



**Есипов  
Андрей  
Владимирович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Строительные конструк-  
ции» ФГБОУ ВО «Тюменский  
государственный  
университет»

e-mail:  
sibstroy.2012@yandex.ru



**Бараняк  
Андрей  
Игоревич**

ассистент кафедры  
«Строительные конструк-  
ции» ФГБОУ ВО «Тюменский  
индустриальный  
университет»

e-mail:  
andrei\_baranjak@yandex.ru



**Дюрягина  
Анна  
Валерьевна**

студентка ФГБОУ ВО  
«Тюменский индустриаль-  
ный университет»

e-mail:  
anna\_dyuryagina@mail.ru

УДК 624.154.1

ЕСИПОВ А. В.  
БАРАНЯК А. И.  
ДЮРЯГИНА А. В.

## Численные исследования напряженно-деформированного состояния коротких свайных фундаментов

В данной статье изучается напряженно-деформированное состояние коротких свайных фундаментов под сосредоточенной нагрузкой. Исследовано распределение внутренних усилий и перемещений в балочной конструкции ростверка, а также осадки и реакции свай при учете нелинейного поведения опор. Численные эксперименты выполнялись в программном комплексе ING+ для ростверков различной жесткости и различного типа опор.

**Ключевые слова:** основание, сваи, ростверк, осадки, распределение усилий, опоры.

ESIPOV A. V., BARANYAK A. I., DYURYAGINA A. V.  
NUMERICAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF SHORT PILE FOUNDATIONS

*This article explores the stress-strain state of short pile foundations under concentrated load. The work investigated the distribution of the internal forces and displacements of the beam structure of the grillage, as well as precipitation and reaction piles, taking into account the nonlinear behavior supports. Numerical experiments were performed in the software package ING+ for raft foundations of different hardness and different types of supports.*

**Keywords:** base, piles, grillage, precipitation, the distribution of effort, support.

### Введение

С развитием информационных технологий на рынке проектирования появилось много расчетных программ, позволяющих создавать сложные конечно-элементные модели с высокой детализацией. Например, для проведения статических и конструктивных расчетов несущих конструкций часто применяются специализированные строительные комплексы MicroFe, Stark, SCAD, Лира и т. д. Выполняя на высоком уровне расчеты надземных конструкций, эти программы недостаточно полно моделируют взаимодействие несущих конструкций с грунтовым основанием, в особенности для сложных геотехнических условий. С другой стороны, для решения узких геотехнических задач в основном используются специализированные программы, такие как Plaxis, Ansys, Nastran, Fem models и т. д., которые не позволяют детально рассчитывать надземные конструкции самого здания [1].

Одновременно весьма важным вопросом является расчет несущего остова зданий с учетом его совместной работы с грунтовым основанием [2–4]. Эта информация приводит к более точному моделированию напряженно-деформированного состояния грунтового основания и надфундаментных конструкций здания. Как жесткость здания влияет на НДС и осадки основания, так и нелинейные свойства грунта влияют на перераспределение усилий в надфундаментных конструкциях здания.

Для инженера-проектировщика важно выполнить не только статические и конструктивные расчеты, но и разработать проект здания в целом, состоящий в большей степени из чертежей [5]. Это возможно только в приспособленных для проектирования расчетно-графических комплексах, которые плохо моделируют работу фундаментов, в особенности свайных. Так как зависимость осадок свай от нагрузок  $S(P)$  носит ярко выраженную нелинейную зависимость,

то моделирование нелинейного поведения свай весьма актуально в сложившихся условиях проектирования.

### Моделирование работы свай

Одним из вариантов создания модели сваи, работающей по нелинейной схеме «нагрузка — осадка», в расчетной программе является методика устройства нелинейной опоры, основанная на статических испытаниях одиночной сваи [6]. Данный способ может применяться в любой расчетной программе, например, комплексе ING+.

Исходными данными для моделирования поведения свай под нагрузкой были приняты результаты статического испытания одиночной железобетонной призматической сваи длиной 6 м и сечением  $300 \times 300$  мм. По данным инженерно-геологических исследований, на площадке испытаний залегает слой глины глубиной до 12 м (однослойное основание), физико-механические характеристики которой представлены в Таблице 1.

