геотехнической ситуации. В 1998 г. была произведена пробная экскавация грунта из-под подошвы фундамента со стороны, противоположной направлению крена.

Геодезические измерения показали эффективность проводимых мероприятий. Далее работы стали проводить с большей интенсивностью. В результате башню вернули в положение, при котором потеря устойчивости уже не может произойти (рис. 4). Окончательную выправку в вертикальное положение производить не стали, так как Пизанская башня и знаменита своим креном и привлекает миллионы туристов со всего мира как уникальный памятник истории и культуры.

4. Предложения по стабилизации наклона Невьянской башни

Невьянская башня (рис. 5) — известное сооружение на Урале, было построено купцом Демидовым в XVIII веке. Высота башни составляет 57 м. По результатам геодезических измерений горизонтальное отклонение верха башни составляет до 2,2 м, а общий угол наклона $2,9^\circ$. Средняя скорость смещения оценивается ориентировочно в 0,5–0,9 мм в год. Дальнейшие геодезические измерения показывали, что крен башни продолжает развиваться, пусть и с медленной скоростью. Основная причина крена — наличие в основании насыпных грунтов (шлаков) и слабых грунтов (продуктов деятельности р. Нейвы).

Расчетный прогноз устойчивости башни в сравнении с Пизанской приведен на рис. 6 [10]. На сегодняшний день коэффициенты устойчивости имеют нормативное значение. Однако согласно прогнозным расчетам Невьянская башня может потерять устойчивость примерно через

Рис. 3. Второй вариант выпрямления Пизанской башни: а — схема экскавации грунта; б — изменение наклона Пизанской башни

Рис. 4. Ход отклонения Пизанской башни в XX веке

Рис. 6. Изменение коэффициентов устойчивости Пизанской и Невьянской башен; цифрами 1–4 обозначены результаты прогноза для Невьянской башни при различных скоростях развития наклона

100 и более лет. Возможные способы стабилизации башни подробно приведены в [11]. К ним относятся, в первую очередь, инъекция закрепляющих растворов или сооружение буронабивных свай под фундаментом.

Рис. 5. Невьянская башня: общий вид (а), план с расположенными марками (б) и изогнутая ось башни (в)

5. Уникальный пример — региональный аэропорт Кансай

Строительство регионального аэропорта Кансай в Осацком заливе на островах Амакуса в Японии было начато в 1987 г. Затраты на его сооружение составили 15–20 млрд долл. (40 % годового бюджета страны), а опыт считается уникальным примером и рекордом искусственного основания¹.

Дно Осацкого залива (рис. 7) представлено текучими глинистыми грунтами мощностью до 20 м, а под этими слабыми грунтами расположены еще более слабые подстилающие глинистые грунты мощностью более 30 м. Для уплотнения слабого основания были выполнены песчаные сваи-дрены. Технология устройства свай-дрен заключалась во вдавливании обсадных стальных труб и последующем заполнении их песком. Шаг свай составил 2,5 м. Над дренами возвели насыпь, которая была выше уровня залива на 30 м. После этого насыпь уплотнили путем трамбования грунтов по всей площади. Этих мероприятий, казалось, было достаточно, но через пять лет после сдачи аэропорта в эксплуатацию, в 1999 г., было установлено, что насыпь получила осадку до 8 м и деформации интенсивно продолжают развиваться. На экстренном совете было принято решение о применении домкратной системы подъема сооружения. В колонны аэропорта были встроены домкраты с датчиками управления. Периодически домкраты вклю-

¹ https://ru.wikipedia.org/wiki/Международный_аэропорт_Кансай.

Рис. 7. Строение грунтового основания и картина деформаций аэропорта Кансай по состоянию на 2006 (а) и на 2014 г. (б): 1, 2 — положение здания на те же годы; 3, 4 — положение насыпи на те же годы; 5, 6 — уплотненный песчаными сваями слабый грунт на те же годы; 7 — подстилающий слабый грунт; 8 — система «Jack systems»

чались в работу и отжимали вверх проседающие конструкции. На сегодняшний день скорость развития осадок — до 5 см в год. Несмотря на катастрофические осадки данного сооружения, аэропорт Кансай считается самым масштабным проектом искусственного острова в мировой практике строительства.

Заключение

На рассмотренных примерах объектов различного назначения можно увидеть, что даже сложные аварийные ситуации поддаются исправлению путем применения неординарных конструктивно-технологических решений. Большинство ошибок при проектировании и строительстве оснований и фундаментов — это грубые нарушения требований нормативных документов, которые теоретически не допускаются, а в случае их выявления должны незамедлительно устраняться. Ошибки проектирования и строительства могут приводить к значительным неравномерным осадкам оснований, дефектам и повреждениям фундаментов и надземных конструкций. Напряженно-деформированное состояние основания и фундаментов при этом не соответствует требованиям технических регламентов, и фундаменты начинают работать за пределами технического правового поля. В этом случае существует, наверное, единственная возможность применить адаптивное управление параметрами фундаментов и оснований силами научных сотрудников проектных и производственно-исследовательских организаций.

