

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-1-14-21
УДК 624.154.1

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Эффективность реализации свайных фундаментов на примере сооружения реакторного отделения атомной станции с ВВЭР-1000

А.Е. Саргсян, Е.Г. Гукова*

АО «Атомэнергопроект», Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1
*gukova_eg@aep.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 02 октября 2019 г.
Доработана: 18 декабря 2019 г.
Принята к публикации: 18 января 2020 г.

Аннотация

Цель. В статье представлена разработанная модель свайного фундамента, демонстрируется целесообразность применения свайных фундаментов для повышения устойчивости и несущей способности оснований сооружений АС, на примере сооружения реакторного отделения (РО) обосновывается достоверность результатов натурных наблюдений, приводятся данные натурных наблюдений за осадкой РО. **Методы.** Даны выражения для определения расчетных параметров интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности подошвы для естественного основания сооружения, а также для свайного основания с учетом эффектов взаимодействия ростверка и свайного куста с грунтовой средой при общем характере перемещения сваи с круглым поперечным сечением. Разработана пространственная трехмерная конечно-элементная статическая модель РО совместно с основанием. Показаны изополя вертикальных перемещений фундаментной плиты РО для естественного основания, а также для свайного основания при нормальной эксплуатации. Сопоставительный анализ данных натурных наблюдений с результатами расчета позволяет обосновать достоверность разработанной модели свайного фундамента. **Выводы.** Имеющееся расхождение между результатами натурных наблюдений и расчетов обусловлено тем обстоятельством, что по расчету вычисленная осадка основания сооружения соответствует всему периоду эксплуатации, включая период возведения сооружения, а результаты наблюдения относятся только к периоду эксплуатации. Сопоставительный анализ данных натурных наблюдений, а также результатов расчета наглядно подтверждает высокую эффективность реализации свайных фундаментов для возведения массивных сооружений на слабых грунтах.

Ключевые слова: пространственная расчетная модель; свайный фундамент; ростверк; сваи; осадка; сопоставительный анализ; результаты расчетов; натурные наблюдения; естественное основание; сооружение; взаимодействие с грунтовой средой

Для цитирования

Саргсян А.Е., Гукова Е.Г. Эффективность реализации свайных фундаментов на примере сооружения реакторного отделения атомной станции с ВВЭР-1000 // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 1. С. 14–21. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-14-21>

Введение

Возведение реакторного отделения (РО) АЭС-1 было начато в 1972 году. Наблюдения за осадка-

ми начаты в марте 1981 года по 15 стенным осадочным маркам. В процессе эксплуатации марки уничтожались и восстанавливались. На начало 2009 года существовали все осадочные марки. Средняя осадка сооружения носит стабильный во времени характер. Все данные натурных наблюдений и их анализ подробно приведены в [5; 6]. Данные натурных наблюдений наглядно показывают, что средняя осадка сооружения РО превышает допустимое значение в соответствии с требованиями [4]. С ноября 1987 года на площадке размещения РО АЭС-1 ведутся регулярные наблю-

Саргсян Апол Егисевич, д. т. н., профессор, академик МАИ при ООИ, начальник научно-исследовательского отдела динамики и сейсмостойкости; eLIBRARY AuthorID: 731808.

Гукова Елена Геннадьевна, главный специалист научно-исследовательского отдела динамики и сейсмостойкости; eLIBRARY SPIN-код: 2653-5484, Scopus ID: 7202396806.

© Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

дения за кренами и осадками основных зданий и сооружений.

Для сооружения РО блоков 1 и 2 АЭС-2 был реализован свайный фундамент. В [7] выполнены и представлены результаты геодезических натурных наблюдений за осадками зданий и сооружений блоков 1 и 2. Начиная с 1984 года и по настоящее время ведутся натурные наблюдения за осадками и кренами сооружений РО.

Цель настоящей работы – на примере сооружения реакторного отделения на двух площадках (АЭС-1 и АЭС-2) обосновать достоверность разработанной модели свайного фундамента [1–4] по результатам натурных наблюдений, а также продемонстрировать целесообразность применения свайных фундаментов для повышения устойчивости и несущей способности оснований сооружений АС.

Материалы и методы

Схема расположения сооружения РО АЭС-1 в геологической структуре естественного основания представлена на рис. 1.

