

УДК 624.154:624.04

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-27-32

РАСЧЕТ ОСНОВАНИЙ, УСИЛЕННЫХ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ СВАЯМИ

Н. З. Готман^{1,2}, *А. А. Горбачев*³, *А. Л. Гудков*^{2,3}

¹Научно-исследовательский, проектно-изыскательский
и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений
им. Н. М. Герсевича, г. Москва, Россия

²Российский университет транспорта, МИИТ, г. Москва, Россия

³ООО «ПОДЗЕМПРОЕКТ», г. Москва, Россия

Аннотация. *Анализируются принципы численного моделирования основания, усиленного грунтоцементными сваями. На примере реального объекта, на котором ООО ПОДЗЕМПРОЕКТ выполнял научно-техническое сопровождение проектирования, анализируются результаты численного моделирования нагруженного свайного основания с проектной расстановкой свай, вскрываются некоторые противоречия с рекомендациями СП 22.133330.2016 и уточняются расчетные критерии, определяющие выбор типа усиленного основания.*

Ключевые слова: *грунтоцементная свая, усиленное основание, укрепленный массив, армирование сваями, расчетные критерии*

CALCULATION OF BASES REINFORCED WITH SOIL-CEMENT PILES

N. Z. Gotman^{1,2}, *A. A. Gorbachev*³, *A. L. Gudkov*^{2,3}

¹Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, Moscow, Russia,

²Russian University of Transport, Moscow, Russia,

³PODZEMPROEKT LLC, Moscow, Russia

Annotation. *The principles of numerical modeling of the base reinforced with soil-cement piles are analyzed. Using the example of a real facility where PODZEMPROEKT LLC provided scientific and technical support for the design, the article analyzes the results of numerical modeling of a loaded pile foundation with a designed pile arrangement, reveals some contradictions with the recommendations of SP 22.133330.2016, and clarifies the design criteria that determine the choice of the reinforced foundation type.*

Keywords: *soil-cement pile, reinforced foundation, reinforced massif, pile reinforcement, design criteria*

Одним из наиболее эффективных методов усиления основания является подведение грунтоцементных свай (ГЦС) под фундамент, что подтверждено результатам исследований российских авторов, опубликованными в научной литературе [1–5]. Расчет усиления фундаментов сваями должен выполняться с учетом взаимодействия свай усиления, основания и фундамента, при этом нормами РФ предлагается 2 принципа работы основания, а именно как «укрепленного массива» с обобщенным модулем деформации и как массива грунта, армированного сваями.

Современный уровень развития компьютерных программ для моделирования оснований и фундаментов (PLAXIS, MIDAS и пр.) позволяет выполнять расчеты усиления фундаментов сваями с корректным учетом их взаимодействия между собой и с грунтом основания. В зависимости от того по какому принципу работы усиленного основания (укрепленный массив, или армированный массив) оно задается в численном расчете, выполняется задание исходных данных. При этом при следовании принципу «укрепленного массива» возможен упрощенный вариант моделирования основания с обобщенным модулем деформации и определением расчетной области по вертикали от подошвы фундаментной плиты по рекомендациям СП 22.13330.2016. Возможность выполнения расчета по принципу «укрепленного массива» оценивается также в соответствии с рекомендациями СП 22.13330.2016. п.6.44а.

В статье представлены результаты численного исследования взаимодействия свай усиления с основанием и плитой проектируемого здания в г. Уфе, а также их анализ, в результате которых сформулированы предложения, уточняющие расчетные критерии для обоснования выбора принципа работы усиленного основания.

Результаты численного исследования

Численные исследования выполнены при выполнении работ по научно-техническому сопровождению проектирования усиления основания здания в г. Уфа РБ. Проектируемое здание — сложной формы в плане (рис. 1) с габаритными размерами в осях А.1-Н.1/1.1-15.1 – 31.75×53.2м, 30-ти этажное с 3-х уровневой подземной парковкой (секция А) и 2-х этажное с 4-х уровневой подземной парковкой (секция Б).

