

УДК 624.13

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА  
ВЕРТИКАЛЬНОГО АРМИРОВАНИЯ  
НЕОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ ДЛЯ  
КОМПЕНСАЦИИ НЕРАВНОМЕРНОЙ  
ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГРУНТОВОГО  
МАССИВА И СНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАДЗЕМНОЕ  
СООРУЖЕНИЕ**

Мариничев Максим Борисович  
к.т.н., доцент  
e-mail: [m.marinichev@mail.ru](mailto:m.marinichev@mail.ru)  
Internet: [www.geo-technics.com](http://www.geo-technics.com)

Ткачев Игорь Геннадьевич  
магистрант инженерно-строительного факультета  
e-mail: [igortkachev001@mail.ru](mailto:igortkachev001@mail.ru)

*Кубанский государственный аграрный универси-  
тет, Краснодар, Россия*

Шлее Юрий  
Технический директор НАУЭ ГмБХ & Ко. КГ,  
Германия  
Gewerbestraße 2  
32339 Espelkamp-Fiestel  
Германия  
Tel: +7 (495) 925 00 27 (Москва)  
e-mail: [jschlee@naue.com](mailto:jschlee@naue.com)  
Internet: [www.naue.com](http://www.naue.com)

Объектом исследования являются вертикально-армированные грунтовые основания высотных зданий и их работа в сложных инженерно-геологических условиях. Рассмотрена совместная работа армирующих элементов и околосвайного грунта в ходе моделирования армированного основания для жилого дома в г. Сочи. Расчеты проводились в ПК PLAXIS 2D, ING+ и MIDAS GTS. В результате численного моделирования сопоставлены схемы комбинированного свайно-плитного и плитного фундамента на армированном вертикальными элементами основании с учетом сейсмичности площадки строительства

Ключевые слова: ВЕРТИКАЛЬНО-АРМИРОВАННЫЕ ОСНОВАНИЯ, БУРОИНЪКЦИОННЫЕ СВАИ, ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТА, СЕЙСМИЧНОСТЬ, КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

UDC 624.13

**PRACTICAL IMPLEMENTATION OF  
VERTICAL REINFORCEMENT FOR NON-  
HOMOGENEOUS BASES AS A METHOD TO  
REDUCE NON-UNIFORM DEFORMABILITY  
OF SUBSOIL AND COMPENSATE SEISMIC  
LOADS TO UPPER STRUCTURE**

Marinichev Maxim Borisovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor  
e-mail: [m.marinichev@mail.ru](mailto:m.marinichev@mail.ru)  
Internet: [www.geo-technics.com](http://www.geo-technics.com)

Tkachev Igor Gennadyevich  
postgraduate student of the Civil engineering and  
building faculty  
e-mail: [igortkachev001@mail.ru](mailto:igortkachev001@mail.ru)  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Schlee Juri  
Chief technical officer, NAUE GmbH & Co. KG,  
Germany  
Gewerbestraße 2  
32339 Espelkamp-Fiestel  
Germany  
Tel: +7 (495) 925 00 27 (Moscow)  
e-mail: [jschlee@naue.com](mailto:jschlee@naue.com)  
Internet: [www.naue.com](http://www.naue.com)

The subjects of study are vertically reinforced bases of high-rise buildings and its behavior in compound subsoil conditions. The article reviews the carried out analyses of reinforced subsoil for high-rise building in Sochi with particular simulation of combined action for reinforcing elements and nearby surface. Analyses were carried out with such software as PLAXIS 2D, ING+ and MIDAS GTS. As a result of numerical analyses the comparison of raft-pile foundation and slab foundation on reinforced subsoil has been performed for seismic regions

Keywords: VERTICALLY REINFORCED SUBSOIL, CONTINUOUS FLIGHT AUGER PILES, SOIL SETTLEMENTS, SEISMIC ACTIVITY, FINITE ELEMENT ANALYSES

## Введение

Проблема строительства промышленных и гражданских сооружений в сложных грунтовых условиях весьма актуальна, поскольку значительные