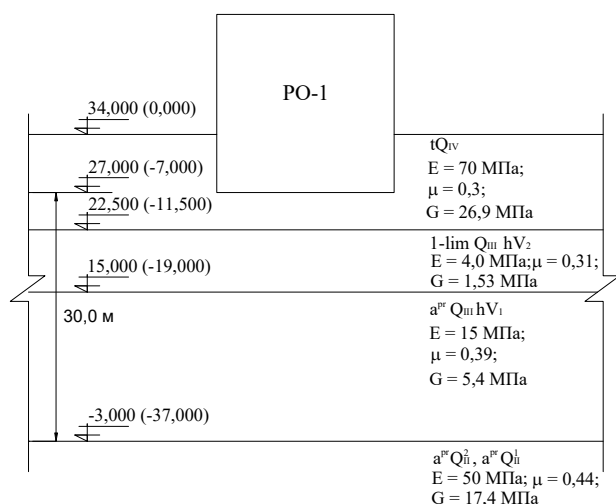


Рис. 1. Схема заглубления сооружения РО АЭС-1 в геологической структуре естественного основания
[Figure 1. The embedding of the reactor building NPP-1 structure of the geological environment of the natural foundation]

На рис. 2 представлено сопоставление результатов натурных наблюдений [7] за осадками сооружений РО блоков 1 и 2 с результатами расчетов, полученных в настоящей работе.

График средних суммарных вертикальных смещений реакторного отделения представлен на рис. 2 [7]. Данные натурных наблюдений наглядно показывают, что средняя осадка сооружения РО АЭС-2 не превышает допустимого значения в соответствии с требованиями [4].

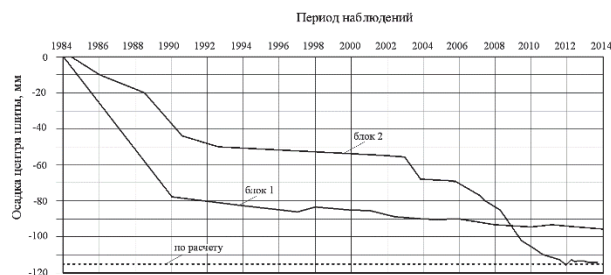


Рис. 2. График средних суммарных вертикальных смещений РО АЭС-2
[Figure 2. Graph of the average total vertical displacements of reactor building NPP-2]

Оценим эффективность применения свайного фундамента для условий площадки размещения АЭС-1 в целях повышения устойчивости и несущей способности оснований сооружений АС.

Расчетные параметры интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности подошвы ростверка определяются по выражениям, представленным в табл. 1 [1–4].

Таблица 1

Выражения для определения эквивалентных интегральных статических жесткостей основания для ростверка прямоугольной формы в плане
[Table 1. Equivalent integral static stiffness of a grillage of a rectangular shape in plan]

Вид перемещения [Displacement]	Интегральная жесткость [Integral stiffness]
Горизонтальное, по оси x [Horizontal, along x]	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$
Горизонтальное, по оси y [Horizontal, along y]	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)}$
Вертикальное, по оси z [Vertical, along z]	$k_z = \frac{4G\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)}$

В табл. 1 введены следующие обозначения: μ – осредненное значение коэффициента Пуассона грунтов в активной зоне основания ростверка;

$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – осредненное значение модуля сдвига

грунтов в активной зоне основания ростверка; $A = L_x L_y$ – площадь подошвы ростверка прямоугольной формы в плане; $L_x, L_y (L_x \geq L_y)$ – длина и ширина ростверка (фундаментной плиты) в плане по координатным осям x и y соответственно.

Расчетные приведенные статические характеристики грунтов в активной зоне естественного основания:

– модуль деформации $E = \frac{\sum E_i h_i}{H_a} = 38$ МПа;

– коэффициент Пуассона $\mu = \frac{\sum \mu_i h_i}{H_a} = 0,4$;

– модуль сдвига $G = \frac{E}{2(1+\mu)} = 13,57$ МПа.

Интегральные статические жесткости естественного основания на подошве фундаментной конструкции [1; 2]:

$$k_x = k_y = \frac{31,1 \cdot (1-\mu) G \sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi} (7-8\mu)} = 2,58 \cdot 10^6 \text{ кН/м};$$

$$k_z = \frac{4G \sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi} (1-\mu)} = 3,64 \cdot 10^6 \text{ кН/м}.$$

Общий вид конечно-элементной модели сооружения РО АЭС-1, АЭС-2 (а), венттруба условно не показана, и фрагмент геометрической модели с вырезом четверти (б) представлены на рис. 3.

