

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SOLIDWORKS

Широкое применение свайных фундаментов в фундаментостроении, целесообразность и экономичность их использования в качестве фундаментов зданий и сооружений, машин с динамическими нагрузками и другого промышленного оборудования приводит к необходимости прогнозирования их динамического поведения. Решение этой задачи встречает существенные затруднения по целому ряду причин, в том числе из-за отсутствия надежного, экспериментально обоснованного метода расчета.

Для оценки возможности применения численных методов для расчета свайных фундаментов с динамическими нагрузками были проведены специальные исследования. При выборе программного комплекса обязательно надо исходить из выполнения следующих требований: реализация возможности постановки объемной динамической задачи и максимально близкое к реальным условиям моделирование системы «свайный фундамент — грунтовое основание». Большое количество экспериментальных и аналитических данных по изучению колебаний свайных фундаментов дало возможность сравнить и оценить эффективность применения различных численных методов для анализа этого вопроса. В результате был принят программный комплекс SolidWorks с модулями CosmosWorks и CosmosMotion. Достоинства данного программного комплекса — сочетание мощных возможностей (позволяющих оперировать более чем миллионом конечных элементов) с интуитивно понятной структурой и относительно простой в использовании, а также возможность динамического расчета системы в объемной постановке с проведением модального и гармонического анализа.

При моделировании расчетной области объемной задачи в разделе Element Group была выбрана категория VOLUME. Объем системе задавался путем образования четырехугольных призм из плоских прямоугольных элементов, параллельные грани призмы располагались перпендикулярно оси Z. В качестве конечных элементов для моделирования грунта и фундамента были выбраны элементы типа SOLID (8–20 node 3D solid element) как наиболее подходящие для моделирования фундамента и окружающего его грунта. На рис. 1 показаны сетки конечных элементов, принятые для расчета объемной задачи.

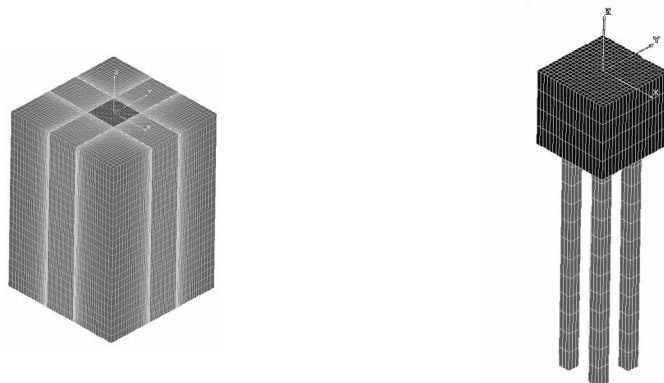


Рис. 1. Сетки конечных элементов при расчете объемной задачи

Свайный фундамент и грунт рассматривались как сложная динамическая система с разными условиями на контактных поверхностях. Тела фундамента и свай условно принимались как абсолютно твердые. Это связано с тем, что их прочностные характеристики значительно выше, чем у грунта. Величина модуля упругости материала фундамента также многократно превосходит значения модуля упругости грунта. Чтобы определить собственные формы колебаний свайного фундамента грунт моделировался невесомым. Это допущение было впервые сделано Н.П. Павлюком и Е. Raush. Они предложили при рассмотрении ограниченных объемов грунтового основания принимать плотность грунтовой среды ρ очень маленькой, условно равной $0,001 \text{ кг/м}^3$ или даже меньше. В противном случае, как выяснится при проведении модального анализа, колебания системы будут соответствовать не колебаниям фундамента, а грунтового массива. Такое допущение является грубо приближенным, но как показывают многочисленные данные, полученные с его использованием расчеты дают результаты, близко соответствующие действительности.

Модальный анализ проводился для первых четырех форм колебаний. Они показаны на рис. 2–5. Это сдвиговращательные колебания в вертикальной плоскости, вертикальные колебания, сдвиговращательные колебания в горизонтальной плоскости и вращательные колебания с угла на угол. Анализ колебаний свайных фундаментов, произведенный численными методами в программном комплексе SolidWorks, как и при аналитическом решении задачи, сводился к построению графиков амплитудно-частотных зависимостей.



