

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-4-250-260
УДК 69.04 (69.07)

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование свайного фундамента в среде Femap with NX Nastran

Э.Р. Кужахметова*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Российская Федерация, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14
elja_09@bk.ru*

История статьи:

Поступила в редакцию: 22 апреля 2020 г.
Доработана: 25 июня 2020 г.
Принята к публикации: 12 июля 2020 г.

Аннотация

Актуальность. Подземная часть здания (фундамент и грунт) оказывает существенное влияние на его напряженно-деформированное состояние и поведение под действием эксплуатационных нагрузок. Поэтому существующая нормативно-техническая документация регламентирует проектирование зданий (сооружений) с учетом совместной работы их надземной и подземной частей. На практике подобный учет становится возможным на основе комплексного инженерного анализа здания как большой механической системы «здание – фундамент – основание», который сегодня можно провести с применением метода конечных элементов. В случае применения свайных фундаментов правильность получаемого результата во многом зависит от обоснованного выбора расчетной модели подсистемы «свая – грунт». В статье анализируются три расчетные модели сваи, работающей в массиве грунтового основания. Первая модель – дискретная (стержневая). В ней свая моделируется пространственными стержнями (типа Bar) и опирается на упругие опоры (Spring) с обобщенными жесткостями. Вторая модель – пространственная, в которой свая и грунт набраны объемными элементами (Solid). Третья модель – пространственно-стержневая, или комбинированная, в которой стержневая свая встроена в сетку грунтового массива при помощи веерной подструктуры, образованной стерженьками большой жесткости (типа Rigid). **Цель исследования** – определить рациональную расчетную модель подсистемы «свая – грунт» позволяющую, с одной стороны, сократить общий порядок системы разрешающих уравнений, а с другой – сохранить точность оценки напряженно-деформированного состояния расчетной модели «свая – грунт» и здания в целом. **Материалы и методы.** Численные результаты анализа статике свайного фундамента с применением трех расчетных моделей «свая – грунт» выполнены в программном комплексе CAE – класса Femap with NX Nastran, реализующим метод конечных элементов. **Результаты.** Сравнительно-численный анализ напряженно-деформированного состояния подсистемы «свайный фундамент – основание» позволил определить достоинства, недостатки, а также области рационального использования стержневой, пространственной и комбинированной расчетных моделей. В следующих статьях планируется рассмотреть расчет свай на вертикальные нагрузки, осуществить сравнительный анализ численных результатов с экспериментальными данными (в лаборатории или в натуральных условиях) на горизонтальные и вертикальные воздействия.

Ключевые слова: свая, свайный фундамент, грунт, дискретная модель сваи с грунтом, пространственная модель сваи с грунтом, стержневая модель, объемная модель, основание, грунтовый массив, упругие опоры

Для цитирования

Кужахметова Э.Р. Моделирование свайного фундамента в среде Femap with NX Nastran // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 4. С. 250–260. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-250-260>

Введение

В настоящее время проверочные расчеты прочности, устойчивости и колебаний проектируемых

зданий и сооружений выполняются с учетом фундамента и основания с реальными физико-механическими свойствами, в том числе определяемыми в результате статического и динамического зондирования. При этом широко используются программные комплексы инженерного анализа CAE-класса, реализующие метод конечных элементов (МКЭ) и позволяющие выстраивать и рассчитывать сложные пространственные (3D) расчетные модели. Высо-

Кужахметова Эльвира Рафаэлевна, аспирант, старший преподаватель кафедры машиноведения и технических систем, eLIBRARY SPIN-код: 1949-1140, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0907-786X>

© Кужахметова Э.Р., 2020

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

кая производительность и большие объемы памяти современных компьютеров позволяют осуществить объединение расчетных моделей надземной и подземной частей здания (сооружения). Инженерный анализ большой системы «здание – фундамент – основание» раскрывает инженеру-конструктору полную картину напряженно-деформированного состояния (НДС) проектируемого объекта, обеспечивает оценку степени взаимовлияния его составных частей.

Во многом благодаря новым вычислительным возможностям компьютерной техники в последние годы выполнен значительный объем теоретических и практических исследований по фундаментам, что позволило усовершенствовать методы расчета и нормы проектирования. Однако расчет большой механической системы «здание – фундамент – основание» МКЭ приводит к разрешающим системам уравнений очень большого порядка. Во многом это связано с моделированием именно подземной части. Расчетная модель надземной части здания и сооружения (пространственный каркас) обычно формируется стержневыми и пластинчатыми (оболочечными) конечными элементами с шестью обобщенными перемещениями в узлах. Численный инженерный анализ подобных моделей особых вычислительных трудностей не вызывает [1; 2]. Ситуация меняется при моделировании подземной части. Применение объемных конечных элементов приводит к существенному росту порядка решаемой задачи и значительному увеличению времени анализа. В результате выбор модели «фундамент – основание» зачастую производится исходя из доступной производительности и объема памяти вычислительной машины, а не из соображений необходимой точности моделирования (адекватности модели). При этом актуализируется не только задача решения больших систем уравнений по частям, но также и задача выбора рациональной расчетной схемы «фундамент – основание».

При решении первой задачи порядок решаемой системы уравнений можно существенно понизить с помощью методов подструктур и суперэлементов, контурных и расчетных точек [3–6] и др. В качестве примера можно привести программный комплекс Femap with NX Nastran, реализующий технологию внешнего суперэлемента. Его использование позволяет свести расчет глобальной системы «здание – фундамент – основание» к расчету здания, находящегося на дискретном упругом основании с обобщенными жесткостными характеристиками, зависящими от реологических свойств основания (грунта) [7]. В результате общая трудоемкость, время и стоимость расчетного анализа сложной системы существенно снижаются, причем без потери точности результата.

Для решения второй задачи необходим сопоставительный анализ различных расчетных моделей подсистемы «фундамент – основание». Далее будут рассмотрены расчетные модели фундаментов свайного типа. Подобные фундаменты получили широкое распространение при строительстве зданий и сооружений в основном благодаря своей высокой надежности, технологичности и относительной простоте изготовления [8]. Как известно, в зависимости от характера работы в грунте сваи разделяются на сваи-стойки и висячие сваи [9; 10]. Под свайным фундаментом подразумевается как группа свай, объединенная ростверком (ленточно-и плитно-свайные поля), так и сваи без ростверка, то есть отдельно стоящие сваи под опоры (колонны). Рассмотрение ленточно-свайных и плитно-свайных фундаментов выходит за рамки данной статьи, поскольку создание геометрии «свая – ростверк – грунт» не меняет основных принципов моделирования, характерных для отдельной сваи. Поэтому нами были исследованы модели висячей сваи с грунтовым основанием, представляющим однородную замкнутую область с заданными физико-механическими характеристиками. Из-за ограниченного объема статьи рассмотрим расчет сваи на горизонтальную нагрузку. Объектом анализа послужит квадратная свая в поперечном сечении размером $0,3 \times 0,3$ м, работающая совместно с грунтовым массивом. Для наглядности методик [10–14], учитывающих помимо ее горизонтального смещения и поворота в вертикальной плоскости еще и поперечную упругую деформацию, примем длину сваи 2 м. Продемонстрированные расчетные модели «свая – грунт» можно использовать для свай разной длины, а также при расчете как на горизонтальные, так и на вертикальные нагрузки [8; 15; 16].