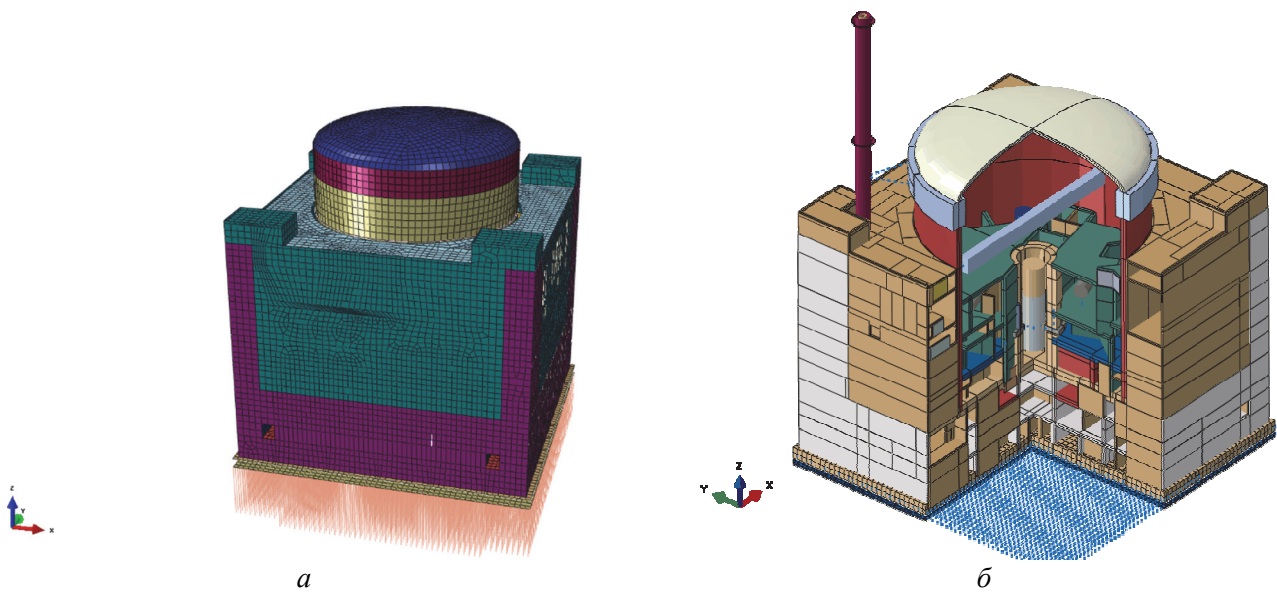


Рис. 3. Конечно-элементная модель сооружения РО АЭС-1 и АЭС-2:
а – общий вид; б – фрагмент геометрической модели с вырезом четверти
[Figure 3. 3D finite element and geometrical models of the reactor building:
а – general view; б – a fragment of geometrical model with a quarter cut]

В пространственной конечно-элементной модели системы сооружения РО с основанием использовались следующие типы конечных элементов:

- четырехузловые оболочечные элементы для моделирования плоских элементов (стен, перекрытий и диафрагм);
- пространственные стержни (стойки и ригели);
- жесткие балки (для обеспечения передачи нагрузки с эксцентриситетом);
- массовые элементы для моделирования нагрузок от оборудования, которые могут быть рассмотрены как сосредоточенные.

Разработка модели системы «сооружение – основание» РО АЭС-1 была выполнена с применением вычислительного комплекса ANSYS, РО АЭС-2 – с применением вычислительного комплекса ABAQUS.

Общий вес сооружения РО с учетом веса технологического оборудования составляет $Q = 26,8 \cdot 10^5$ кН. Масса сооружения РО составляет $M = 2,74 \cdot 10^5$ кН·с²/м.

Размеры фундаментной плиты сооружения в плане $L_x = L_y = 67$ м.

Все соединения между элементами, моделирующими конструкции из монолитного железобетона, приняты жесткими.

Расчетные параметры интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной боковой поверхности и на подошве свай определяются по выражениям, представленным в табл. 2.

При формировании результирующей реакции грунтовой среды на контактной поверхности свай исходили из следующих предположений:

- на стенках боковой поверхности сваи при формировании растягивающих напряжений на контактной поверхности нарушается условие полного прилипания, основываясь на предположении, что грунт на растяжение не работает;
- при вертикальном перемещении вдоль продольной оси сваи по контуру всей боковой поверхности сваи грунты испытывают чистый сдвиг, а на подошве сваи сжатие;
- при перемещении свай с прямоугольным поперечным сечением в горизонтальном направлении в грунтовой среде в двух противоположных

- боковых поверхностях происходит сдвиг грунтов. В передней стенке боковой поверхности по направлению перемещения свай происходит сжатие, а на противоположной стенке – отрыв грунта от поверхности стенки сваи;
- при перемещении сваи в горизонтальном направлении на подошве сваи грунты испытывают чистый сдвиг.

