

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОСНОВАНИЕМ

У статті викладено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану скінченно-елементних моделей системи «пальовий фундамент – ґрунтовий масив».

В статье представлен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния конечно-элементных расчетных моделей системы «свайный фундамент – грунтовый массив».

In this article the comparative analysis of the tensed-and-deformed state of the finite-element models of «pile foundation – soil massif» system is presented.

В последние годы выполнен значительный объем экспериментальных и теоретических исследований по свайным фундаментам, что позволило существенно усовершенствовать нормы их проектирования. Выполнен значительный объем работ по совершенствованию методов расчета свай, используя физико-механические характеристики грунтов и данные статического и динамического зондирования. Принятый в Нормах метод определения несущей способности свай обеспечивает получение надежных результатов, более надежных, чем тех же результатов, полученных по зарубежным методам (коэффициенты надежности и коэффициенты запаса в отечественных нормах принимаются от 1 до 1,4, в зарубежных нормах – от 1,5 до 2,5).

Однако за последние 15 лет нормативные значения расчетных сопротивлений под нижними концами свай увеличились на 7...29 %, а несущая способность свай – в 1,3...1,5 раза. Также следует отметить, что применение свайных фундаментов не всегда согласуется с инженерно-геологическими условиями строительных площадок и экономически целесообразно. Нередки случаи завышения, а иногда и занижения несущей способности свай и несоответствия технологии погружения [1].

В зависимости от характера работы в грунте различают два основных вида свай: свай-стойки и висячие сваи [2]. В данной работе были исследованы свай-стойки, взаимодействующие с массивом грунта, который представляет собой однородную замкнутую область с заданными физическими характеристиками.

Тип свайного фундамента, длину и сечения свай выбирают в зависимости от геологических и гидрогеологических условий строительной

площадки, конструктивных особенностей и размеров сооружения, величины нагрузок, передаваемых на грунтовое основание, опыта строительства и производственных возможностей строительной организации. Окончательное решение о типе свай выносят на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов [3].

Под действием передаваемых сооружением вертикальных или наклонных сил в массиве основания возникают нормальные и касательные напряжения, приводящие к деформации грунтов. Кроме того, грунт испытывает напряжения от собственного веса. Деформации от собственного веса грунта завершаются, как правило, в процессе образования и диагенеза грунтов. Напряжения, возникающие от усилий, передаваемых сооружением, приводят к дополнительной деформации грунтов.

Основными исходными данными при проектировании свайных фундаментов являются внешние нагрузки, действующие в строительный и эксплуатационный периоды. К ним относятся постоянная нагрузка от собственного веса конструкций с учетом коэффициентов перегрузок, полезные эксплуатационные нагрузки, крановые нагрузки, снег, ветер. Кроме того, учитываются собственный вес ростверков и грунта над их обрезами [4].

Наиболее часто имеют место деформации уплотнения грунтов под действием нормальных напряжений, реже – деформации сдвигов грунтов, вызываемые касательными напряжениями [5; 6]. В данной работе рассматривалось действие нормальных сил, воздействующих на ростверк. Задачей эксперимента ставилось определение величины действия вертикальных нагрузок на окружающий грунт через сваи.

Широко применявшийся ранее метод расчета фундаментов предполагал отдельный расчет его элементов (например, ростверка и свай) [3]. На современном этапе развития необходимо учитывать совместную работу всех элементов фундамента. Это стало возможным благодаря широкому применению ЭВМ и инженерных программ, включая комплексы, оперирующие методом конечных элементов.

Таким образом, существует актуальная задача развития более детальных расчетов свайных фундаментов с учетом взаимодействия окружающего грунтового массива, которые не регламентированы существующими нормами, опирающиеся на механику грунтов. В механике грунтов грунт рассматривается как линейно-деформируемая среда. И для расчета используются в основном две расчетные схемы:

1) упругое линейно-деформируемое тело (основные параметры – модули упругости или деформации  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ );

2) упругое основание типа Фусса-Винклера (основной параметр – коэффициент постели  $C$ ).