Изучены следующие варианты расчетных моделей подсистемы «свая – грунт»:

- модель 1 – стержневая модель сваи с дискретными упругими опорами (пружинками) (рис. 1);
- модель 2 – пространственная модель сваи с грунтом (рис. 2);
- модель 3 – пространственно-стержневая модель сваи с веерной системой, составленной из жестких стержней типа Rigid (рис. 3).

1. Модельные представления свайного фундамента с грунтовым основанием

Модель 1. Стержневая модель сваи с дискретными упругими опорами (пружинками)

Свайная конструкция представляет собой стержневой элемент, в общем случае работающий на сжатие, растяжение, изгиб и кручение. Грунт моделируется в рамках гипотезы Винклера установкой ряда

дискретных упругих опор (конечных элементов типа Spring), расположенных по длине сваи [10]. Изменение жесткости грунта C_h , кН/м^3 , по глубине принята согласно нормативным документам [11; 12]. Формирование упрощенного графика грунта осуществляется по трем характерным его точкам (рис. 1). Началом отсчета является уровень отметки поверхности земли, затем выбирается точка, где грунт сложился как однородная структура, в которой проводится экспериментальное измерение коэффициента жесткости грунта C_h , кН/м^3 . Крайняя точка назначается на глубине 10 м. Ниже нее жесткость грунта возрастает лишь незначительно. Такой подход к построению графика изменения жесткости по глубине позволяет ограничиться одним измерением C_h . Методика определения коэффициента жесткости C_i , кН/м , для каждой i -упругой опоры (Spring) сваи (рис. 2) подробно изложена в работах [13–15]. Коэффициент жесткости упругой опоры C_i , кН/м , – это коэффициент жесткости грунта C_h , кН/м^3 , в уровне расположения опоры, умноженный на площадь $A = ab \text{ м}^2$, к ней относящуюся где a – расстояние между упругими опорами, м; b – ширина сваи, м.

При использовании модели 1 необходимы надежные методики определения обобщенных жесткостных характеристик грунта, которые могут быть получены на основе предварительных расчетов альтернативными методами [11–15].

Модель 2. Пространственная модель сваи с грунтом

Эталонной моделью «свая – грунт» будем считать трехмерную модель сваи с грунтовым основанием (рис. 3, а), в которой свайная конструкция и массив грунта представлены объемными (например, тетраэдральными) конечными элементами (КЭ) типа Solid [17; 18]. Каждый конечный элемент в указанной расчетной модели подземной части имеет по три степени свободы в узлах и полилинейную аппроксимацию перемещений по осям x , y , z [19].

Модель 3. Пространственно-стержневая модель с элементами (Rigid)

На рис. 3, б показана модель, в которой свая представлена стержневыми конечными элементами, а грунтовое основание – объемными КЭ. Узлы стержневых и объемных КЭ соединяются при помощи жестких стерженьков типа Rigid, образующих многоуровневые веерные подструктуры КЭ. Таким образом, при моделировании сваи реализуется гипотеза плоских сечений. При этом узлы

сваи сохраняют все шесть степеней свободы, что позволяет отслеживать в местах соединений не только нормальные и перерезывающие силы, но также изгибающие и крутящие моменты.

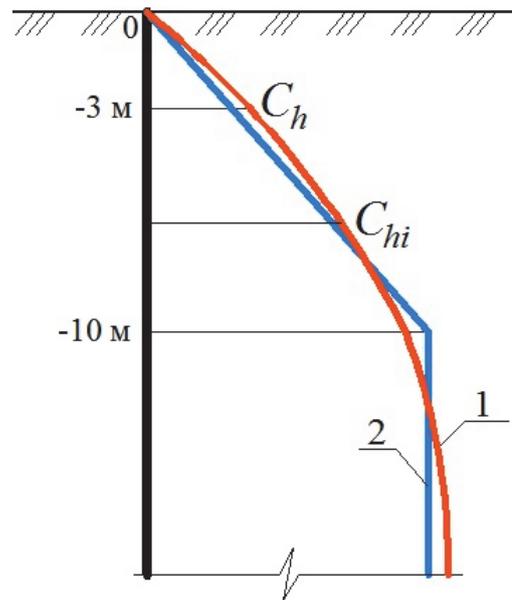


Рис. 1. Расчетная схема сваи и определение отпорности основания:
 P – горизонтальная сила, Н; a – расстояние между упругими опорами, м;
 C_h – коэффициент жесткости грунта в уровне расположения опоры, Н/м^3 ;
 C_i – коэффициент жесткости упругой опоры, Н/м
[Figure 1. The design scheme of the piles and the determination of the resistance of the base:
 P – horizontal force, N; a – distance between the elastic supports, m;
 C_h – soil stiffness coefficient at the level of support location, N/m^3 ;
 C_i – coefficient of stiffness of the elastic support, N/m]

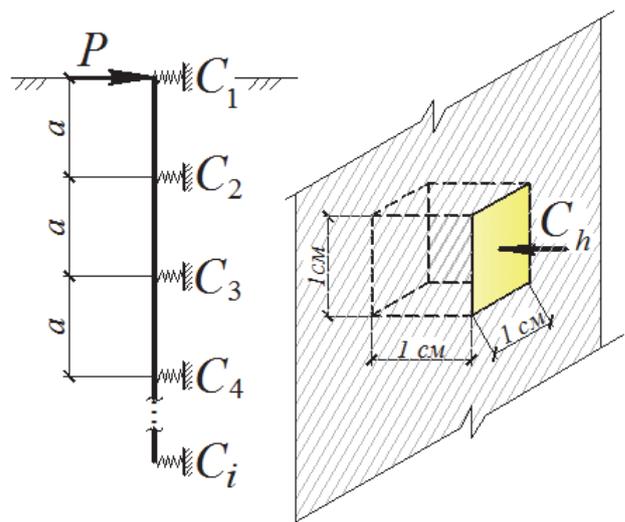


Рис. 2. График изменения жесткости грунта C_{hi} , Н/м^3 , по глубине h , м:
 1 – реальное изменение; 2 – расчетное изменение
[Figure 2. The graph of the change in the stiffness of the soil C_{hi} , N/m^3 , in depth h , м:
 1 – real change; 2 – estimated change]