Рис. 2. Первая форма собственных колебаний — сдвиговращательные колебания в вертикальной плоскости

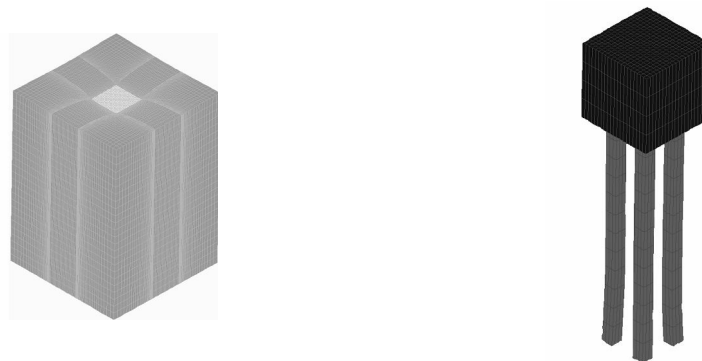


Рис. 3. Вторая форма собственных колебаний — вертикальные колебания

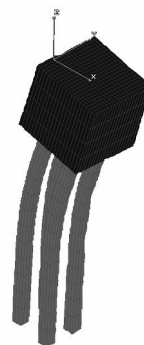
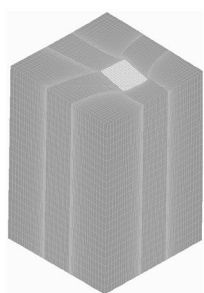


Рис. 4. Третья форма собственных колебаний — сдвиговращательные колебания в горизонтальной плоскости

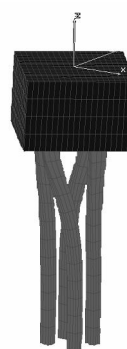
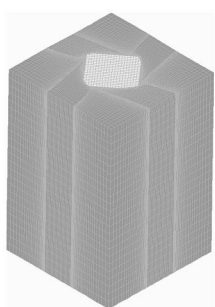


Рис. 5. Четвертая форма собственных колебаний — вращательные колебания

Особое внимание уделялось выбору расчетной области грунтового основания. Для решения динамической задачи необходимо было определить размеры сетки, в которой краевые элементы, находящиеся близко к закрепленным узлам, не должны были перемещаться под действием динамических нагрузок, приложенных к фундаменту, а зона активного деформирования грунтовой среды должна полностью находиться внутри расчетной области моделируемой системы.

Фундамент располагался по центру расчетной области. В плане он был разбит на 400 прямоугольных элементов. Столь плотная разбивка принималась, в первую очередь, для повышения точности анализа свободных колебаний свайного фундамента, возможности изменения места приложения действующих нагрузок и учета различных условий в области контакта ростверка и свай с грунтом.

Для анализа влияния расчетной области грунтового основания на параметры колебаний свайного фундамента были рассмотрены задачи с размерами сетки от $3b \times 3b \times 7b$ и $5b \times 5b \times 5b$ до $7b \times 7b \times 9b$ и $9b \times 9b \times 9b$, где b — ширина подошвы ростверка. Отдельно рассматривалось увеличение размеров расчетной области в плане и по высоте. В большинстве приведенных случаев мощность грунта под нижними концами свай была не менее $2b$. Колебания фундаментов возбуждались вертикальной либо горизонтальной динамическими нагрузками, приложенными к верхнему обрезу ростверка. В обоих случаях отдельно изучались вертикальная и горизонтальная составляющие возбуждаемых колебаний. Полученные результаты расчетов показаны на рис. 6–8.

