



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 1, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.04

УДК 624.159

СНИЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОД МАШИНЫ С ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ МЕТОДОМ ВЫСОКОНАПОРНОГО ГРУППОВОГО ИНЪЕЦИРОВАНИЯ

М.Л. Нуждин¹, Л.В. Нуждин²

¹ООО «Научно-проектное экспертно-консультационное предприятие «ОиФ», Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 декабря 2019
Принята: 25 января 2020
Опубликована: 27 марта 2020

Ключевые слова:

динамические нагрузки, колебания, свайный фундамент, высоконапорное групповое инъецирование.

АННОТАЦИЯ

Параметры колебаний фундаментов от динамических нагрузок или кинематического возбуждения напрямую зависят от параметров жесткости и демпфирования основания, а также от массы колеблющейся системы, состоящей из фундамента, машины и «присоединенного массива грунта». В процессе колебаний свайных фундаментов вся статическая нагрузка передается на сваи, контакт подошвы ростверка с грунтом нарушается, и образуются микрозазоры, препятствующие совместной работе грунтового массива в междусвайном пространстве с фундаментом.

Эффективным способом снижения параметров колебаний фундаментов является использование метода высоконапорного группового инъецирования. Сущность метода заключается в нагнетании подвижного цементно-песчаного раствора в грунтовое основание под подошву ростверка под давлением, превышающим структурную прочность грунта одновременно через несколько инъекторов. Инъекционная смесь ликвидирует микрозазоры и, затвердев, уплотняет грунт, что приводит к увеличению жесткости основания и вовлечению дополнительного объема грунтового массива в совместную работу с фундаментом. Включение в совместную работу междусвайного грунта существенно увеличивает массу колеблющейся системы и, как следствие, приводит к снижению параметров горизонтальных и вертикальных колебаний свайного фундамента при динамическом нагружении и в случае кинематического возбуждения.

Инъекторы погружаются под подошву ростверка через специально предусмотренные отверстия – инъекционные кондукторы. Точки нагнетания располагаются, как правило, между сваями и по периметру ростверка. Параметры инъекционных работ (количество инъекционных точек и их размещение в плане, высотное положение инъекционных горизонтов, требуемый объем нагнетаемого раствора, последовательность инъецирования и пр.) назначаются в зависимости от конструкции свайного фундамента, инженерно-геологических условий площадки, динамического режима работы оборудования и других факторов.

© Нуждин Матвей Леонидович – директор по проектно-экспертным работам, e-mail: 89139059520@mail.ru.

Нуждин Леонид Викторович – кандидат технических наук, профессор, e-mail: Nuzhdin_ML@mail.ru.

Matvey L. Nuzhdin – Technical Director, e-mail: 89139059520@mail.ru.

Leonid V. Nuzhdin – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: Nuzhdin_ML@mail.ru.

Усиление свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками или под виброчувствительное оборудование методом высоконапорного группового инъецирования позволяет существенно снизить амплитуду горизонтальных и вертикальных колебаний фундаментов

© ПНИПУ

REDUCTION VIBRATIONS OF THE PILE FOUNDATIONS FOR MACHINES UNDER DYNAMIC LOADS BY HIGH-PRESSURE GROUP INJECTION METHOD

M.L. Nuzhdin¹, L.V. Nuzhdin²

¹LLC "Research and Design Expert Consulting Enterprise "O&F", Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 December 2019

Accepted: 25 January 2020

Published: 27 March 2020

Keywords:

dynamic load, vibration, pile foundation, high-pressure group injection.

ABSTRACT

The vibration parameters of the foundations under dynamic loads or kinematic excitation directly depend on the stiffness and damping parameters of the base, the mass of the oscillating system consisting foundation, the machine and the «attached mass of soil». In the process of using pile foundations static load is transferred to the piles, the contact of the grillage with the ground is broken, and micro-gaps are formed. Micro-gaps impede the joint work of the soil mass of the inter-pile space with the foundation.

An effective way to reduce the vibration parameters of foundations is the method of high-pressure group injection. The essence of the method lies in injection of a mobile cement-sand mortar into the soil base under the sole of the grillage under pressure exceeding the structural strength of the soil simultaneously through several injectors. The injection mixture eliminates micro-gaps and hardens the soil, which leads to an increase in the rigidity of the base and the involvement of an additional volume of soil mass in joint work with the foundation. The inclusion of inter-pile soil in joint work significantly increases the mass of the oscillating system and, as a result, reduces the parameters of horizontal and vertical vibrations of the pile foundation under dynamic loading and in the case of kinematic excitation.