Рассмотрим некоторые особенности этих схем. Основной недостаток первой схемы – модуль упругости является постоянным, хотя при больших глубинах он зависит от степени сжимаемости грунта. Кроме того, в данной схеме не учитывается работа грунта, расположенного выше подошвы плиты ростверка, одновременное взаимодействие нескольких свай с грунтом и взаимодействие столба с грунтом одновременно по боковой поверхности и подошве. Таким образом, можно свидетельствовать, что данная схема применима только для упругого полупространства и упругой полуплоскости.

По второму варианту справедливо утверждение, что перемещения каждой точки упругого основания линейно связаны с интенсивностями нагрузок и не зависят от нагрузок, действующих на остальные точки поверхности. Отсюда следует, что за пределами загружаемой поверхности перемещения точек равны нулю, что на самом деле не соответствует действительности.

Для учета взаимодействия системы «свайный фундамент – грунтовой массив» необходимо максимально точно создать расчетную модель, которая должна учитывать как геометрические характеристики конструкции фундамента, так и деформационные свойства грунта или грунтов, в случае если грунтовой массив представлен несколькими видами грунтов.

Расчетная модель чаще всего создается на основе методов расчета, реализованных на ЭВМ, либо так называемых «ручных расчетов». Методы расчетов, базирующиеся на ЭВМ, представлены в виде программных расчетных комплексов, например, на основе метода конечных элементов, таких как SCAD, ЛИРА, NASTRAN, PLAXIS и других. Для выполнения «ручных» расчетов используются проверенные опытом и временем методики СНиПов и ДБНов.

Решение задачи взаимодействия грунта и фундамента может быть представлено несколькими вариантами, т.е. следует разделить задачи в пространственной и плоской постановке (квазипространственные). Необходимо отметить, что задачи в пространственной постановке крайне сложны для применения расчетов с помощью нормативных норм и правил, т.к. использование такой постановки подразумевает оперирование напряжениями, а расчет по ДБН требует получения моментов и нормальных сил [7]. Во многих случаях, например, большая площадь ростверка, неоднородность грунтового массива, также крайне сложно свести пространственную задачу к квазипространственной.

На основе конструкции свайного фундамента необходимо рассмотреть все возможные варианты моделей и провести их сравнительный анализ. Рассматриваются следующие варианты:

– вариант № 1 – модель полностью создана на основе пластин;

– вариант № 2 – модель пластинчатая, сваи заданы стержнями;

– вариант № 3 – ростверк создан на основе пластин, сваи и окружающий их грунт – стержни;

– вариант № 4 – ростверк и сваи – пластины, грунт задан в виде стержней;

– вариант № 5 – модель полностью создана на основе стержней;

– вариант № 6 – ростверк и сваи созданы из стержней, окружающий их грунт – пластины;

– вариант № 7 – ростверк создан из стержней, сваи и окружающий их грунт – пластины;

– вариант № 8 – ростверк и грунт – из стержней, сваи – пластины;

– вариант № 9 – модель полностью создана на основе объемных элементов (не рассчитывалась в рамках данной работы).

До начала математического моделирования можно указать на некоторые недостатки буду-

щих моделей. Основной сложностью является задание характеристик грунта для конечного элемента [8]. Проблема в том, что реальные инженерно-геологические условия отличаются высоким уровнем сложности, что обозначено наличием слоистости и неоднородности, т.е. все модели отмечены высокой степенью идеализации, и во многих случаях невозможно использовать значения результатов расчета для практического применения.

Важно отметить, что на современных мощных ЭВМ практически не существует проблемы большого числа конечных элементов, вследствие чего можно применять элементы уменьшенных геометрических размеров. Однако следует отметить, что мелкая сетка также не всегда приводит к точности расчетной модели, т.к. нет необходимости использовать элементы порядка менее 0,1 м. Для типовых задач ис-

пользуются конечные элементы в среднем 0,3...0,5 м.

В качестве исходных данных был взят щебенистый грунт со следующими параметрами:

- объемный вес – 21,97 кН/м<sup>3</sup>;
- модуль упругости – 43 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,2.