Эпюры контактных напряжений на боковой поверхности сваи с круглым поперечным сечением при перемещении по направлениям координатных осей x, y, z представлены на рис. 4 [1; 3].

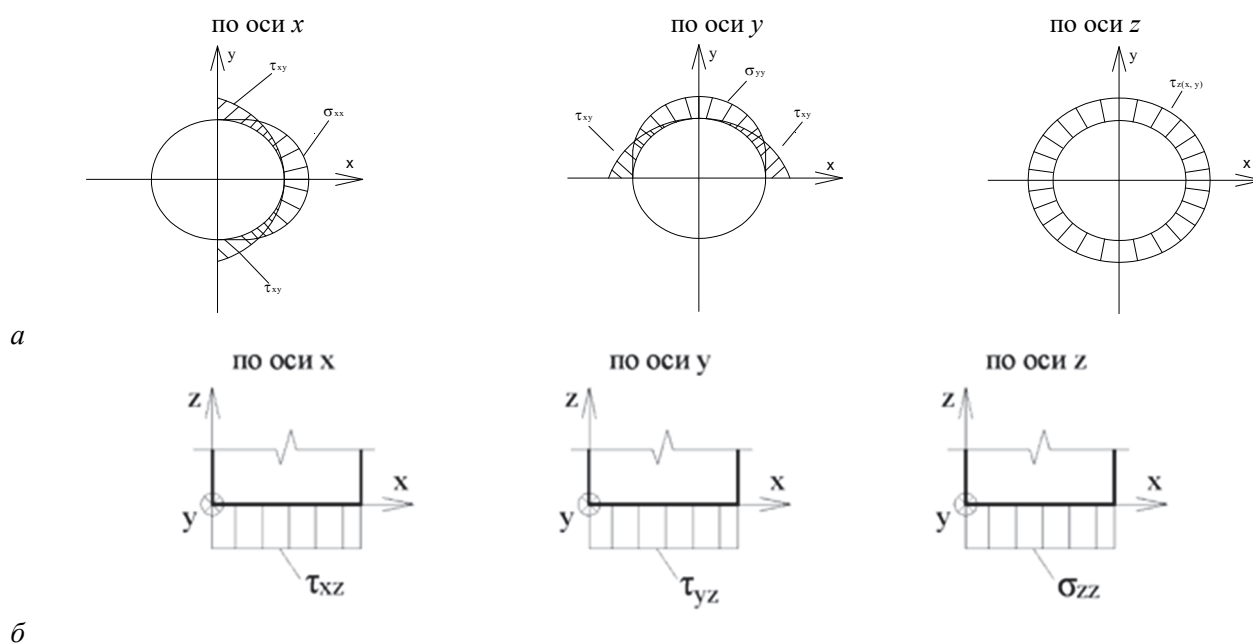


Рис. 4. Характер распределения контактных напряжений на боковой поверхности (а) и подошве (б) сваи с круглым поперечным сечением при перемещении в грунтовой среде по направлениям координатных осей x, y, z [Figure 4. The contact stresses distribution of side surface (a) and bottom (b) of pile with a circular cross-section when moving in a soil medium along the directions of the coordinate axes x, y, z]

Таблица 2

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения сваи

[Table 2. Integral static stiffness of the soil medium on the contact surface with the general nature of the movement of piles]

Направление перемещения сваи [Displacement]	Интегральная жесткость грунтовой среды [Integral stiffness]	
	На боковой поверхности сваи [On the side surface of pile]	На подошве сваи [On the bottom of pile]
Горизонтальное, по оси x [Horizontal, along x]	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_{1x}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{A_{2x}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)R_s}$	$k_x = \frac{31,1(1-\mu_{sL})G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_{sL})R_s}$
Горизонтальное, по оси y [Horizontal, along y]	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_{1y}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{A_{2y}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu)R_s}$	$k_y = \frac{31,1(1-\mu_{sL})G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_{sL})R_s}$
Вертикальное, по оси z [Vertical, along z]	$k_z = \frac{31,1(1-\mu)G_s\sqrt{A_z}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s}$	$k_z = \frac{4G_{sL}\sqrt{A_L}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_{sL})R_s}$

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности при общем характере перемещения сваи с круглым поперечным сечением
 [Table 3. Integral static stiffness of the soil medium on the contact surface with the general nature of the movement of pile with a circular cross section]

