Кубанский государственный аграрный университет

GEO TECH

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF FOUNDATION CONTRACTORS
Международная Ассоциация Фундаментостроителей

II международная научно-практическая конференция
«СВАЙНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ: ТЕНДЕНЦИИ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»

Особенности расчета и конструирования свайных фундаментов высотных зданий в сложных грунтовых условиях

Мариничев Максим Борисович, к.т.н., профессор

Ляшенко Павел Алексеевич, к.т.н., профессор

Денисенко Виктор Викторович, к.т.н., доцент

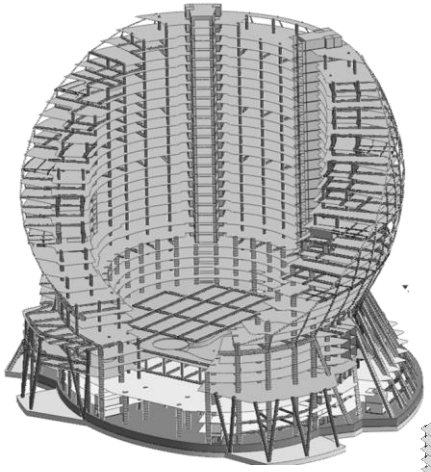
Ткачев Игорь Геннадьевич, аспирант

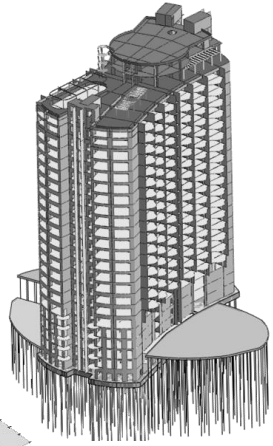
09–10 сентября 2020 года, Москва

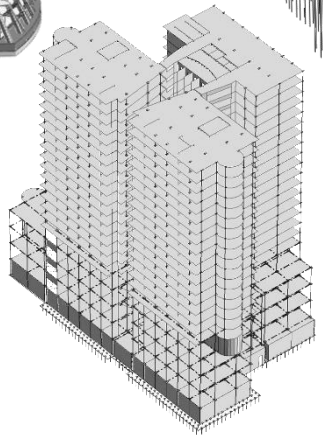
Актуальность

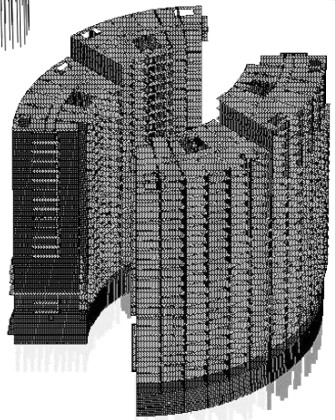
При выборе основных технических решений для конструкций и фундаментов высотных зданий в большинстве случаев приходится иметь дело с исходной геометрической и физической неоднородностью и нелинейностью элементов системы. Различные формы высотных зданий определяют методы строительства фундаментов, а также требуют предварительного детального расчетного и экспериментального обоснования применяемых методов. Одним из наиболее сложных видов неоднородности является разносжимаемость грунтового массива в сочетании с нерегулярной в плане и по высоте формой высотного здания. В таких случаях рациональные конструкции свайных фундаментов позволяют эффективно регулировать напряженно-деформированное состояние системы.

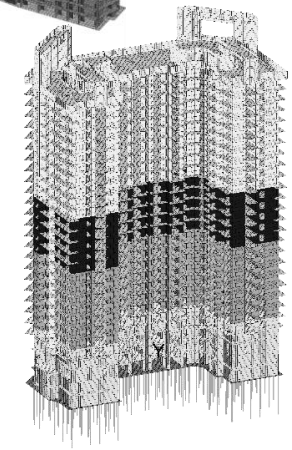
Реализованные проекты с нерегулярными формами высотных зданий



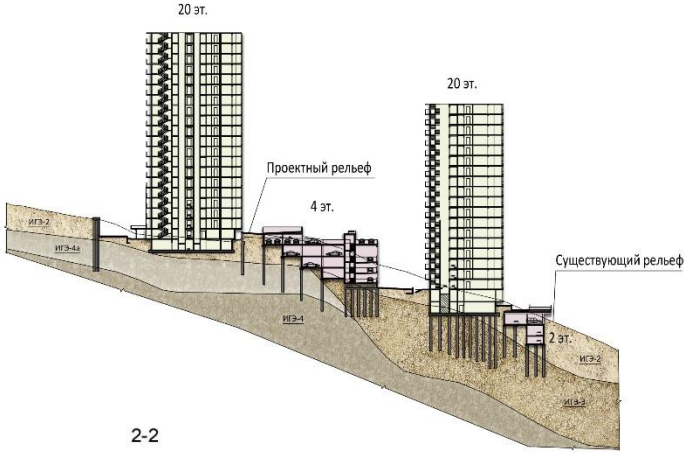


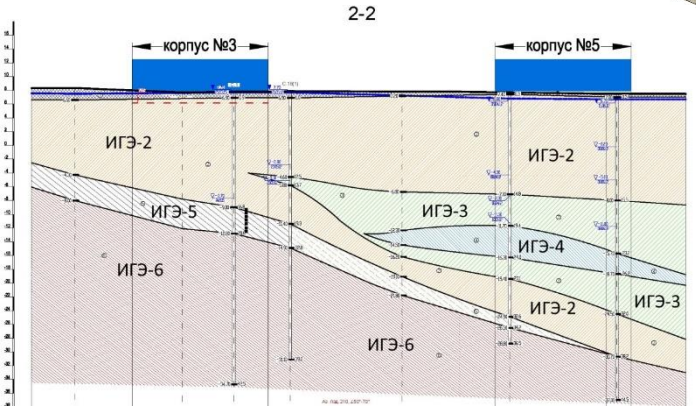


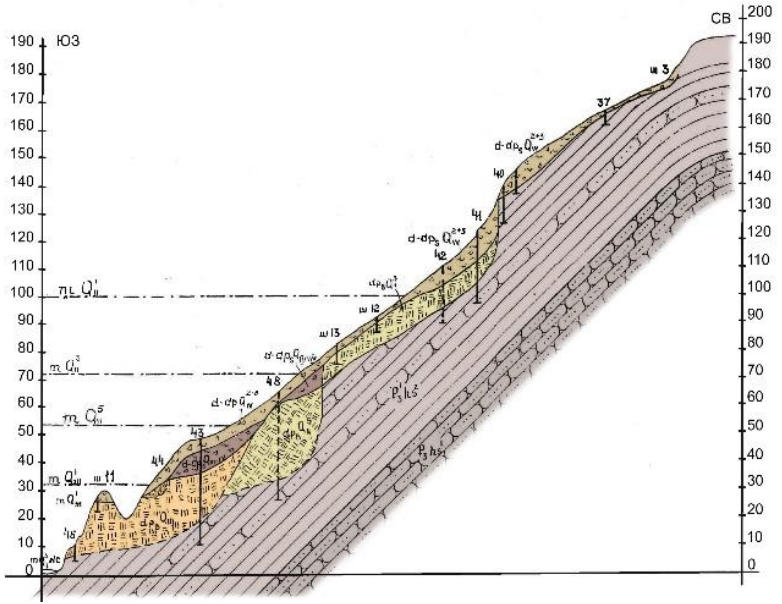




Примеры сложных грунтовых условий

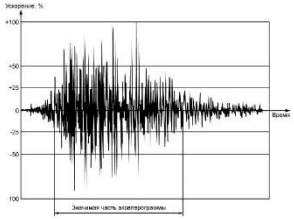




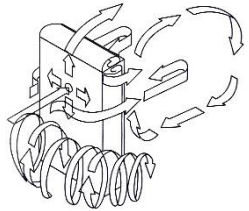


Виды воздействий

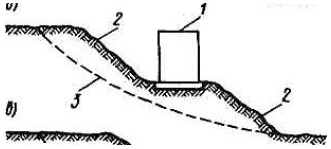
- Высокая сейсмичность



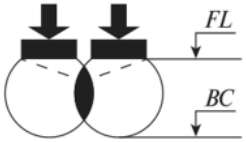
- Ветровые воздействия, пульсация



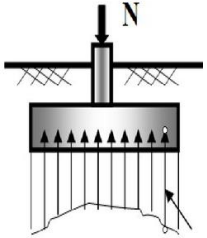
- Оползневые процессы



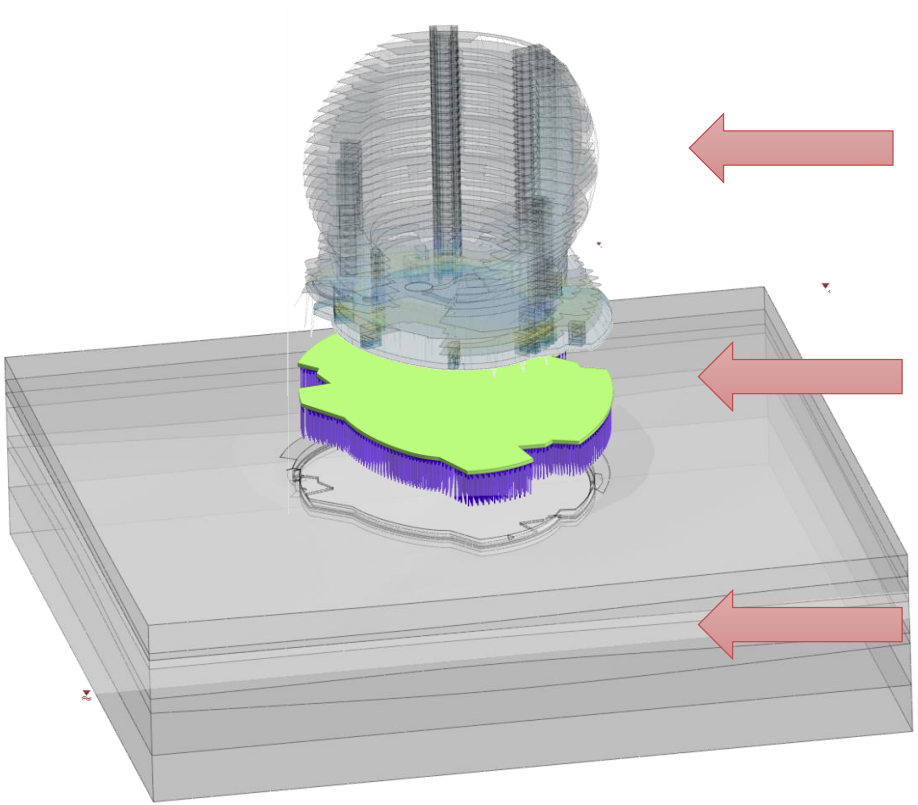
- Стесненные условия строительства



- Неоднородное поле напряжений



Элементы системы



Здание (заданная форма)

Элемент регулирования системы

Основание (исходные данные)

Использование различных видов свай

Свайные решения часто применяются на высотных объектах в Краснодарском крае. Технические решения были реализованы с использованием различных технологий изготовления свайных элементов:

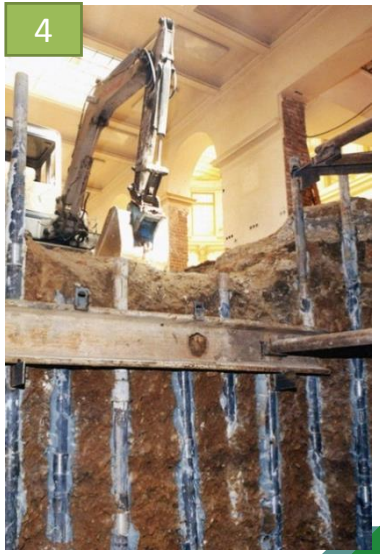
1. **Буронабивные сваи;**
2. **Буроинъекционные сваи;**
3. **Забивные сваи;**
4. **Грунтовые анкера**

1

2

3

4



Развитие конструктивного решения фундамента, включая сваи

Свая как элемент в группе способна формировать различные конструктивные решения фундамента. Однако на сегодняшний день существует большое количество вопросов к поведению сваи в грунте при действии различных нагрузок. Способы изучения работы сваи в грунте – численное и физическое моделирование, а также натурные испытания.

Проблемные вопросы взаимодействия свай

?

Определение числа свай в фундаменте по несущей способности одиночной сваи некорректно

Взаимодействие свай в фундаменте при нагружении приводит к их дополнительной осадке или уменьшению сопротивления

Схема расчёта сопротивления основания сваи исходит из предположения о сплошности грунтов, что невозможно по условиям их нагружения

Разделение сопротивления грунта на «лоб» и «бок» противоречит уменьшению с глубиной усилий в стволе сваи

Определение осадки свайного фундамента меньше осадки условного жесткого фундамента

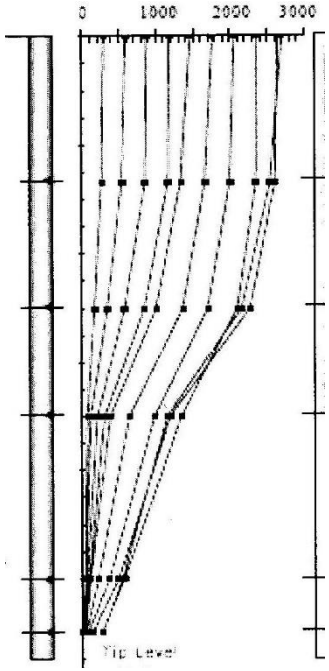
Испытание сваи статической нагрузкой не соответствует режиму нагружения сваи в фундаменте сооружения

Эффекты взаимодействия свай

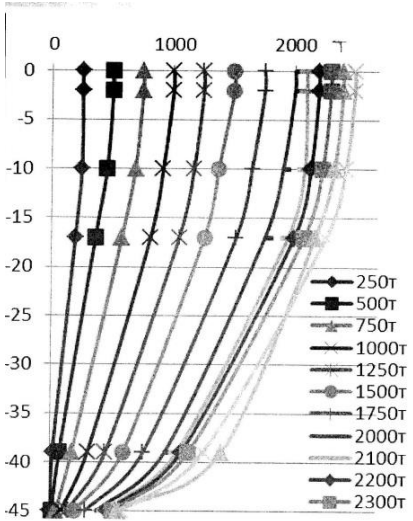
- Несущая способность одиночной сваи больше, чем сваи в группе
- Сопротивление свай внутри группы с общим ростверком меньше периметральных
- Свая даёт дополнительную осадку от действия соседних свай, не связанных с ней общим ростверком
- Нагружение сваи приводит к появлению трещин в глинистых грунтах и поверхностей скольжения в песчаных, что сопровождается разгрузкой локальных областей внутри основания сваи
- Расчёты сопротивления грунта под нижним концом сваи и по боковой поверхности дают сумму меньшую, чем внешняя вдавливающая сила
- Свайный фундамент действует на основание не как условный жёсткий фундамент вследствие распределения упругих и пластических деформаций не только под нижними концами свай, но и на боковой периферии основания каждой сваи
- Испытание сваи ступенями вдавливающей силы не даёт объяснение изменению сопротивления в ходе нагружения, не даёт возможности разделить деформации основания на упругие и пластические

Испытания длинных свай

- Усилия в стволе сваи длиной 54 м (Бангкок)



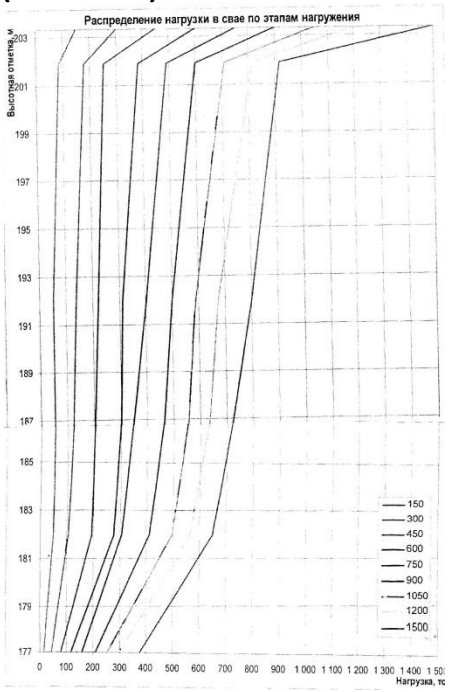
- Усилия в стволе сваи длиной 45 м (Вьетнам)



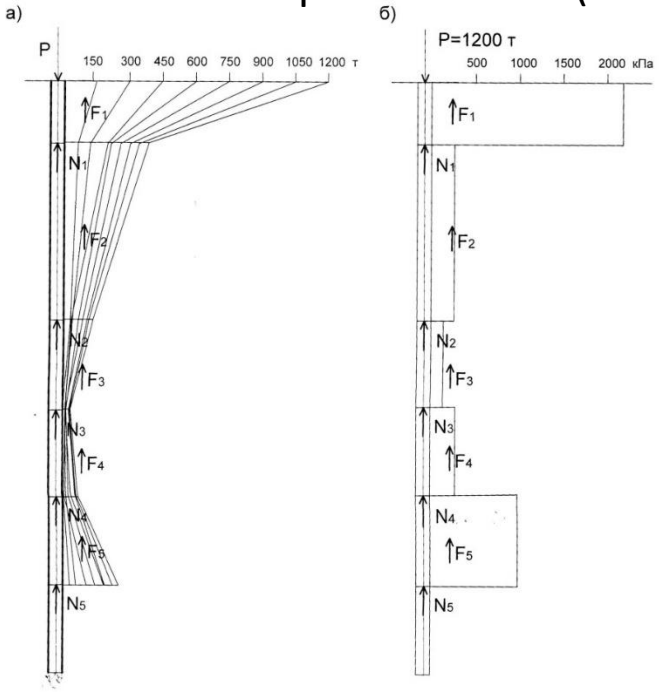
- Тер-Мартиросян З.Г., Тер-Мартиросян А.З., Сидоров В.В. Взаимодействие длинных свай с окружающим грунтом с учетом нелинейных и реологических свойств в условиях высотного строительства // Екатеринбург, 2019.