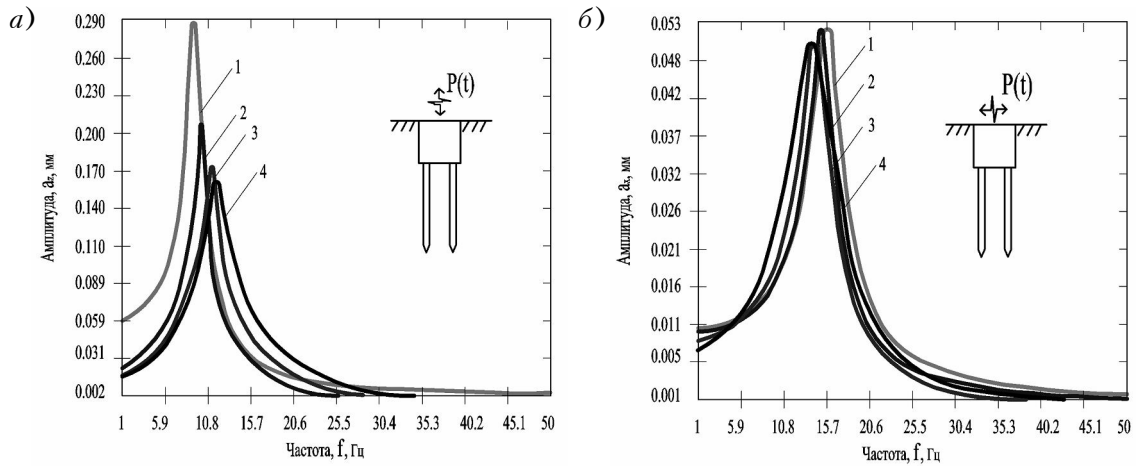


Рис. 6. Параметры вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющих колебаний свайного фундамента от действия соответственно вертикальной и горизонтальной гармонических нагрузок при размерах расчетной области: $3b \times 3b \times 7b$ (1), $4b \times 4b \times 7b$ (2), $5b \times 5b \times 7b$ (3), $6b \times 6b \times 7b$ (4)

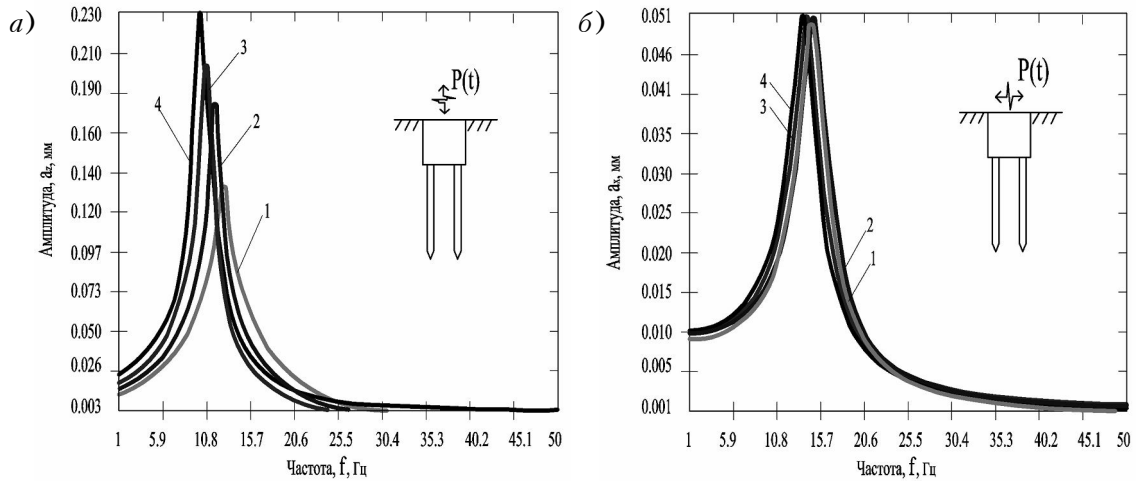


Рис. 7. Параметры вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющих колебаний свайного фундамента от действия вертикальной и горизонтальной гармонических нагрузок при размерах расчетной области: $4b \times 4b \times 8b$ (1), $4b \times 4b \times 7b$ (2), $4b \times 4b \times 6b$ (3), $4b \times 4b \times 5b$ (4)