Направление перемещения сваи [Displacement]	Интегральная жесткость грунтовой среды [Integral stiffness]	
	На боковой поверхности сваи [On the side surface of pile]	На подошве сваи [On the bottom of pile]
Горизонтальное, по осям x, y [Horizontal, along x, y]	$k_x = k_y = \frac{31,1(1-\mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu)R_s} + \frac{4G_s\sqrt{h_c d}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_s)R_s}$	$k_x = k_y = \frac{15,55(1-\mu_{sL})G_{sL}d}{(7-8\mu_{sL})R_s}$
Вертикальное, по оси z [Vertical, along z]	$k_z = \frac{31,1(1-\mu_s)G_s\sqrt{h_c d}}{(7-8\mu)R_s}$	$k_z = \frac{2G_{sL}d}{(1-\mu_{sL})R_s}$

В табл. 2 введены следующие обозначения в зависимости от геометрической формы поперечных сечений сваи: A_{1x} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сдвиг при перемещении сваи по направлению оси x ; A_{2x} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении сваи по направлению оси x ; A_{1y} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сдвиг при перемещении сваи по направлению оси y ; A_{2y} – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой, испытывающей сжатие при перемещении сваи по направлению оси y ; A_z – площадь контактной боковой поверхности сваи с грунтовой средой или площадь боковой поверхности сваи, испытывающей сдвиг при перемещении сваи в вертикальном направлении; A_L – площадь подошвы сваи.

Выражения для определения интегральных статических жесткостей грунтовой среды на контактной поверхности сваи с круглым поперечным сечением обобщены в табл. 3.

Схема расположения сооружения со свайным фундаментом в геологической структуре основания сооружения РО АЭС-2 представлена на рис. 5.

Суммарные интегральные жесткости основания за счет эффектов взаимодействия свайного куста и ростверка с грунтовой средой принимают следующие значения:

$$k_x = k_y = 3,0794 \cdot 10^7 \text{ кН/м};$$

$$k_z = 2,3322 \cdot 10^7 \text{ кН/м}.$$

Определим характеристики грунтовой среды в случае реализации натурального и свайного основания для площадки размещения РО АЭС-1.

Схема расположения свайного поля РО АЭС-1 в плане представлена на рисунке 6.

Схема расположения сооружения со свайным фундаментом в геологической структуре основания сооружения РО АЭС-1 представлена в [6].

Диаметр свай с круглым поперечным сечением принят равным $d = 0,6$ м, длина свай $h_c = 18,0$ м.

С учетом требований СП 50-102-2003 [8] расстояние между осями забивных свай принято равным $\Delta_{x,y} = 2,0 \text{ м} \geq 3d = 1,8 \text{ м}$, расстояние от осей свай до края фундаментной плиты (ростверка) сооружения равно $\delta_{x,y} = 0,5 \text{ м}$.

При этом общее число свай в свайном кусте составляет 1089 штук.

В табл. 3 введены следующие дополни-

тельные обозначения: $G_s = \frac{\sum_{i=1}^n G_{s,i} h_i}{h_c} = 9,16 \text{ МПа}$,

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i h_i}{h_c} = 0,33 \text{ – приведенный статический модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов основания по высоте зоны расположения свайного поля};$$

$G_{sL} = 5,4 \text{ МПа}$, $\mu_{sL} = 0,39$ – модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунтов на уровне подошвы свай; $R_s = 4,2$ – корректирующий коэффициент, учитывающий эффекты взаимодействия сваи в составе свайного куста [4; 8].

Суммарные интегральные статические жесткости основания РО АЭС-1 с учетом эффектов взаимодействия ростверка и свайного куста с грунтовой средой принимают следующие значения:

$$k_x = k_y = 5,358 \cdot 10^7 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