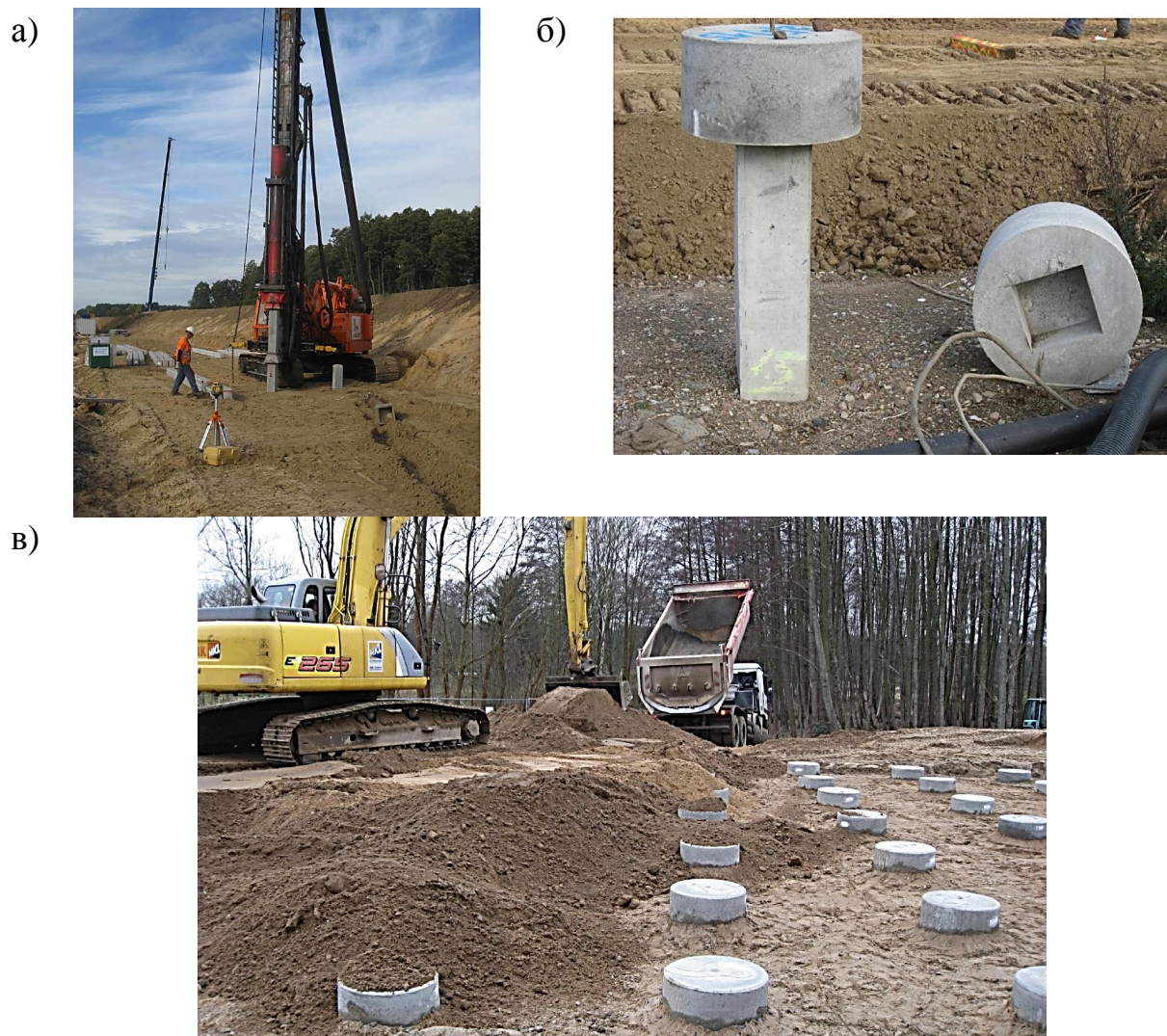
по размерам территории России сложены просадочными, лессовыми, слабыми водонасыщенными, насыпными, набухающими и вечно-мерзлыми грунтами. Многие регионы России относятся к сейсмическим районам, где возможны землетрясения интенсивностью более 7 баллов. Обеспечение необходимой прочности и деформируемости таких оснований и конструкций фундаментов является сложной технической задачей, для решения которой необходимо применение специальных инженерных мероприятий, дорогостоящих материалов и технологий, что зачастую приводит к удорожанию строительства.

Одним из мероприятий по снижению неравномерности осадок и деформаций плитных фундаментов является армирование грунтов основания. На сегодняшний день в нормативных документах практически отсутствуют методы проектирования оснований, армированных вертикальными элементами, несмотря на значительный опыт применения этого подхода за рубежом (см. рис. 1) [6].

В отсутствие нормативной базы принятие предварительных проектных решений основывается на существующем практическом опыте устройства армированных оснований. Недостаточность изученности метода определяет необходимость проведения исследований в этом направлении, а в последствии дополнения существующих нормативных документов.

С каждым годом совершенствуются технологии, появляются новые прогрессивные методы устройства оснований зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях и в условиях плотной городской застройки. Одним из способов повышения прочностных характеристик основания является применение вертикального армирования грунта. В данной статье описывается опыт проектирования вертикально-армированного грунтового массива в г. Сочи, где при помощи этого мето-

да был возведён квартал из шести 19-этажных жилых домов. Данное техническое решение позволило существенно снизить деформации основания, избежать неравномерность осадок, снизить материалоемкость и трудоемкость при возведении фундамента на участке с 9-балльной сейсмичностью площадки.



а – выполнение армирования основания на участке железной дороги Нассенхайде - Ловенберг, вблизи Берлина

б – элементы вертикального армирования основания (забивные сваи + сборные оголовки)