Испытания длинных свай

- Усилия в стволе сваи (Минск)



- Сила (а) и напряжение (б) трения на боковой поверхности сваи (Минск)



Стандартная и расширенная схемы к расчёту сопротивления висячей сваи

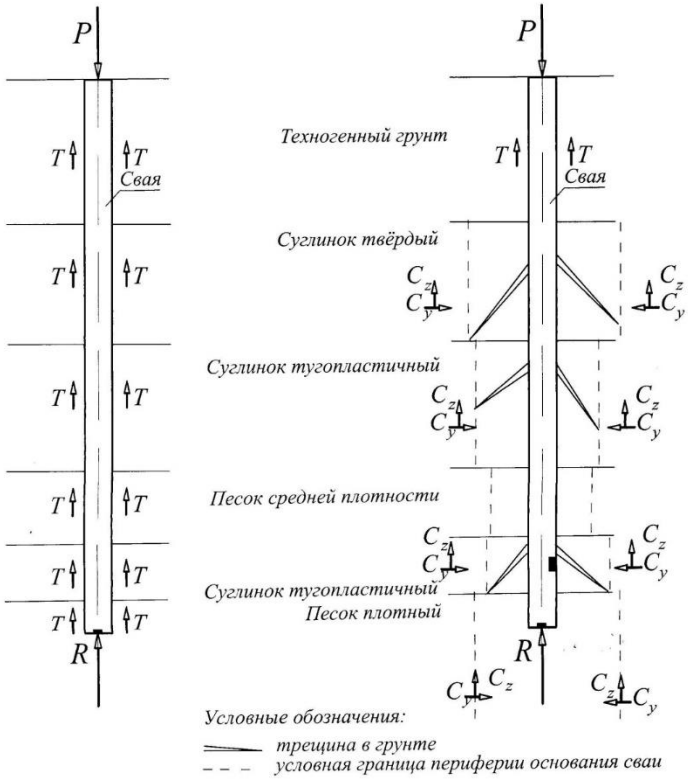


Схема сопротивления висячей сваи вдавливающей силе

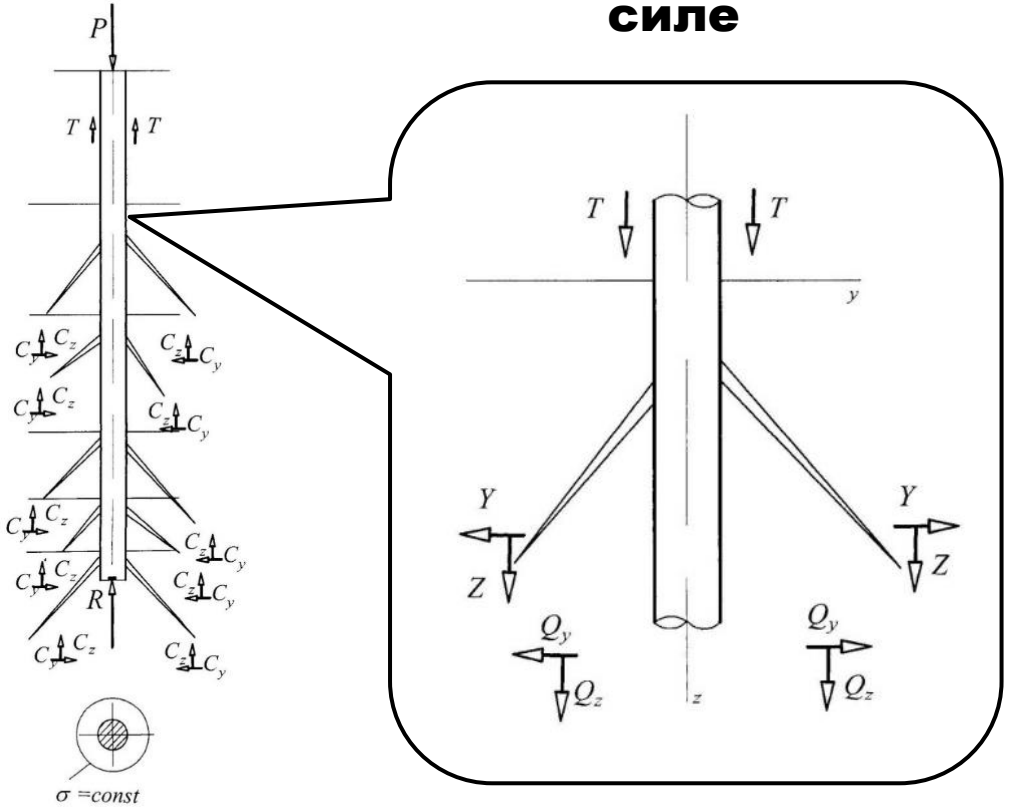


Схема передачи усилий от сваи на грунты: упругие − на периферии основания, трения − на боковой поверхности

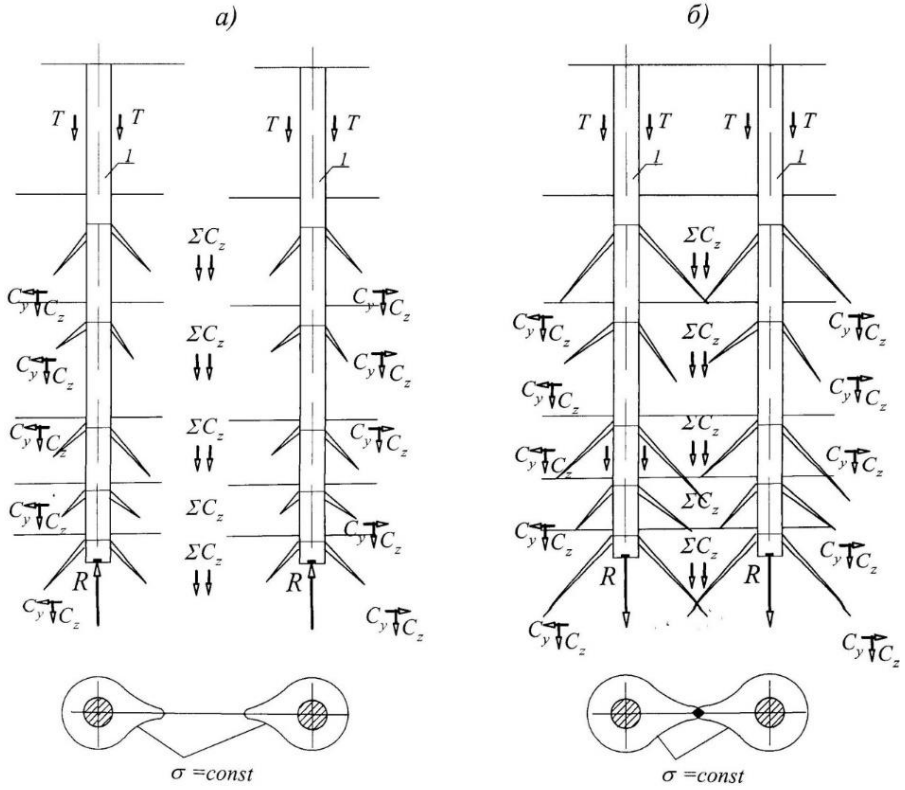
$$C_y = Q_y + Y$$

$$C_z = Q_z + Z$$

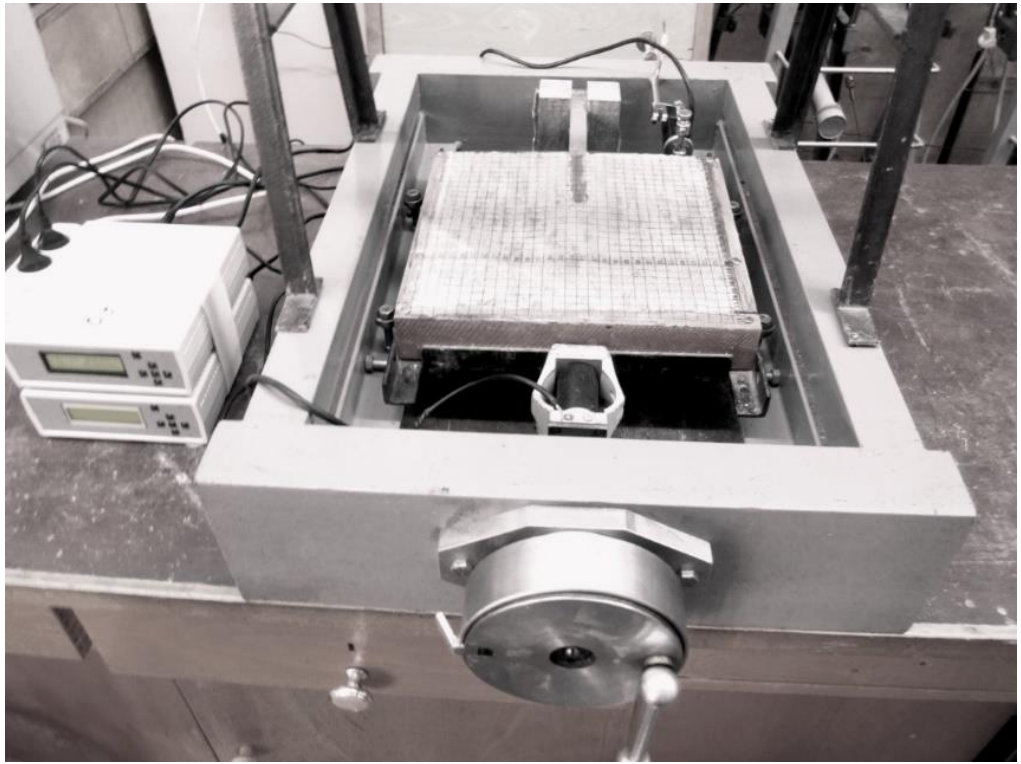
Q_y и Q_z - *упругие силы сопротивления грунта на периферии основания*

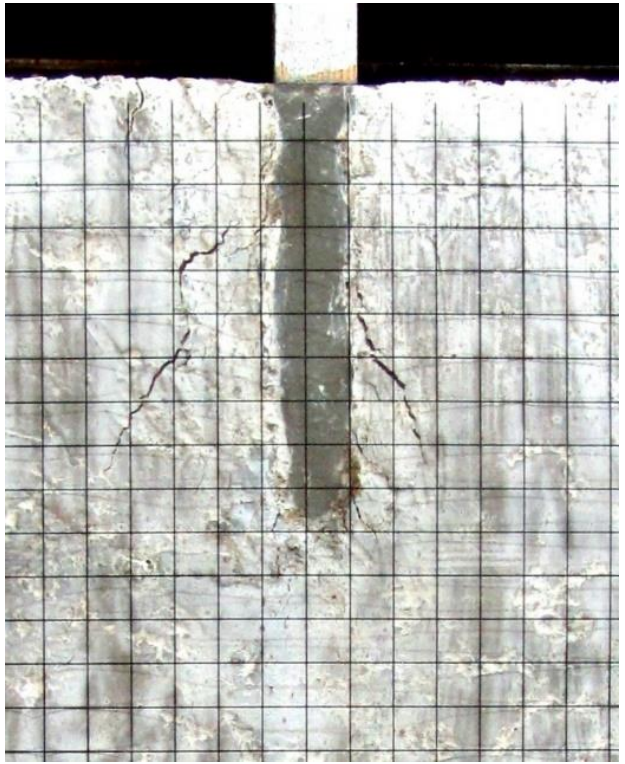
Y и Z - *силы сопротивления грунта на продолжении трещин*

Взаимодействие соседних свай: упругое (а) и пластическое в местах наложения оснований свай (б)



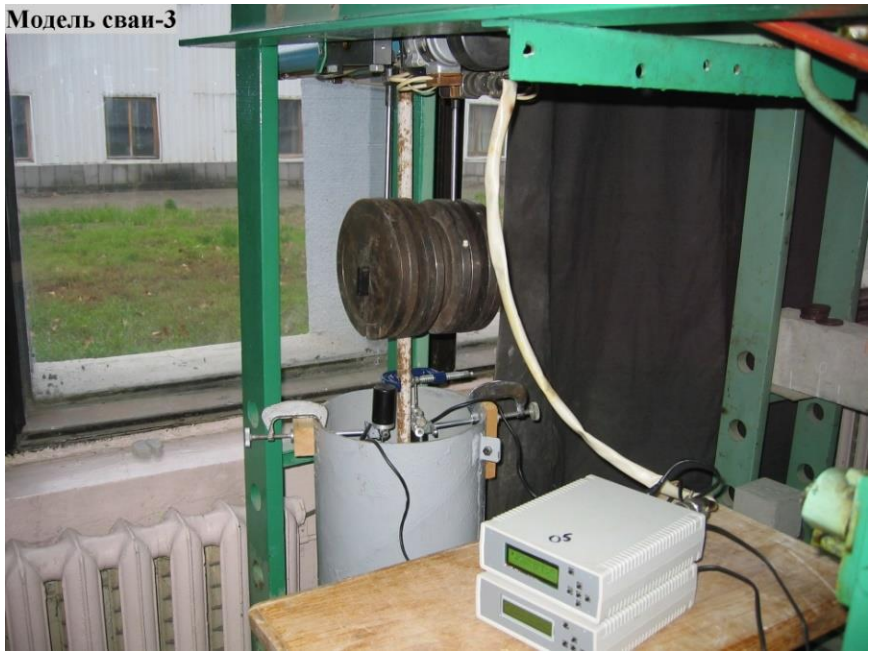
Общий вид лабораторного стенда для испытания модели сваи в плоском лотке





