

УДК 624.156.3

**В. В. Габова, И. С. Завьялов, Е. А. Максютова**

*Волгоградский государственный технический университет*

## **АНАЛИЗ РАСЧЕТА ОСАДКИ ОТДЕЛЬНО СТОЯЩЕГО СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ И ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА**

Выполнена верификация расчетов осадки одиночной сваи и группы свай, входящих в состав отдельно стоящего фундамента. Произведен сравнительный анализ ручного метода расчета с численными моделями, реализованными в программном комплексе «ЛИРА-САПР» (с использованием конечных элементов КЭ-51 и КЭ-57) и методом конечных элементов (МКЭ) в форме классического смешанного метода (КСМ) с модифицированным пластинчатым конечным элементом. Произведена оценка влияния различных подходов к моделированию упругого основания и взаимодействия с грунтом на результаты осадки свай и усилий в ростверке. В ходе расчета выявлена сходимости численных значений осадки сваи между ручным расчетом, «ЛИРА-САПР» (КЭ-51) и МКЭ в форме КСМ. Численные значения усилий в ростверке отличаются и сходятся к результатам, полученным на основе МКЭ в форме КСМ, при сгущении конечно-элементной сетки, что указывает на большую точность МКЭ в форме КСМ при определении напряженно-деформированного состояния фундаментов.

**Ключевые слова:** несущая способность свай, осадка свай, расчет свай и свайных ростверков, метод конечных элементов, МКЭ в форме классического смешанного метода.

### **Введение**

Расчет свайных фундаментов на сегодняшний день остается актуальной проблемой, так же как и выбор достоверного метода их расчета. Классические аналитические методы расчета ростверков не дают корректных результатов и не учитывают реальное взаимодействие между грунтом и свайей.

Исходя из этого, все больше внимания стало уделяться альтернативным методам расчета, а именно методу конечных элементов (МКЭ). Сочетая в себе универсальность и возможность полной автоматизации вычислительного процесса с помощью компьютера, МКЭ значительно расширяет возможность детального исследования напряженно-деформированного состояния конструкций.

Также немаловажным фактом при определении осадки свайного фундамента остается вопрос учета взаимного влияния свай. Как показывают опыты, несущая способность свайного куста не равна произведению несущей способности одной сваи на число свай в фундаменте [1]. Исследователи в этой области отмечают, что определение несущей способности свайных фундаментов как суммы несущих способностей отдельных свай не отражает их реальную работу в грунте и не учитывает совместную работу свай<sup>1</sup>.

Разнообразие методик расчета, расчетных моделей и их конечных элементов требует тщательной верификации и сравнения численных результатов, полученных различными методами. Это особенно актуально при оценке взаимного эффекта, который значительно увеличивает осадку группы свай по сравнению с осадкой одиночной сваи.

<sup>1</sup> *Чан Тоан Тханг.* Метод расчета осадки групп свай большой длины в многослойном основании с учетом продольной сжимаемости свай и их взаимного расположения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. М., 2006. 24 с. EDN: NKDCMJ.

## Материалы и методы

### Определение несущей способности свай

Несущая способность  $F_d$  вдавливаемой сваи, погружаемой без выемки грунта, работающей на сжимающую нагрузку, следует определять как сумму расчетных сопротивлений грунтов основания под нижним концом сваи на ее боковой поверхности по СП 24.13330.2011<sup>2</sup>:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cr} \cdot R \cdot A + u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент условия работы сваи, принимаемый равным 1;  $\gamma_{cr}$ ,  $\gamma_{cf}$  — коэффициенты условия работы сваи по боковой поверхности, принимаемые по табл. 7.4 СП 24.13330.2011;  $R$  — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, принимаемое по табл. 7.2 СП 24.13330.2011;  $A$  — площадь опирания на грунт сваи, м<sup>2</sup>;  $u$  — наружный периметр поперечного сечения ствола сваи, м;  $f_i$  — расчетное сопротивление каждого слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, кПа, принимаемое по табл. 7.3 СП 24.13330.2011;  $h_i$  — толщина слоя, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м, принимаем 1 м.

Допускаемая нагрузка на одну сваю определяется по формуле

$$N = \frac{F_d}{\gamma_g}, \quad (2)$$

где  $\gamma_g$  — коэффициент надежности по нагрузке, равный 1,4.