в – устройство грунтовой подушки из песчаного грунта

**Рисунок 1 – Армогрунтовая насыпь при строительстве участка железной дороги, Германия**

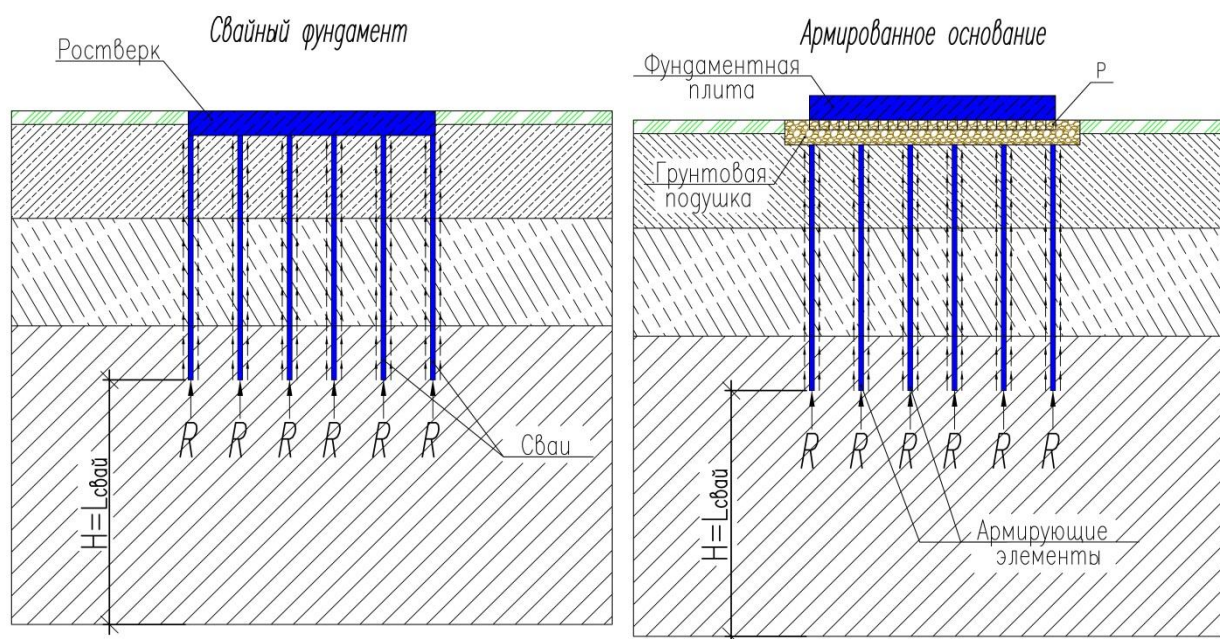
Армированное грунтовое основание представляет собой комбинацию грунта и армирующих элементов. Армирующие элементы располагаются в

вертикальном направлении с таким расчётом, чтобы ограничить деформации грунтов как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

Армирующие элементы улучшают деформационные свойства основания, взаимодействуя с грунтом по боковой поверхности и в уровне острия. Передача нагрузок от сооружения на основание осуществляется через промежуточную грунтовую подушку (см. рис. 2), выполненную из малосжимаемого материала, отсыпаемого и уплотняемого послойно (например, гранитного щебня).

Для изучения работы армированных грунтовых оснований были проведены теоретические исследования, включавшие в себя численное моделирование работы армированных грунтовых оснований в водонасыщенных глинистых и песчано-глинистых грунтах. В результате этого удалось получить качественную и количественную оценку работы армированных вертикальными элементами грунтовых массивов.

Для реализации поставленных задач по определению осадок армированных грунтовых оснований использовались геотехнические программы «MIDAS GTS» и «PLAXIS».



**Рисунок 2 – Схема передачи нагрузок на свайный фундамент и армированное основание**

В отличие от свайно-плитного фундамента армированный массив обладает рядом отличительных особенностей именно в сейсмических районах:

1. Сейсмическое воздействие частично гасится промежуточным слоем (на верхнюю часть сваи не передаются горизонтальные силы и изгибающие моменты);
2. Не действуют ограничения по длине и диаметру армирующих элементов;
3. Армирующие элементы могут быть изготовлены в заводских условиях, а также в виде буровых и грунтоцементных свай или их комбинаций;
4. За счёт работы промежуточного слоя нагрузка на сваи и плиту распределяется практически поровну;

5. Снижается материалоемкость и трудоемкость при возведении «нулевого цикла» зданий и сооружений.

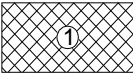
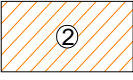

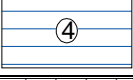

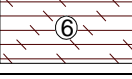
Исследования проводились на примере строительного объекта: «Жилой квартал в г. Сочи по ул. Гастелло, 27».

По результатам геологических изысканий грунтовый массив в пределах строительной площадки сложен суглинистыми грунтами с включениями органики, участками сильно опесчанеными с модулем деформации 4,2-11,7 МПа, залегающими до глубины 30-35 м. Ниже залегают суглинки твёрдые, слоистые с модулем деформации 22-34 МПа. Инженерно-геологический разрез площадки представлен на рисунке 3, а физико-механические свойства грунтов и условные обозначения в таблице №1.

В таких сложных инженерно-геологических условиях первоначально рассматривался вариант свайного фундамента. Но ввиду высокой сейсмичности при использовании свайного фундамента необходимо учитывать ряд ограничений, не позволяющих проектировать буровые сваи с отношением  $l/d \geq 25$ , в связи с чем принят вариант устройства вертикально армированного грунтового массива из буроинъекционных свай СФА диаметром 400мм и длиной 35м. Поверх свай устраивались железобетонные оголовки. Пространство между оголовков было заполнено и послойно уплотнено гранитным щебнем фракциями от 20-40 мм и 40-70мм. Схема расположения элементов вертикального армирования грунта приведена на рисунке 4.

