Пронозин Я.А., Степанов М.А., Шуваев А.Н., Давлатов Д.Н. Взаимодействие системы усиления свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием эксплуатируемого сооружения // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 42–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05

Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Shuvaev A.N., Davlatov D.N. Interaction of the system of strengthening pile foundations with preliminarily prime rated ground basis of operating facilities. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018. Vol. 9. No. 3. Pp. 42-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**
Т. 9, № 3, 2018
**PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05

УДК 624.15

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ УСИЛЕНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОПРЕССОВАННЫМ ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО СООРУЖЕНИЯ

Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, А.Н. Шуваев, Д.Н. Давлатов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 января 2018

Принята: 16 мая 2018

Опубликована: 28 сентября 2018

Ключевые слова:

усиление, свайные фундаменты, деформация, напряжение, осадка, опрессовка, грунт, напряженно-деформированное состояние, гидроразрыв.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния системы усиления свайных фундаментов путем их переустройства в комбинированный фундамент с опрессовкой и цементацией грунтового основания. Выявлены закономерности взаимодействия исследуемого объекта с грунтовым основанием.

В результате проведенного технического обследования установлено, что здание находится в ограниченно работоспособном техническом состоянии. Для стабилизации деформаций и прекращения их дальнейшего развития авторами настоящей статьи были предложены комплексные решения по усилению основания и фундаментов. Данные решения предусматривали усиление существующих ленточных свайных фундаментов путем их переустройства в комбинированные фундаменты с опрессовкой и последующей цементацией грунтового основания. Комплексность подхода заключается в повышении надежности за счет перераспределения части нагрузки от здания на ранее не нагруженные зоны основания без дополнительных осадок, достигаемого с помощью опрессовки цементным раствором пролетных зон между ростверками. Выполнение цементации грунтов обусловлено необходимостью повышения жесткости основания, на которое перераспределяется часть нагрузки, и сдерживания проявления «плавучих» свойств грунтов. По результатам обследования технического состояния объекта было принято решение о необходимости усиления фундаментов оболочками, с опрессовкой грунтового основания давлением порядка 110 кПа и цементацией грунтового основания на глубину до 7 м от низа ростверков по манжетной технологии. Приведена технология выполнения работ и результаты геотехнического мониторинга, подтверждающие эффективность предложенного метода усиления на момент проведения работ.

© ПНИПУ

© Пронозин Яков Александрович – доктор технических наук, доцент, e-mail: pronozinja@tyuiu.ru.

Степанов Максим Андреевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: maxim_stepanov@inbox.ru.

Шуваев Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: anshuvaev46@mail.ru.

Давлатов Далер Назуллоевич – аспирант, e-mail: davlatov.daler.91@mail.ru.

Yakov A. Pronozin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pronozinja@tyuiu.ru.

Maxim A. Stepanov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: maxim_stepanov@inbox.ru.

Anatoly N. Shuvaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: anshuvaev46@mail.ru.

D.N. Davlatov – Postgraduate Student, e-mail: davlatov.daler.91@mail.ru.

INTERACTION OF THE SYSTEM OF STRENGTHENING PILE FOUNDATIONS WITH PRELIMINARILY PRIME RATED GROUND BASIS OF OPERATING FACILITIES

Ya.A. Pronozin, M.A. Stepanov, A.N. Shuvaev, D.N. Davlatov

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 January 2018
Accepted: 16 May 2018
Published: 28 September 2018

Keywords:

strengthening of the pile bases,
deformation, tension, draught, crimping,
soil, stress-strain state, hydro fracturing

ABSTRACT

The article presents the results of the study of the stress-strain state of the pile Foundation reinforcement system by means of their transformation into a combined Foundation with the pressing and cementation of the soil base. The regularities of the interaction of the object under study with the soil base are revealed.

As a result of the technical inspection it was revealed that the building is in a limited working condition. To stabilize the deformations and to stop their further development, the authors of this article proposed comprehensive solutions to strengthen the bases and foundations. These solutions included strengthening existing tape of pile foundations by their conversion to combined foundation and crimping and subsequent grouting of the foundation soil. The complexity of the approach is to increase the reliability due to the redistribution of the load from the building to the previously unloaded areas of the base without additional sediment, performed by pressing the cement mortar of the span zones between the grillage. The implementation of soil cementation is due to the need to increase the rigidity of the base, which is redistributed part of the load, and deter the manifestation of «floating» properties of soils. According to the results of the survey of the technical condition of the object, it was decided to strengthen the foundations with shells, with the pressing of the ground base pressure of about 110 kPa and cementation of the ground base to a depth of 7 m from the bottom of the grillage on the cuff technology. The technology of work performance and the results of geotechnical monitoring, confirming the effectiveness of the proposed method of strengthening at the time of work was described as well.