### Определение осадки одиночной сваи

Расчет осадки одиночной сваи, прорезающей слой грунта, рассматриваемый как линейно деформируемое полупространство, производится, в соответствии с СП 24.13330.2011, по формуле

$$S = \beta \frac{N}{G_1 \cdot l}, \quad (3)$$

где  $N$  — вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю, кН;  $G_1$  — модуль сдвига грунта, МПа;  $l$  — длина сваи, м;  $\beta$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + \frac{1 - \left(\frac{\beta'}{\alpha'}\right)}{\chi}, \quad (4)$$

где  $\beta' = 0,17 \ln(k_v \cdot k)$  — коэффициент, соответствующий абсолютно жесткой свае;  $k_v$  и  $k$  — коэффициенты:

$$k_v = 2,82 - 3,78 \cdot v + 2,18 \cdot v^2, \quad (5)$$

где  $v$  — коэффициент поперечных деформаций;

<sup>2</sup> СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализир. ред. СНиП 2.02.03—85\*. М.: Минстрой России, 2011. 90 с.

$$k = \frac{G_1 \cdot l}{G_2 \cdot d}; \quad (6)$$

$\alpha' = 0,17 \ln \left( k_{v1} \frac{l}{d} \right)$  — тот же коэффициент для случая однородного основания;  $\chi = \frac{EA}{G_1 \cdot l^2}$  — относительная жесткость сваи;  $EA$  — жесткость ствола сваи на сжатие;  $\lambda_1$  — параметр, характеризующий увеличение осадки за счет сжатия ствола:

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \cdot \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot \chi^{3/4}}. \quad (7)$$

При расчете осадок свай необходимо учитывать взаимное влияние соседних свай, находящихся на расстоянии  $a$ , согласно следующей формуле из СП 24.13330.2011 (расстояние измеряется между осями свай):

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 \cdot l}, \quad (8)$$

где  $\delta$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\delta = 0,17 \ln \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a}. \quad (9)$$

### **Расчет плит на упругом основании на основе МКЭ в форме КСМ**

В МКЭ в форме классического смешанного метода (КСМ) разрешающие уравнения состоят из двух групп уравнений:

1) уравнения равновесия, имеющие физический смысл равенства нулю реакций во введенных в основную систему связей:

$$\begin{cases} r_{1,1} q_1 + r_{1,2} q_2 + \dots + r_{1,n} q_n + \tilde{r}_{1,n+1} \tilde{q}_{n+1} + \dots + \tilde{r}_{1,n+m} \tilde{q}_{n+m} + R_{1P} = 0, \\ r_{2,1} q_1 + r_{2,2} q_2 + \dots + r_{2,n} q_n + \tilde{r}_{2,n+1} \tilde{q}_{n+1} + \dots + \tilde{r}_{2,n+m} \tilde{q}_{n+m} + R_{2P} = 0, \\ \dots \\ r_{n,1} q_1 + r_{n,2} q_2 + \dots + r_{n,n} q_n + \tilde{r}_{n,n+1} \tilde{q}_{n+1} + \dots + \tilde{r}_{n,n+m} \tilde{q}_{n+m} + R_{nP} = 0; \end{cases}$$

2) уравнения совместности перемещений (деформаций) конечных элементов, сходящихся в общем для них узле  $ij$ , имеющие физический смысл равенства нулю разрыва углов поворота в узле  $ij$  нормалей к плоскости пластины смежных конечных элементов:

$$\begin{cases} \tilde{\delta}_{n+1,1} q_1 + \tilde{\delta}_{n+1,2} q_2 + \dots + \tilde{\delta}_{n+1,n} q_n + \delta_{n+1,n+1} \tilde{q}_{n+1} + \dots + \delta_{n+1,n+m} \tilde{q}_{n+m} + \Delta_{n+1} = 0, \\ \dots \\ \tilde{\delta}_{n+m,1} q_1 + \tilde{\delta}_{n+m,2} q_2 + \dots + \tilde{\delta}_{n+m,n} q_n + \delta_{n+m,n+1} \tilde{q}_{n+1} + \dots + \delta_{n+m,n+m} \tilde{q}_{n+m} + \Delta_{n+m} = 0, \end{cases}$$

где  $q$  — кинематические неизвестные;  $\tilde{q}$  — силовые неизвестные.

Систему разрешающих уравнений МКЭ в форме КСМ можно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} r & \tilde{r} \\ \tilde{\delta} & \delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \tilde{q} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_F \\ \Delta_F \end{Bmatrix} = \{0\}. \quad (10)$$

Для моделирования работы упругого основания используется модифицированный пластинчатый конечный элемент, в котором учитываются не только перемещения по направлению работы упруго-податливых опор  $w$ , но и усилия в них  $R$ .