**Таблица №1 – Основные прочностные характеристики грунтов площадки строительства**

Условные обозначения	Инженерно-геологические элементы	Модуль деформации грунта E, МПа	Удельное сцепление, КПа	Угол внут. трения

	ИГЭ 1. Насыпной неслежавшийся техногенный грунт	-	-	-
	ИГЭ 2. Суглинок тугопластичный	11,7	6,2	1,2
	ИГЭ 3. Суглинок текучепластичный	7,2	1,4	11,1
	ИГЭ 4. Суглинок с примесями органики	4,2	2	8,1
	ИГЭ 5. Сглинок твердый, слоистый	18,0	20,6	20,9
	ИГЭ 6. Суглинок твердый, слоистый, с песчаной присыпкой	29,3	31,0	22,6

Расчёт деформативности искусственного основания выполнялся в ПК «ING+», «PLAXIS 2D», «Midas GTS». В отличие от нормативных методик[2] данные комплексы позволяют рассчитывать осадку свайно-плитного фундамента с неравномерной сеткой расположения свай.

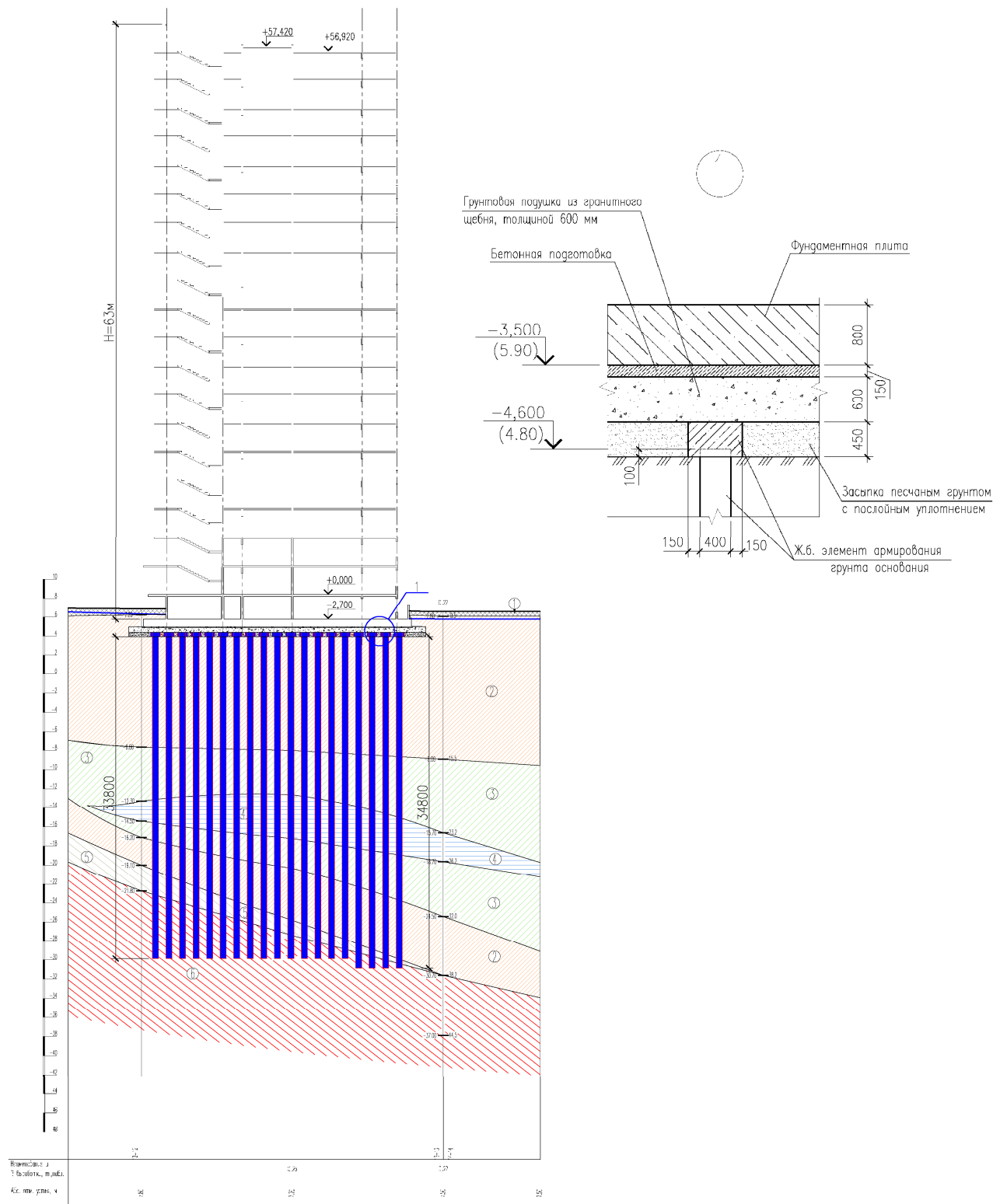


Рисунок 3 – Инженерно-геологический разрез площадки строительства



Результатами расчета установлено, что максимальная осадка фундаментной плиты на естественном основании (без свай) составила около 500 мм, минимальная – 420 мм, относительная разность – 0,005 (см. рис. 5) [2].