© PNRPU

При обследовании жилого 9-этажного трехсекционного дома в г. Тюмени были зафиксированы сверхнормативные деформации (рис. 1). Первые деформации одной из секций были обнаружены в августе 2016 г. В сентябре 2016 г. авторами данной статьи было проведено обследование дома и оценка технического состояния блока жилого дома в осях «8–10». Характерными дефектами являлись трещины в стыках стеновых панелей и плит перекрытий, соответствующие общей форме деформирования остова здания, причинами которых являлись сверхнормативные неравномерные осадки фундаментов.

Рис. 1. Общий вид 9-этажной секции здания

Fig. 1. The general view of the 9-storey section of the building

В целях стабилизации деформаций и прекращения их дальнейшего развития, сопровождающегося увеличением крена здания, в качестве наиболее рационального был выбран комплексный подход, предусматривающий усиление как существующих ленточных свайных фундаментов, так и грунтового основания [1–3].

В случае недостаточной несущей способности свай одним из эффективных способов усиления следует считать их переустройство в комбинированные фундаменты с опрессовкой и цементацией грунтового основания [4]. В этом случае, для уменьшения нагрузки на сваи и вовлечения в работу ненагруженного грунтового основания в пролетных частях, целесообразно предусматривать предварительное напряжение грунтового основания между ростверками для включения его в работу. Система усиления фундамента состоит из несущих железобетонных оболочек 1, устроенных по спланированной поверхности из щебня 2 и песка 3, профилированной мембраны 4, существующего ростверка со сваями 5. Опорные части оболочек соединяются с существующими ростверками через анкера 6. Закачивание под давлением высокоподвижного гидрофобного раствора происходит через иньекторы 7 в подоболочечное пространство и через иньекторы 8 в грунтовой массив на глубину до 7,8 м с образованием гидроразрывов 9 (рис. 2).

Рис. 2. Схема усиления свайных фундаментов путем переустройства их в комбинированный с опрессовкой и цементацией грунтового основания
Fig. 2. Scheme reinforced pile foundations by converting them into a combined with crimping and cementation of the ground base

В процессе производства работ по переустройству фундаментов и усилению основания выполнялся контроль за изменением напряженно-деформационного состояния (НДС) грунтового основания. Для измерения послойной деформации грунта активной зоны фундамента в основание предварительно были установлены глубинные винтовые марки. Вертикальные перемещения конструкции фундамента и глубинных винтовых марок фиксировались с помощью тарированных прогибомеров 6ПАО [3–7]. Для регистрации напряжений были использованы тарированные односторонние датчики давления (мессдозы). Мессдозы, уложенные по контактной поверхности исследуемой секции переустраиваемого фундамента, позволили зафиксировать и оценить характер распределения контактных давлений на I и II этапах производства работ, а оснащение активной зоны грунтового основания глубинными мессдозами позволило оценить вертикальные напряжения в грунте.

Порядок проведения работ по переустройству фундаментов и усилению основания свайных фундаментов включал в себя следующие этапы.

I этап: нагнетание раствора в подбололочную часть (опрессовка основания).

После 70 % набора прочности бетона оболочек, устраиваемых между ленточными свайными ростверками, начиналась работа по предварительному напряжению оболочек, опрессовке основания путем нагнетания цементного раствора в подбололочное пространство. При общем расчетном весе 9-этажной секции здания порядка 9500 т и среднем давлении на основание 140 кПа, с учетом вышеперечисленных условий, было принято давление опрессовки 110 кПа. В процессе выполнения работ нагнетание раствора было разбито на три захватки (рис. 3).

Рис. 3. Схема расположения захваток
Fig. 3. Scheme of the location work sites

II этап: нагнетание раствора в грунтовый массив (выполнение гидроразрывов).

После опрессовки основания под оболочками были выполнены работы по цементации с устройством (гидроразрывов). Цементация выполнялась по манжетной технологии с помощью растворонасоса (давление 0,4–0,6 МПа) в несколько этапов с технологическими перерывами. Закрепление производилось по зонам размещения уровней инъекционных отверстий снизу вверх [5–10].