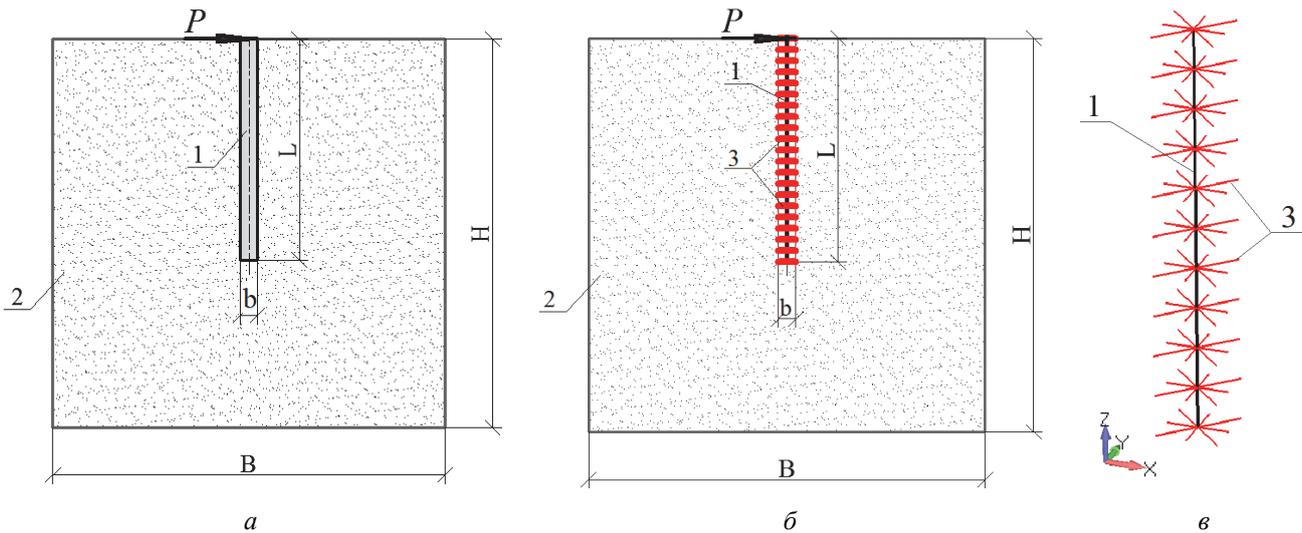


Рис. 3. Расчетные модели «свая – грунт»:

a – модель 2 – пространственная модель сваи с грунтом; *б* – модель 3 – пространственно-стержневая модель;
в – фрагмент сваи в виде стержня с элементами типа Rigid; 1 – железобетонная свая в виде стержневого конечного элемента Bar;
 2 – однородное грунтовое основание в виде объемного тела Solid; 3 – жесткие Rigid-элементы с заданным шагом разбиения сетки;
P – горизонтальная сила, Н; *H*; *b* – ширина сваи, м; *L* – длина сваи, м

[Figure 3. Design models “pile – soil”:

a – model 2 – solid model of soil piles; *б* – model 3 – spatial-bar model; *в* – fragment of a pile in the form of a bar with elements of the Rigid type;
 1 – reinforced concrete pile in the form of a finite element Bar; 2 – homogeneous soil base in the form of a solid body;
 3 – Rigid-elements with a given mesh partition step; *P* – horizontal force, N; *b* – pile width, m; *L* – pile length, m]

2. Материалы исследования

Для расчетного исследования возьмем исходные данные, аналогичные данным ранее опубликованных работ [14; 15].

Принята железобетонная забивная свая квадратного поперечного сечения $b \times h = 0,3 \times 0,3$ м, длиной $L = 2$ м по ГОСТ 19.804.1 [20]. Материал сваи – тяжелый бетон класса В15 с модулем упругости $E_b = 24 \cdot 10^3$ МПа (табл. 6.11 в [21]). Значение модуля сдвига бетона равняется $G_b = 0,4E_b = 0,4 \cdot 24 \cdot 10^3 = 9,6 \cdot 10^3$ МПа (п. 6.1.15 в [21]), а коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (п. 6.1.17 в [21]).

Грунт основания – песок четвертичного отложения, пылеватый (коэффициент пористости $e = 0,65$) с модулем деформации $E = 18$ МПа, углом внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$, удельным сцеплением $c = 4$ кПа (табл. Б.1 в [22]) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ (табл. 5.10 в [22]). Внешняя горизонтальная нагрузка на все расчетные модели сваи составляет $P = 100\,000$ Н [14; 15; 22].

3. Методы исследования

Сегодня метод конечных элементов является универсальным средством численного инженерного анализа сложных конструкций, включая конструкции зданий и сооружений. Он позволяет использовать в инженерном анализе широкий набор надежных стержневых, пластинчатых (оболочечных) и объемных конечных элементов с различными ап-

роксимирующими функциями полей перемещений. Для расчета стержневых и объемных тел применима дискретная модель, которая обуславливает описание НДС исследуемого объекта в виде системы алгебраических уравнений, порядок которой может быть весьма высоким. Поэтому анализ модели конструкции, построенной на основе МКЭ, имеет смысл лишь при условии полной автоматизации расчетных исследований. В исследовании расчетных моделей свайных фундаментов применен расчетный комплекс Femap with NX Nastran, реализующий весьма широкий набор расчетных подходов и методов.

4. Результаты

Рассмотрим результаты сравнительного расчетного анализа напряженно-деформированного состояния свайного фундамента с применением трех расчетных моделей «свая – грунт».

Модель 1. Стержневая модель сваи с дискретными упругими опорами (пружинками)

Для двухметровой сваи используются три опорные точки – по краям и в центре – с шагом $a = 1$ м (рис. 4).

В точке 1 (расположенной на поверхности при $h_{гр} = 0$ м) коэффициент жесткости упругой опоры составляет $C_1 = 2 \cdot 10^6$ Н/м, в точке 2 (на глубине $h_{гр} = 1,5$ м) – $C_2 = 8 \cdot 10^6$ Н/м, а в точке 3 (на глубине $h_{гр} = 3$ м) коэффициент жесткости упругой опоры

равен $C_3 = 11,2 \cdot 10^6$ Н/м. Конечно-элементная модель стержня состоит из шести конечных элементов типа Bar, состыкованных в семи узлах. Каждая пружинка (элемент типа Spring) имеет несмещаемое опирание. На рис. 5 представлены результаты расчета: горизонтальные перемещения (а) и реакции опор (б) свай.