Испытания моделей сваи методом ПВН в цилиндрическом лотке

Фото стенда для испытания модели сваи методом ПВН



Модель сваи после разрушения керна

Графики сопротивления (а) и скорости изменения сопротивления (б) грунта модели сваи

а)

б)

Изменения осадки модели сваи (а), скорости осадки (б) и ускорения (в) при действии постоянно возрастающей нагрузки (ПВН)

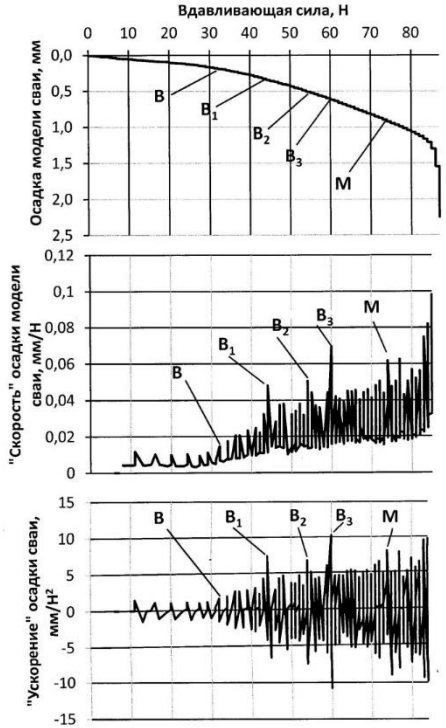
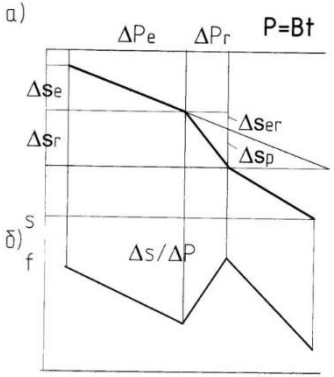


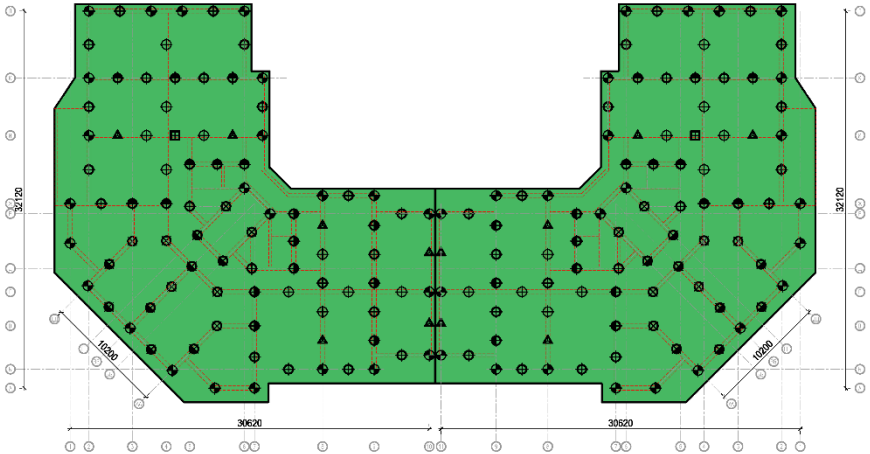
Схема цикла скорости осадки сваи

$fI = (sI+1-sI)/(PI+1-PI)$, мм/кН,

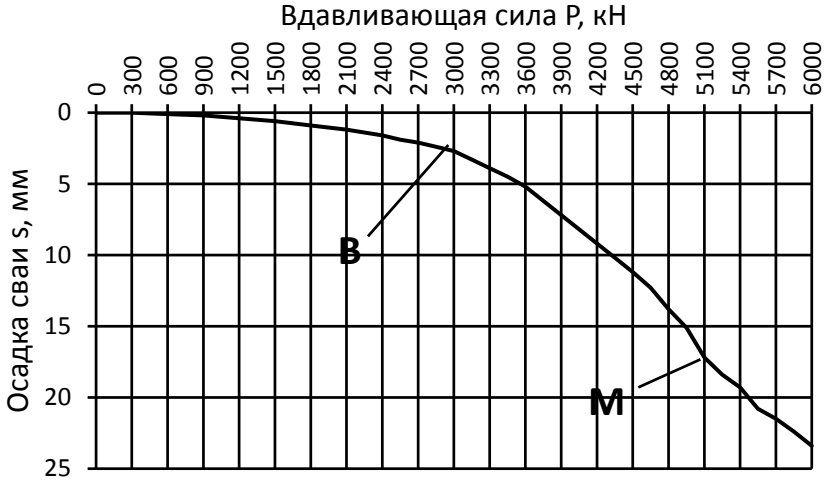
$gI=(fI+1-fI)/(PI+1-PI)$, мм/кН^2

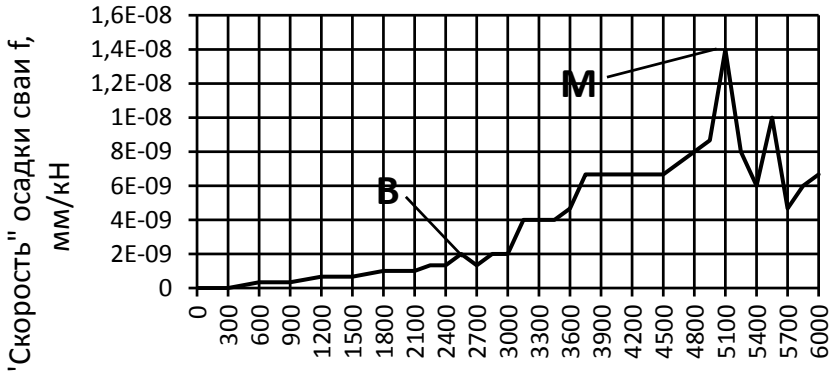


Испытания сваи № 165 по ул. Виноградная, Сочи (D=820 мм, длиной 11,0 м)



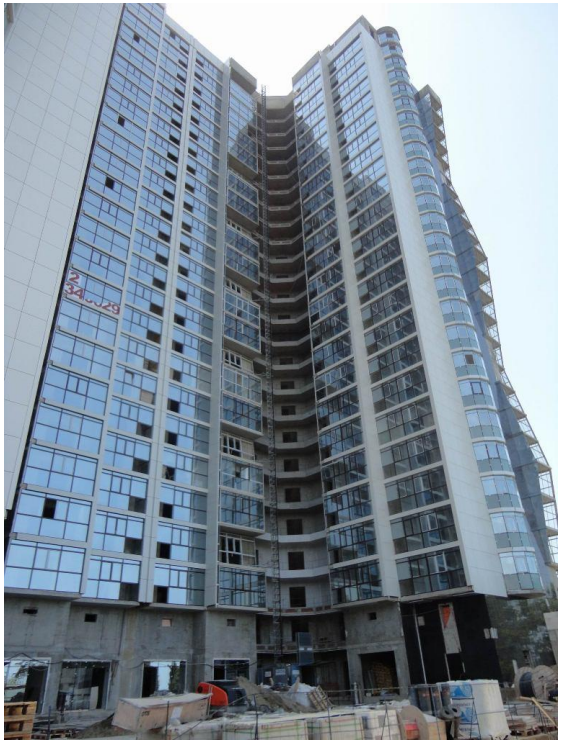
Результаты испытания сваи № 165 по ул. Виноградная, Сочи (D=820 мм, длиной 11,0 м)



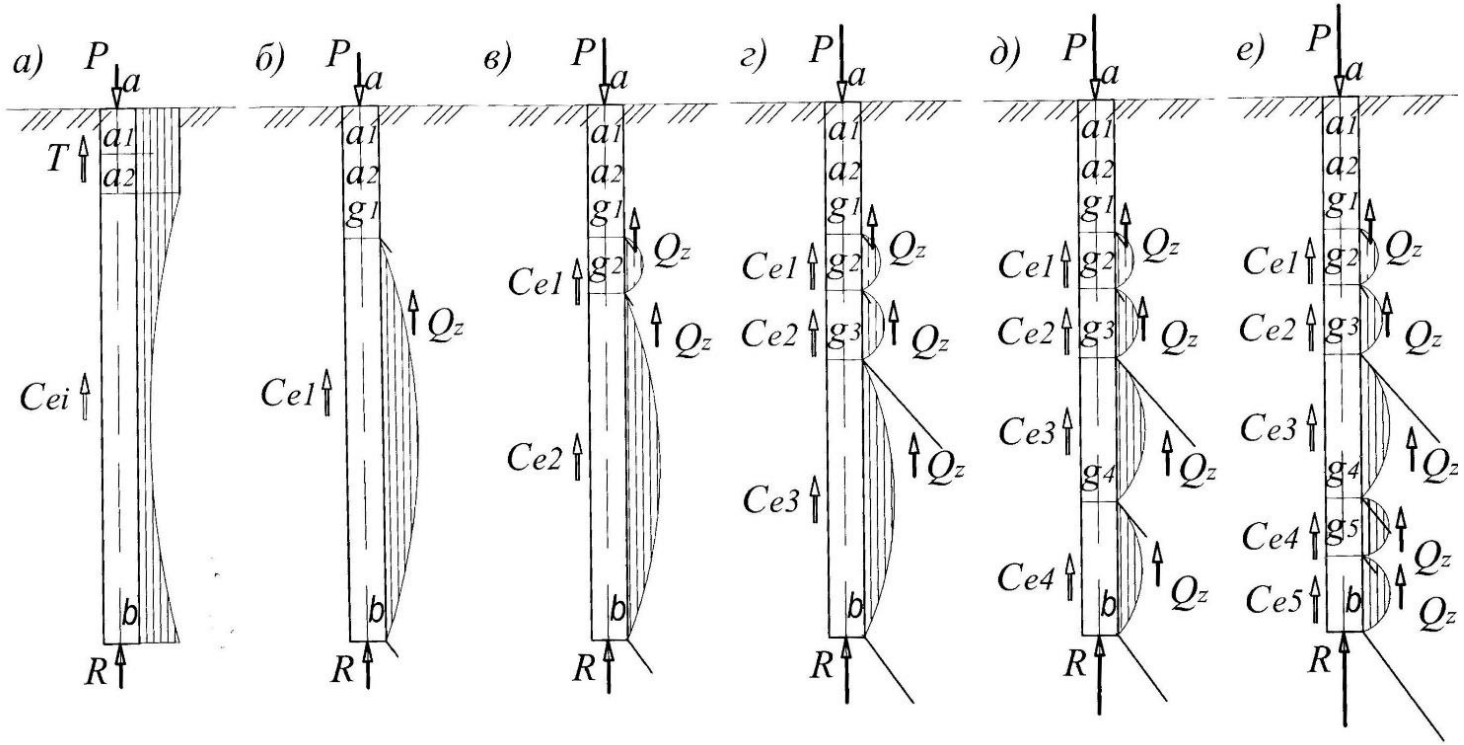


Этапы возведения высотного здания

Итоговый вид высотного жилого здания



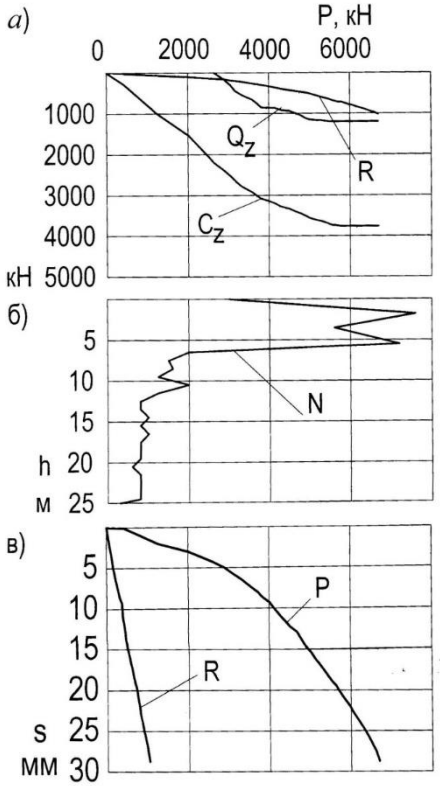
Развитие сопротивления основания висячей сваи при увеличении вдавливающей силы



Распределение и изменение усилий в основании сваи при увеличении вдавливающей силы

- **а)** в начале нагружения сопротивление грунта является упругим по длине сваи, за исключением участка вблизи дневной поверхности грунта, где грунт сразу же переходит в пластическое состояние (трение) на боковой поверхности (БП);
- **б)** поверхность трения заканчивается там, где прочность грунта вблизи БП становится больше прочности того же грунта в массиве. В точке g1 образуется трещина сдвига и отрыва грунта. Ниже точки g1 грунт вблизи БП сопротивляется упруго. В кончике трещины грунт сопротивляется упруго и пластически;
- **в)** напряжения в грунте вблизи БП становится больше прочности того же грунта в массиве, и в точке g2 образуется вторая трещина сдвига и отрыва грунта. Ниже точки g2 грунт вблизи БП сопротивляется упруго. В кончике трещины грунт сопротивляется упруго и пластически;
- **г) – е)** ситуация повторяется столько раз, сколько всплесков скорости осадки покажет испытание сваи постоянно возрастающей нагрузкой (методом ПВН). При этом упругие напряжения в грунте вблизи БП не превышают предельных значений, участки их распределения разделены трещинами сдвига и отрыва.
- Очевидно, что сжимающие усилия в стволе сваи уменьшаются с глубиной:
- в сечении g1: $N_1=P-C_1$, в сечении g2: $N_2=P=C_1-C_2$, и т. д., в сечении b: $R=P-C_1-\ldots-C_5$.

Развитие сил сопротивления основания висячей сваи при увеличении вдавливающей силы



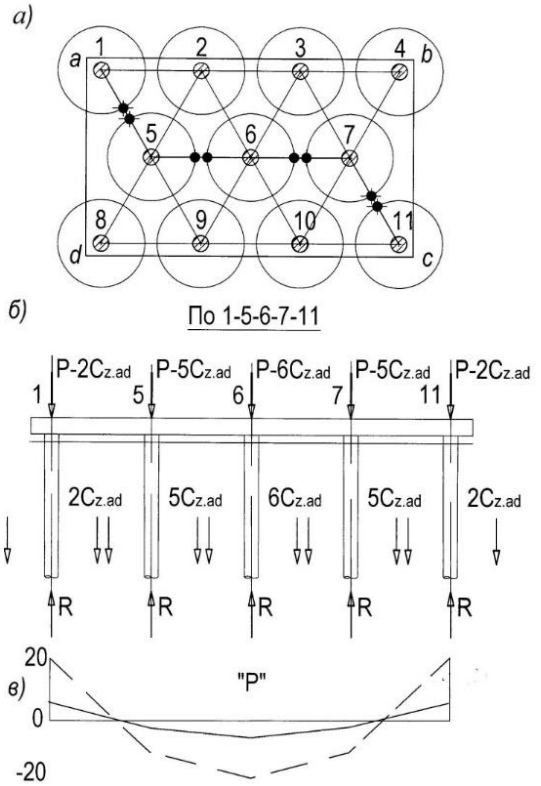
P – постоянно возрастающая вдавливающая сила, кН;
R – сопротивление грунта под нижним концом сваи, кН;

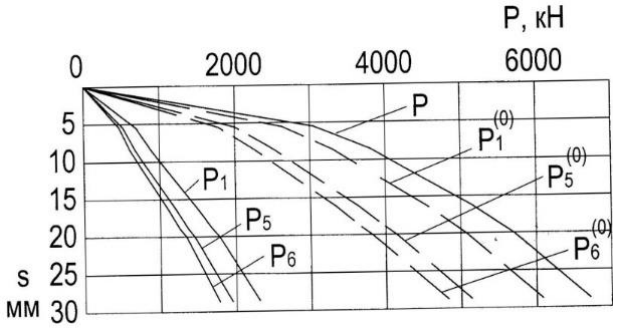
Q_z – сопротивление грунта на периферии основания сваи, кН;

C_z – упругое сопротивление на боковой поверхности сваи, кН;

N – распределение по длине сваи сжимающей силы в её стволе, кН.