Injectors are immersed under the sole of the grillage through specially provided openings – injection conductors. The discharge points are usually located between piles and around the perimeter of the grillage. The parameters of the injection work (the number of injection points and their placement in the plan, the height of the injection horizons, the required volume of injected solution, the injection sequence, etc.) are assigned depending on the construction of the pile foundation, the engineering and geological conditions of the site, the dynamic operating mode of the equipment, and others factors.

Strengthening pile foundations for machines under dynamic loads or vibration-sensitive equipment by high-pressure group injection can significantly reduce the amplitude of horizontal and vertical vibrations of foundations.

© PNRPU

Введение

Известно, что параметры колебаний фундаментов от динамических нагрузок или кинематического возбуждения напрямую зависят от параметров жесткости и демпфирования основания, а также от массы колеблющейся системы, состоящей из фундамента, машины или конструкций, установленных на фундаменте, и «присоединенного массива грунта», участвующего в колебаниях. С технической точки зрения в большинстве случаев для снижения колебаний выгодно увеличивать жесткость основания и массу колеблющейся системы. Этому в достаточной степени отвечает применение свайных фундаментов [1–8].

При этом следует отметить, что статическая нагрузка (вес) от машин с динамическими нагрузками, технологических установок, виброчувствительного оборудования и специальных конструкций относительно невелика, и количество свай даже на очень слабых грунтах принимается конструктивно, исходя из размеров ростверков, назначаемых по габаритам

размещаемого оборудования. При возведении свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками и в ходе их эксплуатации вся статическая нагрузка передается на сваи, в результате чего грунт под подошвой ростверка остается неуплотненным. В процессе колебаний контакт подошвы ростверка с грунтом может нарушаться, и между ними появляются микрозазоры. В результате, жесткостные и демпфирующие параметры основания определяются только соответствующими характеристиками погруженных свай, сопротивление грунта по подошве ростверка при его колебаниях отсутствует, а грунтовый массив между сваейного пространства практически не участвует в совместной работе с фундаментом [9].

Проблеме включения в работу на динамические нагрузки грунта между сваейного пространства и, как следствие, увеличения массы колеблющейся системы посвящено достаточное количество научных публикаций и технических решений. Однако большинство предлагаемых способов при определенных преимуществах имеет ряд очевидных недостатков. В первую очередь это сложность предлагаемых конструкций и трудоемкость их реализации при относительно невысокой эффективности.

Например, предлагается вовлекать в работу дополнительный объем грунтового массива с помощью установки в теле ростверка электромагнитных катушек со стальными сердечниками, их последующего выдвижения и погружения в боковую засыпку, окружающую фундамент [10]. Выполнять ростверк из двух плит по высоте стянутых напрягаемыми клиньями (Е.М. Семиженов, Г.Г. Аграновский, 1982), закреплять сваи в ростверке с помощью подшипников скольжения и домкратов (М.И. Забылин и др., 1989) или домкратов и упругих связей с одной степенью свободы [11].

В отличие от указанных работ и многих других, посвященных данному вопросу [12–19], авторами предложен достаточно простой и надежный способ уплотнения и включения в работу грунта между сваейного пространства с помощью высоконапорного инъецирования подвижных цементно-песчаных смесей.

1. Усиление грунтового основания свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками инъецированием подвижного цементно-песчаного раствора

В НИЛ динамики оснований и фундаментов Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) был разработан и внедрен в строительную практику способ устройства свайных фундаментов, эксплуатирующихся в условиях динамического нагружения, с усилением грунтового массива между сваейного пространства высоконапорным инъецированием подвижного цементно-песчаного раствора [10]. Сущность метода заключается в нагнетании инъекционной смеси в грунтовое основание под подошвой ростверка под давлением, превышающим структурную прочность грунта одновременно через несколько инъекторов [10, 11]. Нагнетаемый цементно-песчаный раствор ликвидирует микрозазоры и, затвердев, уплотняет грунт, что приводит к увеличению жесткости основания и вовлечению дополнительного объема грунтового массива в совместную работу с фундаментом. Включение в совместную работу между сваейного грунта существенно увеличивает массу колеблющейся системы и, как следствие, приводит к снижению параметров горизонтальных и вертикальных колебаний свайного фундамента при динамическом нагружении и в случае кинематического возбуждения (рис. 1).