Увеличение шага упругих опор не оказывает существенного влияния на результат (табл. 1).

Модель 2. Пространственная модель «свая – грунт» (Solid-модель)

Рассмотрена замкнутая область грунта в виде куба с размерами $H \times B \times L = 6 \times 6 \times 6$ м. Размеры свай составили $0,3 \times 0,3$ м, длина $L = 2$ м. Общее число объемных КЭ расчетной модели – 37 979, число узлов стыковки – 55 478, сетка с шагом 0,3 м. Граничные условия для грунтового массива принимались следующими:

- перемещения нижней и боковых поверхностей равны нулю;
- перемещение верхней поверхности массива не ограничивается.

К свае приложена сосредоточенная горизонтальная (вдоль оси x) сила $P = 100\,000$ Н. Нагрузка равномерно распределялась по верхней образующей поверхности при помощи веерной системы жестких КЭ типа Rigid. На рис. 6 показано горизонтальное перемещение свай совместно с грунтом (а) и эквивалентные напряжения в свае $\sigma_{эжв}$, Н, (б), вычисленные в соответствии с энергетической гипотезой фон Мизеса:

$$\sigma_{эжв} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x\right)^2 + 6 \cdot \left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2\right)}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения по осям x, y, z ; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – касательные напряжения на площадках, перпендикулярные к осям x, y, z .

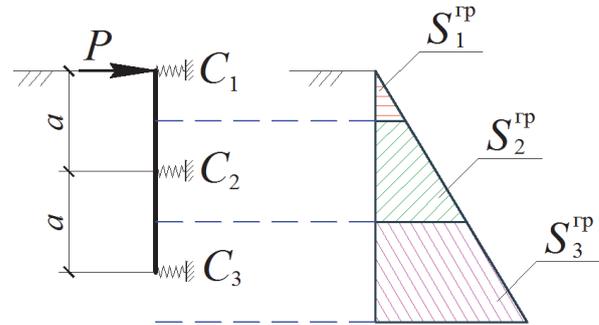


Рис. 4. Модель 1 – стержневая модель свай с дискретными упругими опорами C_i и схема определения жесткости упругих опор для свай $L = 2$ м: P – горизонтальная сила, Н; a – расстояние между упругими опорами, м; C_1, C_2, C_3 – коэффициенты жесткости упругих опор, Н/м; S_i^{gp} – грузовые площади, относящиеся к упругим опорам, м²

[Figure 4. Model 1 – bar model of piles with discrete elastic supports C_i and a scheme for determining the stiffness of elastic supports for piles $L = 2$ m: P – horizontal force, N; a – distance between the elastic supports, m; C_1, C_2, C_3 – stiffness coefficients of elastic supports, N/m; S_i^{gp} – cargo area related to elastic supports, m²]

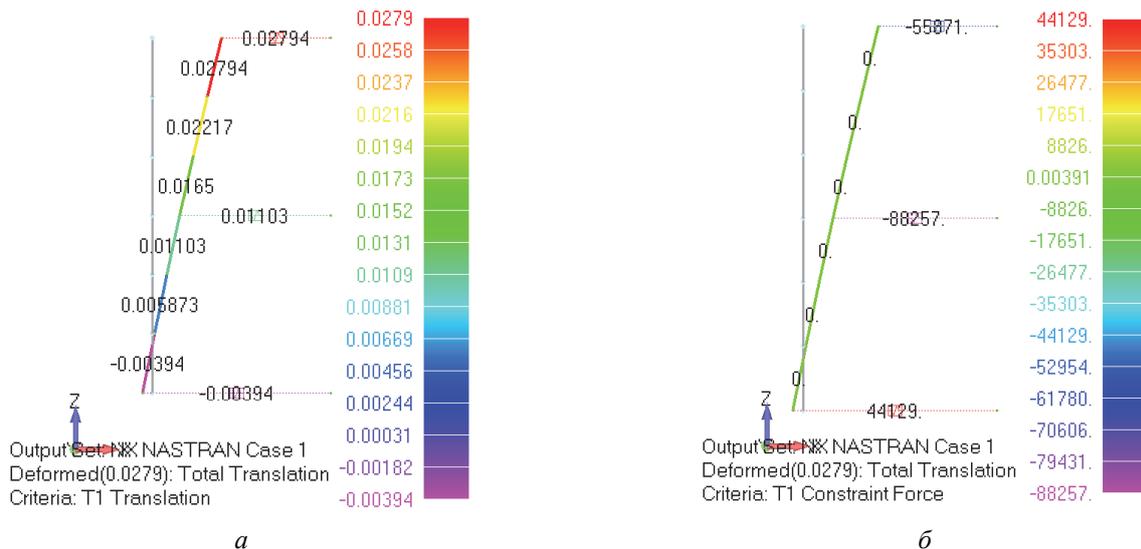


Рис. 5. Результаты расчета стержневой модели 1:
 а – перемещение V_i узла по оси x в точках $V_1 = 0,02794$ м, $V_2 = 0,01103$ м, $V_3 = -0,00394$ м;
 б – опорные реакции P_i по оси x в точках $P_1 = 55871$ Н, $P_2 = 88257$ Н, $P_3 = -44129$ Н

[Figure 5. The calculation results of the core model 1:
 а – translation V_i of a node along the x axis at points $V_1 = 0,02794$ м, $V_2 = 0,01103$ м, $V_3 = -0,00394$ м;
 б – constrain force P_i along the x axis at points $P_1 = 55871$ Н, $P_2 = 88257$ Н, $P_3 = -44129$ Н]

Исходные данные и результаты расчета модели 1
 [Table 1. The initial data and the calculation results of the model 1]

№ п/п [No.]	Исходные данные модели [Initial data of the model]			Результаты расчета [Calculation results]		
	Размер сетки s , м [Mesh size on solid s , m]	Число узлов [Number of nodes]	Число элементов [Number of elements]	Перемещение V_i , м, узла по оси x в точках [Translation V_i , m, of a node along the x axis at points]		
				1	2	3
1	0,5	9	10	0,02794	0,01103	-0,00394
2	0,4	12	11	0,02794	0,01103	-0,00394
3	0,3	13	12	0,02794	0,01103	-0,00394
4	0,2	21	22	0,02794	0,01103	-0,00394
5	0,1	41	42	0,02794	0,01103	-0,00394