Учёт уменьшения сопротивления одинаковых свай в группе





Cz.ad – силы действия соседних свай с коэффициентами, учитывающими число соседей, кН;

$P^{(0)}$– сопротивление свай с учётом действия соседних свай, кН;

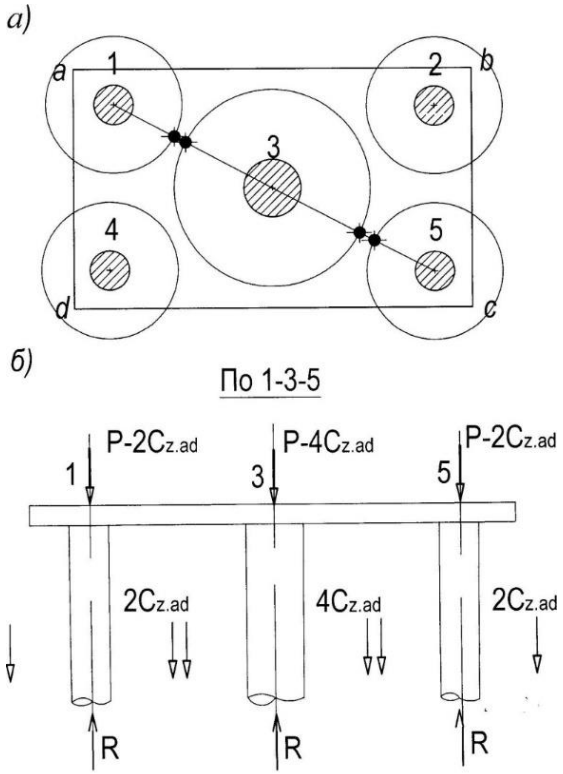
P – сопротивление свай с учётом распределения усилий ростверком, кН;

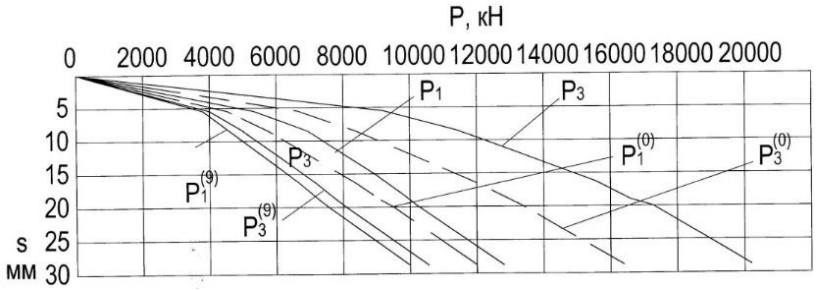
“P”– эпюры сопротивления свай до и после выравнивания ростверком, кН.

Учёт уменьшения сопротивления одинаковых свай в группе

- 1. При шахматной расстановке одинаковых свай (как на слайде № 15), дополнительные силы C_{ad}, действующие со стороны 6-ти таких же свай, равны **$6 \times C_{ad}/6$** каждая, от 2-х таких свай – **$2 \times C_{ad}/6$**, от 5-ти – **$5 \times C_{ad}/6$**.
- 2. Если сваи разные (как на слайде № 17), то на сваю № 1 будут действовать силы **$(1 \times C_{ad}^{(3)}/6) + (1 \times C_{ad}^{(4)}/6)$**, где **$C_{ad}^{(3)}/6$** – дополнительные силы от сваи № 3, а **$C_{ad}^{(4)}/6$** от сваи № 4.
- 3. На сваю № 4 будут действовать дополнительные силы **$4 \times C_{ad}^{(4)}/6$**.
- 4. Все силы сопротивления свай рассчитаны для одного (предельного) значения осадки фундамента. Относительная разность между средним значением сопротивления и частным значением умножается на дополнительную силу, чтобы получить частное сопротивление в следующей итерации.

Учёт уменьшения сопротивления свай разных диаметров в группе





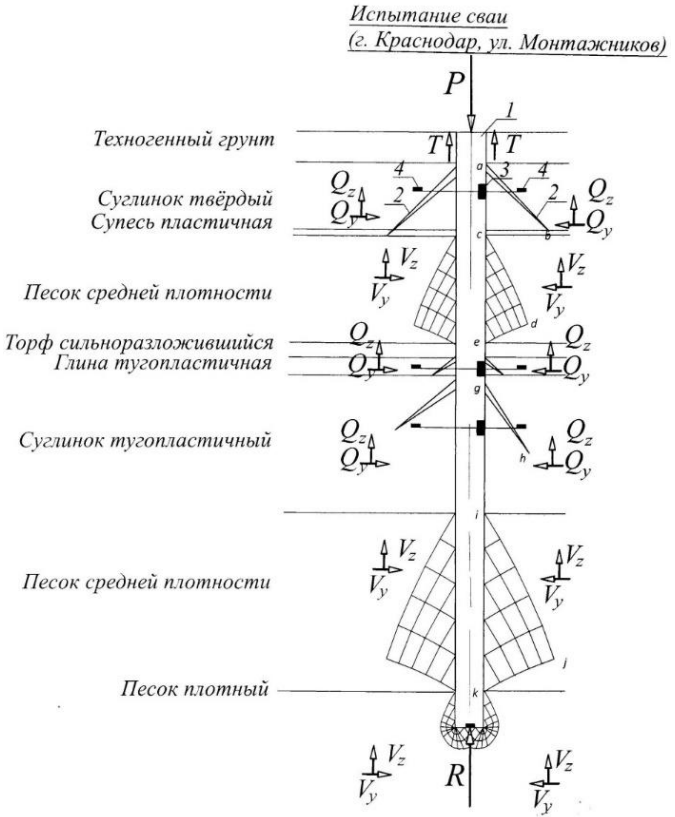
Cz.ad – силы действия соседних свай с коэффициентами, учитывающими число соседей, кН;

$P^{(0)}$– сопротивление свай с учётом действия соседних свай, кН;

P – сопротивление свай с учётом распределения усилий ростверком, кН;

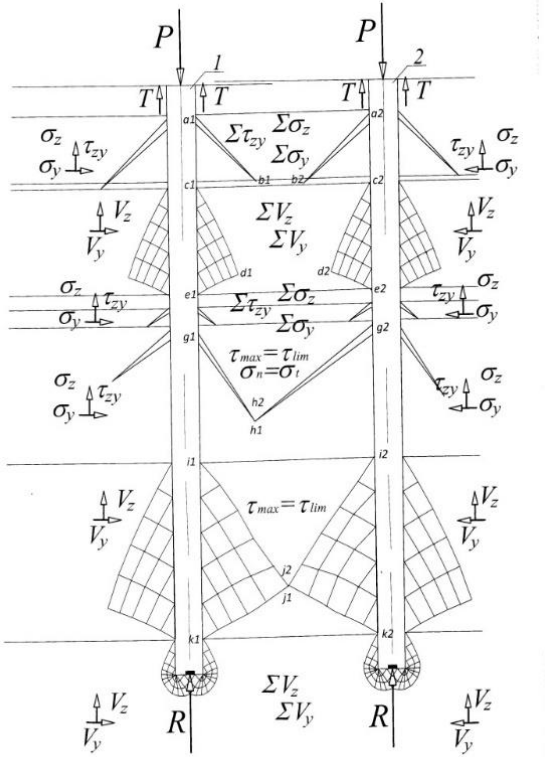
“P”– эпюры сопротивления свай до и после выравнивания ростверком, кН.

Схема передачи усилий от сваи на грунты основания



При сложном напластовании должны учитываться области предельного состояния как глинистых грунтов, так и песков – с помощью датчиков деформаций грунта и глубинных марок

Взаимодействие соседних свай в момент слияния пластических областей их оснований



Примеры реализации проектов с жесткой заделкой свай и с отделением свай от фундаментной плиты

Решения с жесткой заделкой свай

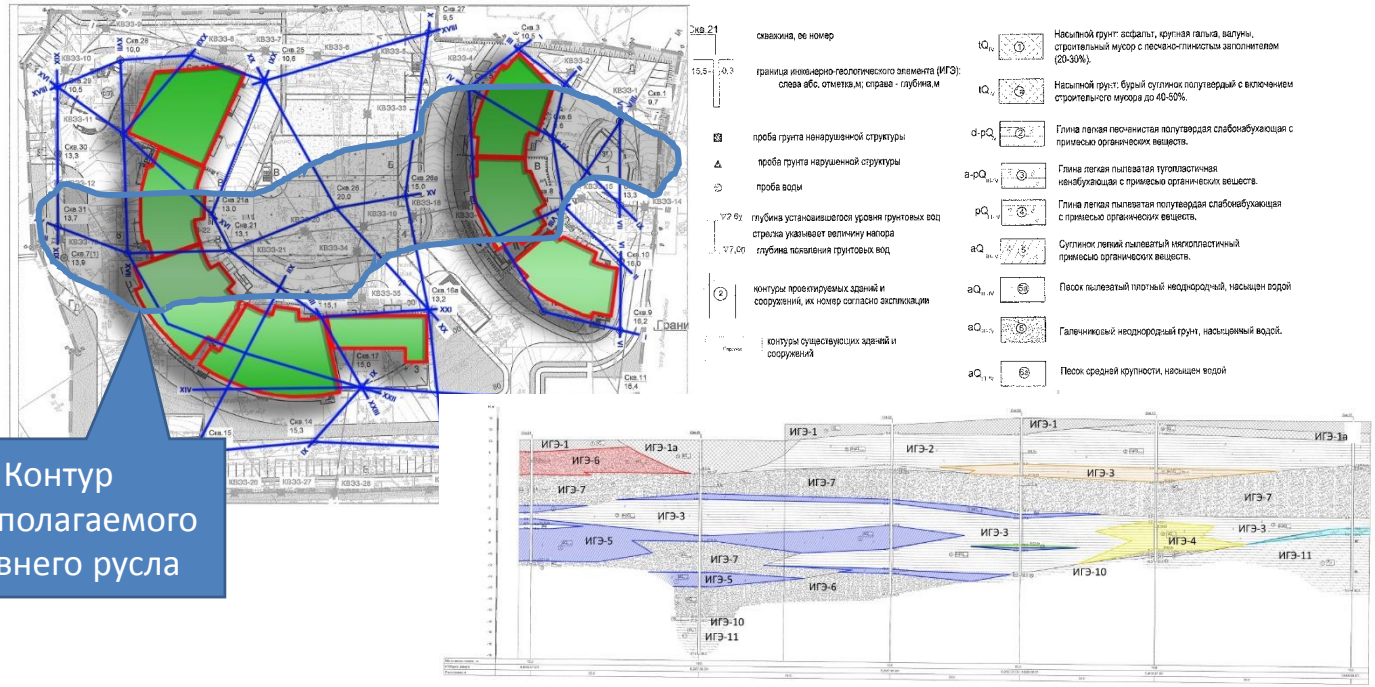
Высотный жилой комплекс в г. Сочи

Общий вид жилого комплекса «Парк Горького» в г. Сочи

Решения с жесткой заделкой свай

Высотный жилой комплекс в г. Сочи

Контур древнего палеорусла

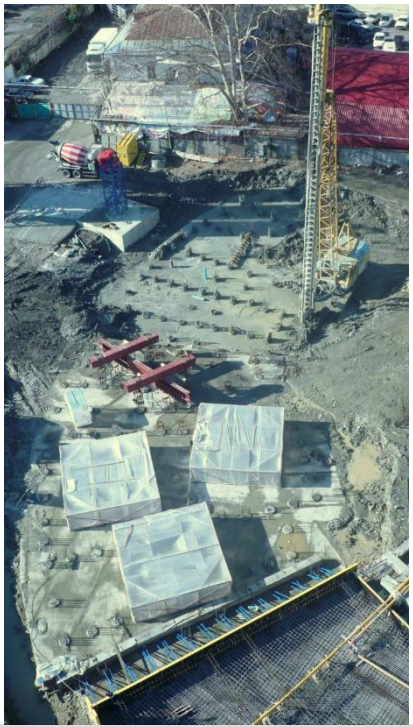


Контур предполагаемого древнего русла

Решения с жесткой заделкой свай

Высотный жилой комплекс в г. Сочи

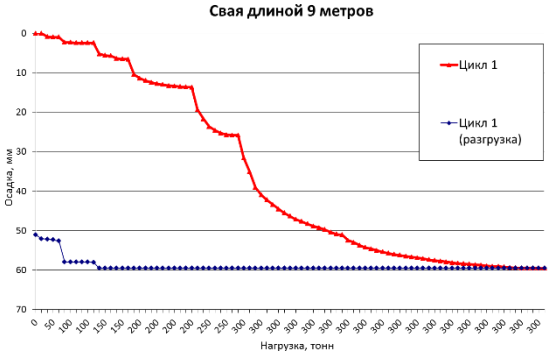
Процесс испытания свай 1 очереди строительства