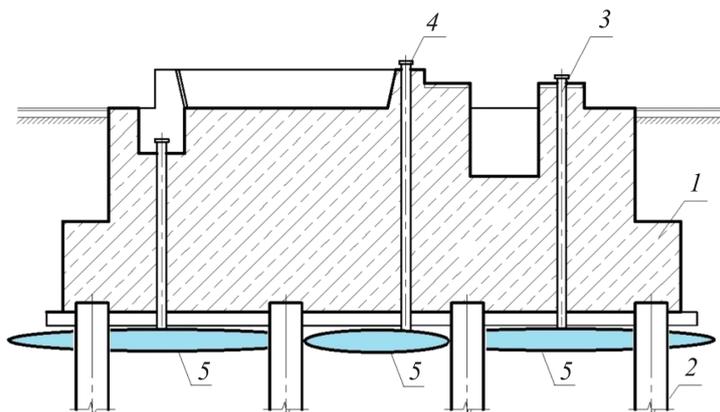


Рис. 1. Схема усиления свайного фундамента под машину с динамическими нагрузками. Этап I: 1 – ростверк; 2 – сваи; 3 – иньектор; 4 – крышка кондуктора; 5 – иньекционные тела под подошвой ростверка

Fig. 1. Pile foundation reinforcement scheme for a machine with dynamic loads. Stage I: 1 – grillage; 2 – piles; 3 – injector; 4 – conductor cover; 5 – injection bodies under the grillage

В случае необходимости производится работы второго этапа – направленное иньектирование раствора в междусвайное пространство на глубину $0,3-0,5l$ (где l – длина сваи) от подошвы ростверка. Сформированные твердые иньекционные тела объединяют сваи между собой, повышают жесткость и увеличивают массу колеблющейся системы, что способствует дальнейшему снижению параметров колебаний фундамента (рис. 2).

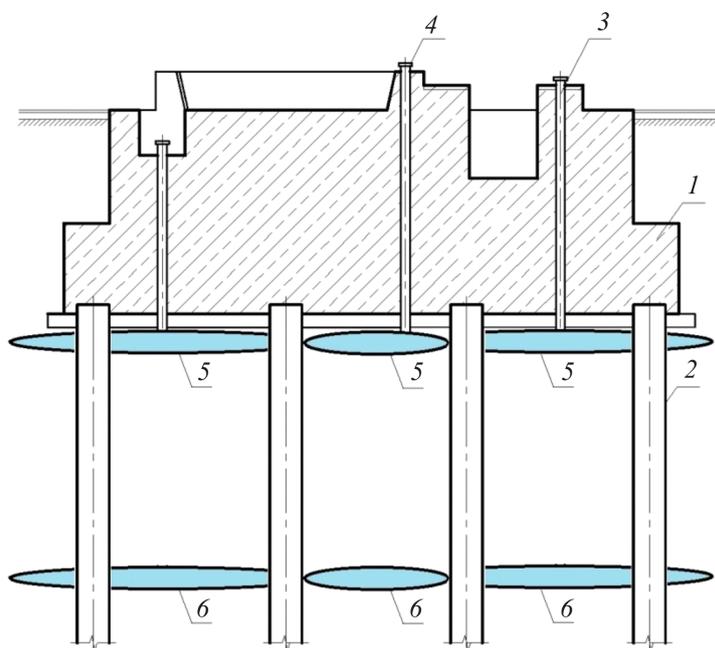


Рис. 2. Схема усиления свайного фундамента под машину с динамическими нагрузками. Этап II: 1 – ростверк; 2 – сваи; 3 – иньектор; 4 – крышка кондуктора; 5 – иньекционные тела под подошвой ростверка; 6 – иньекционные тела, объединяющие сваи

Fig. 2. The scheme of strengthening the pile foundation under the machine with dynamic loads. Stage II: 1 – grillage; 2 – piles; 3 – conductor; 4 – conductor cover; 5 – injection bodies under the sole of the grillage; 6 – injection bodies uniting piles

Нагнетание раствора ведется в нескольких инъекционных точках, располагаемых между сваями и/или по периметру ростверка. Количество точек и их расположение зависит от габаритов ростверка, наличия технологического пространства и пр. При этом расстояния между соседними точками в среднем не должны превышать 2,5–3,0 м [20]. В каждой точке нагнетание осуществляется на одном или, при необходимости, нескольких инъекционных горизонтах, количество и высотное положение которых зависит от инженерно-геологических условий площадки, вида свай, конструкции свайного фундамента и динамического режима работы оборудования. Процесс нагнетания контролируется по изменению значения подающего давления инъецирования и объему закаченной смеси. Инъекционные работы обычно останавливают при повышении подающего давления на 40–60 % к уровню установившегося рабочего давления, свидетельствующем о ликвидации зазоров – заполнении их цементно-песчаным раствором и уплотнении грунта под подошвой ростверка. Также критерием окончания работ может являться объем закаченного раствора до 2,0–2,5 м³ в одной инъекционной точке на одном горизонте [21].