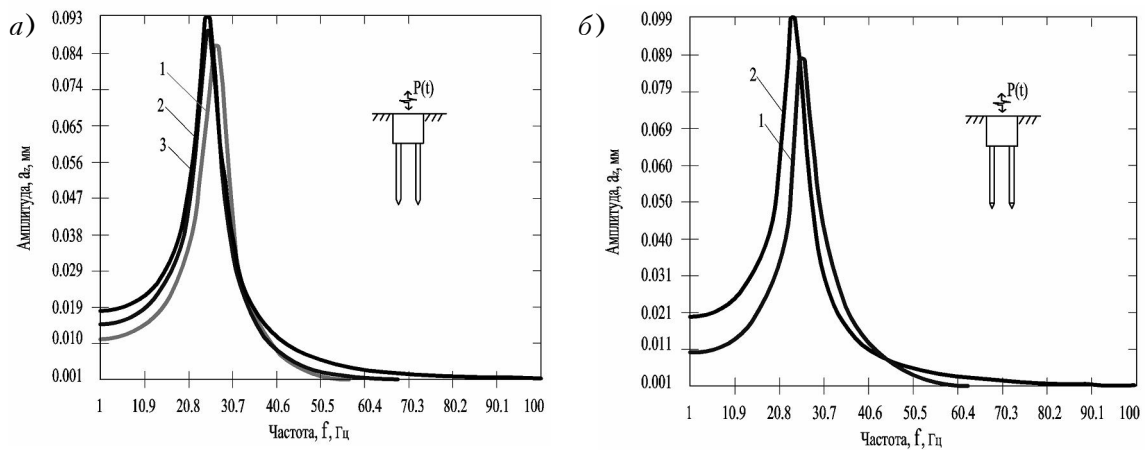


Рис. 8. Параметры вертикальной составляющей колебаний свайного фундамента от действия вертикальной гармонической нагрузки при размерах расчетной области: $5b \times 5b \times 5b$ (1 – а), $7b \times 7b \times 7b$ (2 – а, 1 – б), $7b \times 7b \times 9b$ (2 – б), $9b \times 9b \times 9b$ (3 – а)

С увеличением размеров расчетной области получаемые значения амплитуд вертикальных колебаний уменьшаются, а резонансная частота при этом возрастает. Одновременно для горизонтальных колебаний увеличение расчетной области грунтового основания приводит к уменьшению как амплитуд, так и резонансных частот колебаний.

Разница между соответствующими амплитудами вертикальных колебаний в резонансной зоне для расчетных областей $3b \times 3b \times 7b$ и $4b \times 4b \times 7b$ составляет 31 %, для $4b \times 4b \times 7b$ и $5b \times 5b \times 7b$ — 15 %, а для $5b \times 5b \times 7b$ и $6b \times 6b \times 7b$ — уже только 12 %. Аналогичная картина наблюдается и в дорезонансной области. После резонанса с увеличением размеров расчетной области амплитуды вертикальных колебаний увеличиваются. Однако можно отметить устойчивую тенденцию снижения погрешностей определения амплитуд колебаний с увеличением размеров расчетной области грунтового основания. Отдельный анализ влияния размеров сетки КЭ показывает необходимость преимущественного увеличения расчетной области в плане. Так, разница между соответствующими амплитудами для расчетных областей с размерами $5b \times 5b \times 5b$ и $7b \times 7b \times 7b$ составляет около 9 %, а для $7b \times 7b \times 7b$ и $9b \times 9b \times 9b$ — не более 5 %. Мощность грунта под нижними концами свай имеет наибольшее влияние на вертикальные колебания фундамента. Увеличение расчетной области по высоте может приводить к возрастанию амплитуд вертикальных колебаний, при этом резонансная частота колебаний фундамента тоже увеличивается. Так, отличие между амплитудами вертикальных колебаний для расчетных областей $7b \times 7b \times 7b$ и $7b \times 7b \times 9b$ составляет порядка 11 %.

Похожая тенденция, но с меньшей разницей изменения определяемых амплитуд колебаний фундамента имеет место и для горизонтальной составляющей колебаний. Различие заключается только в уменьшении амплитуд горизонтальных колебаний в резонансной и послерезонансной областях при соответствующем их увеличении в дорезонансной области. При увеличении сетки КЭ по высоте горизонтальные колебания фундамента сокращаются, и резонансная частота тоже уменьшается.

Одним из факторов, способных влиять на параметры колебаний свайного фундамента, может быть недостаточно надежный контакт подошвы ростверка с грунтовым основанием. Учет особенностей взаимодействия ростверка с грунтовым основанием по подошве производился введением зазора между ростверком и грунтовой средой. В программе SolidWorks это создавалось присвоением конечным элементам в месте контакта подошвы ростверка с грунтом нулевых характеристик.

Из сопоставления резонансных кривых колебаний ростверка (рис. 9) при наличии и отсутствии контакта его подошвы с грунтом можно сделать вывод, что амплитуды вертикальных и горизонтальных колебаний для рассмотренного случая (принятых суммарной изгибной жесткости свай и грунтовых условий) практически не меняются (до 1 %).