$$k_z = 3,764 \cdot 10^7 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

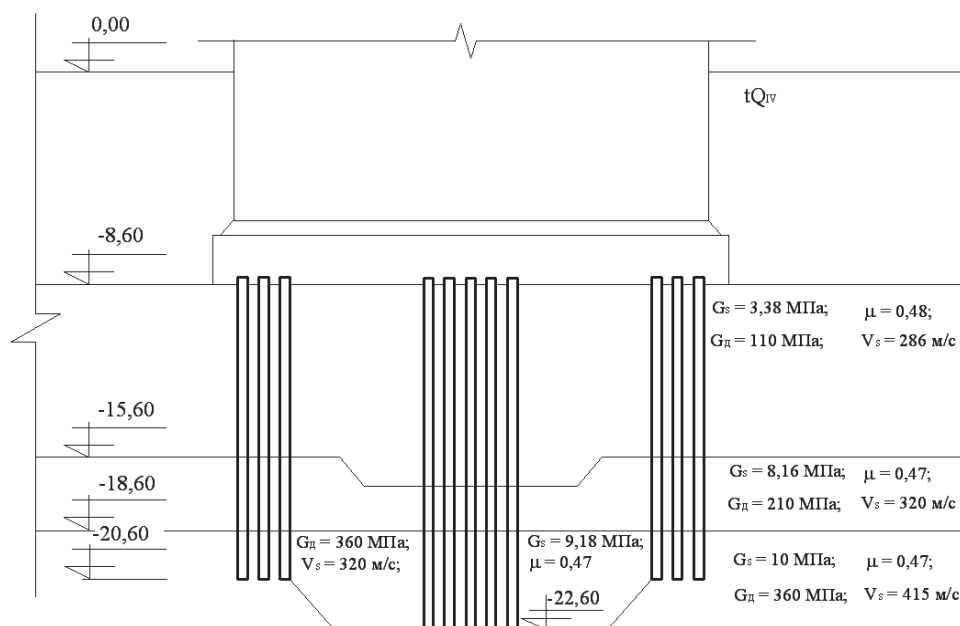


Рис. 5. Схема расположения РО АЭС-2 со свайным фундаментом в геологической структуре основания
 [Figure 5. Layout of the reactor building NPP-2 with pile foundation in the geological structure of the base]

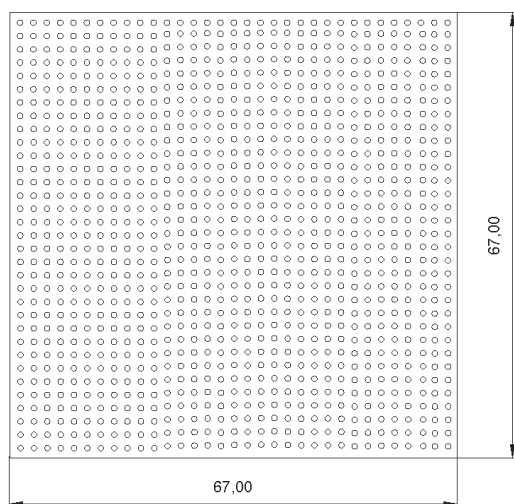


Рис. 6. Схема расположения свайного поля в плане для РО АЭС-1
 [Figure 6. Layout of the pile field of reactor building NPP-1]

Интегральные жесткости основания сооружения РО на естественном основании и в случае применения свайного фундамента обобщены в табл. 4. Представленные в ней результаты наглядно демонстрируют, что жесткость основания сооружения при реализации рассматриваемого варианта свайного фундамента более чем на порядок превышает жесткость естественного основания сооружения.

Изополя вертикальных перемещений фундаментной плиты РО АЭС-1 для естественного и свайного основания при нормальной эксплуатации (НЭ) представлены на рис. 7 и 8.

Таблица 4

Численные значения интегральных жесткостей основания сооружения РО на естественном основании и в случае применения свайного фундамента
 [Table 4. Numerical values of the integral stiffness of the reactor building structure on a natural foundation and in the case of pile foundation]

Интегральные жесткости основания [Integral stiffness], $10^7 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$			
Естественное основание [Natural foundation]		Свайное основание [Pile foundation]	
$k_x = k_y$	k_z	$k_x = k_y$	k_z
0,258	0,364	5,358	3,764

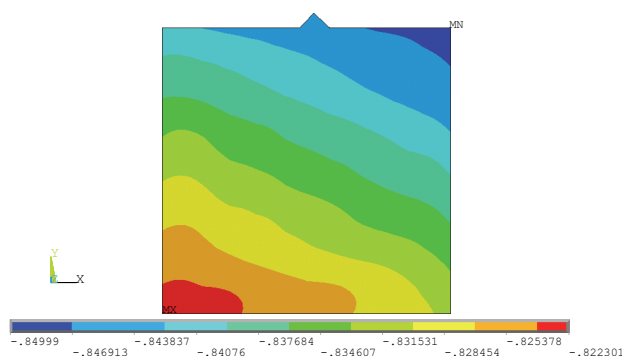


Рис. 7. Изополя вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты РО АЭС-1 для естественного основания при НЭ
 [Figure 7. Isolines of vertical displacements (m) of the base slab of the reactor building NPP-1 on the natural foundation on normal operation]