Инъецирование раствора в междусвайное пространство под ростверк осуществляется через инъекторы, погружаемые в предварительно выполненные в теле ростверка отверстия – инъекционные кондукторы, представляющие собой металлические, пластмассовые или асбестоцементные трубы промышленного производства с внутренним диаметром, достаточным для погружения через них инъекторов с минимальным зазором. Инъекционные кондукторы устанавливаются в теле ростверка в процессе его бетонирования – их закрепляют вязальной проволокой или на сварке (для металлических труб) к арматурным стержням или опалубке. Обычно кондукторы располагаются вертикально с незначительным возвышением одного конца над верхним обрезом ростверка и заглублением другого в грунтовое основание под его подошвой или бетонной подготовкой (рис. 3).

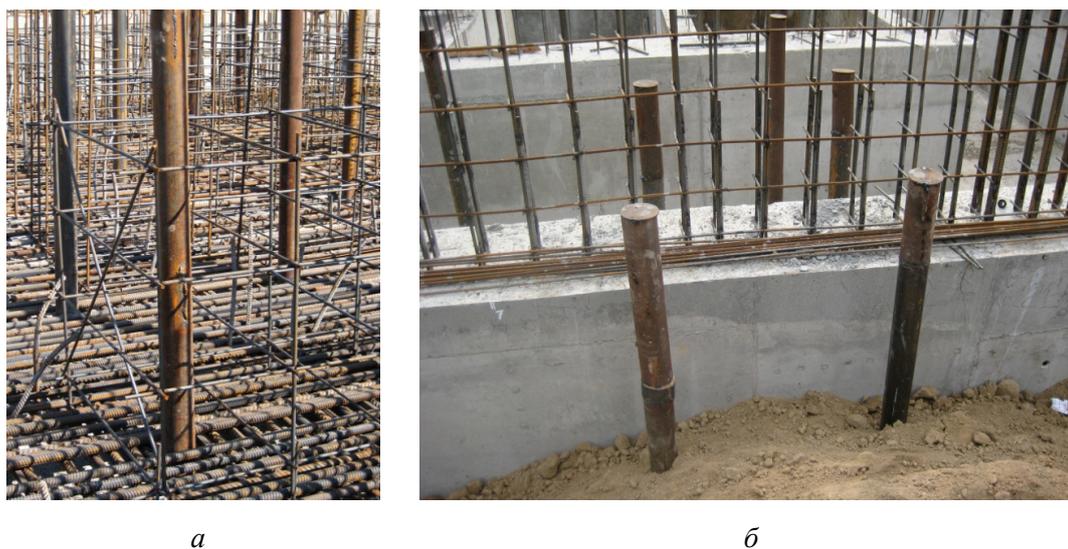


Рис. 3. Металлические инъекционные кондукторы: *a* – крепление кондукторов к арматурным стержням; *б* – инъекционные кондукторы в теле монолитного железобетонного ростверка
Fig. 3. Metal injection conductors: *a* – mounting conductors to reinforcing bars;
b – injection conductors in the body of a monolithic reinforced concrete grillage

Предлагаемым способом можно проводить усиление и ранее выполненных фундаментов под машины с динамическими нагрузками. Для них также, даже в случае относительно небольших размеров ростверка в плане, целесообразно выполнять нагнетание смеси через инъекторы, погружаемые через тело ростверка. Это объясняется неоднородным состоянием грунта под ростверком после устройства свай, возможностью неконтролируемого распространения раствора в грунте за пределы фундамента и, как следствие, отсутствием требуемого уплотнения грунта в междусвайном пространстве под подошвой ростверка после инъецирования проектного объема раствора.

При невозможности устройства отверстий для погружения инъекторов в теле ростверка требуется разработка специальной, более сложной технологии производства инъекционных работ, включающей несколько этапов инъецирования или проведения предварительных мероприятий для создания в грунтовом основании экранов, препятствующих неконтролируемому распространению нагнетаемых смесей.