В качестве основных неизвестных в узле  $IJ$  (рис. 1) этого конечного элемента приняты:

$q_{IJ}$  — перемещение узла  $IJ$  по направлению работы упруго-податливой опоры;

$M_x^{IJ}$  — изгибающий момент по направлению оси  $X$ ;

$M_y^{IJ}$  — изгибающий момент по направлению оси  $Y$ ;

$R_{IJ}$  — реакция дискретной связи.

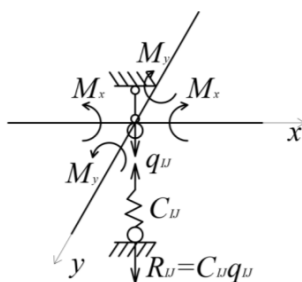


Рис. 1. Основные неизвестные в узле  $IJ$

### Результаты и обсуждение

Объектом исследования является отдельно стоящий свайный фундамент с размерами в плане  $1,6 \times 1,6$  м (рис. 2). На ростверк действует равномерно распределенная нагрузка. В рамках исследования были выполнены следующие расчеты: ручной расчет согласно СП 24.13330.2011, расчет в ПК «ЛИРА-САПР», расчет на основе МКЭ в форме КСМ.

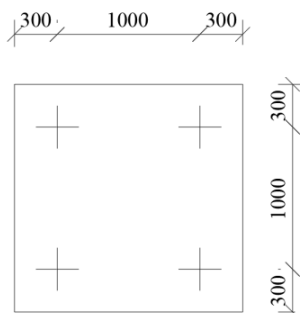


Рис. 2. Расположение свай в ростверке

Исходные данные:

- ростверк:

$a = b = 1,6$  м;  $h = 0,2$  м; бетон В25;  $\mu_x = \mu_y = 0,2$ ;  $E = 30 \cdot 10^6$  МПа;

$q = 767,5$  кН/м<sup>2</sup>;

- сваи:

$B = H = 0,3$  м;  $L = 14$  м; бетон В25;  $\mu_x = \mu_y = 0,2$ ;  $E = 30 \cdot 10^6$  МПа.

Ручной расчет несущей способности и осадки сваи в соответствии с СП 24.13330.2011:

$A = d^2 = 0,3^2 = 0,09$  м;

$u = 4 \cdot d = 4 \cdot 0,3 = 1,2$  м.

Вспомогательная схема для определения  $f_i$  представлена на рис. 3.

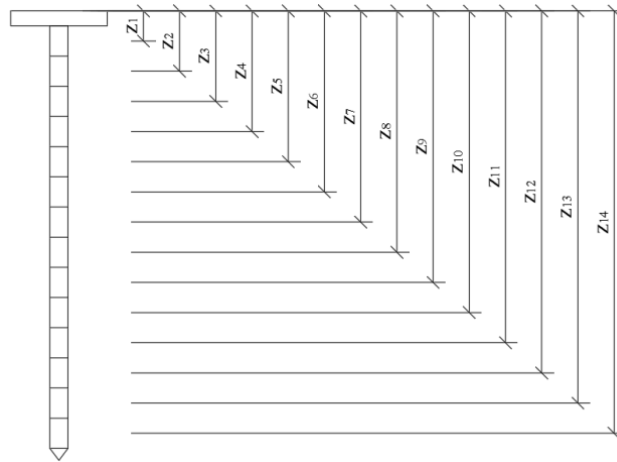


Рис. 3. Вспомогательная схема для определения  $f_i$

При мощности слоя  $z_1 = 2,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_1 = 29,685$  кПа.

При мощности слоя  $z_2 = 3,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_2 = 32,325$  кПа.

При мощности слоя  $z_3 = 4,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_3 = 34,360$  кПа.

При мощности слоя  $z_4 = 5,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_4 = 36,360$  кПа.

При мощности слоя  $z_5 = 6,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_5 = 37,430$  кПа.

При мощности слоя  $z_6 = 7,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_6 = 38,430$  кПа.

При мощности слоя  $z_7 = 8,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_7 = 39,190$  кПа.

При мощности слоя  $z_8 = 9,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_8 = 39,950$  кПа.

При мощности слоя  $z_9 = 10,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_9 = 40,830$  кПа.

При мощности слоя  $z_{10} = 11,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_{10} = 41,740$  кПа.

При мощности слоя  $z_{11} = 12,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_{11} = 42,640$  кПа.

При мощности слоя  $z_{12} = 13,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_{12} = 43,540$  кПа.

При мощности слоя  $z_{13} = 14,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_{13} = 44,440$  кПа.

При мощности слоя  $z_{14} = 15,93$  м расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи составляет  $f_{14} = 45,240$  кПа.