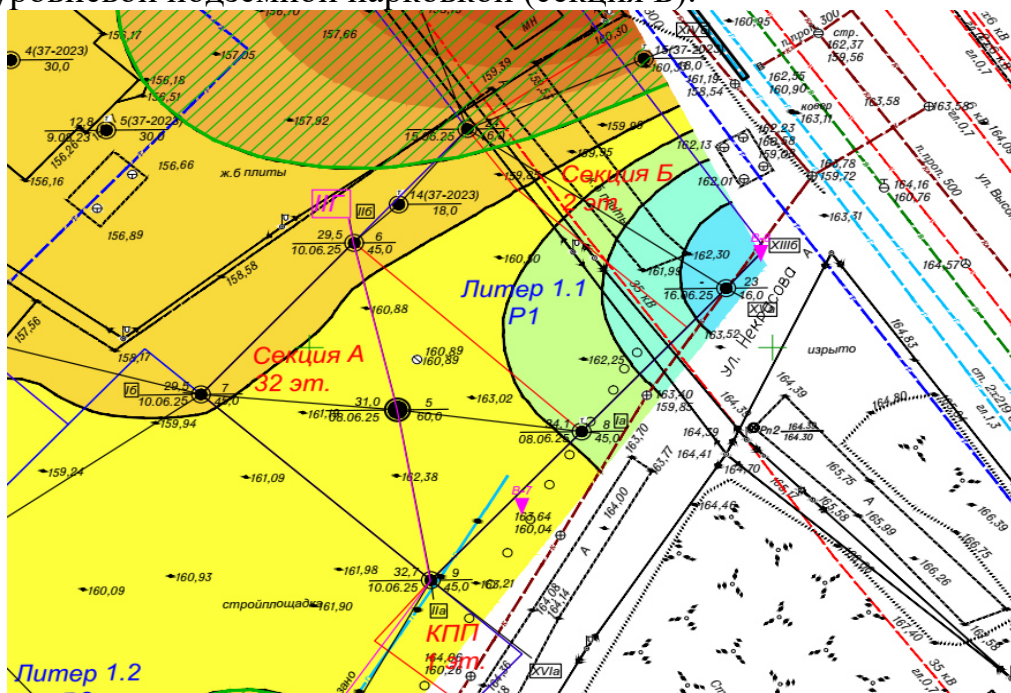


Рис. 1. План расположения буровых скважин

Конструктивная схема здания – каркасно-стенная. Фундаменты — монолитная железобетонная плита на основании, усиленном грунто-цементными элементами (ГЦЭ), для высотной секции А и на естественном основании для 2-х этажной секции и паркинга. В основании фундаментной плиты на отметках подошвы фундамента залегают глины твердые и мергель, ниже в пределах сжимаемой толщи — в основном глины и мергель (рис. 2, табл. 1).

Усиление грунтов в основании фундаментов высотной секции выполняется путем армирования природного грунта жесткими грунтоцементными элементами (ГЦЭ) диаметром 1,1–1,2 м, которые в плане располагаются по регулярной сетке с шагом 2 м.