По результатам статических испытаний построен график зависимости осадки сваи от нагрузки. Несущая способность одиночной призматической железобетонной сваи С60–30 длиной 6 м, сечением  $300 \times 300$  мм при предельной осадке сооружения  $S = \zeta \cdot S_{u,mt} = 0,2 \cdot 150 \text{ мм} = 30 \text{ мм}$  согласно п. 7.3.5 [7] составляет 300 кН.

Для задания нелинейной опоры в рамках расчетной программы необходимо разбить график осадки сваи на линейные участки: при заданной ступени нагрузки  $\Delta N_i$  и известной разности осадки  $\Delta S_i$  для каждого этапа

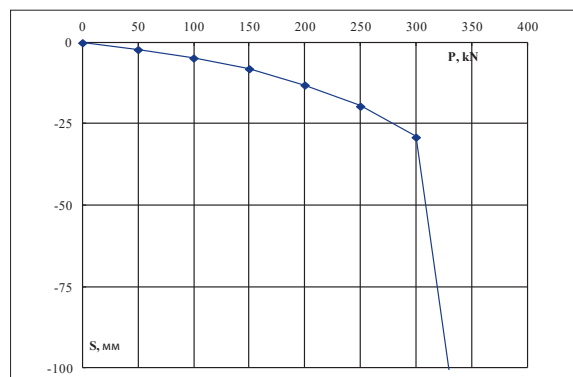


Иллюстрация 1. График «нагрузка — осадка» одиночной сваи по результатам статических испытаний

следует определять соответствующий коэффициент  $k_i$ , отвечающий за угол наклона графика.

$$k_i = \frac{\Delta N_i}{\Delta S_i} \quad (1)$$

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} \quad (2)$$

Достаточная степень разбивки графика работы сваи под нагрузкой составляет 5÷6 этапов. Представленная нелинейная опора хорошо описывает осадки сваи с точностью до 1÷3% в рамках расчетных программ.

Таблица 1. Физико-механические характеристики грунта

| Параметры               | Наименование, ед. изм.       | Значение            |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| Объемный вес грунта     | $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup> | 19,8                |
| Модуль деформации       | $E$ , кН/м <sup>2</sup>      | $2,95 \cdot 10^4$   |
| Коэффициент Пуассона    | $\nu$                        | 0,35                |
| Удельное сцепление      | $c$ , кН/м <sup>2</sup>      | 15                  |
| Угол внутреннего трения | $\varphi$ , град.            | 23,4                |
| Коэффициент фильтрации  | $k$ , м/сут                  | $9,0 \cdot 10^{-9}$ |