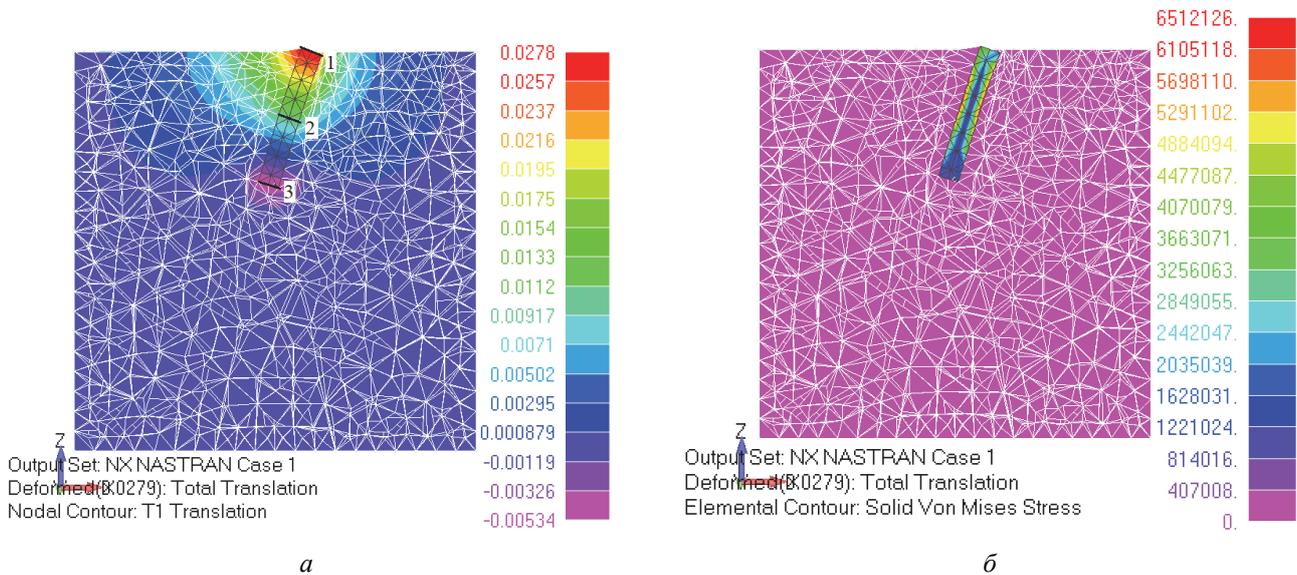


Рис. 6. Результаты расчета пространственной модели 2:
 а – перемещение V_i узла по оси x в точках $V_1 = 0,0279$ м, $V_2 = 0,0112$ м, $V_3 = -0,00534$ м;
 б – эквивалентные напряжения в объемном элементе $\sigma_{э\text{кв}}$, Н
[Figure 6. The results of the calculation of solid model 2:
 а – translation V_i of a node along the x axis at points $V_1 = 0.0278$ m, $V_2 = 0.0112$ m, $V_3 = -0.00534$ m;
 б – solid Von Mises stress σ_{eqv} , N]

Исходные данные и полученные результаты расчета пространственной модели 2
 [Table 2. The initial data and the calculation results of the spatial model 2]

№ п/п [No.]	Исходные данные модели [Initial data of the model]			Результаты расчета [Calculation results]		
	Размер сетки s , м [Mesh size on solid s , m]	Число узлов [Number of nodes]	Число элементов [Number of elements]	Перемещение V_i , м, узла по оси x в точках [Translation V_i , m, of a node along the x axis at points]		
				1	2	3
1	0,5	17033	11457	0,0274	0,01120	-0,00508
2	0,4	28104	19047	0,0276	0,01120	-0,00522
3	0,3	55478	37979	0,0279	0,01120	-0,00534
4	0,2	142482	98617	0,0280	0,01130	-0,00556
5	0,1	714857	503816	0,0280	0,01130	-0,00556

Для сравнительного анализа результатов (по горизонтальному смещению) размер разбиения конечно-

элементной сетки изменялся в пределах от 0,1 до 0,5 м. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Как видно, с уменьшением размера сетки (сгущения) незначительно возрастает числовое значение горизонтального перемещения в верхней и нижней частях сваи (табл. 2, рис. 6, а).

Модель 3. Пространственно-стержневая модель с элементами Rigid

По аналогии с предыдущей моделью массив грунта представлен кубом с размерами $H \times B \times L = 6 \times 6 \times 6$ м. Шаг КЭ сетки составил 0,3 м. Область грунта разбита на 37 251 элемент. Число узлов стыковки – 25 231. Граничные условия грунта приняты аналогичными пространственной модели 2.

В рамках регулярной конечно-элементной сетки стержневой сваи в каждом ее узле установлен плос-

кий веер жестких элементов Rigid, соединяющих сваю с грунтовым основанием. В сравнении с моделью 2 число конечных элементов и узловых точек сократилось до 33 %, а следовательно, сократился и порядок системы разрешающих уравнений. Полученные результаты расчета деформированного состояния подсистемы «свая – грунт» приведены на рис. 7.

В табл. 3 представлен сравнительный анализ численного расчета деформированного состояния модели 3 с шагом разбиения сетки КЭ от 0,1 до 0,5 м.

Результаты численного анализа деформированного состояния по всем расчетным вариантам сведены в табл. 4 и сопоставлены с аналогичными результатами, полученными численно-аналитическими методами расчета, изложенными в [10–15].