2. Экспериментальная проверка эффективности усиления свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками инъецированием подвижного цементно-песчаного раствора

Экспериментальная проверка эффективности усиления грунтового основания свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками инъецированием подвижного цементно-песчаного раствора была выполнена в большом грунтовом лотке с размерами в плане 3×3 м и глубиной 2 м (без дна). Лоток заполнялся мелкозернистым воздушно-сухим песком ($\rho = 1,70 \text{ г/см}^3$, $w = 1,7 \%$, $E = 28 \text{ МПа}$). Песок укладывался слоями толщиной по 20 см и послойно уплотнялся ручной трамбовкой. Мощность песчаного основания составила 1,5–1,6 м. Подстилающим слоем являлась лессовидная маловлажная твердая супесь природного сложения мощностью более 10 м ($\rho = 1,71 \text{ г/см}^3$, $w = 11 \%$, $I_p = 6$, $I_L < 0$, $\varphi = 20^\circ$, $C = 50 \text{ кПа}$, $E = 11 \text{ МПа}$).

В качестве модели фундамента использовался металлический сварной ростверк из швеллеров № 12 и № 20 и листового металла толщиной 10 мм с размерами в плане 520×520 мм, опирающийся на 9 металлических полых свай диаметром $d = 4,2 \text{ см}$ и длиной $l = 0,92 \text{ м}$, расположенных по сетке с шагом 21 см ($5d$). Сваи погружались забивкой ручной кувалдой, ростверк устанавливался на сваи без заглубления и через болтовые соединения жестко с ними сопрягался. На ростверк устанавливались инвентарные грузы – металлические диски весом 2–4 кг. Общий вес пригрузки составлял 80–90 кг (рис. 4).

Колебания возбуждались в горизонтальном и вертикальном направлении в диапазоне частот от 5 до 40–45 Гц двухвальным вибратором направленного действия, установленным на ростверк. Регистрация параметров колебаний (амплитуд перемещений ростверка) осуществлялась комплектом К001 из трех вибродатчиков типа И001. Два вибродатчика измеряли горизонтальную составляющую колебаний, один – вертикальную. Датчики устанавливались на грани металлического ростверка, ориентировались в пространстве и жестко закреплялись для исключения возможности перемещения относительно фундамента. С помощью проводов они присоединялись к внешнему модулю АЦП (L-CARD E-330) и персональному компьютеру.



Рис. 4. Модель свайного фундамента в большом грунтовом лотке с установленным двухвальным вибратором направленного действия
Fig. 4. Model of pile foundation in a large soil tray with installed twin-shaft directional vibrator

В качестве инъекторов использовались металлические трубы диаметром 25 мм с толщиной стенки 2,5 мм. Три трубы устанавливались с разных сторон ростверка и вручную вдавливались на глубину 0,5–1,0 см от его подошвы. Нагнетание производилось ручными насосами одновременно через все инъекторы. Инъекционной смесью служил цементно-песчаный раствор, приготавливаемый на месте в соотношении: цемент – 1 часть, песок – 4 части, вода – до необходимой пластичности смеси. Расход цементно-песчаного раствора составил 0,03–0,05 м³.

В ходе экспериментов выполнялось три цикла регистрации параметров колебаний модели свайного фундамента:

- на свайном основании (после погружения свай и установки ростверка, без усиления грунта);
- на основании, усиленном нагнетанием цементно-песчаного раствора под подошву ростверка (в течение нескольких часов после окончания процесса инъектирования);
- на основании, усиленном твердым инъекционным телом, сформированным под подошвой ростверка (через 28 дней после проведения работ по инъектированию).

В результате были получены амплитудно-частотные графики колебаний модели свайного фундамента до и после его усиления (рис. 5, 6).

Выполнив анализ результатов проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1. Нагнетание цементно-песчаного раствора под ростверк свайного фундамента с целью уплотнения грунта и ликвидации возможных зазоров между подошвой ростверка и грунтом (наличие которых отчетливо наблюдалось в рыхлом песке) приводит к существенному снижению амплитуд колебаний фундамента – от 1,8 до 2,6 раз. При этом наиболее эффективно усиление грунтового основания сказывается на горизонтальной составляющей колебаний.

2. Образование твердого инъекционного тела (через 28 дней после окончания работ), объединяющего сваи и ростверк между собой, способствует дальнейшему снижению амплитуд как вертикальных, так и горизонтальных параметров колебаний (еще на 15–20 %).