Параметры конечно-элементной модели:

- толщина элементов – 0,5 м;
- длина свай – 12 м;
- над каждой свайе приложена расчетная нагрузка в 10 т;
- высота ростверка – 0,5 м;
- разбивка конечных элементов произведена с шагом 0,5 м; границы массива жестко закреплены.

После создания конечно-элементных моделей и их проверки были проведены их расчёты, результатами которых являются изополя и изолинии перемещений и напряжений (рис. 1).

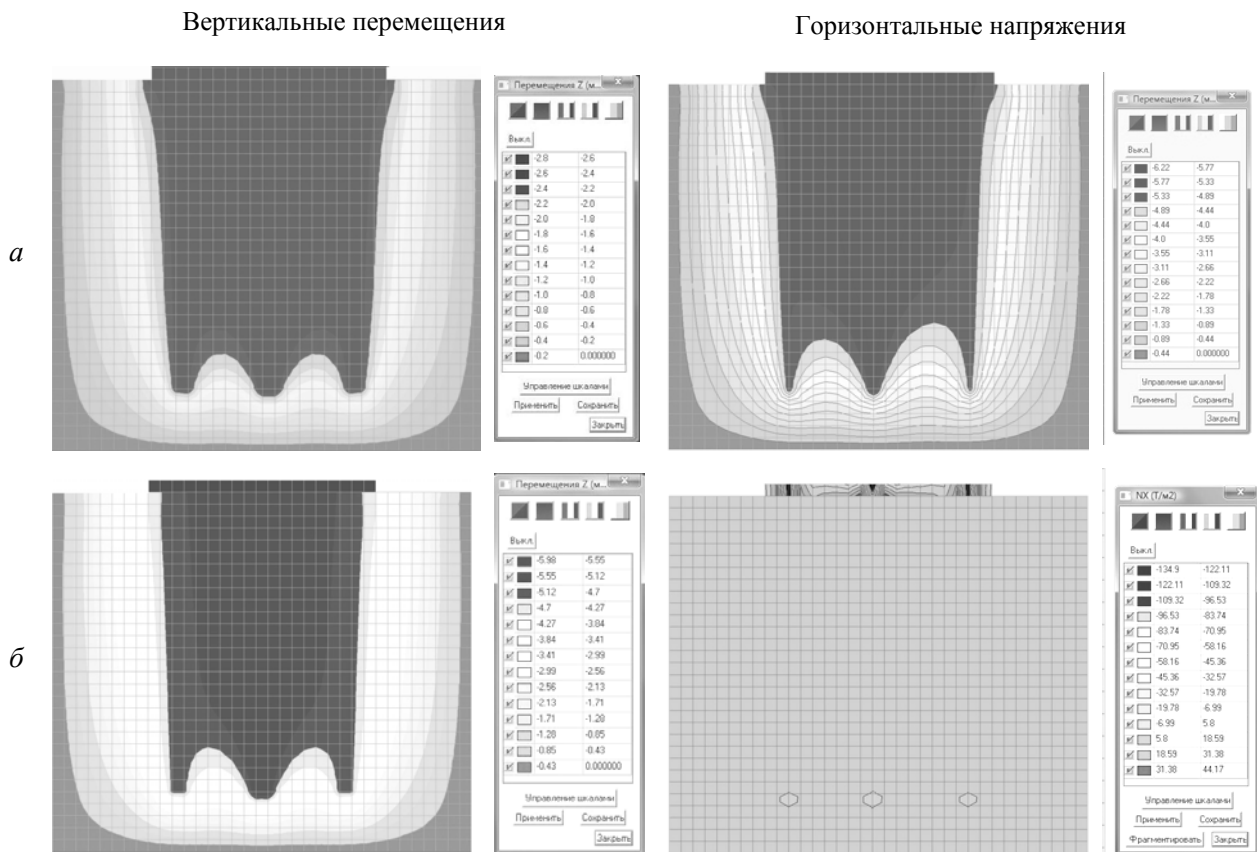


Рис. 1. Изополя и изолинии перемещений и напряжений конечно-элементных моделей:  
а – Вариант № 1; б – Вариант № 2

После проведённого численного сравнительного анализа можно сделать следующие выводы.