Библиографический список

1. Абовский Н. П. Управляемые конструкции. Красноярск: КрасГАСА, 1998. 433 с.
2. Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций. 2-е изд., испр. и доп. М.: АСВ, 2011. 184 с.
3. Лушников В. В. Слово о фундаменте, или Фундамент здания как аналог опор творений природы // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10, № 2. С. 14–25.
4. Авт. свид. 312016 СССР, МПК E02D27/20, E02D19/02. Способ возведения сооружения / Б. М. Гиль, Н. С. Метелюк, И. П. Шаповал; НИИстройконструкций. № 1276098.29-14; заявл. 20.09.1968; опубл. 19.08.1971.
5. Метелюк Н. С., Грузинцев В. В., Куценко А. В. Исследования по выявлению резерва несущей способности свайных кустов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1977. № 6. С. 9–11.
6. Пат. 2301303 Российская Федерация, МПК E02D27/12. Плитно-свайный фундамент / В. В. Лушников, Ю. Р. Оржеховский, М. В. Сметанин, А. С. Ярдяков; ООО «Экспертно-консультационная фирма «ГеоСтройЭксперт», УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. № 2005106662/03; заявл. 09.03.2005; опубл. 20.06.2007.
7. Лушников В. В., Оржеховский Ю. Р., Сметанин М. В., Ярдяков А. С. Плитно-свайный фундамент стадийного нагружения // Сб. тр. науч. конф. СПбГАСУ. СПб., 2005. С. 75–81.
8. Katzenbach R. Optimized Design of High-Rise Building Foundations in Settlement-Sensitive Soils // International Geotechnical Conference of Soil-Structure Interaction, 26–28 May. St. Petersburg, 2005. Pp. 39–46.

9. Burland J. B., Jamiolkowski M., Viggiani C. The stabilization of the Leaning Tower of Pisa // *Soils and Foundation*. Vol. 43, No 5. Pp. 63–80.

10. Лушников В. В. Упадёт ли Невьянская башня? И как выпрямляли Пизанскую кампанилу. Екатеринбург: Учебная книга, 2011. 87 с.

11. Соломин В. И., Лушников В. В., Орзеховский Ю. Р. Адаптивное управление параметрами грунтов и фундаментов при возведении сооружений // Сб. тр. науч. конф. СПбГАСУ. СПб., 2012. С. 337–342.

12. Гендель Э. М. Передвижка, подъем и выпрямление сооружений. М.: Стройиздат, 1975. 274 с.

References

1. Abovskiy N. P. *Upravlyayemye konstruksii* [Controlled structures]. Krasnoyarsk, KrasGASA Publ., 1998, 433 p.

2. Pereł'muter A. V. *Upravlenie povedeniem nesushchikh konstruksiy* [Control of load-bearing structures]. 2-nd ed., revised. Moscow, ASV Publ., 2011, 184 p.

3. Lushnikov V. V. *Slovo o fundamente, ili Fundament zdaniya kak analog opor tvoreniy prirody* [Briefly about the foundations, or the foundation of the building as an analogue of the supports of nature's creations]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 14–25.

4. Gil' B. M., Metelyuk N. S., Shapoval I. P. *Sposob vozvedeniya sooruzheniya* [Method of building a structure]. Inventor's certificate no. 312016 SSSR, NII Stroykonstruktsiy Publ., 1971.

5. Metelyuk N. S., Gruzintsev V. V., Kutsenko A. V. *Issledovaniya po vyyavleniyu rezerva nesushchey sposobnosti svaynykh kustov* [Research on identifying the

reserve of bearing capacity of pile groups]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 1977, no. 6, pp. 9–11.

6. Lushnikov V. V., Orzhekhovskiy Yu. R., Smetanin M. V., Yadyakov A. S. *Plitno-svaynyy fundament* [Combined pile raft footing]. Patent RF, no. 2301303, 2007.

7. Lushnikov V. V., Orzhekhovskiy Yu. R., Smetanin M. V., Yadyakov A. S. *Plitno-svaynyy fundament stadiynogo nagruzheniya* [Combined pile raft footing of stage loading]. *Trudy nauch. konf. SPbGASU*. St. Petersburg, 2005, pp. 75–81.

8. Katzenbach R. *Optimized design of high-rise building foundations in settlement-sensitive soils*. International Geotechnical Conference of Soil-Structure Interaction, 26–28 May. St. Petersburg, 2005, pp. 39–46.

9. Burland J. B., Jamiolkowski M., Viggiani C. Stabilization of the Leaning Tower of Pisa. *Soils and Foundations*, vol. 43, no 5, pp. 63–80.

10. Lushnikov V. V. *Upadet li Nev'yanskaya bashnya? I kak vypryamlyali Pizanskuyu kampanilu* [Is the Leaning Tower of Nevyansk going to fall? And how was the Pisa Campanile straightened]. Ekaterinburg, Uchebnaya kniga Publ., 2011, 87 p.

11. Solomin V. I., Lushnikov V. V., Orzhekhovskiy Yu. R. *Adaptivnoe upravlenie parametrami gruntov i fundamentov pri vozvedenii sooruzheniy* [Adaptive control of soil and foundation parameters at the construction of structures]. *Trudy nauch. konf. SPbGASU* [Proc. of sci. conf SPbGASU]. St. Petersburg, 2012, pp. 337–342.

12. Gendel' Eh. M. *Peredvizhka, pod'em i vypryamlenie sooruzheniy* [Transportation, lifting and straightening of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 274 p.