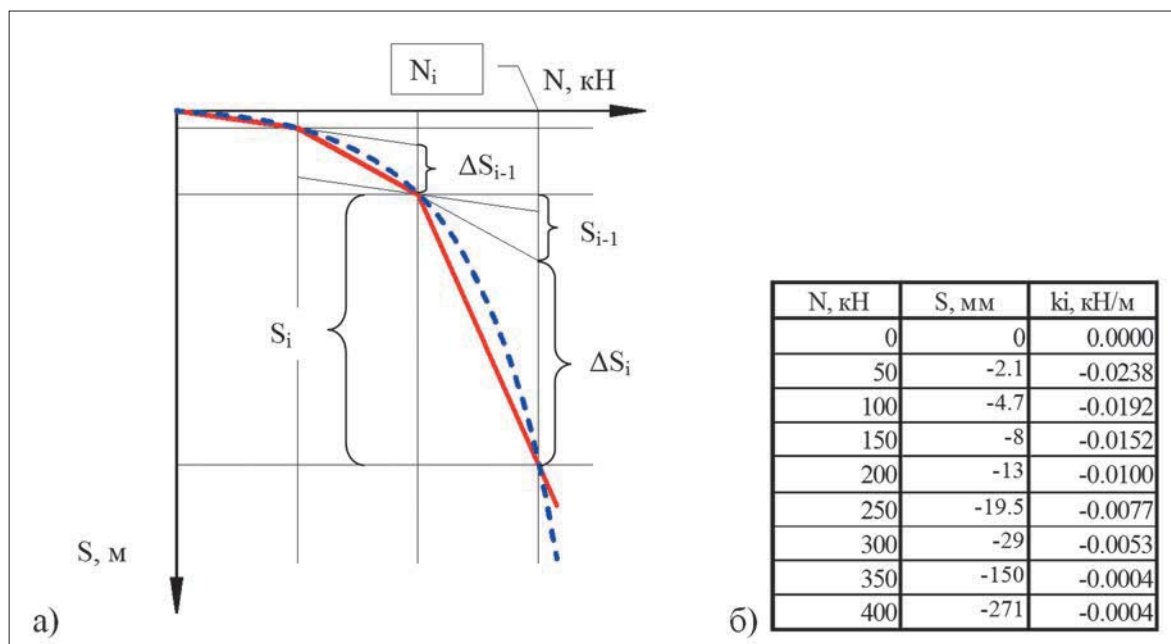


Иллюстрация 2. Схема к расчету характеристик нелинейно деформируемых опор: а — схема зависимости «нагрузка — осадка»; б — таблица зависимости «нагрузка — осадка» с коэффициентом жесткости опоры на каждом этапе нагружения

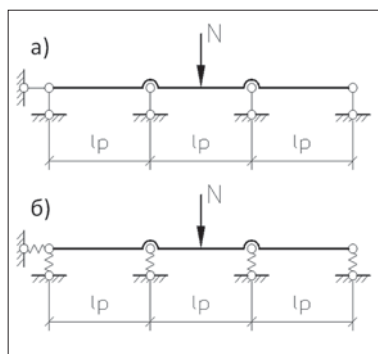


Иллюстрация 3. Расчетные схемы фундаментов: а — на линейных опорах; б — на нелинейных опорах

### Численные моделирования коротких свайных лент

При строительстве зданий и сооружений на талых грунтах, а также на многолетнемерзлых грунтах по первому принципу строительства (с сохранением грунтов в мерзлом состоянии в период эксплуатации) одним из вариантов устройства фундаментов является выполнение свайного фундамента с высоким ростверком. При проектировании каркасных зданий под колонны используют как свайные кусты, так и короткие свайные ленты. Свайные ленты особенно целесообразно применять для крайних осей здания. Ростверк располагается вдоль здания, вследствие чего не выступает за контуры надземной части, в отличие от ростверков свайных кустов, и не влияет на архитектуру фасада.

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) и осадок коротких свайных фундаментов под сосредоточенной нагрузкой с помощью метода, моделирующего нелинейные свойства грунтового основания, выполнялось в программном комплексе ING+.

Рассматривались два варианта расчетной модели:

1. Ростверки задавались как балки конечной жесткости, опертые на линейные опоры. Жесткость опор определялась по графику «нагрузка — осадка» статических испытаний отдельной сваи как отношение соответствующей нагрузки к предельно допустимой осадке сваи (30 мм).
2. В расчетную схему ростверков были введены данные о нелинейных опорах. Работа таких опор под нагрузкой моделирует реальную работу сваи в грунте, жесткость опоры в каждый момент нагружения соответствует графику «нагрузка — осадка» статических испытаний сваи (Иллюстрация 1).

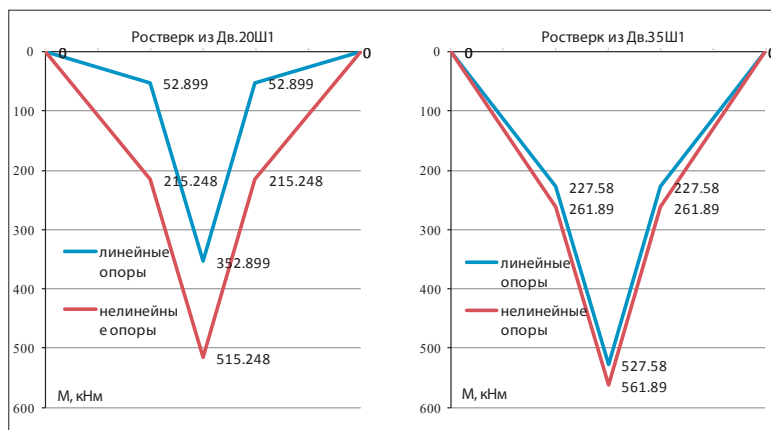


Иллюстрация 4. Эпюры моментов в ростверках в зависимости от типа опор для нагрузки 1000 кН: вверху — для ростверка из двутавра 20Ш1, внизу — для ростверка из двутавра 35Ш1