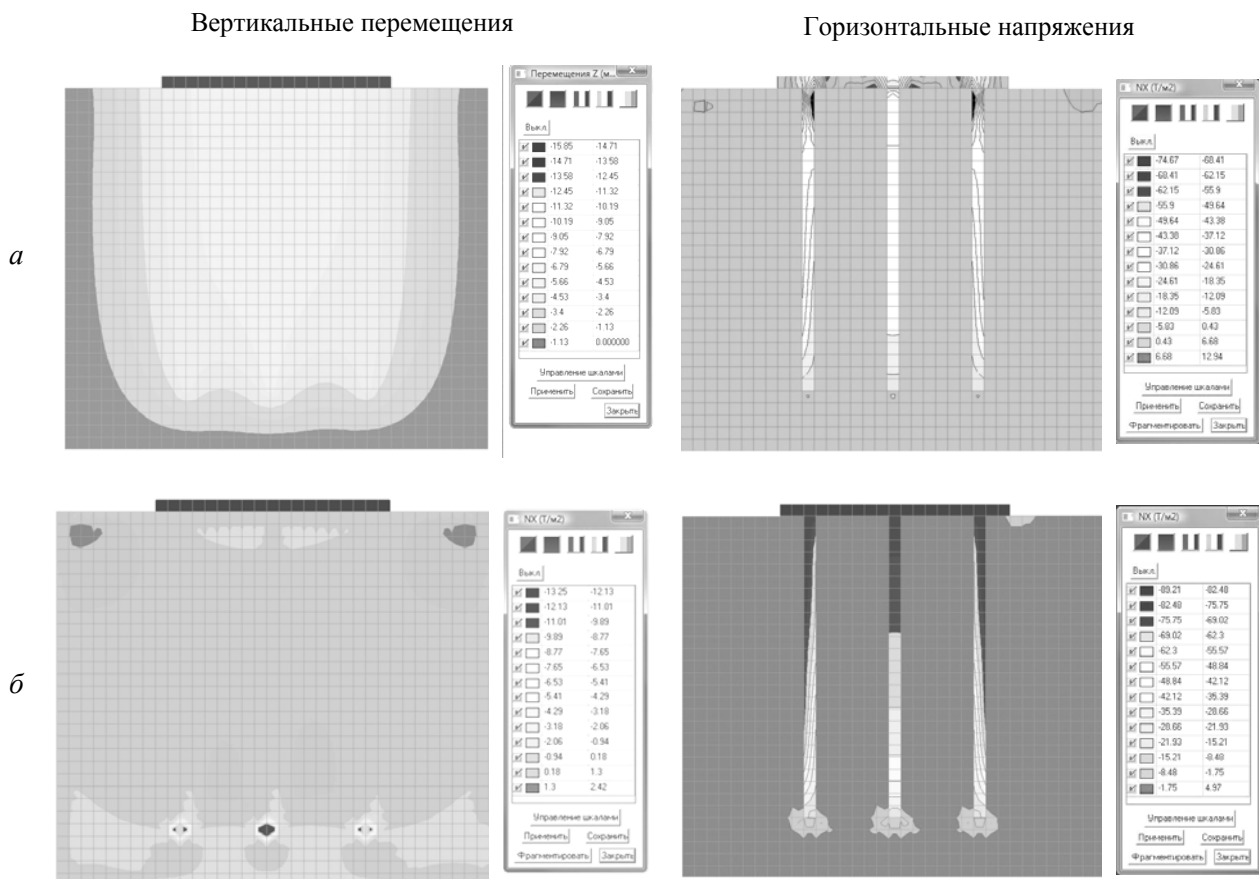
Вариант № 1. После анализа распределения изополей перемещений можно отметить то, что в данной модели существует совместная работа фундамента и грунтового массива (рис. 1, а);

грунт, который находится между сваями, переместился вместе с ними, что свидетельствует об их совместной работе.