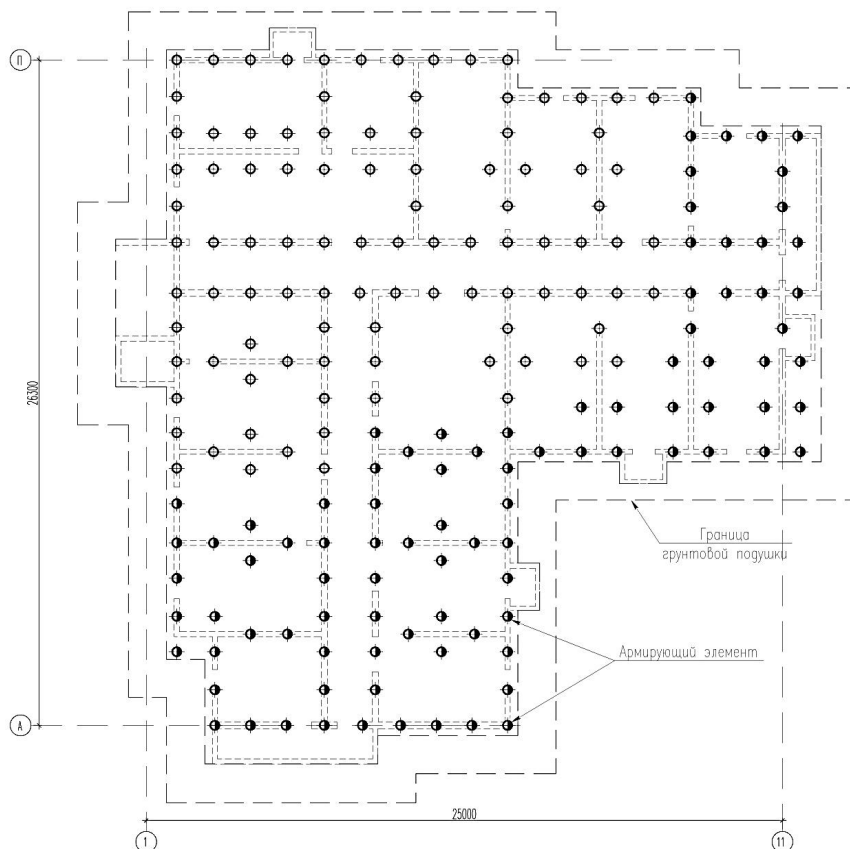


Рисунок 4 – План основания, армированного буроинъекционными сваями

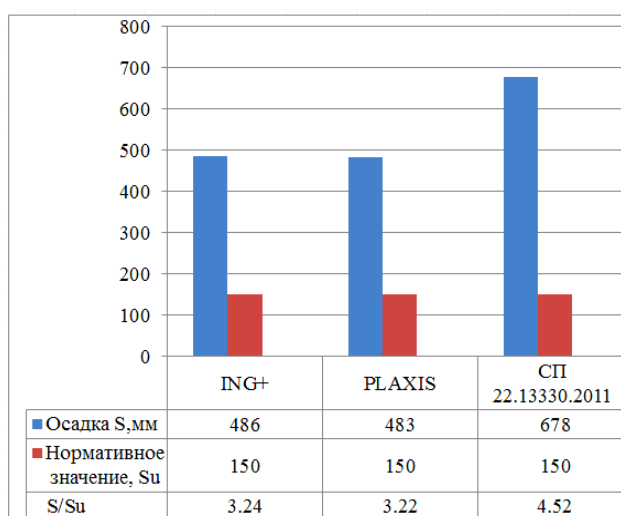
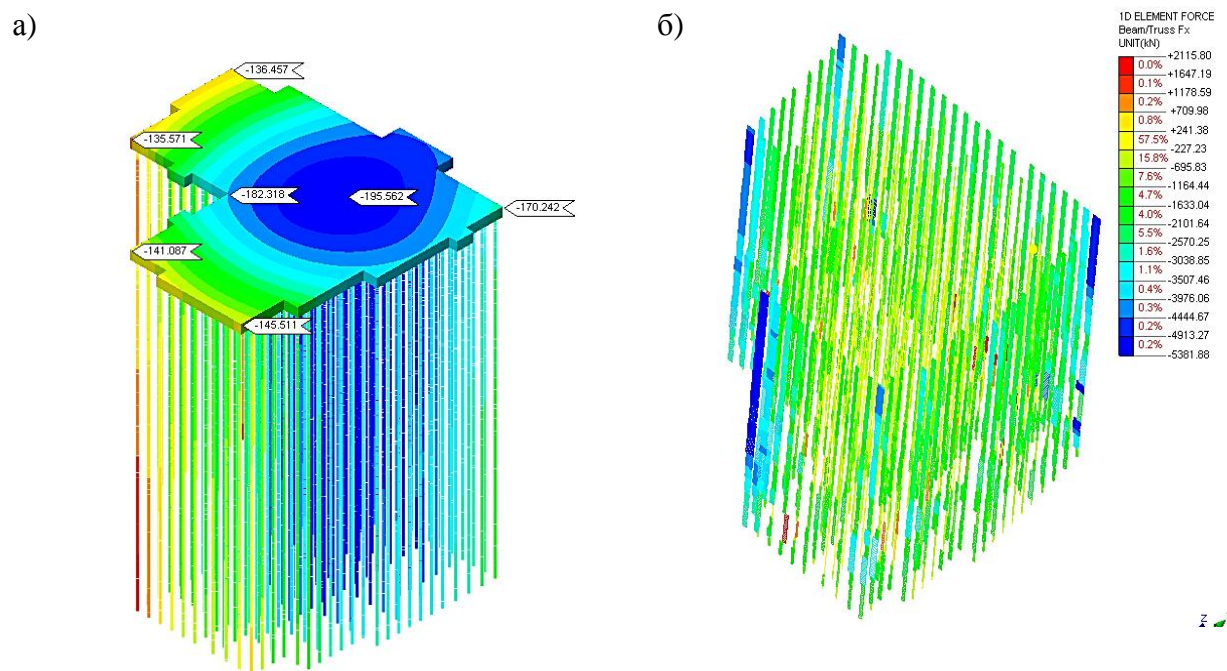