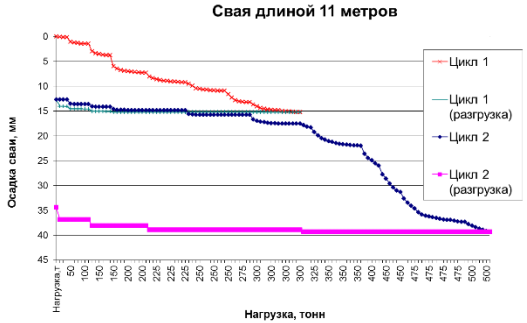


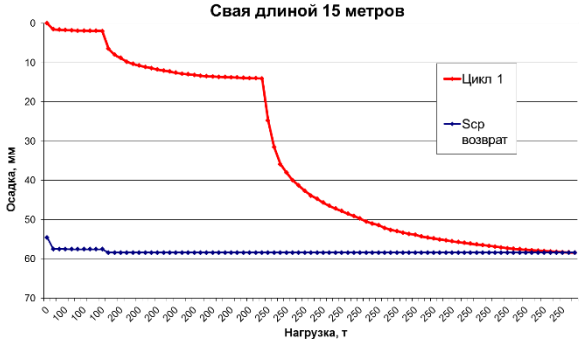
Решения с жесткой заделкой свай

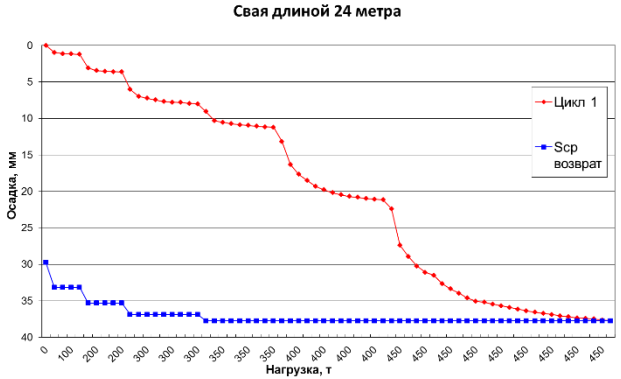
Высотный жилой комплекс в г. Сочи

Испытания свай 2 очереди строительства, попадающих в пятно древнего русла





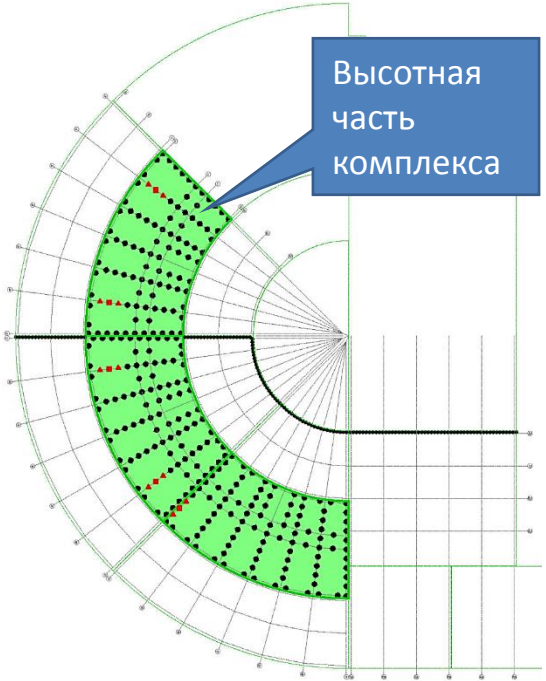




Решения с жесткой заделкой свай

Высотный жилой комплекс в г. Сочи

Схема свайного поля 2 очереди строительства



Решения с жесткой заделкой свай

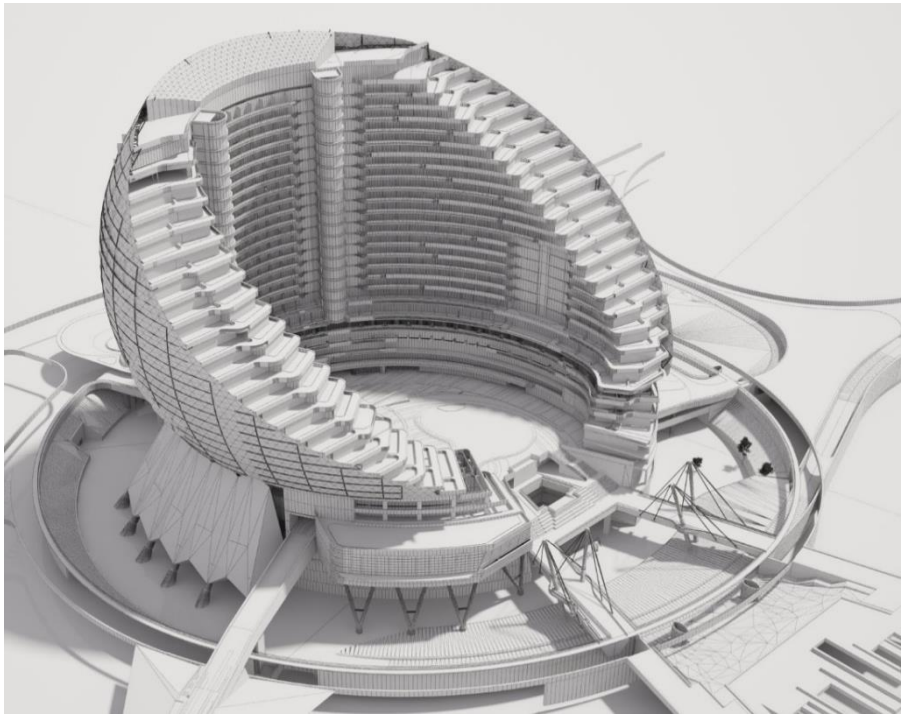
Высотный жилой комплекс в г. Сочи

Этапы строительства жилого комплекса

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

Общий вид комплекса



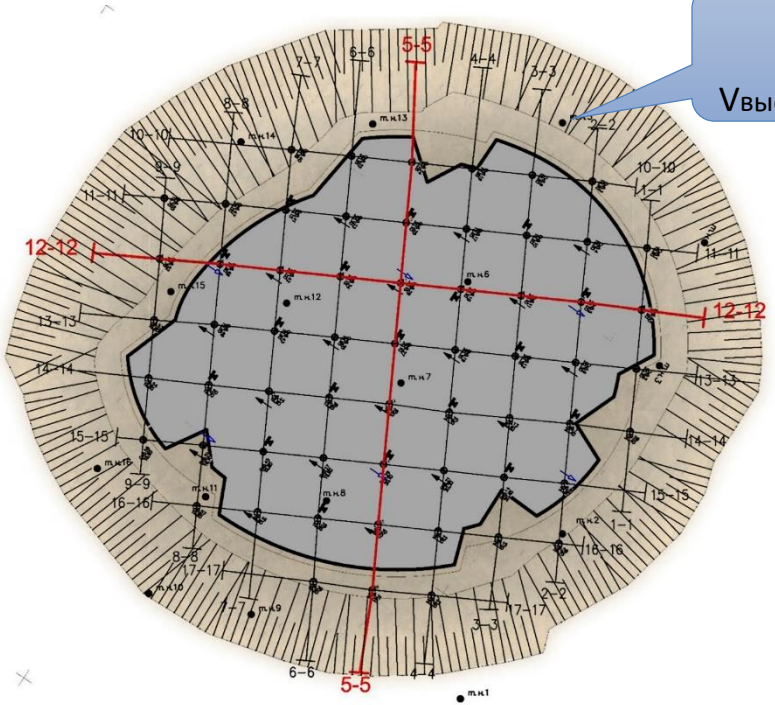
Характеристики здания:

- Надземных этажей: 28
- Подземных: 3-4
- Высота от ур. земли: 110,85 м
- Коробчатый фундамент
- Фундаментная плита 16867 м2 без швов
- Сейсмичность площадки: 9 баллов

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

Инженерно-геологические изыскания

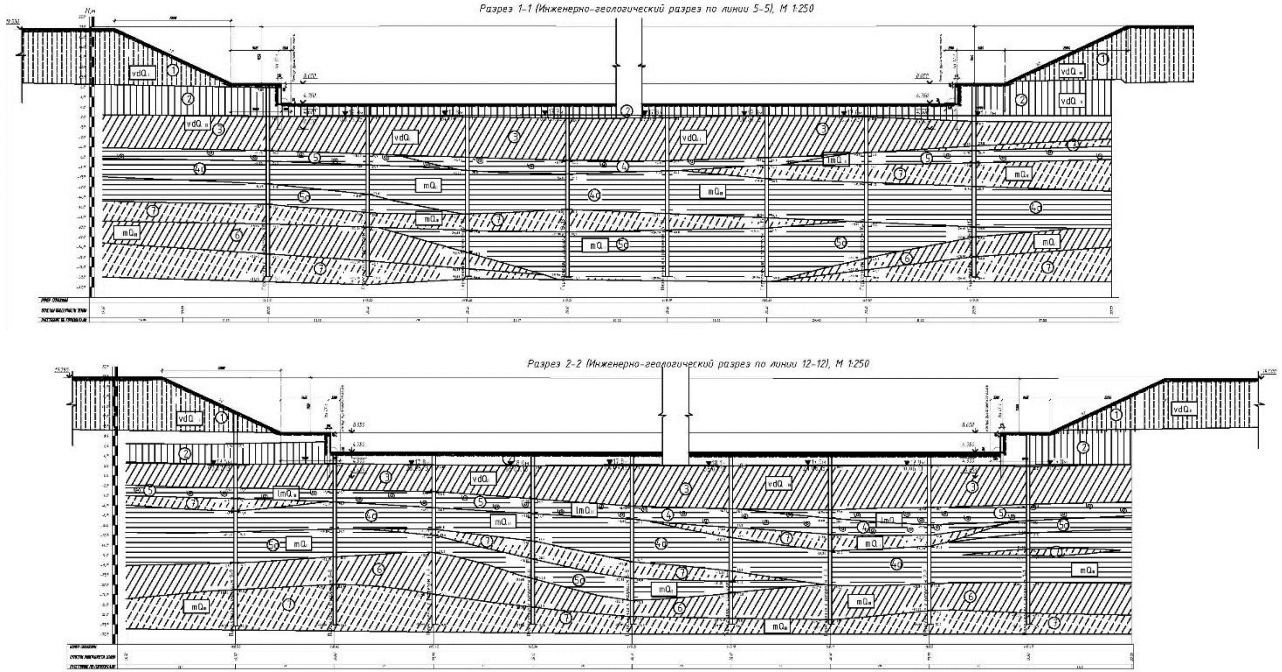


Бровка котлована
Здания
Vвыемки=458 340 куб.м.!!!

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

Инженерно-геологические разрезы с контуром котлована



Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

Физико-механические свойства грунтов

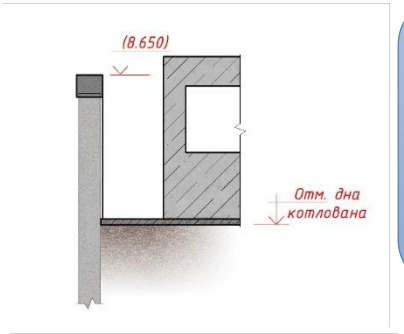
№ ИГЭ	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011	Природная влажность, д. ед.	Плотность частиц грунта, г/см	Плотность грунта природной влажности, г/см³			Плотность в сухом состоянии	Пористость, д.ед.	Коэффициент пористости	Влажность на границе, д.ед.		Число пластичности, д.ед.	Коэффициент водонасыщения, д.ед.	Показатель текучести	Модуль общей деформации (в интервале давлений 0,1-0,2), МПа			Модуль общей деформации (в интервале давлений 0,2-0,3), МПа			Модуль общей деформации (в интервале давлений 0,5-0,6), МПа			Угол внутреннего трения, град.			Удельное сцепление, кПа			Гранулометрический состав										Относительная деформация набухания без нагрузки ε_{sw},д.е	Давление набухания Psw, МПа	Влажности набухания ,Wsw д.ед	Относительная деформация усадки ,esh д.ед	Относительная деформация просадочности, д.е
				Нормативное значение	Расчетные значения по деформациям при α=0,85	Расчетные значения по несущей способности при α=0,95				Текучести	Раскатывания				Нормативное значение	Расчетные значения по деформациям при α=0,85	Расчетные значения по несущей способности при α=0,95	Нормативное значение	Расчетные значения по деформациям при α=0,85	Расчетные значения по несущей способности при α=0,95	Нормативное значение	Расчетные значения по деформациям при α=0,85	Расчетные значения по несущей способности при α=0,95	Нормативное значение	Расчетные значения по деформациям при α=0,85	Расчетные значения по несущей способности при α=0,95	Нормативное значение	Расчетные значения по деформациям при α=0,85	Расчетные значения по несущей способности при α=0,95	Количество по массе в % частиц размером >10,0	10,0-5,0	5,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	< 0,005					
1	Супесь твердая светло-коричневая пылеватая просадочная	0,071	2,68	1,50	1,49	1,49	1,40	0,477	0,912	0,226	0,170	0,056	0,209	-1,81	18,2	17,1	16,3	23,2	22,1	21,4				14,3 11,3	13,3 10,9	12,6 10,6	26,8 16,1	23,8 14,9	21,9 14,2					0,2	1,2	5,6	25,2	34,0	16,3	17,4					0,013
2	Суглинок твердый рыжевато-коричневый пылеватый просадочный	0,135	2,70	1,65	1,64	1,63	1,46	0,461	0,856	0,274	0,187	0,086	0,427	-0,63	21,5	19,7	18,7	27,1	24,7	23,4				13,9 12,0	13,0 11,5	12,4 11,1	21,2 19,6	19,8 18,8	18,9 18,3					0,3	0,5	2,1	10,1	21,3	19,7	46,0					0,014
3	Суглинок мягкопластичный серовато-коричневый пылеватый	0,237	2,69	2,02	2,01	2,00	1,64	0,392	0,646	0,271	0,181	0,090	0,978	0,62	19,9	18,5	17,6	29,4	28,0	27,0				23,7 10,4	23,1 9,9	22,7 9,6	23,7 17,6	22,2 16,5	21,3 15,7		0,1	0,4	1,6	7,1	4,9	3,9	11,1	17,3	16,8	36,9					
4	Глина тугопластичная рыжевато-коричневая до коричневой пылеватая	0,255	2,73	2,00	1,99	1,98	1,59	0,415	0,711	0,395	0,197	0,198	0,963	0,29	24,9	23,2	22,1				50,4	47,8	46,1	22,6	20,2	18,8	31,0	27,4	25,2			4,8	3,4	12,2	11,3	4,6	5,9	9,0	9,3	39,3					
4а	Глина тугопластичная коричневая до серой песчанистая	0,290	2,73	2,01	1,99	1,98	1,56	0,429	0,754	0,419	0,223	0,197	0,991	0,34	27,3	24,7	23,1				58,1	54,4	52,1	23,9	21,8	20,6	29,0	26,1	24,3				5,7	14,9	17,4	4,7	10,2	7,2	6,7	33,1					
5	Глина полутвердая коричневая пылеватая слабонабухающая	0,219	2,72	2,04	2,03	2,02	1,67	0,387	0,631	0,406	0,201	0,205	0,942	0,10	46,1	41,0	37,9				77,8	72,5	69,1	25,3	24,3	23,6	38,0	36,4	35,4	0,3	0,4	2,0	3,2	3,4	5,4	5,2	9,2	14,2	14,5	42,1	0,061	0,084	0,261	0,111	
5а	Глина полутвердая коричневая до голубовато-серой песчанистая слабонабухающая	0,234	2,72	1,98	1,97	1,96	1,60	0,412	0,701	0,411	0,210	0,201	0,910	0,12	27,1	25,9	25,1				57,8	55,8	54,3	22,8	21,3	20,3	45,0	41,7	39,8		0,2	1,6	4,9	14,4	12,7	5,3	6,6	8,7	9,8	35,8	0,054	0,080	0,267	0,104	
6	Суглинок тугопластичный коричневый до серовато-коричневого песчанистый	0,214	2,69	2,02	2,01	2,00	1,66	0,381	0,617	0,270	0,181	0,089	0,931	0,37	24,7	22,4	21,0				56,9	51,0	47,4	24,9	24,1	23,5	21,7	19,3	17,8	1,3	3,8	5,5	5,8	6,1	7,0	6,7	18,8	11,9	18,2	14,8					
7	Супесь пластичная голубовато-серая до коричневой песчанистая	0,188	2,68	2,03	2,01	2,00	1,71	0,364	0,575	0,222	0,167	0,055	0,879	0,38	29,0	27,4	26,3				48,6	46,7	45,3	22,8	22,5	22,3	16,5	15,4	14,7		0,6	2,0	2,3	3,3	6,2	12,1	27,5	21,6	11,3	13,1					

Примечание:
Для ИГЭ-1;2;3 в числителе данные сдвига консолидированного дренированного, в знаменателе - неконсолидированного недренированного;
Для ИГЭ-4; 4а; 5; 5а; 6; 7 данные сдвига консолидированного дренированного.