Учет контакта ростверка по боковой поверхности достигался с помощью устройства зазора между боковыми поверхностями ростверка и окружающего грунта. В программе SolidWorks это реализовывалось с помощью задания нулевых характеристик грунту в месте контакта с боковой поверхностью ростверка.

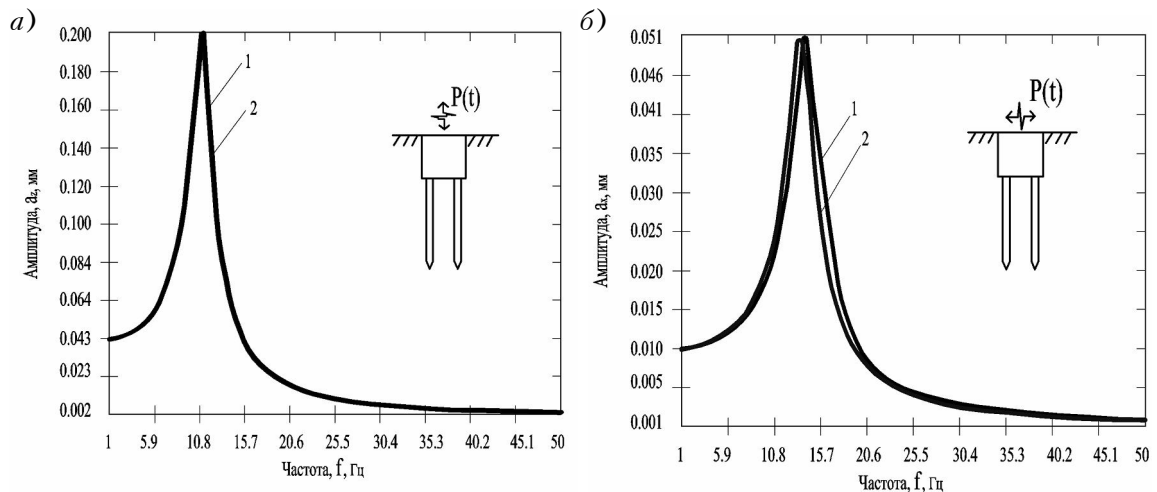


Рис. 9. Параметры вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющих колебаний свайного фундамента от действия соответственно вертикальной и горизонтальной гармонических нагрузок при наличии контакта подошвы ростверка с грунтом (2) и учете возможного зазора между ними (1)

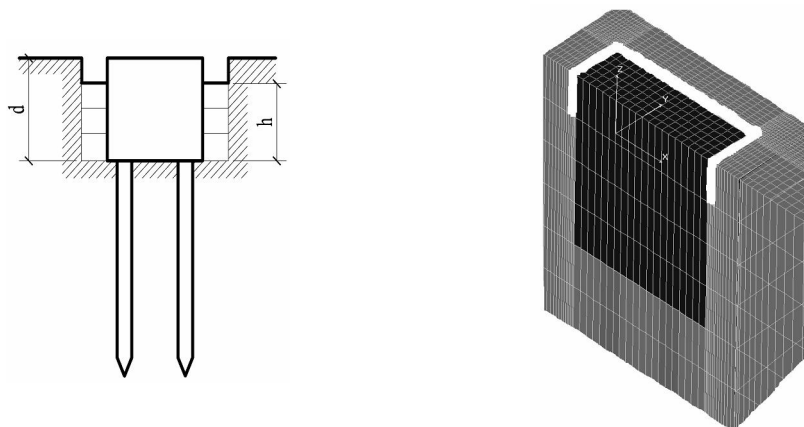


Рис. 10. Устройство зазора между фундаментом и грунтом

Устройство зазора между ростверком по боковой поверхности и грунтом выполнялось ступенями по $1/4$ высоты ростверка (рис. 10). Это проводилось для того, чтобы проанализировать влияние на параметры колебаний глубины заложения h/d ростверка. Из полученных результатов (рис. 11) видно, что чем больше ростверк заглублен в грунт, тем меньше амплитуды его колебаний. Это соответствует особенностям реального процесса колебаний свайных фундаментов. Полученные зависимости соответствуют имеющимся результатам специальных экспериментальных исследований.