Рисунок 5 - Гистограмма расчетов плитного фундамента на естественном основании в программных комплексах и по СП 22.13330.2011



а – осадки фундаментной плиты  
 б – усилия в сваях

**Рисунок 6 – Результаты расчета в ПК «Midas GTS» свайно-плитного фундамента**

Для снижения крена и максимальных осадок было принято решение о введении в состав основания бурой инъекционных свай под пятном фундаментной плиты. Промежуточный слой был выполнен из гранитного щебня с приведёнными физико-механическими характеристиками:  $E=40\text{МПа}$ ;  $\varphi=55^\circ$ ;  $C=30\text{ кН/м}^2$   $h=600\text{мм}$ .

Большинство армирующих элементов устраивались в осях несущих стен с шагом 1,45 м и переменной длиной – 34-35м (см. рис. 4).

Для расчета осадки здания в ПК «ING+» рассматривали бурой инъекционные сваи и грунт как грунтовой массив с осредненным модулем (эффективным) деформации

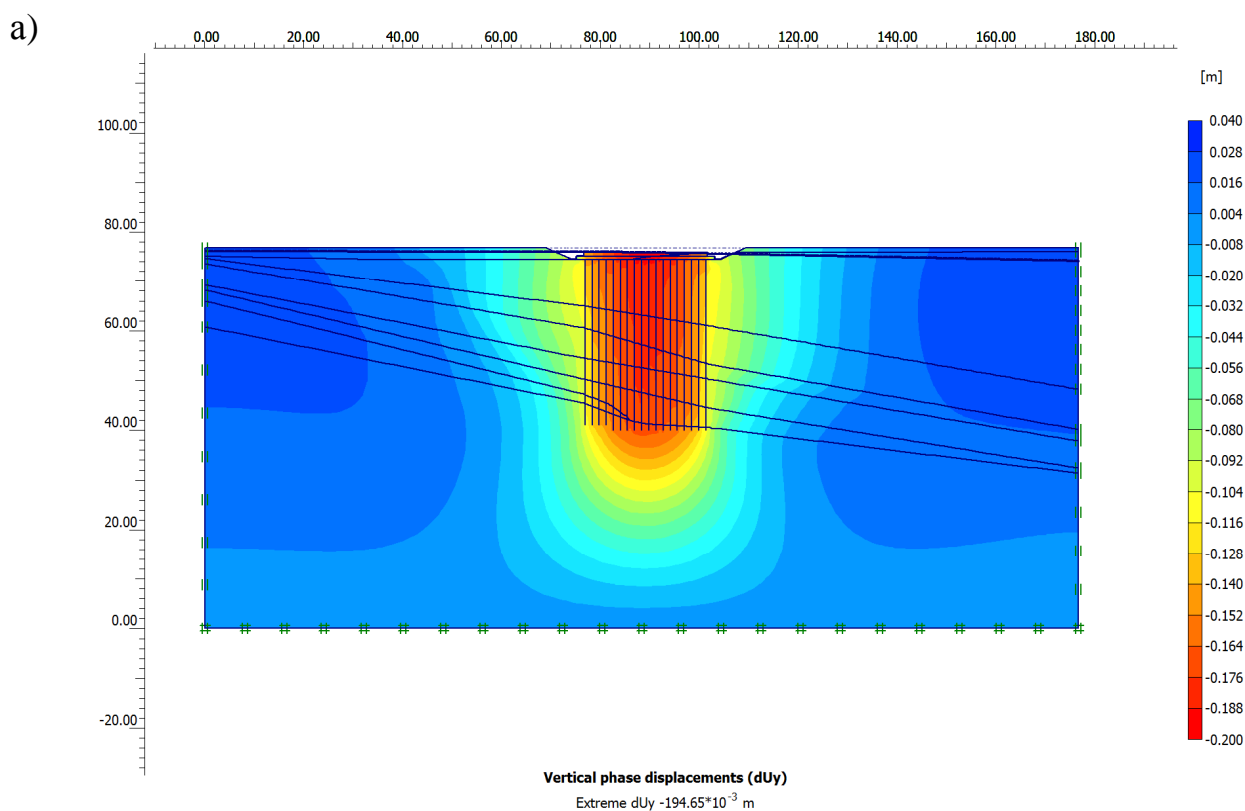
$$E = \frac{E_p A_p + E_g (S - S_p)}{S},$$

где  $E_p$ ,  $E_g$  – модули деформации свай и грунта;

$S_p$ ,  $S$  – площадь всех свай и общая площадь плиты.