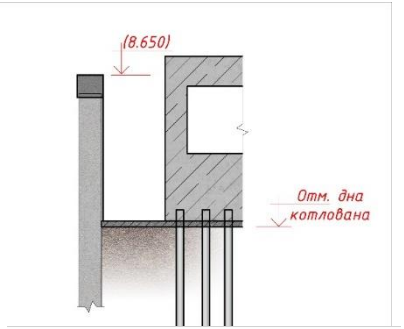
Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

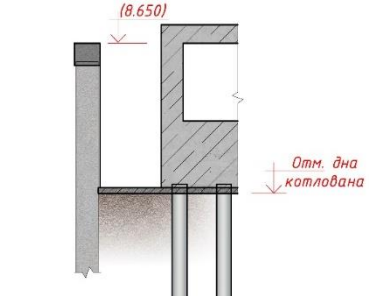
Общий вид комплекса



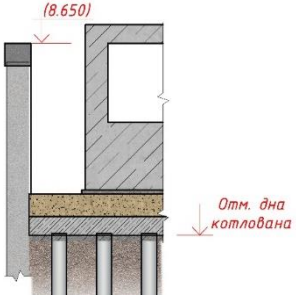
1. Фундамент на естественном основании



2. Забивные сваи с жесткой заделкой в ростверк



3. Буровые сваи + введение единой стилобатной части с высокой пространственной жесткостью

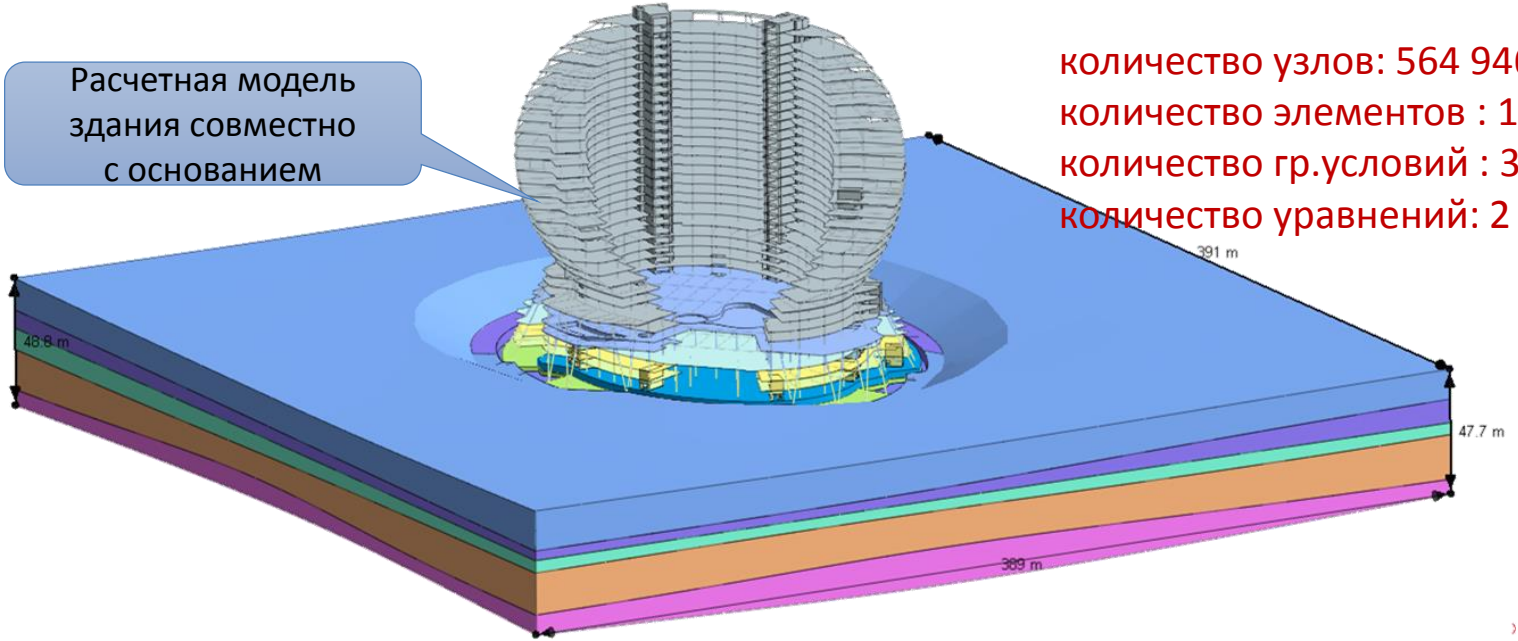


4. Свайный фундамент с промежуточной подушкой и единым жестким стилобатом

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

Пространственная модель системы



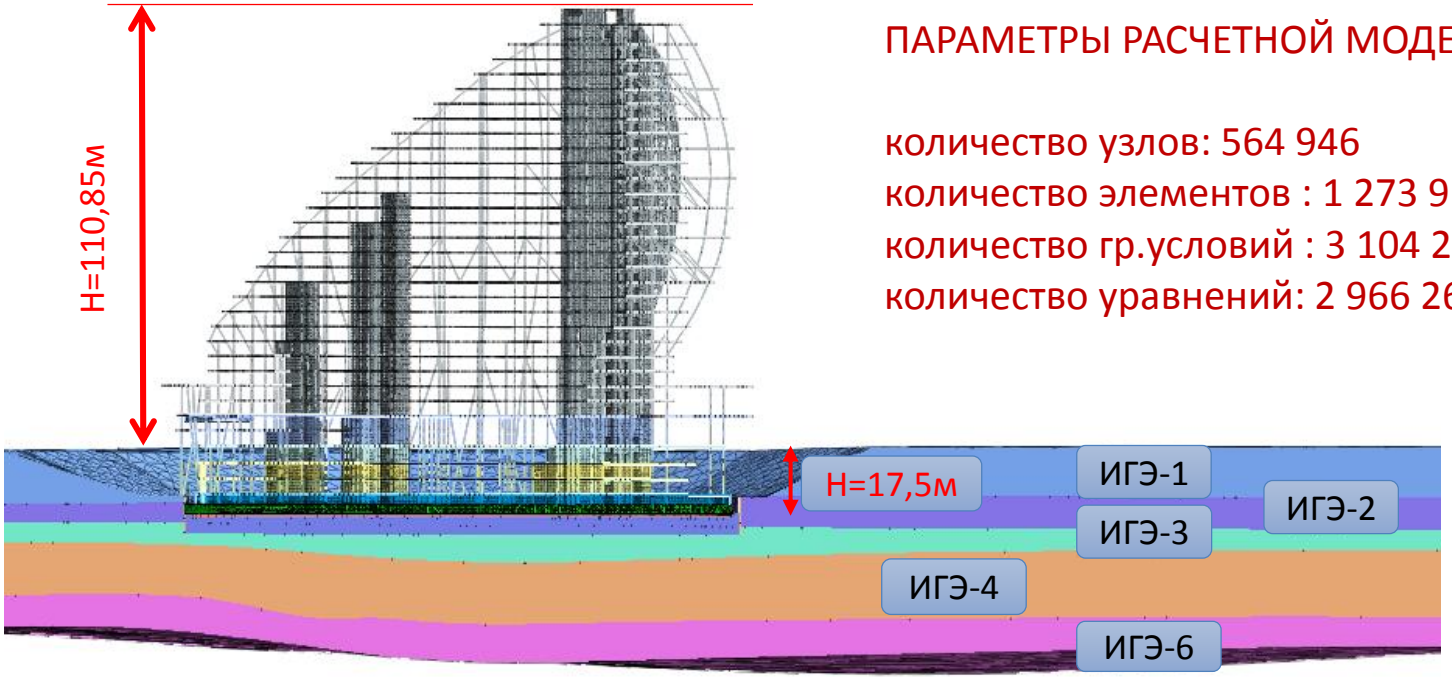
ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ:

количество узлов: 564 946
количество элементов : 1 273 915
количество гр.условий : 3 104 202
количество уравнений: 2 966 261

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Гостиничный комплекс Oyster в г. Анапа

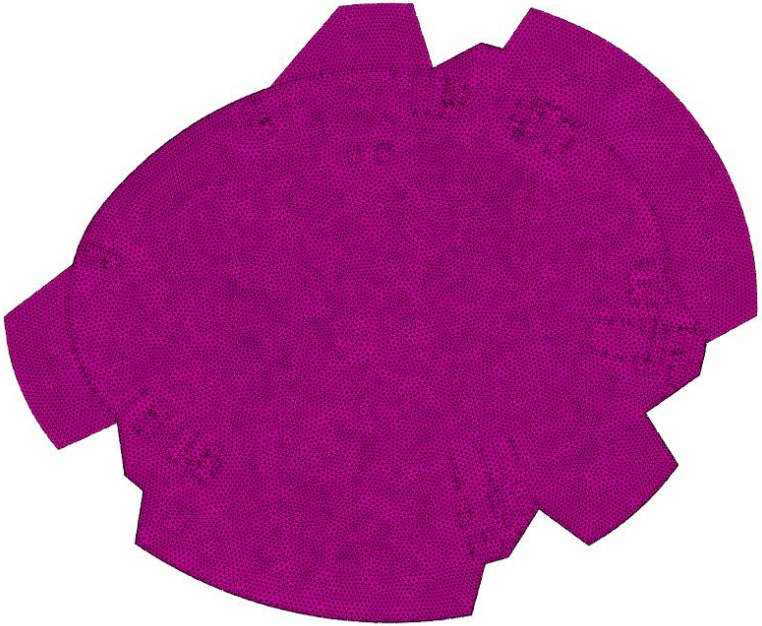
Сечение геотехнической модели

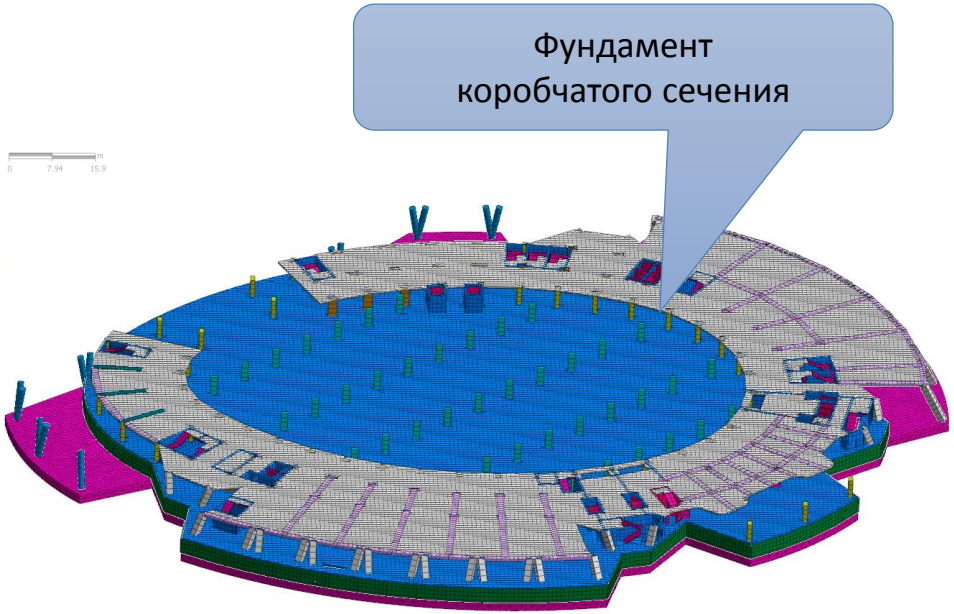


ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ:

количество узлов: 564 946
количество элементов : 1 273 915
количество гр.условий : 3 104 202
количество уравнений: 2 966 261

Вариант 1. Фундамент на естественном основании

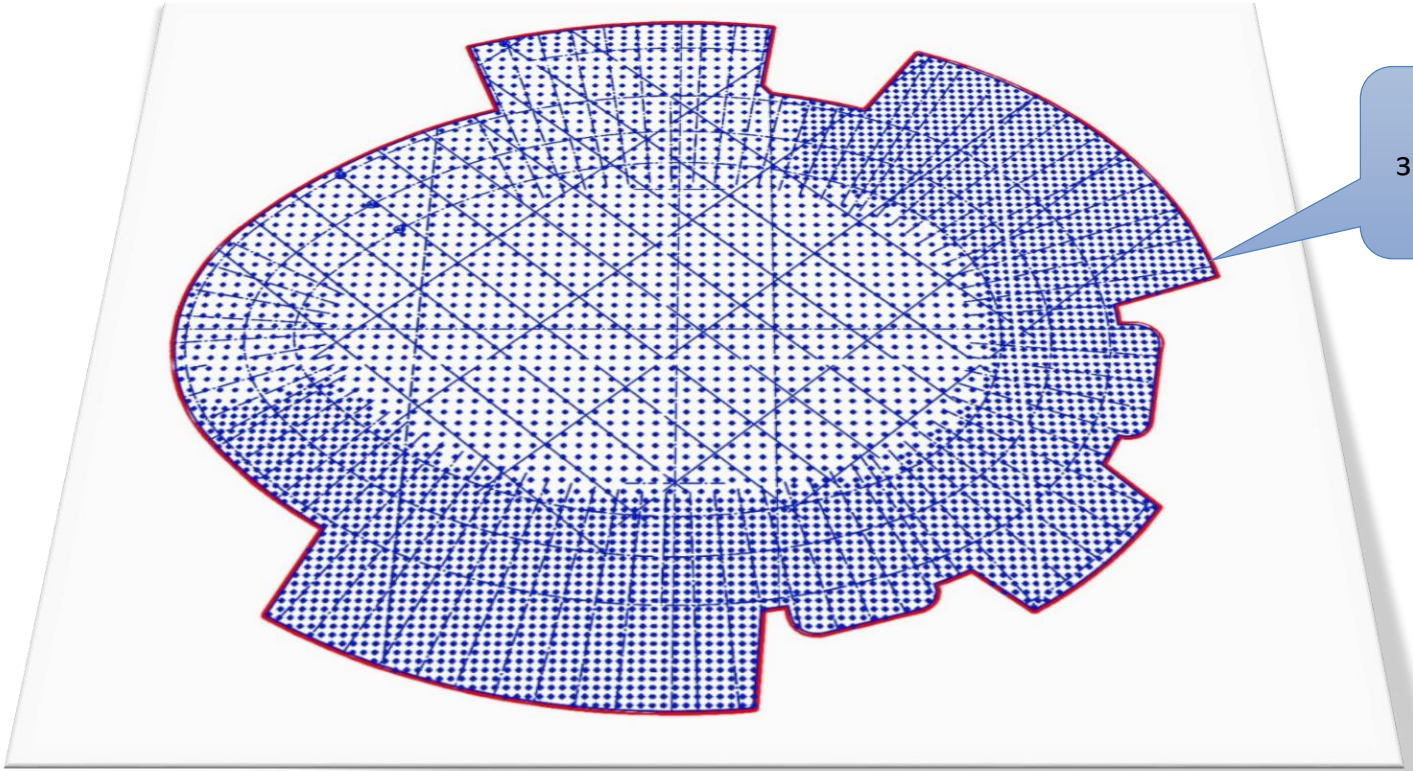




Площадь фундаментной плиты 16 867 м2
Расчетная нагрузка на основание 500 000 т

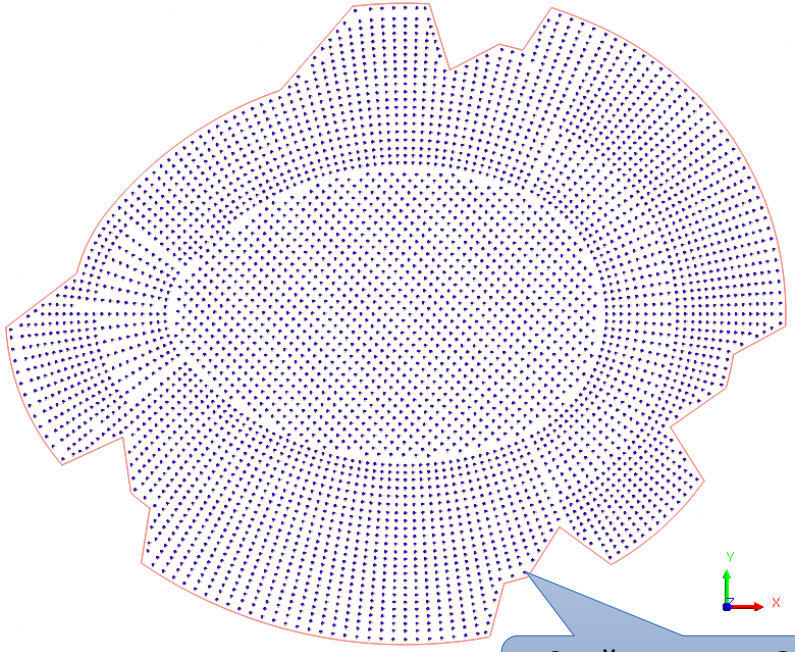
НГСТ=33,5 м

Вариант 2. Забивные сваи с жесткой заделкой в ростверк



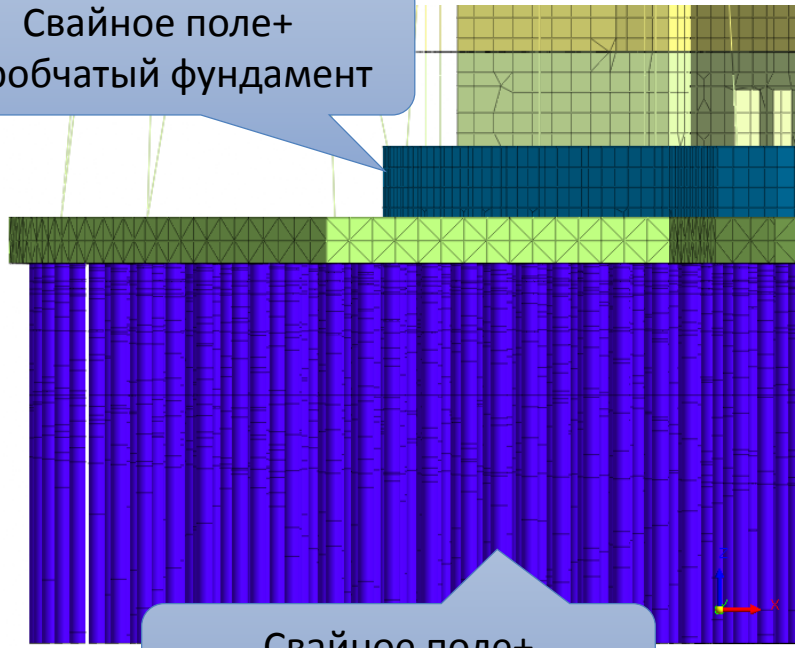
Свайное поле из забивных свай 400х400 ≈5000шт.