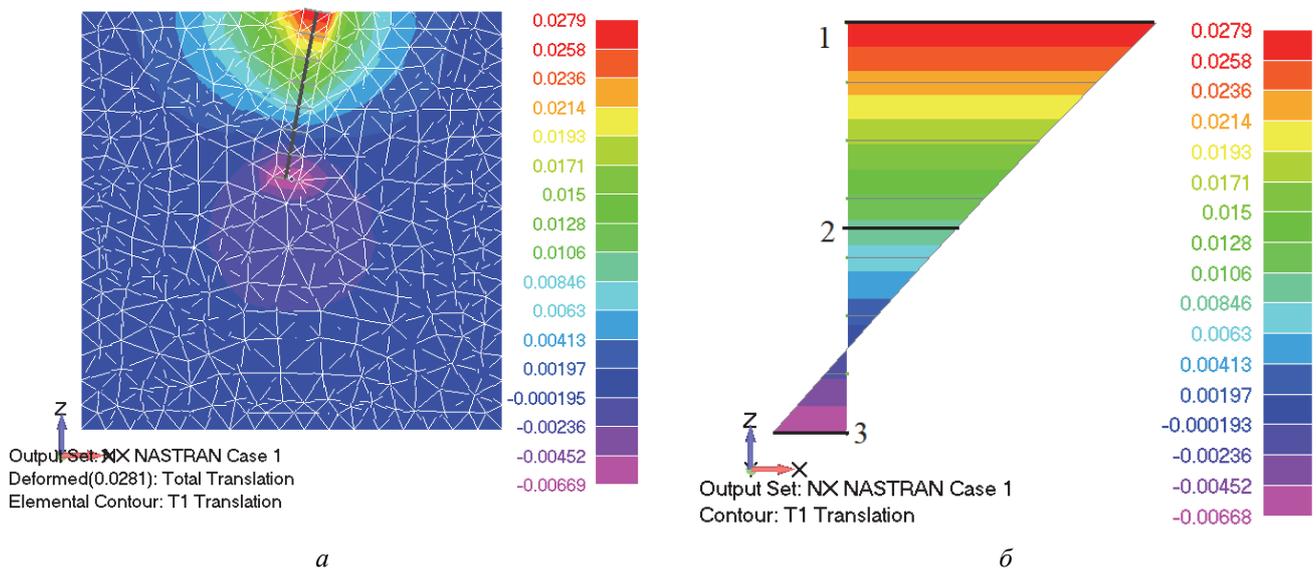


Рис. 7. Результаты расчета пространственно-стержневой модели 3:

а – перемещение грунта V_i узла по оси x в точках $V_1 = 0,0339$ м, $V_2 = 0,0129$ м, $V_3 = -0,00805$ м;

б – перемещение сваи V_i узла по оси x в точках $V_1 = 0,0339$ м, $V_2 = 0,0129$ м, $V_3 = -0,00805$ м

[Figure 7. The results of the calculation of the solid-bar model 3:

а – translation of soil V_i of a node along the x axis at points $V_1 = 0,0339$ м, $V_2 = 0,0129$ м, $V_3 = -0,00805$ м;

б – translation of the pile V_i of a node along the x axis at points $V_1 = 0,0339$ м, $V_2 = 0,0129$ м, $V_3 = -0,00805$ м;]

Таблица 3

Результаты расчета пространственно-стержневой модели 3
[Table 3. The calculation results of the solid-bar model 3]

№ п/п [No.]	Исходные данные модели [Initial data of the model]			Результаты расчета [Calculation results]		
	Размер сетки s , м [Mesh size on solid s , m]	Число узлов [Number of nodes]	Число элементов [Number of elements]	Перемещение V_i , м, узла по оси x в точках [Translation V_i , m, of a node along the x axis at points]		
				1	2	3
1	0,5	11043	7310	0,0273	0,0103	-0,00676
2	0,4	19536	13051	0,0277	0,0105	-0,00666
3	0,3	37251	25231	0,0280	0,0106	-0,00668
4	0,2	89316	61252	0,0280	0,0107	-0,00687
5	0,1	464655	327480	0,0280	0,0107	-0,00687

Сравнительный анализ полученных результатов статического линейного расчета
[Table 4. Comparative analysis of the results of static linear calculation]

№ п/п [No.]	Расчетные варианты моделирования «свая – грунт» [Design models “pile – soil”]	Результаты расчета [Calculation results]					
		Перемещение V_i , м, узла по оси x в точках [Translation V_i , m, of a node along the x axis at points]			Опорные реакции грунта P_i , кН, по оси x в точках [Constrain force P_i , kN, along the x axis at points]		
		V_1	V_2	V_3	P_1	P_2	P_3
1	Численно-аналитические методы расчета [Numerical and analytical methods of calculation] [15]						
1.1	Численно-аналитические методы [Numerical and analytical methods]	0,02800	0,01100	-0,0039	56,000	88,000	-44,000
2	Метод конечных элементов [Finite element method]						
2.1	Модель 1. Стержневая модель свай с упругими опорами Spring [Model 1. Bar model of piles with discrete elastic supports]	0,02794	0,01103	-0,00394	55,871	88,257	-44,129
2.2	Модель 2. Пространственная модель свай с грунтом [Model 2. The solid model “pile – soil”]	0,02790	0,01120	-0,00534	–	–	–
2.3	Модель 3. Пространственно-стержневая модель с элементами Rigid [Model 3. Solid-bar model with Rigid elements]	0,02800	0,01060	-0,00668	–	–	–

На рис. 8 представлен график сходимости результатов расчета от действия горизонтальной силы $P = 100\,000$ Н, полученный для трех моделей «свая – грунт» с учетом размера разбиения сетки s , м. Результаты численного метода практически подтвердили сходство с аналитическим методом (табл. 4). Если сравнить результаты расчетов моделей 1, 2 и 3 с аналогичными результатами, полученными альтернативными методами [14; 15], то они совпадают с достаточно высокой точностью.

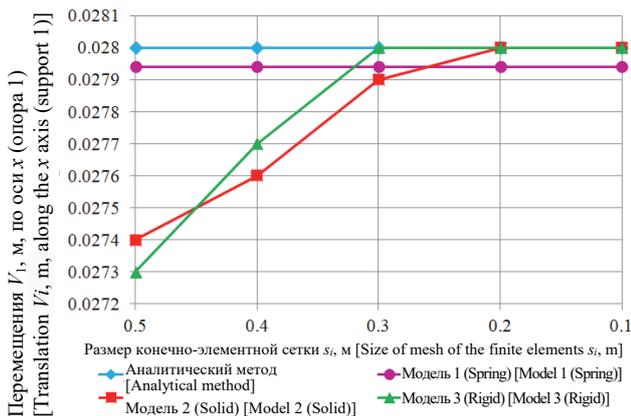


Рис. 8. График сходимости результатов (с точностью до 0,0001 м), полученных численно-аналитическими методами расчета, на примере трех расчетных моделей «свая – грунт» [Figure 8. The graph of convergence of the results obtained by numerical and analytical methods of calculation on the example of three calculation models “pile – soil”]

Отметим ряд особенностей, отражающих специфику формирования и применения расчетных моделей «свая – грунт» и влияющих на анализ результатов расчета.

Модель 1. Стержневая модель свай с дискретными упругими опорами (пружинками)

Преимуществом данной модели является наименьшая трудоемкость в создании геометрической и расчетной моделей, и отсюда – экономия времени на выполнение расчета. Из-за малого числа конечных элементов и узлов время численного анализа и число решаемых уравнений, как и следовало ожидать, оказалось существенно меньше, чем у моделей 2 и 3. Основным недостатком модели 1 является трудоемкий расчет по определению коэффициентов жесткости C_i , кН/м, каждой i -упругой опоры (Spring), выполняемый аналитическими методами. Так, трудоемкость существенно возрастет при заданных гидрогеологических условиях строительной площадки, имеющей сложную схему геологического разреза по слоям и типам грунта. К тому же, в научно-технической литературе коэффициент постели (коэффициент жесткости) грунта C_h , кН/м³, имеет весьма размытые границы, что затрудняет его практический выбор. Результатами анализа модели являются перемещения и деформации свай, изгибающие и крутящие моменты, продольные и поперечные силы, нормальные и касательные напряжения в свае, вызванные кручением, а также реакции грунта, заданные в дискретном виде.