По результатам расчетов максимальная осадка здания составила 83 мм, минимальная – 68 мм, относительная разность осадок – 0,0015. Однако данная методика не учитывала расположения свай и, следовательно, нуждается в доработке, так как жесткости железобетонных свай и грунтового основания несопоставимы ( $E_{\text{свай}}=30000\text{МПа}$ , а грунтового массива  $E_{\text{ср}}\approx 15\text{МПа}$ ).

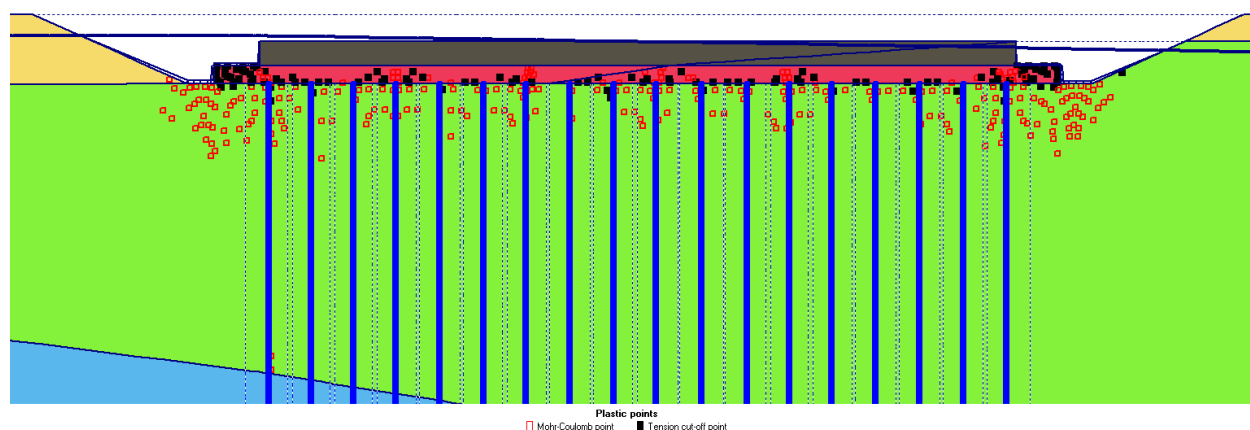
Расчет армированного основания в ПК «PLAXIS 2D» производился по модели грунта Кулона – Мора и установил, что осадки здания превышают значения, полученные по методике осреднения модуля деформации по правилу механической смеси, и составляют около 195 мм (см. рис. 7). Данный результат сопоставим с осадками, полученными при 3D-моделировании в ПК «MIDAS GTS» (см. рис. 6).



а – вертикальные перемещения (осадки) на последней стадии расчета

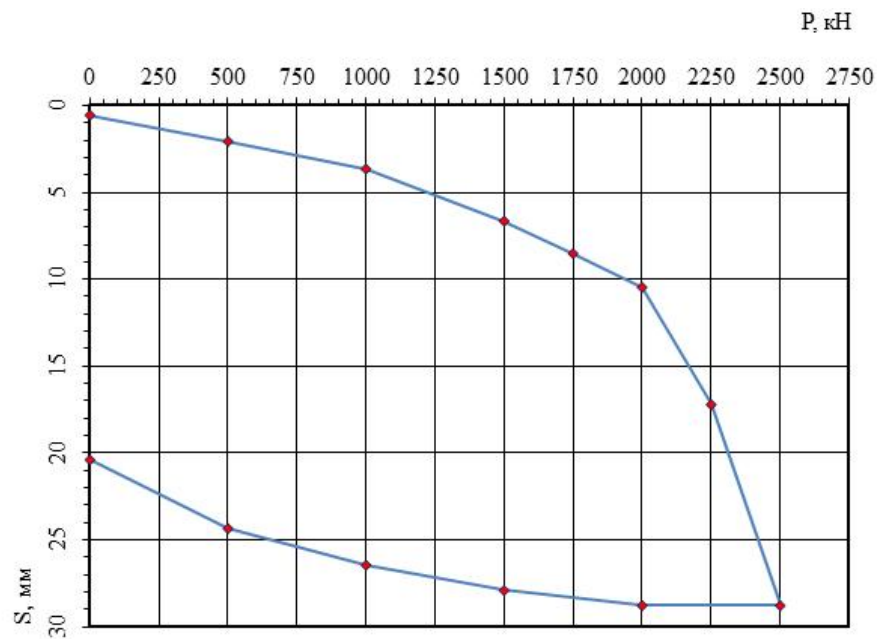
**Рисунок 7 - Результаты расчета армированного основания в ПК «PLAXIS»**

Таким образом, по ПК «PLAXIS» и «MIDAS GTS» прогнозируемая величина максимальной осадки фундаментной плиты на армированном основании составила 193-195 мм, что ниже предельной максимальной осадки, регламентируемой действующими нормативными документами [2]. Увеличение осадки в сравнении со свайно-плитным фундаментом объясняется наличием между сваями и фундаментной плитой промежуточного слоя, обладающего распределительной способностью. Таким образом, фундаментная плита воспринимает до 40-50% нагрузки, ее вовлечение в работу меняет деформируемость армированного грунта, о чем свидетельствует распределение точек пластических деформаций по объему грунтовой подушки (см. рис. 8).