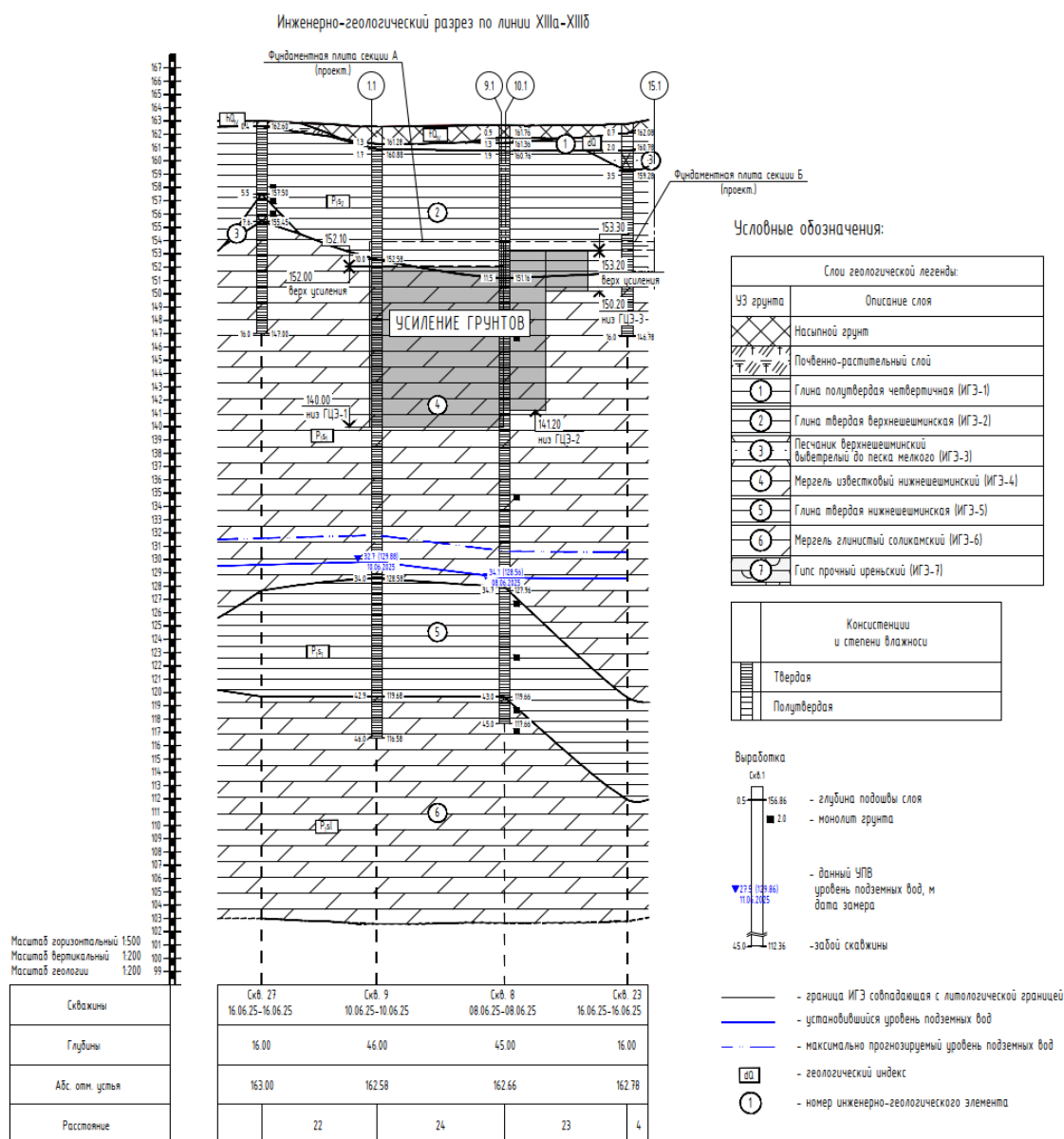


Рис. 2. Схема усиления основания ГЦЭ

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунтоцемента

Удельный вес γ_{stb} , кН/м ³	Прочность на одноосное сжатие R_{stb} , МПа	Сцепление $c_{stb, II}$, кПа	Модуль деформации E_{stb} , МПа
18,0	3,0	1200	300

Грунтоцементные элементы устраиваются по двухкомпонентной технологии струйной цементации грунтов «Jet grouting».

Расчетные схемы для геотехнических расчетов (рис. 3) состоят из стержневых и объемных конечных элементов (КЭ), моделирующих работу зданий, объемных КЭ, моделирующих работу грунтового основания, специальных элементов, моделирующих процесс устройства и работу грунтоцементных элементов, а также узловые и распределенные нагрузки, соответствующие нормативным значениям.