Изополе горизонтальных напряжений свидетельствует, что с глубиной нормальные напряжения в сваях уменьшаются; распределение нормальных напряжений в грунтовом массиве

Вариант № 3. Третий вариант реализовать не удалось, грунтовый массив некорректно заменять стержневыми конечными элементами. Грунтовый массив, заданный стержнями, ведет себя неадекватно, и взаимодействие массива и свай не происходит. Дальнейшая обработка варианта не имеет смысла. То же касается и Варианта № 4.

Вариант № 6. Концентрация напряжений произошла в месте основания сваи; общее поле деформаций выглядит неоднородно; метод неудачный (рис. 2, *а*).



то исследование данной модели в при условии адекватного отображении  
чем может быть продолжено только действия конечных элементов различ

при условии адекватного отображения взаимодействия конечных элементов различной мет-

рики, т.е. пластин и стержней. Данная модель может использоваться более плодотворно, если в качестве пластинчатых элементов применять пластины, описываемые полиномами высшего порядка. Однако совмещение стержневых и пластинчатых элементов всё-таки требует решения ряда задач, результаты которых смогут доказать нормальную сходимость решения. Преимуществом данной схемы является простота в задании свай в виде стержней и получение решения в виде силовых факторов, т.е. моментов и нормальных сил, что приводит решение в соответствие с ДБН.

Вариант № 7. Ростверк нежелательно задавать стержнями (рис. 2, б). Данная конечно-элементная модель свидетельствует в пользу применения пластинчатых элементов.

Из вышеизложенного следует, что конечно-элементные модели следует использовать в дальнейшей работе в решении задач определения напряжённо-деформированного состояния свайного фундамента с взаимодействием грунтового основания.

Лишь первая и вторая конечно-элементные модели дали удовлетворительные результаты. Результаты расчета правдоподобны и очевидно, что взаимодействие свайного фундамента и грунтового массива происходит адекватно реальному взаимодействию. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о методологически верно выбранном подходе к созданию конечно-элементных моделей и использованию конечных элементов одной метрики, что даёт возможность получения детальных и точных результатов изменения напряжённо-деформированного состояния свайного фундамента и грунтового массива.

В дальнейшем кроме равномерно распределенной нагрузки следует применить узловые вертикальные и горизонтальные нагрузки. Важным решением является также решение задачи слоистого массива, анализа изменения длины свай и высоты ростверка. В каждом соответствующем случае запланировано исследование напряженно-деформированного состояния околосвайного массива грунта и проверка свай на несущую способность.

После данного этапа следует перейти от плоской задачи к пространственной и проанализировать напряжения в грунтовом массиве, созданном из объемных элементов. Особое внимание следует уделить усовершенствованию задания характеристик грунта, применение нескольких видов слов грунта разной толщины. Как известно, во многих случаях грунт ведет себя достаточно сложно и парадоксально (это отражается, например, в разнице между результатами расчетов и полевыми испытаниями).

Рассмотренные компьютерные модели отличаются высокой степенью идеализации, поэтому неоднородность грунтового массива следует моделировать путем включения элементов соответствующих характеристик.

В дальнейших исследованиях будет учтено взаимодействие свай и окружающего ее массива грунта в случае неоднородных или слоистых грунтовых оснований, а также рассмотрен случай свайного фундамента, который находится на оползневом склоне.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартоломей, А. А. Прогноз осадок свайных фундаментов [Текст] / А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
2. Грутман, М. С. Свайные фундаменты [Текст] / М. С. Грутман. – К.: Будівельник, 1969. – 193 с.
3. Гервазюк, Б. В. Расчет фундаментных балок [Текст] / Б. В. Гервазюк, С. И. Глазер. – К.: Будівельник, 1967. – 99 с.
4. Ободовский, А. А. Проектирование свайных фундаментов [Текст] / А. А. Ободовский. – М.: Стройиздат, 1977. – 112 с.
5. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / Б. И. Далматов. – Л.: Стройиздат, 1988. – 415 с.
6. Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / С. Б. Ухов, В. В. Семенов. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 527 с.
7. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты [Текст] / Минстрой РФ. – М.: ГП ЦПП. – 48 с.
8. Карпиловский, В. С. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2007. – 609 с.

Поступила в редколлегия 18.03.2010.

Принята к печати 24.03.2010.