**Рисунок 8 – Распределение точек пластических деформаций по грунтовой подушке из гранитного щебня**

Для контроля качества работ были выполнены опытные сваи и испытаны статической вдавливающей нагрузкой по ГОСТ 5686-94. Расчетная допускаемая нагрузка по проекту составила 1600 кН, однако в процессе испытаний была установлена несущая способность сваи  $F_d=2500$  кН. График зависимости осадки о нагрузки представлен на рисунке 9.



**Рисунок 9 - График «Осадка - нагрузка», построенный по результатам испытания грунтов вертикальными вдавливающими нагрузками на буринъекционную сваю длиной 35 метров, диаметром 400мм.**



**Рисунок 10– Этапы выполнения вертикального армирования основания на объекте в г. Сочи**

## **Выводы**

Совокупность выполненных экспериментальных исследований позволила сформулировать следующие результаты работы:

1. На примере трех различных программных комплексов была рассчитана осадка 19-этажного здания на слабых глинистых грунтах. установлено, что применение плитного фундамента на исследуемом объекте недопустимо в виду высокой и неоднородной сжимаемости основания. Изготовление комбинированных свайно-плитных фундаментов из буронабивных свай ограничивается в сейсмических районах отношением длины к диаметру [1]. Применение свай заводского изготовления осложняется ввиду их составного строения и низкой несущей способности на восприятие горизонтальных нагрузок.

2. В результате улучшения деформационных характеристик грунтов основания путем введения вертикальных элементов, были получены экспериментальные данные о деформативности оснований, армированных буронабивными сваями.

3. Использование вертикально-армированного основания позволило снизить осадки здания более чем в 3 раза по сравнению с плитным фундаментом для объекта: «19-этажный жилой дом в г. Сочи по ул. Гастелло, 27».

4. Использование щебеночной подушки между оголовками свай и фундаментной плитой толщиной 0,5-0,6м позволяет частично компенсировать сейсмическое воздействие, а также распределить более равномерно давление от надземного сооружения.

5. В результате введения вертикального армирования была достигнута равномерная осадка зданий, подтвержденная расчетами в программных комплексах «ING+2012», «MIDAS GTS» и «PLAXIS».

В целом, прогрессивные мероприятия по повышению деформационных характеристик основания позволяют значительно повысить применимость плитных фундаментов на слабых грунтах, сократить материалоёмкость и сроки возведения оснований и фундаментов высотных зданий.

#### **Библиографический список**

1. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2010.
2. СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов. – М.: Госстрой России, 2004.
3. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2011.
4. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов: монография – Пермь, Пресстайм, 2007. – 168с.
5. Караулов А.М. Практический метод расчета вертикально армированного основания ленточных и отдельно стоящих фундаментов транспортных сооружений// Основания и фундаменты, подземные сооружения: Вестник ТГАСУ № 2, 2012.
6. Мирсаяпов И.Т. Эффективные армированные грунтовые основания [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://minstroy.tatarstan.ru/file/1%D0%B4\(1\).pdf](http://minstroy.tatarstan.ru/file/1%D0%B4(1).pdf), свободный. — Загл. с экрана.
7. S.J.M. van Eekelen, A. Bezuijen «Dutch research on basal reinforced piled embankments», 8.Geokunststoff-Kolloquium, 2013.

#### **References**

1. SP 24.13330.2011 Svajnye fundamenty. – M.: NIIOСП im. N.M. Gersevano-va, 2010.
2. SP 50-102-2003 Proektirovanie i ustrojstvo svajnyh fundamentov. – M.: Gos-stroj Rossii, 2004.
3. SP 22.13330.2011 Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. – M.: NIIOСП im. N.M. Gersevanova, 2011.
4. Malinin A.G. Strujnaja cementacija gruntov: monografija – Perm', Presstajm, 2007. – 168s.
5. Karaulov A.M. Prakticheskij metod rascheta vertikal'no armirovannogo osnovanija lentochnyh i otdel'no stojashhih fundamentov transportnyh sooruzhenij// Osnovaniya i fundamenty, podzemnye sooruzhenija: Vestnik TGASU № 2, 2012.
6. Mirsajapov I.T. Jefferktivnye armirovannye gruntovye osnovanija [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [http://minstroy.tatarstan.ru/file/1%D0%B4\(1\).pdf](http://minstroy.tatarstan.ru/file/1%D0%B4(1).pdf), svobodnyj. — Zagl. s jekrana.
7. S.J.M. van Eekelen, A. Bezuijen «Dutch research on basal reinforced piled embankments», 8.Geokunststoff-Kolloquium, 2013.