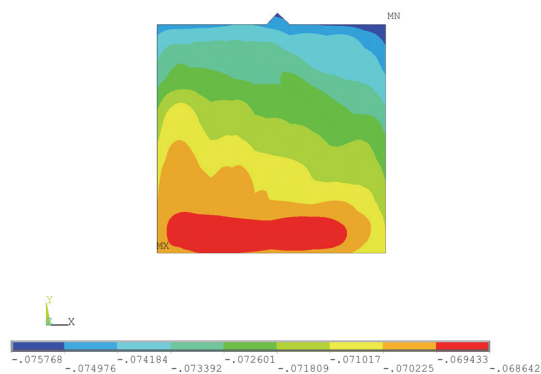


Рис. 8. Изополя вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты РО АЭС-1 для свайного основания при НЭ
[Figure 8. Isolines of vertical displacements (m) of the base slab of the reactor building NPP-1 on the pile foundation on normal operation]

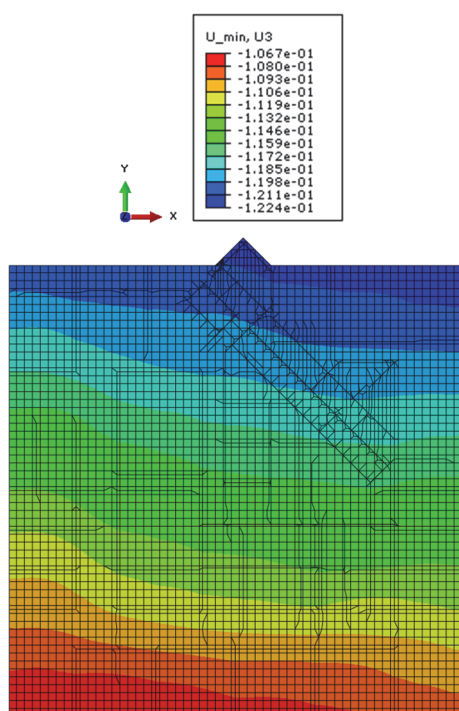


Рис. 9. Изополя расчетных максимальных вертикальных перемещений (м) фундаментной плиты при НЭ
[Figure 9. Isolines of vertical displacements (m) of the base slab of the reactor building NPP-2 on the pile foundation on normal operation]

Расчетные значения осадки (рис. 7) в среднем примерно в 1,9 раза превышают величину осадки, полученную по результатам наблюдений (рис. 2). Данное обстоятельство согласуется с аналогичными результатами, представленными в [5; 6]. Расхождение между результатами натуральных наблюдений и расчетов обусловлено тем обстоятельством, что по расчету вычисленная осадка основания сооружения соответствует всему периоду эксплуатации, включая период возведения сооружения, а результаты наблюдения относятся только к периоду эксплуатации, то есть начиная с 1985 года.

Изополя вертикальных перемещений фундаментной плиты РО АЭС-2 для свайного основания при НЭ представлены на рис. 9.

Сопоставление результатов расчетов вертикальных перемещений фундаментной конструкции сооружения РО АЭС-1 на естественном основании (рис. 7) и на свайном основании (рис. 8) показывает, что при реализации рассматриваемой схемы свайного фундамента осадка сооружения уменьшается более чем на порядок. Результаты численного эксперимента по реализации свайного фундамента для АЭС-1 хорошо согласуются с результатами расчетов для существующей реализации свайного основания на примере РО АЭС-2.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование свайного фундамента позволяет существенно повысить устойчивость и несущую способность оснований сооружений АС. Данное обстоятельство подтверждает высокую эффективность реализации свайных фундаментов для возведения массивных сооружений на слабых грунтах.

Список литературы

1. Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2013. 550 с.
2. Саргсян А.Е., Гукова Е.Г., Гришин А.С. Разработка и обоснование механической и математической модели основания сооружений атомных станций в виде однородного инерционного полупространства // Вестник ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». 2009. № 1. С. 81–95.
3. Саргсян А.Е., Геращенко В.С. Разработка статической и динамической модели свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой // Вестник НИЦ «Строительство». 2010. № 2. С. 159–166.
4. МР 1.5.2.05.999.0026-2011. Нормы проектирования оснований сооружений атомных станций. М., 2011.
5. Глаговский В.Б., Зализский А.Г., Каган А.А., Кривоногова Н.Ф., Финагенов О.М. Анализ осадок и кренов фундаментов реакторных отделений Балаковской АЭС // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2005. № 4. С. 17–22.
6. Саргсян А.Е., Гришин А.С. Оценка эффективности реализации свайных фундаментов на примере сооружения РО Балаковской АЭС // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 7 (667). С. 112–121.
7. Технический отчет о результатах геодезических наблюдений за осадками и кренами зданий и сооружений блоков № 1, 2 и общестационарных объектов Ростовской АЭС. ГТБ-2014-Б.06/13-1/14-651 / ООО НПО «Гидротехпроект». Валдай, 2014.
8. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. М., 2004.