На I этапе происходит уплотнение грунта в пролетной части фундамента и его предварительное напряжение. Изолинии напряжений и вертикальных перемещений грунта активной зоны деформирования представлены на рис. 4. Данные обработаны с помощью Golden Software Surfer 13 [4–8].

Максимальные вертикальные перемещения грунта в пролетной части фундамента на I этапе (при $P_{\text{опр}} = 110$ кПа) составили 6 мм. Затухание вертикальных перемещений зафиксировано на глубине $1,1B$, где B – ширина пролета (рис. 5).

При нагнетании раствора под давлением 110 кПа наблюдается подъем оболочки на величину 10,2 мм. При увеличении давления нагнетания процесс подъема оболочки продолжается, что свидетельствует о ее натяжении и включении в работу грунтового основания пролетной части.

Графики изменения контактных давлений в процессе опрессовки грунтового основания представлены на рис. 6.

Рис. 4. Изолинии вертикальных перемещений S , мм (слева) и вертикальных напряжений σ_z , кПа (справа) грунтов основания в процессе опрессовки ($P_{\text{опр}} = 110$ кПа)
Fig. 4. Isolines of vertical displacements (mm) (left) and vertical stresses σ_z (kPa) (right) of the foundation soils in the process of crimping ($P_{\text{opr}} = 110$ kPa)

Рис. 5. Эпюра вертикальных перемещения грунта по центральной оси пролетной части фундамента на I этапе ($P_{\text{опр}} = 110$ кПа)
Fig. 5. Diagram of vertical soil movement along the central axis of the transit part of the foundation I stage ($P_{\text{opr}} = 110$ kPa)

Рис. 6. График изменения контактных давлений во времени
в процессе опрессовки грунтового основания (I этап)

Fig. 6. Graph of the change in the contact pressures of pressure in time
in the process of pressing the soil base (stage I)

Рис. 7. Эпюра вертикальных напряжений в грунтовом массиве
по центральной оси в процессе опрессовки (I этап)

Fig. 7. Diagram of vertical stresses in the soil massif along the central
axis during the crimping process (stage I)

Максимальные значения вертикальных напряжений по глубине зафиксированы мессдозами на контакте «грунт – оболочка» и достигают 110 кПа. Эпюра вертикальных напряжений представлена на рис. 7.

Показания мессдоз, расположенных (см. рис. 3) по контактной поверхности исследуемого фундамента, на II этапе позволили оценить и зафиксировать характер распределения

контактных давлений. Изолинии напряжений и вертикальных перемещений для всех точек грунта, находящихся в активной зоне основания фундамента, построены с помощью Golden Software Surfer 13 (рис. 8).

Рис. 8. Изолинии вертикальных перемещений S , мм, (слева) и вертикальных напряжений σ_z , кПа, (справа) грунта основания в процессе гидроразрывов, $P = 0,4 \dots 0,6$ МПа (II этап)

Fig. 8. Isolation of vertical displacements S [mm] (left) and vertical stresses σ_z [kPa] (right) ground bottom during fracturing, $P = 0.4 \dots 0.6$ MPa (II stage)

Минимальные вертикальные перемещения составили 0,3 мм в первом слое (песок мелкий) на глубине $0,16B$, где B – ширина пролета. Полное затухание вертикальных перемещений зафиксировано во втором слое грунта (суглинок), что соответствует глубине $1,1B$ (рис. 9). Это говорит о том, что на глубине $0,16B$ перемещения меняют направление и уменьшаются. На глубине $0,96B$ вертикальные перемещения составили 10,9 мм, что во много раз больше, чем на предыдущем этапе. Это связано с тем, что в грунтовой массе сформировались линзовидные гидроразрывы.

Графики изменений контактных давлений во времени при выполнении нагнетания раствора представлены на рис. 10 (II этап).

Максимальные значения вертикальных напряжений по данным глубинных мессдоз зафиксированы на глубине $0,6B$, где B – ширина пролета и равны 160 кПа (рис. 11).