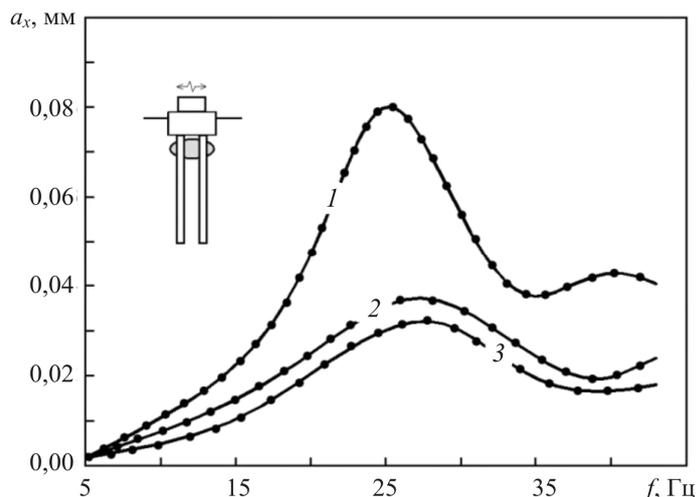


Рис. 5. Графики горизонтальных колебаний модели свайного фундамента:

1 – до усиления; 2 – после нагнетания инъекционного раствора;

3 – после формирования твердого инъекционного тела

Fig. 5. Graphs of horizontal vibrations of the pile foundation model:

1 – before amplification; 2 – after injection cement-sand mortar;

3 – after the formation of a solid injection body

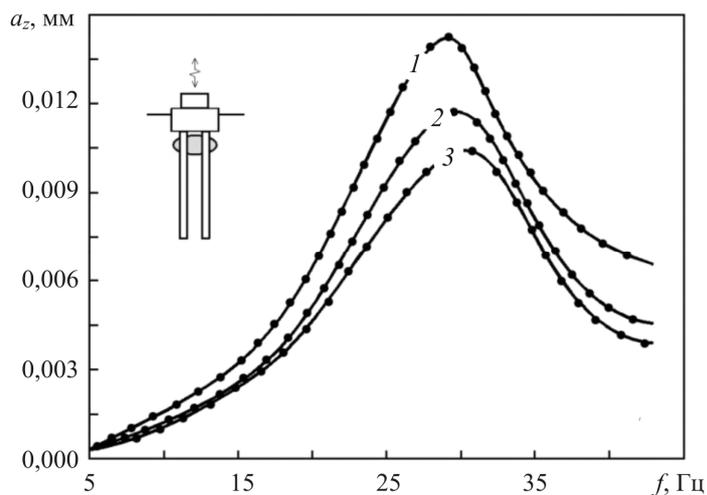


Рис. 6. Графики вертикальных колебаний модели свайного фундамента:

1 – до усиления; 2 – после нагнетания инъекционного раствора;

3 – после формирования твердого инъекционного тела

Fig. 6. Graphs of vertical vibrations of the pile foundation model:

1 – before amplification; 2 – after injection cement-sand mortar;

3 – after the formation of a solid injection body

Предложенным методом было усилено несколько натуральных свайных фундаментов, эксплуатирующихся в условиях динамического нагружения, в том числе для снижения высокого уровня колебаний было усилено грунтовое основание свайного фундамента ВПЛ-200-400. Ростверк фундамента с размерами в плане 1,4×2,45 м и высотой 0,6 м опирался на 4 забивных железобетонных сваи С6-30 длиной 6,0 м. Грунты основания были представлены водонасыщенными суглинками от текучей до мягкопластичной консистенции. Масса установки – 45 кН, мощность 144 кВт, рабочая частота 2980 об./мин. Регистрация параметров колебаний

производилась до и после усиления грунтового основания. Замеренные амплитуды колебаний фундамента ВПЛ-200-400 превышали предельно допустимые значения по целому ряду показателей, включая санитарно-гигиенические нормы. Для усиления основания в верхнюю зону между сваейного пространства было закачено около 1,0 м³ пластифицированной цементно-песчаной смеси. В результате выполненных работ вертикальная составляющая амплитуд колебаний уменьшилась в зависимости от частотного диапазона в 1,2–1,6 раза, а горизонтальная – в 1,5–3,0 раза и более. После выполненного усиления параметры колебаний фундамента стали меньше предельно допустимых значений.

Заключение

Усиление грунтового основания свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками инъектированием подвижного цементно-песчаного раствора позволяет существенно (до 1,8–2,6 раз) снизить уровень их колебаний как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.

Наибольший эффект наблюдается при заполнении пространства между ростверком и грунтовым основанием жидкой инъекционной смесью, что приводит к ликвидации зазоров, включению основания в работу и повышению массы колеблющейся системы – тем самым к существенному снижению параметров как горизонтальных, так и вертикальных колебаний.