Вариант 3. Буровые сваи + введение единой стилобатной части с высокой пространственной жесткостью



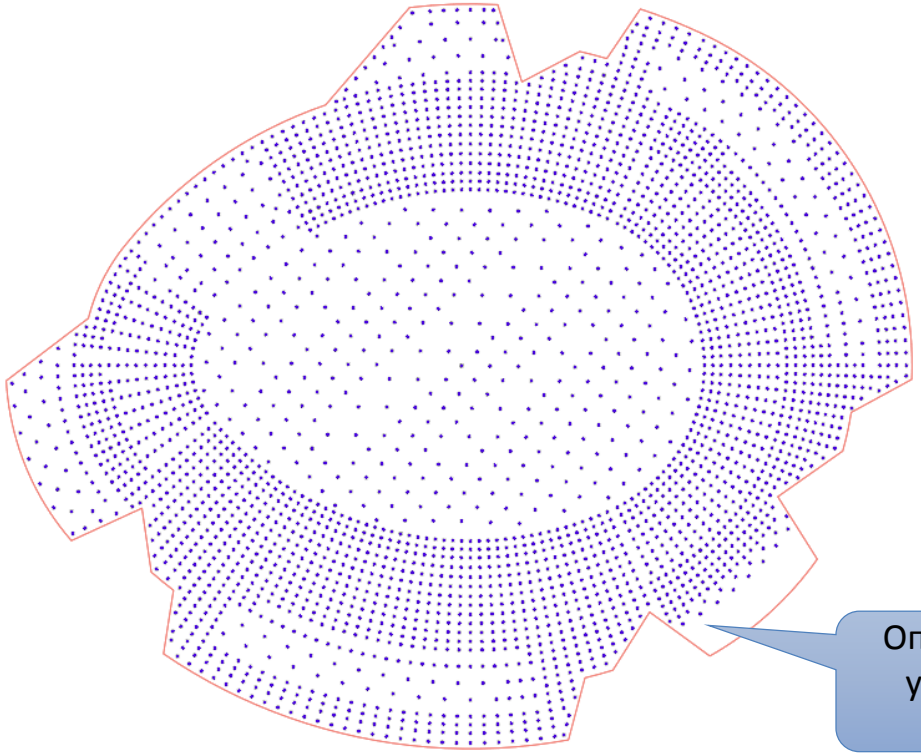
Свайное поле Сб d630
4593шт.

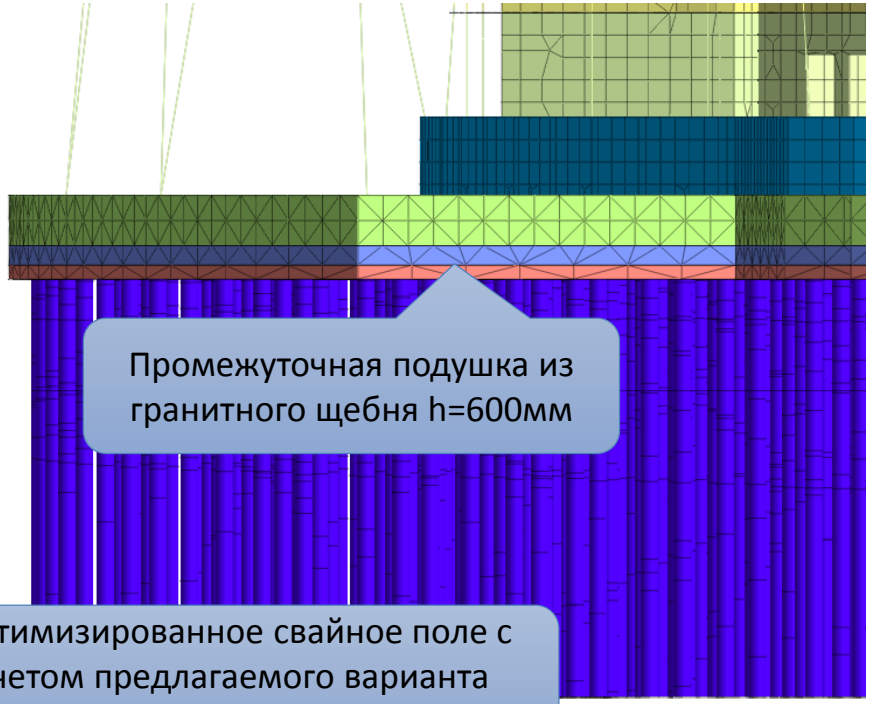
Свайное поле+
коробчатый фундамент



Свайное поле+
коробчатый фундамент

Вариант 4. Свайный фундамент с промежуточной подушкой и единым жестким стилобатом

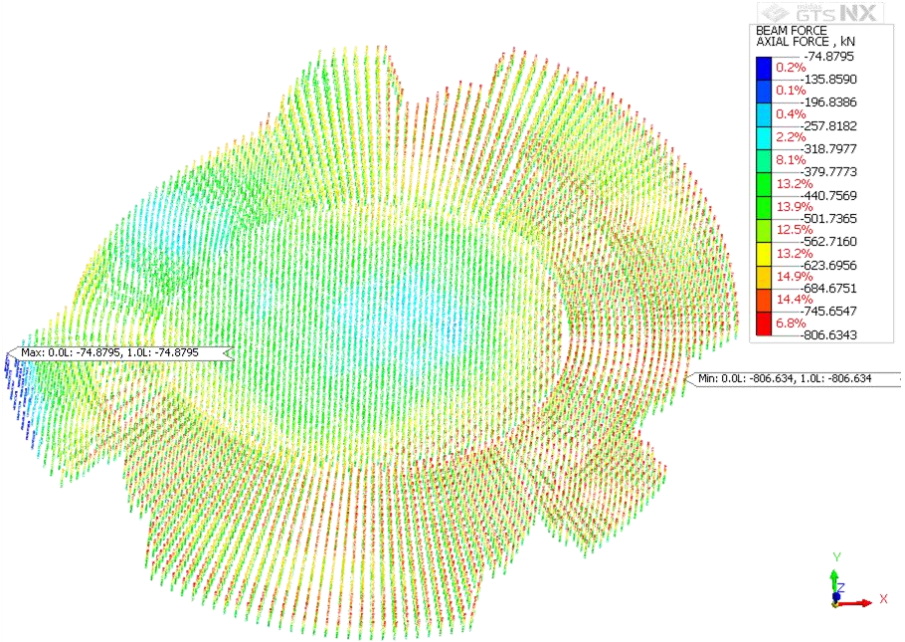




Промежуточная подушка из гранитного щебня h=600мм

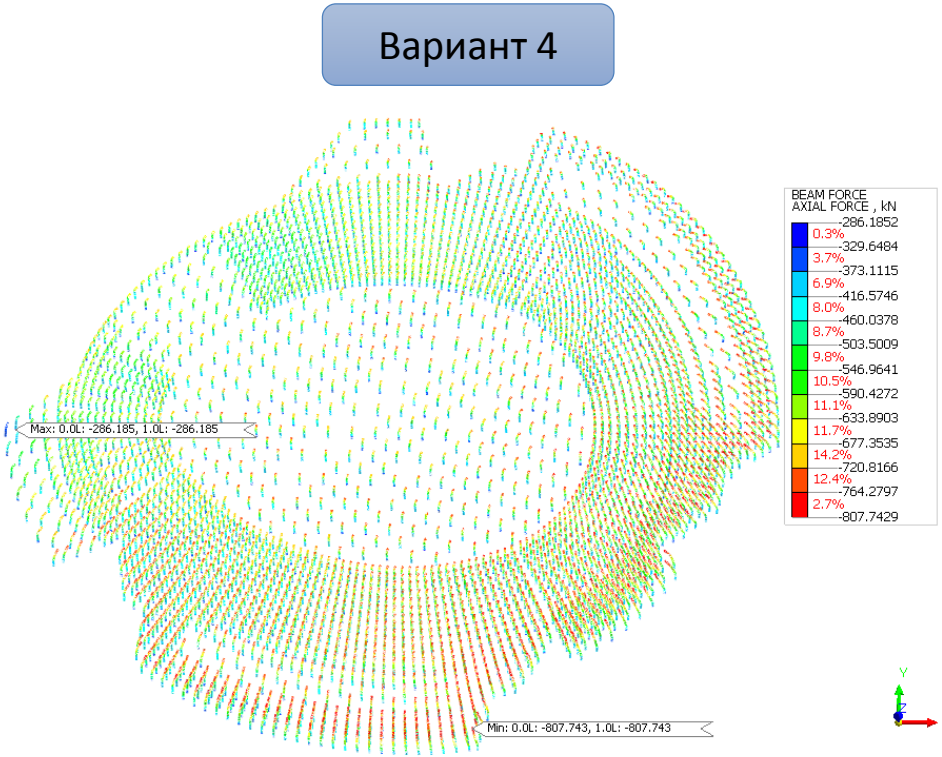
Оптимизированное свайное поле с учетом предлагаемого варианта
Сб d630 3030шт.