Для проверки степени влияния длины свай на колебания свайных фундаментов были рассмотрены ростверки с различной длиной свай. Увеличение длины свай, способствующее возрастанию жесткости основания, приводит к уменьшению амплитуд как вертикальных, так и горизонтальных колебаний. На рис. 12 показано, как изменяются параметры горизонтальной составляющей колебаний свайного фундамента при действии горизонтальной динамической нагрузки с увеличением длины свай от $1,5b$ ($10d$ свай) до $3b$ ($20d$ свай).

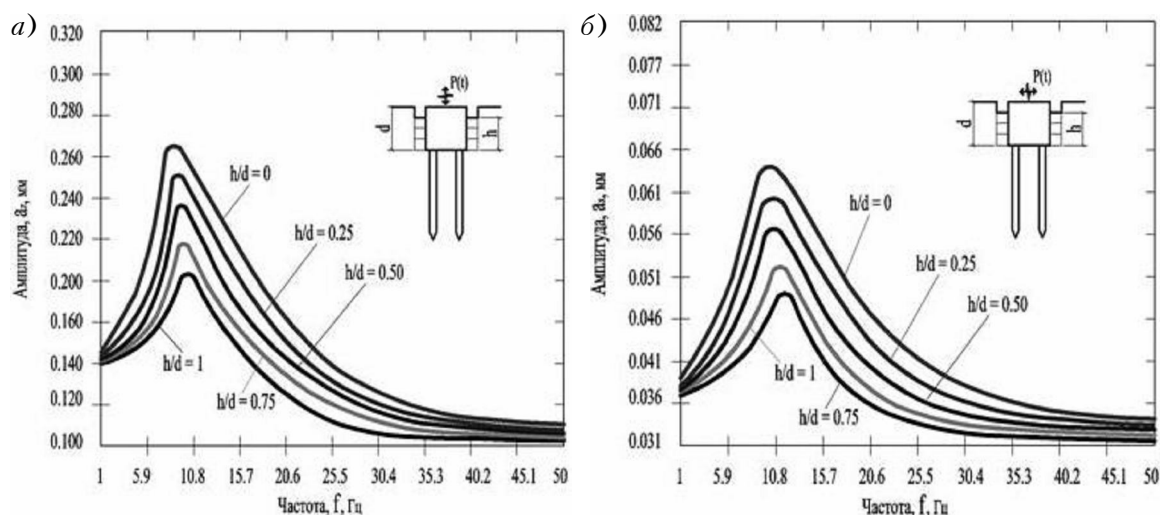


Рис. 11. Влияние заглубления ростверка на параметры вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющих колебаний свайного фундамента от действия соответственно вертикальной и горизонтальной гармонических нагрузок

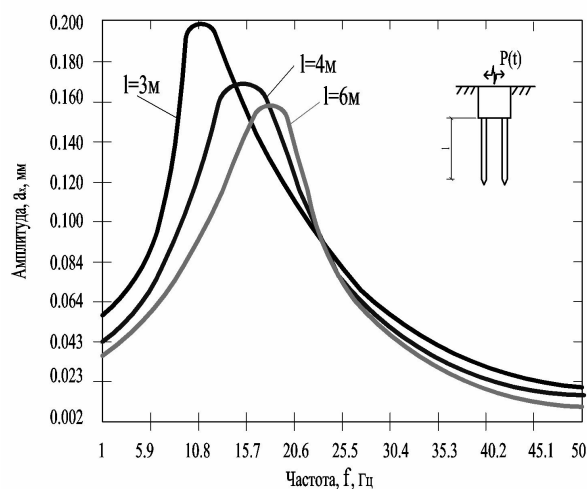


Рис. 12. Влияние длины свай на параметры горизонтальной составляющей колебаний свайного фундамента от действия горизонтальной гармонической нагрузки

Выполненные численные исследования подтвердили возможность применения МКЭ для прогнозирования колебаний свайных фундаментов. Программный комплекс SolidWorks позволяет проводить комплексный анализ динамического поведения свайных фундаментов в объемной постановке и создать универсальную методику расчета колебаний с учетом всех основных влияющих факторов. Сравнение показало, что полученные результаты во многом соответствуют имеющимся аналитическим и экспериментальным данным.