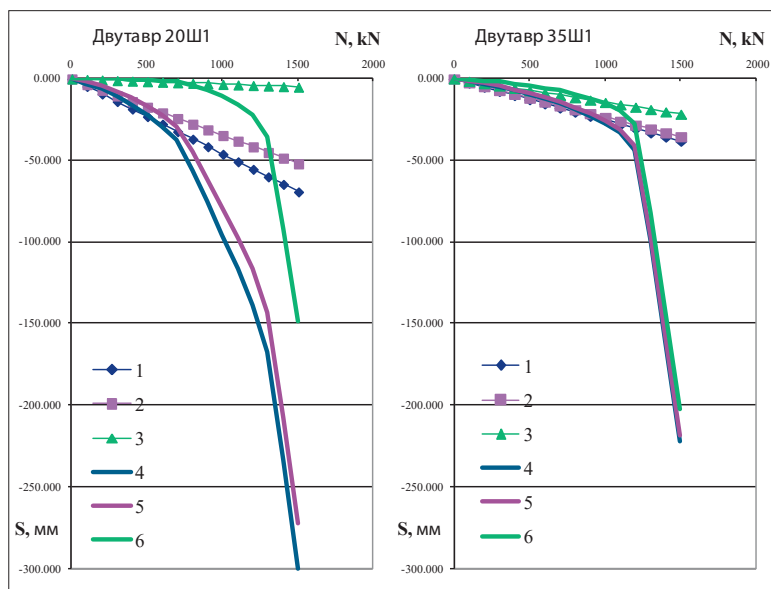


Иллюстрация 5. Графики зависимостей перемещений в центре ростверка и осадки опор от нагрузки: 1 — перемещение центра балки при линейных опорах; 2, 3 — осадки средних и крайних свай при линейных опорах; 4 — перемещение центра балки при нелинейных опорах; 5, 6 — осадки средних и крайних свай при нелинейных опорах. Слева — для ростверка из двутавра 20Ш1, справа — для ростверка из двутавра 35Ш1

Следует отметить, что «кустовой эффект» [8] или взаимное влияние свай в кусте в рамках настоящей работы не учитывались ввиду небольшого количества свай в ленте и, как следствие, незначительного взаимного влияния свай между собой.

Как основа фундамента смоделирована балка на четырех сваях с сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета (Иллюстрация 3). Шаг свай в ленте 1,2 м. В качестве ростверка в расчетах применялись балки с жесткостями, соответствующими стальным двутаврам 20Ш1, 26Ш1, 30Ш1, 35Ш1, 40Ш1. Нагружение производилось в диапазоне от 0 до 1500 кН с шагом 100 кН.

Сравнение эпюр внутренних моментов и их распределение в зави-

симости от типа опор и жесткости ростверков представлено на Иллюстрации 4. При сопоставлении эпюр моментов видно, что распределение усилий зависит как от жесткости распределительной балки, так и от типа использованных опор. Разница во внутренних моментах особенно значительна при малой жесткости распределительной балки (до 200%).

Более жесткие на первых этапах включаются в работу, получают приращение осадки и способствуют большему общему выгибу распределительной балки. В итоге значения изгибающего момента получаются выше, чем при использовании линейных опор (на 46%). В более жестких распределительных балках

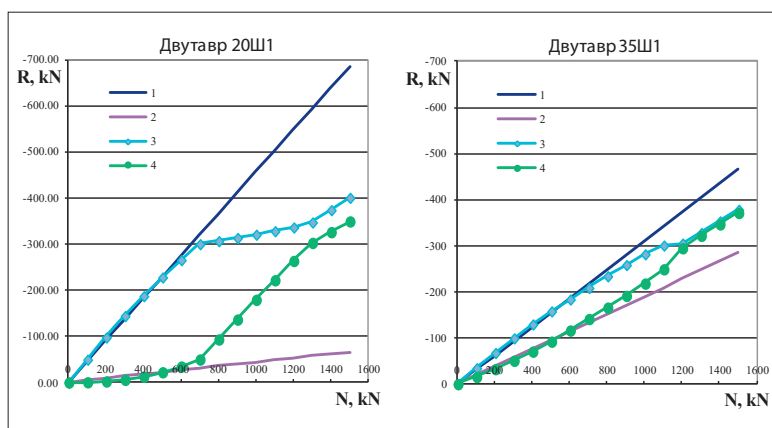


Иллюстрация 6. Графики зависимости реакций опор от нагрузки: 1, 2 — реакции средних и крайних свай при линейных опорах; 3, 4 — реакции средних и крайних свай при нелинейных опорах. Слева — для ростверка из двутавра 20Ш1, справа — для ростверка из двутавра 35Ш1

наблюдается уменьшение разницы величины изгибающих моментов при разных типах опор. Тем не менее при учете нелинейных опор возникает разница и в большую сторону (до 6,5%). Это обязательно необходимо учитывать при конструктивных расчетах распределительных балок (ростверков).