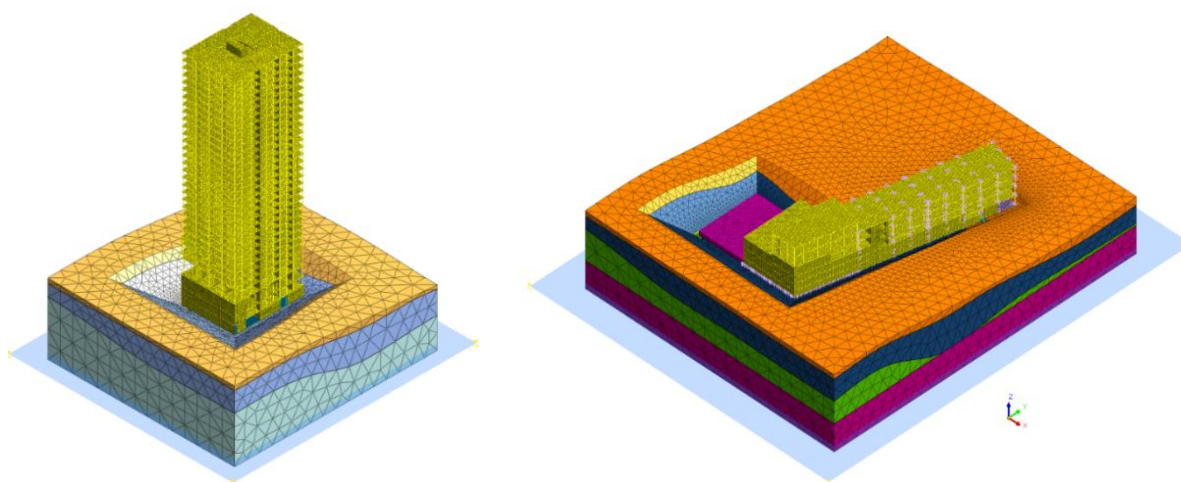


Рис. 3. Расчетная схема

На рис. 4 показаны изополя вертикальных напряжений в уровне голов ГЦС. По результатам видно, что среднее значение напряжений в головах ГЦС составило 144 т/м², среднее значение напряжений в пяте ГЦС составило 123 т/м². Принимая во внимание габариты ФП и диаметры ГЦС равный 1,2 метра была вычислена суммарная нагрузка, передаваемая на грунтоцементные стволы. При нормативном значении веса здания ~45 тыс. тонн на грунтоцементные стволы передается ~36 тыс. тонн.

Таким образом, большая часть нагрузки передается в уровне пяты ГЦЭ, что больше соответствует работе свайного фундамента.

При анализе возможности рассмотрения данного поля ГЦС как укрепленный массив, или как массив, армированный сваями, в соответствии с рекомендациями СП 22.13330.2016 и проверкой требований п. 6.44а при определении доли нагрузки, воспринимаемой грунтоцементными элементами (β) как отношение допускаемой нагрузки на ГЦС по грунту к полной проектной нагрузке, установлено следующее.