Рис. 9. Эпюра вертикальных перемещений грунта по центральной оси пролетной части фундамента на II этапе ($P = 0,4 \dots 0,6$ МПа)

Fig. 9. Diagram of vertical soil movement along the central axis of the transit part of the foundation II stage ($P = 0.4 \dots 0.6$ MPa)

Рис. 10. График изменения контактных давлений во времени (II этап)

Fig. 10. Graph of changes in contact pressures in time (II stage)

После переустройства ленточных свайных фундаментов в комбинированные происходит перераспределение нагрузок, воспринимаемых сваями и пролетной частью (рис. 12). Выполненное усиление, согласно показаниям контактной мессдозы, позволило разгрузить свайные ленты до 31 %.

После проведенного обследования за зданием ведется постоянный геодезический контроль. С помощью высокоточного нивелирования фиксируются осадки и отклонения здания от вертикали (рис. 13).

Рис. 11. Эпюра изменения вертикальных напряжений в грунтовом массиве по центральной оси на II этапе
Fig. 11. Diagram of the variation of vertical stresses in the soil massif along the central axis in the II stage

Рис. 12. Схема распределения нагрузок, воспринимаемых элементами комбинированных фундаментов
Fig. 12. Scheme of distribution of loads perceived by elements of combined foundations

Рис. 13. Схема размещения марок в плане
Fig. 13. Scheme of mark situation on project

Данные мониторинга подтвердили наличие незатухающего характера неравномерных осадок здания до начала производства работ по усилению. Работы по опрессовке подбололочечного пространства были выполнены к 15 марта 2017 г., все работы по усилению грунтового основания окончены 15 марта 2018 г., после этого наблюдался небольшой подъем здания в среднем на 1–1,5 мм. После работ по цементации также фиксируется минимальный подъем части фундамента, где производятся работы, на величину 1–1,2 мм. Также наблюдалось увеличение осадок за счет релаксации напряжений в основании на величину до 2 мм. В настоящее время наблюдается стабилизация осадок (рис. 14).

Рис. 14. График осадок во времени: I – до усиления;
II – подготовительные работы; III–IV – опрессовка основания;
V – цементация (выполнение гидроразрывов); VI – мониторинг
после завершения работ

Fig. 14. Diagram of mark settlement during the time

Таким образом, анализ результатов экспериментальных исследований показал следующее:

1. Согласно данным контактных мессдоз, установлено включение в работу грунтового массива в пролетных частях между ленточных свайных фундаментов. В процессе усиления происходит разгрузка ленточных свайных фундаментов (см. рис. 12). После завершения работ на пролетную часть и свайные фундаменты передается соответственно около 31 % и 69 % нагрузки.

2. Глубина развития вертикальных деформаций при опрессовке составила $1,1B$, где B – ширина пролета, дополнительное увеличение вертикальных напряжений зафиксировано до глубины $0,7B$.

3. Нагнетание растворной смеси под давлением при усилении свайных фундаментов с опрессовкой позволяет уплотнить и увеличить жесткость малонагруженного основания в пролетной части.

Библиографический список

1. Мангушев Р.А., Готман А.Л., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / под ред. Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 320 с.
2. Мулюков Э.И. Усиление оснований и фундаментов существующих зданий // Сб. науч. тр. / Уфимский НИИпромстрой. – Уфа, 1990.

3. Наумкина Ю.В. Усиление ленточных фундаментов с переустройством в сплошную плиту переменной жесткости с предварительным напряжением грунтового основания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. – Тюмень, 2013. – 24 с.
4. Усиления свайных фундаментов путем переустройства их в комбинированный фундамент с опрессовкой и цементацией грунтового основания / Я.А. Пронозин, Р.В. Мельников, Н.Д. Корсун, Д.Н. Давлатов // Геотехника. – 2017. – № 4. – С. 36–44.
5. Пронозин Я.А., Степанов М.А., Волосюк Д.В. Регулирование напряженно-деформированного состояния основания комбинированных ленточно-свайных фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 3. – С. 16–20.
6. Пискунов М.Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений. – М.: Недра, 1990. – 186 с.
7. Степанов М.А. Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. – Тюмень, 2015. – 189 с.
8. Степанов М.А., Пронозин Я.А., Копица А.В. Воздействие опрессовки на грунтовое основание // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – Т. I. – Тюмень: РИО Тюм ГАСУ, 2014. – С. 88–92.
9. Улицкий А.М., Шашкин А.Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов. – М: Изд-во АСВ, 2004. – 324 с.
10. Федоров В.В. Реконструкция и реставрация зданий. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 208 с.
11. Расчетно-экспериментальное обоснование использования свайно-оболочечных фундаментов в высотном строительстве / В.М. Чикишев, Я.А. Пронозин, Л.Е. Мальцев, Ю.В. Зазуля, М.А. Степанов // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2012. – Вып. 1 (20).
12. Katzenbach R., Arslan U., Moormann Chr. Piled raft foundation projects in Germany. Design Applications of Raft Foundations / ed. by J.A. Hemsley / Thomas Telford Ltd. – 2000. – P. 323–391.
13. Lizzi F. Practical engineering in structurally complex formations // International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Foundations, Capri, Associazione Geotechnica Italiana. – 1977.
14. Review of underpinning methods // Report on architectural heritage conservation in Europe. – Brussels: EC Publishing, 2000. – 19 p.
15. Ter-Martirosyan Z.G., Pronozin Ya.A., Stepanov M.A. Feasibility of pile-shell foundations with prestressed soil beds // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2012. – P. 1.