Библиографический список

1. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – 2-е изд., доп. и перераб. / под общей ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
2. Ставницер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 448 с.
3. Фундамент под машину: авт. св-во СССР / Г.Г. Аграновский. – № 937620; опубл. бюл. № 23, 1982.
4. Jiang Z., Ashlock J.C. Computational simulation of three-dimensional dynamic soil-pile group interaction in layered soils using disturbed-zone model // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2020. – Vol. 130. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105928
5. Dynamic analysis of an axially loaded pile embedded in elastic-poroelastic layered soil of finite thickness / C. Zheng, S. Gan, G. Kouretzis, L. Luan, X. Ding // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2020. – № 4 (44). – С. 533–549. DOI: 10.1002/nag.3036
6. Validation of a finite element modelling approach on soil-foundation-structure interaction of a multi-storey wall-frame structure under dynamic loadings / O.S. Qaftan, T. Toma-Sabbagh, L. Weekes, L. Augustus-Nelson // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2020. – Vol. 131. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106041
7. Vertical dynamic response of a pile embedded in radially inhomogeneous soil based on fictitious soil pile model / Y. Cai, Z. Liu, T. Li, J. Yu, N. Wang // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2020. – Vol. 132. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106038
8. Leonid N.V. The analysis of the foundations vibrations on wave models in general case of dynamic loading // *ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2017. – P. 793–796.

9. Фундамент под машину: авт. св-во СССР / Г.Г. Аграновский. – № 990970; опубли. бюл. № 3, 1983.
10. Способ усиления грунтового основания: пат. Рос. Федерация / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин, М.Л. Нуждин, В.П. Писаненко. – № 2259446; заявл. 15.07.2003; опубли. 27.08.2005. – 5 с.
11. Способ усиления грунтового основания: пат. Рос. Федерация / С.Н. Лавров, Л.В. Нуждин, М.Л. Нуждин, В.П. Писаненко. – № 2259447; заявл. 15.07.2003; опубли. 27.08.2005. – 4 с.
12. Nuzhdin M.L, Nuzhdin L.V. Strengthening of pile foundation under dynamic loads by high-pressure injection // *Challenges and Innovations in Geotechnics: Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference* – Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. – P. 143–145.
13. Nuzhdin M.L, Nuzhdin L.V. Application high-pressure directional injection method for strengthen soil base // *Geo-Engineering for Construction and Conservation of Cultural Heritage and Historical Sites. Challenges and Solutions: Proceedings of the IVth CAGS*. – Самарканд, 2012. – P. 201–205.
14. Тер-Мартirosян З.Г., Джаро М.Н. Колебания заглубленного массивного фундамента на многослойном весомом основании // *Вестник Московского государственного строительного университета*. – 2012. – № 4. – С. 116–120.
15. Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С. Безопасность эксплуатации оснований зданий и сооружений при динамическом воздействии // *Вестник Московского государственного строительного университета*. – 2017. – Т. 12, вып. 5 (104). – С. 537–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.537-544
16. Саргсян А.Е., Геращенко В.С., Шапошников Н.Н. Расчетная модель свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой // *Вестник Московского государственного строительного университета*. – 2012. – № 4. – С. 69–72.
17. Шутова О.А., Пономарев А.Б. Численное моделирование вибрационного воздействия автотранспорта на фундаменты зданий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – № 1. – С. 93–102. DOI: 10/15593/2224-9826/2018.1.19
18. Шутова О.А., Пономарев А.Б. Анализ возможности применения программного комплекса Geostudio Quake/W для моделирования техногенной вибрации // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. – 2016. – № 3. – С. 59–64.
19. Xu C., Luo M., Han J. Dynamic response of a scaled model of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system by shaking table test // *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* – University of Pretoria, South Africa, 2019. – P. 261–266.
20. Preparation for field testing for the performance validation of piled wind turbine foundations in expansive clays / T.S. da Silva, S.K. Haigh, M.Z.E.B. Elshafie, S.W. Jacobsz, P.W. Day, A.S. Osman // *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* – University of Pretoria, South Africa, 2019. – P. 667–672.
21. Coppola G., Liu K. Control of a unique active vibration isolator with a phase compensation technique and automatic on/off switching // *Journal of Sound and Vibration*. – 2010. – № 23 (7). – P. 2228–2235.