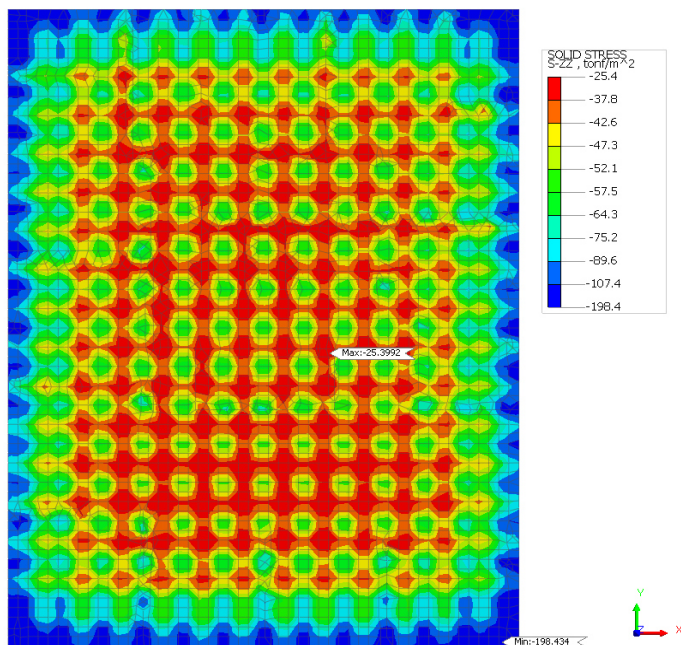


Рис. 4. Изополя распределения вертикальных напряжений в уровне голов ГЦС, т/м^2

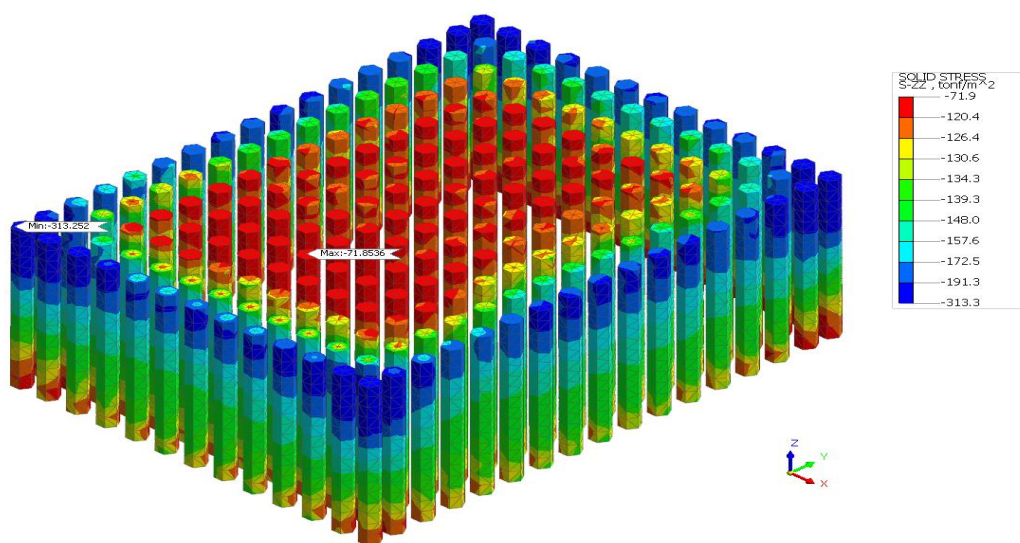


Рис. 5. Изополя распределения вертикальных напряжений в грунтоцементных элементах, т/м^2

Коэффициент β определяется при достижении предельных состояний ГЦС, что не подтверждается геотехническими расчетами и потому в данном случае не характеризует реальную долю нагрузки, передаваемую на сваи ГЦС. По расчету в соответствии с требованиями СП он более 2-х, а в соответствии с геотехническим расчетом его величина составляет 0,8.

Как правило, в основании фундаментной плиты устраивается щебеночная подушка, выполняющая функции перераспределения нагрузки в основании.

В этом случае при усилении оснований под высотные здания, когда длина элементов усиления (ГЦС) определяется из расчета по деформациям, наиболее целесообразно коэффициент β определять из условия совместности деформаций по формуле

$$\beta = \frac{E_{\text{ГЦ}} F D^2}{E_{\text{Гр}} (a^2 - F)(D + 2h)^2}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ГЦ}}$ — модуль деформации грунтоцементного элемента; $E_{\text{Гр}}$ — модуль деформации грунта; F, D, a — площадь, диаметр и шаг грунтоцементных элементов; h — толщина щебеночной подушки.

Для реального рассмотренного случая усиления основания при толщине щебеночной подушки 0,5 м этот коэффициент, определенный по формуле (1), равен 0.81, что соответствует результатам геотехнического расчета.

Заключение

На основании численных исследований установлено, что при усилении оснований высотных зданий грунтоцементными элементами (ГЦЭ) с промежуточной щебеночной подушкой, когда выбор длины армирующего элемента определяется расчетом деформаций, коэффициент β , определяющий долю нагрузки, передаваемой на ГЦЭ, рекомендуемый нормами, существенно отличается от коэффициента, определенного по результатам геотехнического расчета.

В связи с тем, что данный коэффициент оказывает большое влияние на выбор типа усиленного основания (укрепленный массив, или массив, армированный сваями) по требованиям СП 22.13330.2016, предложено для вышеописанных условий определять его из условий совместности деформаций, формула (1).

Список источников

1. Briaud J.-L. Introduction to geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils. Wiley, 2013.
2. Маковецкий, О. А. Опыт армирования слабых грунтов в основании фундаментных плит с применением струйной геотехнологии / О. А. Маковецкий, С. С. Зуев // Тр. междунар. конф. по геотехнике «GeoMos 2010», Москва, 7-10 июня 2010 г. – С. 1801-1808.
3. Melegari C. Introduction to the Jet-grouting Methods // Seminar on jet grouting. Singapore, 1997.
4. Малинин, А. Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. – М.: ОАО «издательство «Стройиздат», 2010. – 226 с.
5. Мангушев, Р. А. Определение прочностных характеристик грунтоцементного массива, выполненного по технологии jet-grouting в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / Р. А. Мангушев, В. В. Конюшков // Вестн. гражданских инженеров. – 2010. – № 2. – С. 69-77.
6. Маковецкий, О. А. Применение струйной цементации для устройства подземных частей комплексов / О. А. Маковецкий, С. С. Зуев, И. И. Хусаинов // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 10-14.
7. Хусаинов, И. И. Сравнительный анализ опытных и расчетных деформаций грунтового массива, закрепленного струйной цементацией / И. И. Хусаинов, Г. Г. Кашеварова, О. А. Маковецкий.

© Готман Н. З., Горбачев А. Л., Гудков А. А., 2026