Модель 2. Пространственная модель сваи с грунтом

Преимущество модели 2 заключается в относительной простоте ввода в расчет заданных физико-механических свойств грунта, определяемых по результатам инженерно-геологических изысканий, включая создание точных переходов между слоями различных типов грунта. Однако данная задача является очень трудоемкой на начальной стадии создания геометрической и конечно-элементной пространственных моделей грунтового основания. Отсюда увеличение порядка решаемых алгебраических уравнений за счет большого числа КЭ и существенное увеличение продолжительности численного анализа. Поскольку каждый КЭ расчетной модели подземной части здания имеет по три линейных перемещения в узлах и полилинейную аппроксимацию перемещений, то могут возникнуть сложности при ее стыковке с надземной частью конструкции, конечные элементы которой имеют иную аппроксимацию полей перемещений. Характерным примером может служить стыковка стержневой удерживающей колонны здания с объемной свайей, приводящая к потере точности ряда анализируемых внутренних силовых факторов. Результатами расчетов являются все характеристики НДС, включая перемещения по осям x , y , z , и компоненты тензора напряжений и деформаций.

Модель 3. Пространственно-стержневая модель с элементами Rigid

Модель 3 характерна использованием стержневой сваи, имеющей по шесть узловых степеней свободы, что позволяет стыковать ее с узлами надземной части без потери точности результата. При этом в точках стыковки сохраняется полный набор внутренних силовых факторов, что выгодно отличает ее, например, от модели 2. К тому же модель 3 сохраняет все преимущества развернутого анализа НДС объемного грунтового массива с учетом разнообразных реологических свойств. В данной модели для анализа доступны все характеристики НДС, предусмотренные для стержневого и объемного КЭ.

Заключение

В статье проведено сопоставление трех расчетных конечно-элементных моделей подземной части здания (подсистемы «свая – грунт»), предназначенных для численного анализа статике и динамики большой механической системы «здание – фундамент – основание».

Каждая расчетная модель обладает своими достоинствами и недостатками. Окончательный выбор

зависит от заданных условий задачи, объема исходной информации, знаний и профессионального опыта инженера-конструктора, технических характеристик используемой электронно-вычислительной машины, а также лимита времени, предусмотренного на выполнение всего комплекса инженерных расчетов.

Список литературы

1. Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-плитно-вантового (ЦПВ) покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 95–110. [http:// dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110](http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110)
2. Кужахметова Э.Р. Конструктивные решения расположения ванта в цилиндрично-плитно-вантовом (ЦПВ) покрытии здания (сооружения) // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 77–89. doi: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970.
3. Przemieniecki J.S. Matrix Structural Analysis of Structures // AIAA Journal. 1963. Vol. 1. No.1 Pp. 138–147.
4. Meissner C.J. A Multiple Coupling Algorithm for the Stiffness Method of Structural Analysis // AIAA Journal. 1968. Vol. 6. No. 11. Pp. 2184–2185.
5. Сапожников А.И. Методы контурных и расчетных точек в нелинейных расчетах свайных эстакад, нагруженных горизонтальными нагрузками // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1984. № 5. С. 29–30.
6. Кужахметова Э.Р. Расчетное проектирование каркасного здания с учетом обобщенных жесткостей и нагрузок основания и фундамента (часть 1). 2019. № 12. С. 34–36. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-12-34-46.
7. Трофименко Ю.Г., Ободовский А.А. Свайные фундаменты для жилых и промышленных зданий. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Издательство литературы по строительству, 1970. 241 с.
8. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 с изм. № 1–3. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2011.
9. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2004.
10. Сапожников А.И., Солгалов Ю.В. Расчет свай на горизонтальную нагрузку в нелинейно-деформируемом основании // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1980. № 4. С. 9–11.
11. Сапожников А.И., Абдурахманов А. Методические указания по расчету одноэтажных каркасных сельскохозяйственных зданий на сваях-колоннах. Киев: НИИСК Госстроя СССР, 1979. 41 с.
12. Сапожников А.И., Штанько Л.Ф. Руководство по определению горизонтальной сейсмической нагрузки, действующей на свайные пирсы и набережные. М.: СоюзморНИИпроект, РМС 40-74, 1974. 61 с.

13. Сапожников А.И. Расчет жестких и коротких свай на продольно-поперечные нагрузки: методические указания. Астрахань: АИСИ, 1994. 11 с.

14. Сапожников, А.И., Кужахметова Э.Р. Способы погружения, прочностные и деформационные расчеты свай. Б. и., 2015. 71 с. URL: <https://rucont.ru/efd/314524> (дата обращения: 04.04.2020).

15. Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Сравнительный анализ работы длинных и коротких свай при горизонтальном нагружении // Строительные материалы, технологии, оборудования XXI века. 2015. № 5–6. С. 30–34.

16. Кужахметова Э.Р. Погружение, расчет и конструирование монолитной железобетонной сваи конической формы // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 57–64.

17. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

18. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2003. 448 с. (Серия «Проектирование»).

19. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 540 с.

20. ГОСТ 19.804.1 Сваи забивные железобетонные цельные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой и поперечным армированием ствола и с напрягаемой арматурой. М.: Издательство стандартов, 1980.

21. СП 63.13330.2011. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 с изменением № 1. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2015.

22. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2010.

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-4-250-260

RESEARCH PAPER

Modeling of a piled foundation in a Femap with NX Nastran

Elvira R. Kuzhakhmetova

Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 Aleksandra Nevskogo St, Kaliningrad, 236041, Russian Federation
elja_09@bk.ru

Article history:

Received: April 22, 2020

Revised: June 25, 2020

Accepted: July 12, 2020

Abstract

Relevance. The underground part of the building (foundation and soil) has a significant impact on its stress-strain state and behavior under the influence of operational loads. Therefore, the existing regulatory and technical documentation regulates the design of buildings (structures), taking into account the joint work of their aboveground and underground parts. In practice, such accounting becomes possible on the basis of a comprehensive engineering analysis of the building as a large mechanical system “building – foundation – soil”, which today can be carried out using the finite element method. In the case of pile foundations, the correctness of the result depends largely on the reasonable choice of the design model of the pile-soil subsystem. The article analyzes three design models of piles operating in an array of soil foundation. The first model is discrete. In it, the pile is modeled by bars and is based on elastic supports (Spring) with generalized stiffnesses. Second model – spatial, in which the pile and soil are typed in by volumetric elements (Solid). Third model – spatial-bar or combined, in which the bar pile is embedded in the mesh of the soil mass using a rigid substructure formed by bars of high rigidity. **The aim of the work** – to determine a rational calculation model of the “pile – soil” subsystem, which allows, on the one hand, to reduce the general order of the system of resolving equations, and, on the other hand, to maintain the accuracy of the assessment of the stress-strain state of the calculation model of “pile – soil” and the building as a whole. **Materials and methods.** The numerical results of the analysis of the pile foundation statics using the three “pile – soil” calculation models were performed in the CAE software package – the Femap with NX Nastran class, which implements the finite element method. **Results.** Comparative-numerical analysis of the stress-strain state of the “pile foundation – soil” subsystem made it possible to determine the advantages, disadvantages, and also the areas of rational use of bar, spatial combined calculation models. In the next articles, it is planned to consider the calculation of piles for vertical loads, as well as a comparative analysis of numerical results with experimental data (in the laboratory or in field conditions) for horizontal and vertical effects.