References

1. Il'ichev V.A, Mangushev R.A. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniia, fundamenty i podzemnye sooruzheniia [Handbook of geotechnical engineering]. 2nd ed. Moscow, ASV, 2016, 1040 p.
2. Stavnitser L.R. Seysmostoykost' osnovaniy i fundamentov [The seismic stability of bases and foundations]. Moscow, ASV, 2010, 448 p.
3. Agranovskiy G.G. Fundament pod mashinu [Foundation for the machine]. Patent USSR no. № 937620 (1982).
4. Jiang Z., Ashlock J.C. Computational simulation of three-dimensional dynamic soil-pile group interaction in layered soils using disturbed-zone model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, no. 130. DOI:10.1016/j.soildyn.2019.105928.
5. Zheng C., Gan S., Kouretzis G., Luan L., Ding X. Dynamic analysis of an axially loaded pile embedded in elastic-poroelastic layered soil of finite thickness. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2020, no. 4(44), pp. 533–549. DOI:10.1002/nag.3036.
6. Qaftan O.S., Toma-Sabbagh T., Weekes L., Augustus-Nelson L. Validation of a finite element modelling approach on soil-foundation-structure interaction of a multi-storey wall-frame structure under dynamic loadings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, no. 131. DOI:10.1016/j.soildyn.2020.106041.
7. Cai Y., Liu Z., Li T., Yu J., Wang N. Vertical dynamic response of a pile embedded in radially inhomogeneous soil based on fictitious soil pile model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, no. 132. DOI:10.1016/j.soildyn.2020.106038.
8. Leonid N.V. The analysis of the foundations vibrations on wave models in general case of dynamic loading. *ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, pp. 793–796.
9. Agranovskiy G.G. Fundament pod mashinu [Foundation for the machine]. Patent USSR no. № 990970 (1983).
10. Lavrov S.N., Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Pisanenko V.P. Sposob usileniya gruntovogo osnovaniya [Method of strengthening the soil base]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. № 2259446 (2005).
11. Lavrov S.N., Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Pisanenko V.P. Sposob usileniya gruntovogo osnovaniya [Method of strengthening the soil base]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. № 2259447 (2005).
12. Nuzhdin M.L, Nuzhdin L.V. Strengthening of pile foundation under dynamic loads by high-pressure injection. *Challenges and Innovations in Geotechnics: Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference*, Leiden, CRC Press / Balkema, 2016, pp. 143-145.
13. Nuzhdin M.L, Nuzhdin L.V. Application high-pressure directional injection method for strengthen soil base. *Geo-Engineering for Construction and Conservation of Cultural Heritage and Historical Sites. Challenges and Solutions: Proceedings of the IVth CAGS*, Samarkand, 2012, pp. 201-205.
14. Ter-Martirosyan Z.G., Dzharo M.N. Kolebaniya zaglublennogo massivnogo fundamenta na mnogosloynnom vesomom osnovanii [Vibrations of the buried massive foundations on a multi-layer weighty base]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 116-120.
15. Ter-Martirosyan A.Z., Sobolev Ye.S. Bezopasnost' ekspluatatsii osnovaniy zdaniy i sooruzheniy pri dinamicheskom vozdeystvii [Safety of operation of bases and constructions at

dynamic influence]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2017, vol. 12, no. 5 (104), pp. 537-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.537-544.

16. Sargsyan A.Ye., Gerashchenko V.S., Shaposhnikov N.N. Raschetnaya model' svaynykh fundamentov s uchetom effekta ikh vzaimodeystviya s gruntovoy sredoy [Calculation model of pile foundation taken into account the effect of their interaction with the soil environment]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 69-72.

17. Shutova O.A., Ponomarev A.B. Chislennoye modelirovaniye vibratsionnogo vozdeystviya avtotransporta na fundamente zdaniy [Numerical simulation of vibration impact of vehicles on the buildings foundations]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, no. 1, pp. 93-102. DOI: 10/15593/2224-9826/2018.1.19.

18. Shutova O.A., Ponomarev A.B. Analiz vozmozhnosti primeneniya programmnoy kompleksa Geostudio Quake/W dlya modelirovaniya tekhnogennoy vibratsii [Analysis of the possibility of using the software complex Geostudio Quake/W for modeling man-made vibrations]. *Seysmoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy*. 2016, no. 3, pp. 59-64.

19. Xu C., Luo M., Han J. Dynamic response of a scaled model of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system by shaking table test. *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, University of Pretoria, South Africa, 2019, pp. 261-266.

20. da Silva T.S., Haigh S.K., Elshafie M.Z.E.B., Jacobsz S.W., Day P.W., Osman A.S. Preparation for field testing for the performance validation of piled wind turbine foundations in expansive clays. *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, University of Pretoria, South Africa, 2019, pp. 667-672.

21. Coppola G., Liu K. Control of a unique active vibration isolator with a phase compensation technique and automatic on/off switching. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, no. 23 (7), pp. 2228-2235.