References

1. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamenskij V.V., Ponomarev A.B. Svai i svajnye fundamenty. Konstrukcii, proektirovanie i tehnologii [Pile and pile foundations. Structure, designing and technology.]. Ed. by R.A. Mangusheva. Moscow, ASV, 2015, 320 p
2. Mulyukov E.I. Strengthening of bases and foundations of existing buildings. *Sbornik nauchnykh trudov*. Ufa, NIIpromstroj, 1990.
3. Naumkina Ju.V. Usilenie lentochnyh fundamentov s pereustrojstvom v sploshnuju plitu peremennoj zhestkosti s predvaritel'nym naprjazheniem gruntovogo osnovanija [Reinforcement

of strip foundations by reorganization into solid variable rigidity slab with prestressed ground base]. Abstract of Ph.D. thesis. Tyumen, 2013, 24 p.

4. Pronizin Ya.A., Melnikov R.V., Korsun N.D., Davlatov D.N. Reinforcement of pile foundations by reorganization into combined foundation ones with pressure and cement of ground basis. *Geotechnics*, 2017, no. 4, pp. 36-44.

5. Pronozin Y.A., Stepanov M.A., Volosyuk D.V. Regulation of the stress-strain state of combined strip pile foundation beds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, pp. 1-6.

6. Piskunov ME Method of geodetic observations of deformations of structures. Moscow, Nedra, 1990, 186 p.

7. Stepanov M.A. Vzaimodejstvie kombinirovannyh lentochnyh svajnyh fundamentov s predvaritel'no opressovannym gruntovym osnovaniem [Interaction of complex strip pile foundations with preliminary pressurizing ground base]. Ph.D. thesis. Tyumen, 2015, 25 p.

8. Pronozin Ya. A., Stepanov M.A., Kopitsa A.V. Impact of crimping on the ground foundation. *Actual problems of construction, ecology and energy saving in Western Siberia: a collection of materials of the international scientific and practical conference..* 2014, vol. 1. Tyumen, 2014, pp. 88-92.

9. Ulitsky A.M., Shashkin A.G. Geotekhnicheskoe soprovozhdenie rekonstruktsii gorodov [Geotechnical support of city reconstruction]. Moscow, ASV, 2004, 324 p.

10. Fedorov V.V. Rekonstruktsiya i restavratsiya zdaniy [Reconstruction and restoration of buildings]. Moscow, INFRA-M, 2003, 208 p.

11. Chikishev V.M., Pronozin Ya.A., Mal'tsev L.E., Zazulya Yu.V., Stepanov M.A. Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie ispol'zovaniya svajno-obolocheknykh fundamentov v vysotnom stroitel'stve [Calculation and experimental justification of the use of pile-shell foundations in high-rise construction]. *Internet-vestnik VolgGASU. Politematicheskaya*, 2012, iss. 1 (20).

12. Katzenbach R., Arslan U., Moormann Chr. Piled raft foundation projects in Germany. *Design Applications of Raft Foundations*. Ed. by J.A. Hemsley, Thomas Telford Ltd, 2000, pp. 323-391.

13. Lizzi F. Practical engineering in structurally complex formations. *International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Foundations*, Capri, Associazione Geotechnica Italiana, 1977.

14. Review of underpinning methods. *Report on architectural heritage conservation in Europe*. Brussels: EC Publishing, 2000, 19 p.

15. Ter-Martirosyan Z.G., Pronozin Ya.A., Stepanov M.A. Feasibility of pile-shell foundations with prestressed soil beds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2012, p. 1.