Keywords: pile, pile foundation, soil, discrete model of pile with soil, spatial model of pile with soil, bar model, volumetric model, soil mass, elastic supports

For citation

Kuzhakhmetova E.R. Modeling of a piled foundation in a Femap with NX Nastran. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(4):250–260. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-250-260> (In Russ.)

Elvira R. Kuzhakhmetova, postgraduate student, senior lecturer of the Department of Engineering Science and Technical Systems, eLIBRARY SPIN-code: 1949-1140, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0907-786X>

References

1. Kuzhakhmetova E.R. Stress-strain state cylinder-plate-cable-stayed roof buildings (structures) with various forms of external support contour. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16 (2):95–110. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110> (In Russ.)
2. Kuzhakhmetova E.R. Constructive solutions of cable location in cylinder-plate-cable-stayed roof of building (structures). *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019; (5):77–89. doi: 10.34031/article_5ce292ca24bc23.91006970. (In Russ.)
3. Przemieniecki J.S. Matrix Structural Analysis of Substructures. *AIAA Journal*. 1963;1(1):138–147. <https://doi.org/10.2514/3.1483>
4. Meissner C.J. A Multiple Coupling Algorithm for the Stiffness Method of Structural Analysis. *AIAA Journal*. 1968;6(11):2184–2185. <https://doi.org/10.2514/3.4954>
5. Sapozhnikov A.I. Metody konturnykh i raschetnykh tochek v nelinejnykh raschetah svajnykh estakad, zagruzhennykh gorizontálnymi nagruzkami [Methods of contour and design points in nonlinear calculations of pile racks loaded with horizontal loads]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo i arhitektura [News of higher educational institutions. Construction and architecture]*. 1984;(5):29–30. (In Russ.)
6. Kuzhakhmetova E.R. Numerical design of frame buildings taking into account the generalized stiffness and load of soil and foundation (part 1). *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019;(12):4–36. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-12-34-46. (In Russ.)
7. Trofimenkov Yu.G., Obodovskiy A.A. *Svaynyye fundamenty dlya zhilykh i promyshlennykh zdaniy [Pile foundations for residential and industrial buildings]*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1970. (In Russ.)
8. SP 24.13330.2011. *Svaynyye fundamenty. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.03-85 [Pile foundations. Updated edition of SNIp 2.02.03-85]*. Moscow; 2011. (In Russ.)
9. SP 50-102-2003. *Proyektirovaniye i ustroystvo svaynykh fundamentov [Design and construction of pile foundations]*. Moscow; 2004. (In Russ.)
10. Sapozhnikov A.I., Solgalov Yu.V. Raschet svaj na gorizontálnuyu nagruzku v nelinejno-deformiruemom osnovanii [Calculation of piles for horizontal load in a nonlinearly deformable foundation]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Soil Mechanics and Foundation Engineering]*. 1980;(4):9–11.
11. Sapozhnikov A.I., Abdurakhmanov A. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu odnoetazhnykh karkasnykh sel'sko-hozyajstvennykh zdaniy na svayah-kolonnah [Methodical instructions for the calculation of one-story frame agricultural buildings on stilts-columns]*. Kiev; 1979. (In Russ.)
12. Sapozhnikov A.I., Shtanko L.F. *Rukovodstvo po opredeleniyu gorizontál'noy seymicheskoy nagruzki, deistvuyushchey na svaynyye pirsy I naberezhnyye [Guidance on the determination of horizontal seismic load acting on pile piers and embankments]*. Moscow; 1974. P. 40–74. (In Russ.)
13. Sapozhnikov A.I. Raschet zhestkih i korotkiy svaj na prodol'no-poperechnye nagruzki [Calculation of hard and short piles for longitudinal-transverse loads]: methodical instructions. Astrakhan; 1994. (In Russ.)
14. Sapozhnikov A.I. Kuzhakhmetova E.R. Sposoby pogruzheniya, prochnostnyye i deformatsionnyye raschoty svay [Immersion methods, strength and deformation calculations of piles]. 2015. Available from: <https://rucont.ru/efd/314524> (accessed: 04.04.2020). (In Russ.)
15. Kuzhakhmetova E.R., Sapozhnikov A.I. Comparative analysis of long and short piles with horizontal uploading. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2015;(5–6):30–34. (In Russ.)
16. Kuzhakhmetova E.R. Dipping, calculation and construction of the monolithic reinforced concrete pile of the conical form. *Scientific review. Technical sciences*. 2017;(2): 57–64. (In Russ.)
17. Rychkov S.P. *Modelirovaniye konstruksiy v srede Femap with NX Nastran [Structural modeling in Femap with NX Nastran]*. Moscow: DMK Press; 2013. (In Russ.)
18. Shimkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows [Structural Analysis in MSC/NASTRAN for Windows]*. Moscow: DMK Press; 2003. (In Russ.)
19. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.)
20. GOST 19.804.1 *Svai zabivnyye zhelezobetonnyye tsel'nyye sploshnogo kvadratnogo secheniya s nenapryagayemoy armaturoy i poperechnym armirovaniyem stvola i s napryagayemoy armaturoy [Reinforced concretedriver square piles. Structure and dimensions]*. Moscow: Standartinform Publ.; 1980. (In Russ.)
21. SP 63.13330.2011. *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Osnovnyye polozeniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 52-01-2003 s izmeneniyem No. 1 [Concrete and reinforced concrete structures. Fundamental requirements. Updated edition of SNIp 52-01-2003 with amendment No. 1]*. Moscow; 2015. (In Russ.)
22. SP 22.13330.2011. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.02.01-83* [Soil bases of buildings and structures. Updated edition of SNIp 2.02.01-83*]*. Moscow; 2010. (In Russ.)