The effectiveness of the implementation of pile foundations on the example of the reactor building of a nuclear power plant with VVER-1000

Akop E. Sargsyan, Elena G. Gukova*

JSC "Atomenergoproekt", 7 Bakuninskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

*gukova_eg@aep.ru

Article history:

Received: October 02, 2019

Revised: December 18, 2019

Accepted: January 18, 2020

Abstract

Aims. The purpose of this work is to justify the reliability of the developed models of pile foundations on the data of field observers and to demonstrate the feasibility of using pile foundations to increase the stability and bearing capacity of the NPP structures foundation using the example of reactor building (RB). **Methods.** The data of field observers for the settlement of the RB are presented. The expressions for calculation of the static stiffness of the contact surface of the slab bottom and soil medium, as well as for pile foundations taking into account the effects of interaction of grillage and pile field with the soil media with a general character of displacement of a circular cross section pile are submitted. A spatial three-dimensional finite element static model of RB was developed together with the soil base. Isolines of vertical movements of RB fundamental slabs for natural foundations, as well as for pile foundations for normal operation are shown. A comparative analysis of the data of field observers with the calculation results allows us to justify the reliability of the developed model of the pile foundation. **Results.** The calculations of the foundation yield correspond to all the period of operation including construction, and the results of observations relate only to the period of operation that explain the difference. A comparative analysis of the data of field observers with the calculation results allows us to justify of the strong effectiveness of realization of pile foundation for the massive structures on soft soil bases.

Keywords: spatial model; pile foundation; grillage; piles; yield; comparative analysis; calculation results; field observations; natural base; structure; interaction with the soil environment

For citation

Sargsyan A.E., Gukova E.G. The effectiveness of the implementation of pile foundations on the example of the reactor building of a nuclear power plant with VVER-1000. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(1):14–21. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-14-21>. (In Russ.)

References

1. Sargsyan A.E. *Dinamika i seismostojkost' sooruzhenij atomnyh stancij [Dynamics and seismic stability of nuclear power plants]*. Sarov: RFNC – VNIIEF Publ.; 2013. (In Russ.)
2. Sargsyan A.E., Gukova E.G., Grishin A.S. Razrabotka i obosnovanie mekhanicheskoy i matematicheskoy modeli osnovaniya sooruzhenij atomnyh stancij v vide odnorodnogo inercionnogo poluprostranstva [Development and justification of a mechanical and mathematical model of the foundation of nuclear power plant structures in the form of a homogeneous inertial half-space]. *The Investigations for Structural Analysis, V.A. Kucherenko Institute Herald*. 2009;(1):81–95. (In Russ.)
3. Sargsyan A.E., Gerashchenko V.S. Razrabotka staticheskoy i dinamichekoy modeli svajnyh fundamentov s uchetom efekta ih vzaimodejstviya s gruntovoj sredoj [Development of a static and dynamic model of pile foundations taking into account the effect of their

interaction with the soil environment]. *Bulletin of Science and Research Center. Stroytelstvo*. 2010;(2): 159–166. (In Russ.)

4. MR 1.5.2.05.999.0026-2011. *Standards for the design of the foundations of nuclear power plant structures*. Moscow; 2011. (In Russ.)

5. Glagovskii V.B., Zalizskii A.G., Kagan A.A., Krivonogova N.F., Finagenov O.M. Analysis of settlements and tilts of reactor foundations at the Balakovskaya nuclear power plant. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2005;42(3):132–138.

6. Sargsyan A.E., Grishin A.S. Ocenka effektivnosti realizacii svajnyh fundamentov na primere sooruzheniya RO Balakovskoj AES [Efficiency Estimation of Pile Foundation by the Example of the Reactor Building of the Balakovo Nuclear Power Plant]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2014; 7(667):112–121. (In Russ.)

7. LLC NPO "Gidrotehproekt". *Technical report on the results of geodetic observations of yield and tilt of buildings and structures of units No. 1, 2 and general stationary objects of the Rostov NPP*. GTB-2014-B.06/13-1/14-651. Valdai; 2014. (In Russ.)

8. SP 50-102-2003. *Design and construction of pile foundations*. Moscow; 2004. (In Russ.)

Akop E. Sargsyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of IAI UN, Head of Research Department of Dynamics and Seismic Stability; eLIBRARY AuthorID: 731808.

Elena G. Gukova, chief specialist of Research Department of Dynamics and Seismic Stability; eLIBRARY SPIN-code: 2653-5484, Scopus ID: 7202396806.