По результатам расчетов составлялись графики перемещений точки приложения нагрузки в средней части ростверка (Иллюстрация 5) и осадки ближайших и крайних свай. Изучались и распределения реакций между крайними и средними сваями (Иллюстрация 6).

Для наглядности на графиках как наиболее характерные рассмотрены варианты с ростверками, выполненными из двутавров 20Ш1 и 35Ш1. При сопоставлении графиков видно, что распределение усилий между средними и крайними опорами в значительной степени зависит от жесткости распределительной балки. При малой жесткости балки в работе в основном участвуют средние, ближние к нагрузке, опоры, и разница между реакциями в средних и крайних опорах велика. С увеличением жесткости распределительной балки эта величина уменьшается.

При расчете фундамента на линейных опорах зависимость распределения реакций в сваях прямо пропорциональна жесткости распределительной балки. Чем больше жесткость, тем меньше разница реакций средних и крайних опор. С использованием нелинейных опор в расчете видно, что крайние сваи интенсивней включаются в работу лишь при достижении предельных значений реакций и срыве средних свай (Иллюстрация 6). Дальнейшее

нагружение фундамента (общая нагрузка более 1 200 кН) приводит к срыву свай.

### Заключение

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- 1 При расчете ростверков как балок конечной жесткости на линейно-упругих опорах графики деформаций и осадок свай носят линейный характер, что не отражает реальную работу свай в грунте, и, как следствие, НДС ростверка далеко от фактического.
- 2 При рассмотрении схемы фундамента на нелинейных опорах графики деформаций ростверков в местах расположения свай повторяют форму зависимости осадки одиночной сваи от нагрузки, и НДС ростверков соответствует реальности.
- 3 Данный подход к моделированию нелинейного поведения свай в грунте, хотя и не учитывает взаимного влияния свай между собой, позволяет, не выполняя сложных геотехнических расчетов, получить достоверные распределения усилий между сваями и, как следствие, адекватные данные о НДС фундамента в целом.
- 4 Задачами дальнейших исследований, повышающих эффективность применения более лаконичных и простых по отношению к столбчатым фундаментам коротких ленточных ростверков, может являться обоснование применения ростверков переменной по длине жесткости, учет геометрических размеров и распределительной способности базы колонн, в итоге значительно уменьшающих изгибающие моменты в фундаментной конструкции.

### Список использованной литературы

- 1 Мангушев Р. А., Сахаров И. И., Коношников В. В., Ланько С. В. Сравнительный анализ численного моделирования системы «здание — фундамент — основание» в программных комплексах Scad и Plaxis // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 3. С. 96–101.
- 2 Цветков Р. В., Шардаков И. Н. Моделирование деформационных процессов в системе «грунтовое основание — фундамент — здание» при наличии карстовых явлений // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 3. С. 102–116.
- 3 Гусев Г. Н., Ташкинов А. А. Математическое моделирование систем «здание — фундамент — грунтовое основание» // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2012. № 4 (29). С. 222–226.
- 4 Андреев В. И., Барменкова Е. В. Моделирование реальной системы «здание — фундамент — основание» двухслойной балкой переменной жесткости на упругом основании // Вестник МГСУ. 2012. № 6. С. 37–41.
- 5 Малышкин А. П., Есипов А. В., Бараняк А. И. Современный подход к проектированию высотных зданий в условиях плотной городской застройки // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 158–162.
- 6 Малышкин А. П., Есипов А. В. Практический подход к моделированию работы свай в условиях расчетных программ // Геотехнические проблемы XXI века в строительстве зданий и сооружений. П. Академические чтения им. профессора А. А. Бартоломея / Пермский государственный технический университет; Российское общество по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению. Пермь: [б.и.], 2007. С. 171–174.
- 7 СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2011. 86 с.
- 8 Девальтовский Е. Э. Проектирование свайных фундаментов по предельным деформациям // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2016. № 3 (05). С. 50–58.