Сравнение усилий в сваях вариантов 3 и 4

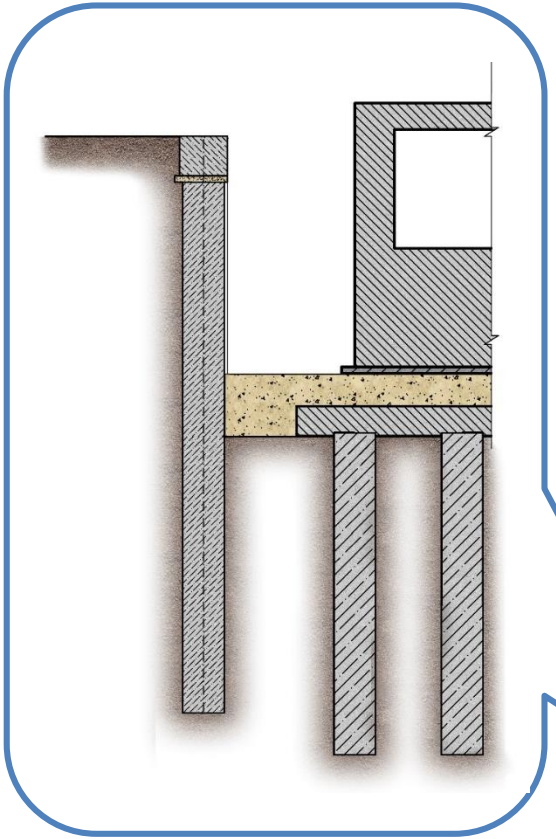


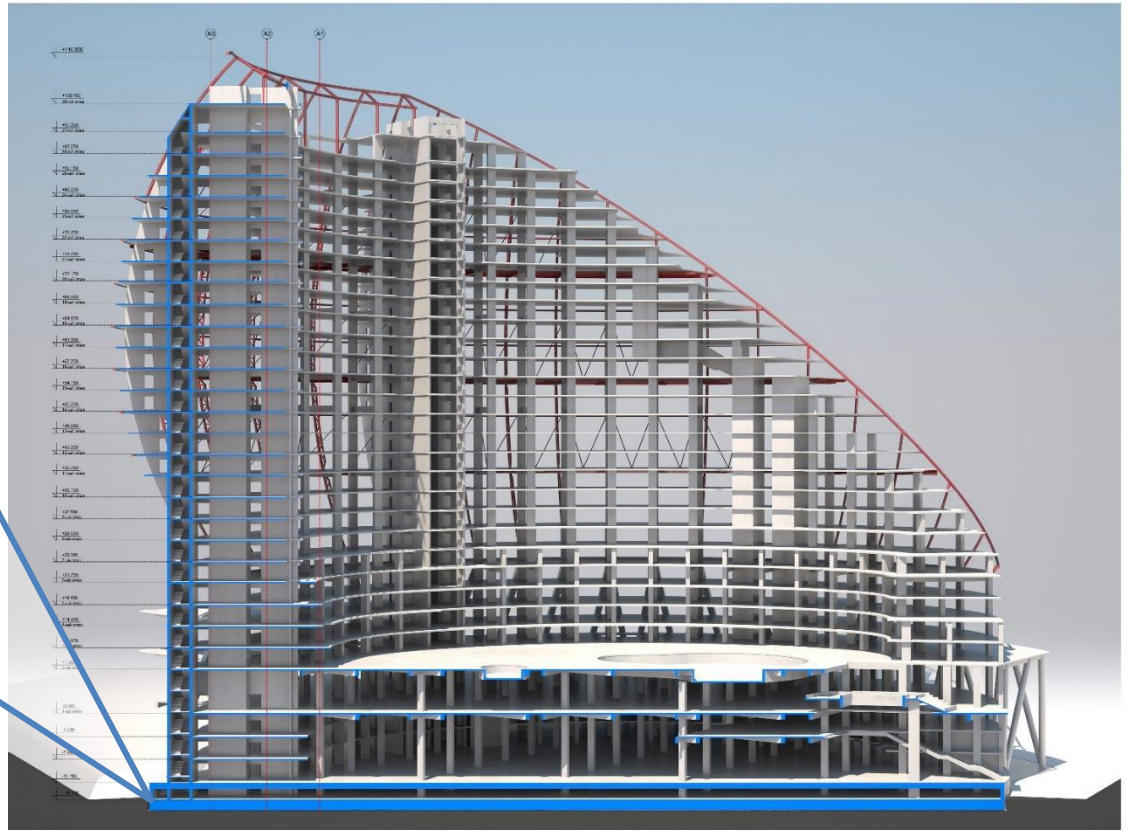
Вариант 3

Вариант 4

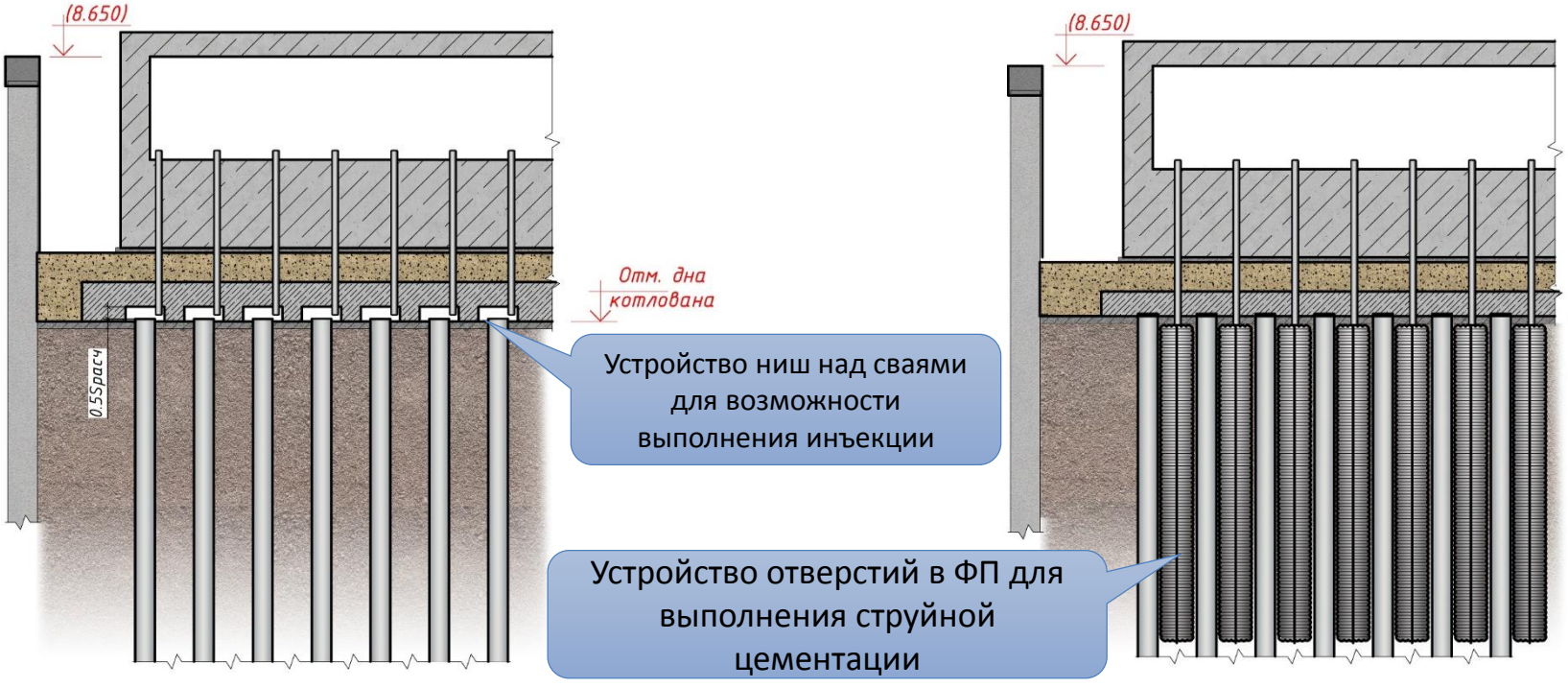


Итоговый вариант фундаментной конструкции





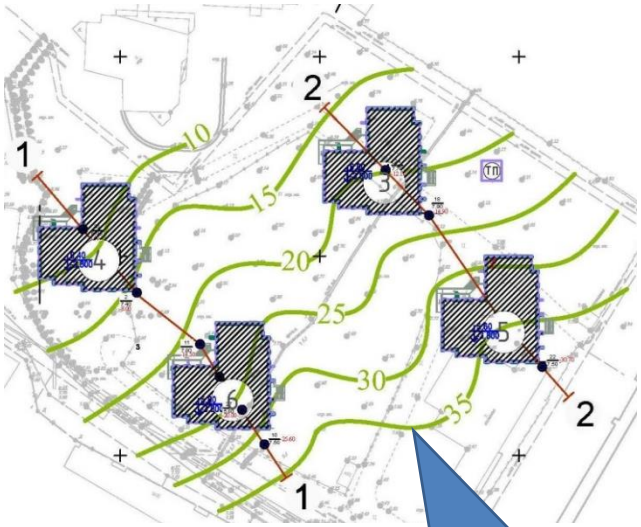
Возможные технические решения по корректировке неравномерных деформаций фундаментов здания



Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Жилой квартал по ул. Гастелло в г. Сочи

Общий вид комплекса

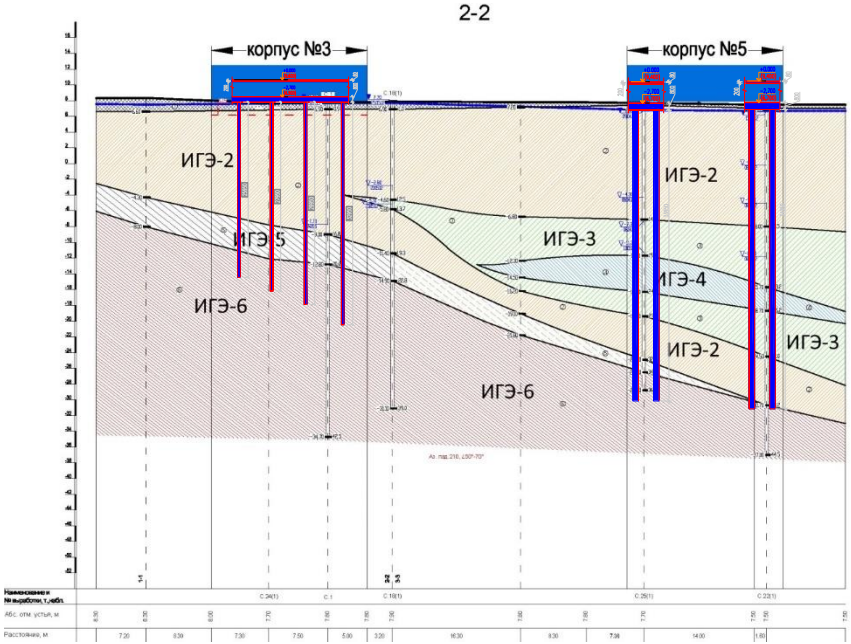


Глубина заложения кровли несущего слоя

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Жилой квартал по ул. Гастелло в г. Сочи

Общий вид комплекса

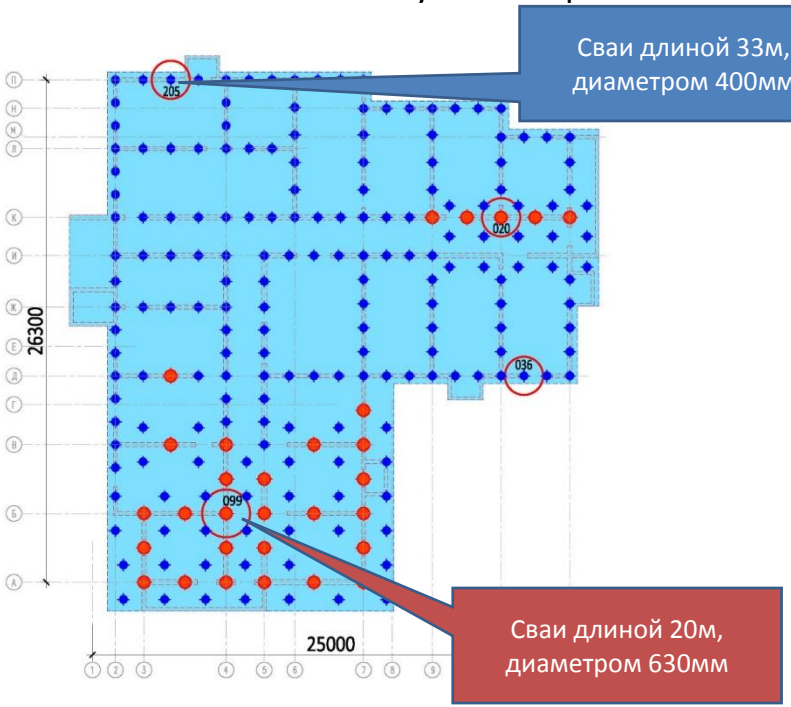


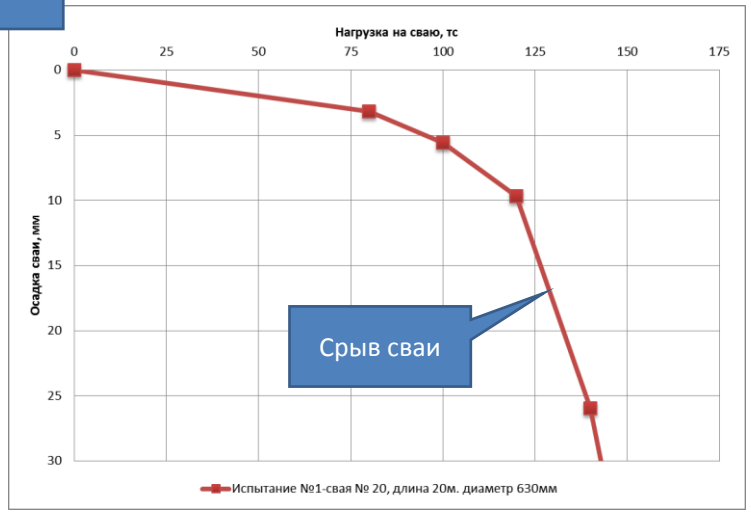
	Модуль деформации, Е, МПа	Сцепление, С, кПа
ИГЭ 2	11,7	6,8
ИГЭ 3	7,2	2,0
ИГЭ 4	4,2	2,3
ИГЭ 5	18,0	31,0
ИГЭ 6	29,3	36,8

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Жилой квартал по ул. Гастелло в г. Сочи

Схема свайного поля. Результаты пробных испытаний





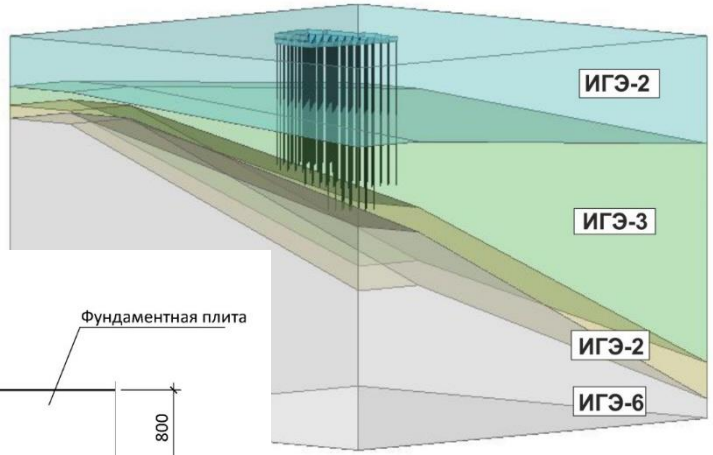
Несущая способность 20м сваи на площадке строительства

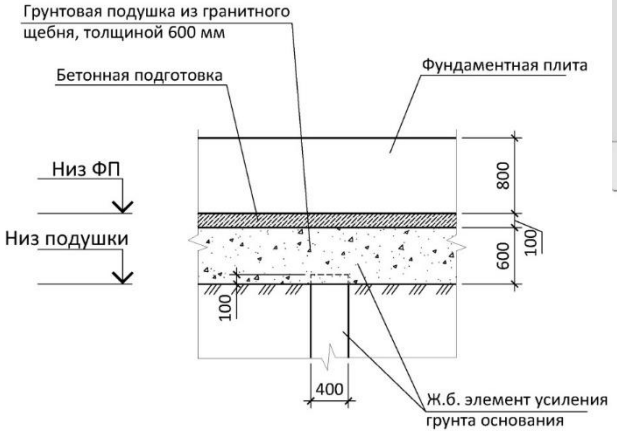
Решения с отделением свай от фундаментной плиты

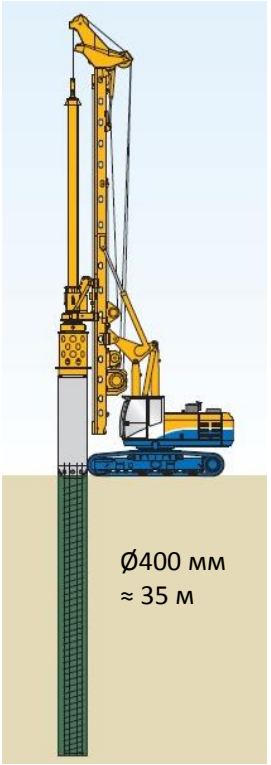
Жилой квартал по ул. Гастелло в г. Сочи

Технические решения фундаментов

Необходимо 36 м
БН – 1/25 Ø≈1,5 м
Обсадная труба + …





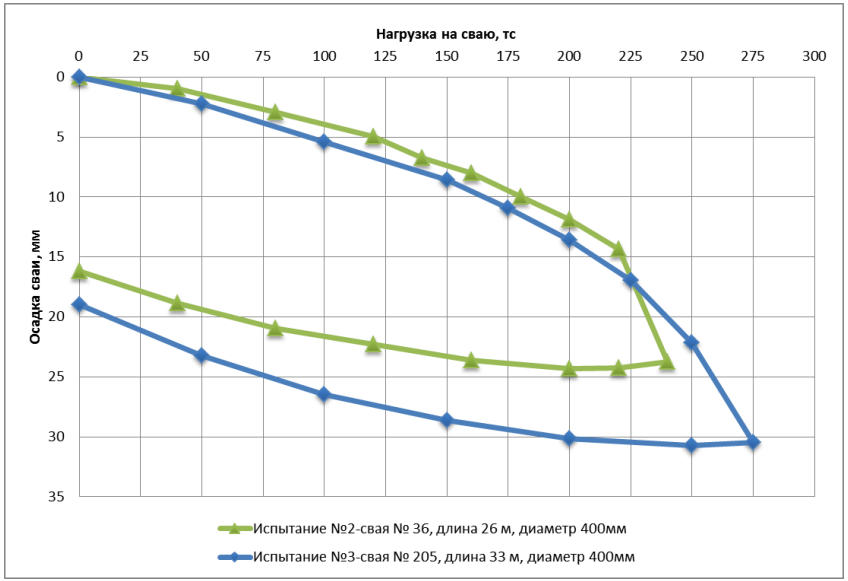


Свайный фундамент с промежуточной подушкой

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Жилой квартал по ул. Гастелло в г. Сочи

Результаты испытаний свай длиной 26 и 33м диаметром 400мм



Свайный фундамент с промежуточной подушкой

Решения с отделением свай от фундаментной плиты

Жилой квартал по ул. Гастелло в г. Сочи

Этапы возведения комплекса высотных жилых зданий

Выводы

1. Разделение осадки сваи на упругую и пластическую составляющие продиктовано деформациями микроструктуры грунтов. Оно позволяет упростить расчёты основания, производить их в каждом цикле скорости осадки, и обосновать подобие модельной и рабочих свай.

2. Анализ зависимости «нагрузка-осадка» с позиций разделения деформаций приводит к построению расчётной схемы одиночной сваи и группы свай, которая объясняет известные парадоксы в свайном фундаментостроении.

3. Упругая характеристика основания может быть использована при расчётах на особое сочетание нагрузок, включающее ветровую и сейсмическую. Вязко-пластические характеристики грунтов позволяют прогнозировать развитие осадки во времени.

4. Понимание этапности поведения свай под нагрузкой дает возможность более точно прогнозировать напряженно-деформированное состояние фундаментов высотных зданий, расположенных в сложных грунтовых условиях.

Спасибо за внимание!

Мариничев Максим Борисович

к.т.н., профессор кафедры «Оснований и фундаментов» КубГАУ,
Заслуженный строитель Кубани
E-mail: m.marinichev@geo-technics.com