Несущая способность сваи:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{CR} \cdot R \cdot A + u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i) = 1(1 \cdot 4000 \cdot 0,09 + 1,2(14,84 + 16,16 + 17,18 + 18,18 + 18,72 + 19,22 + 19,6 + 19,88 + 20,42 + 20,87 + 21,32 + 21,77 + 22,22 + 22,62)) = 687,72 \text{ кПа.}$$

Допускаемая нагрузка на одну сваю:

$$N = \frac{F_d}{\gamma_g} = \frac{687,72}{1,4} = 491,23 \text{ кПа.}$$

Расчет осадки сваи:

$$G_1 = 0,4 \cdot E_0 = 0,4 \cdot 7 = 2,8 \text{ МПа;}$$

$$G_2 = \frac{0,4 \cdot 16,9 \cdot 1 + 0,4 \cdot 21 \cdot 6}{7} = 8,17 \text{ МПа;}$$

$$k = \frac{G_1 \cdot l}{G_2 \cdot d} = \frac{2,8 \cdot 14}{8,17 \cdot 0,3} = 15,99;$$

$$k_v = 2,82 - 3,78 \cdot v + 2,18 \cdot v^2 = 2,82 - 3,78 \cdot 0,25 + 2,18 \cdot 0,25^2 = 2,01;$$

$$\beta' = 0,17 \ln(k_v \cdot k) = 0,17 \ln(2,01 \cdot 15,99) = 0,589;$$

$$\alpha' = 0,17 \ln\left(k_{v1} \frac{l}{d}\right) = 0,17 \ln\left(2,01 \frac{14}{0,3}\right) = 0,772;$$

$$\chi = \frac{EA}{G_1 \cdot l^2} = \frac{27 \text{ МПа} \cdot 10^{-3} \cdot 0,09}{2,8 \text{ МПа} \cdot 14^2} = 4,4;$$

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \cdot \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot \chi^{3/4}} = \frac{2,12 \cdot 4,4^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot 4,4^{3/4}} = 0,87;$$

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + \frac{1 - \left(\frac{\beta'}{\alpha'}\right)}{\chi} = \frac{0,589}{0,87} + \frac{1 - \left(\frac{0,589}{0,772}\right)}{4,4} = 0,73;$$

$$S = \beta \frac{N}{G_1 \cdot l} = 0,73 \frac{491,23 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 14 \cdot 10^6} = 0,0125 \text{ м.}$$

Учет влияния смежных свай.

Влияние сваи № 2 ( $a = 1$  м):

$$\delta = 0,17 \ln \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a} = 0,17 \ln \frac{2,01 \cdot 2,8 \cdot 14}{2 \cdot 8,17 \cdot 1} = 0,267;$$

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 \cdot l} = 0,267 \frac{491,23 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^6 \cdot 14} = 0,0033 \text{ м.}$$

Влияние сваи № 3 ( $a = 1$  м):

$$\delta = 0,17 \ln \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a} = 0,17 \ln \frac{2,01 \cdot 2,8 \cdot 14}{2 \cdot 8,17 \cdot 1} = 0,267;$$

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 \cdot l} = 0,187 \frac{491,23 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^6 \cdot 14} = 0,0033 \text{ м.}$$

Влияние сваи № 4 ( $a = 1,414$  м):

$$\delta = 0,17 \ln \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a} = 0,17 \ln \frac{2,01 \cdot 2,8 \cdot 14}{2 \cdot 8,17 \cdot 1,414} = 0,209;$$

$$S_{ad} = \delta \frac{N}{G_1 \cdot l} = 0,209 \frac{491,23 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 10^6 \cdot 14} = 0,002619 \text{ м.}$$

Полная осадка сваи  $S + \sum S_{ad} = 0,0217$  м (2,17 см).

#### **Расчет в ПК «ЛИРА-САПР» с использованием КЭ-51**

Для верификации ручного расчета в ПК «ЛИРА-САПР» использовался КЭ-51. Этот элемент позволяет смоделировать работу пружин (упругого основания) для степеней свободы  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Усилие, полученное в таком элементе, является реакцией в узле по заданному направлению. Расчетная модель фундамента представлена на рис. 4. Жесткость упругой связи задавалась на основе ручного расчета как отношение нагрузки на сваю к ее осадке:

$$c_1 = \frac{R}{S} = \frac{491,23}{0,0125} = 39298,4 \text{ кН/м.}$$

Моделирование группы свай выполнялось с учетом «скорректированной жесткости упругой связи», полученной отношением нагрузки на сваю к ее осадке с учетом взаимного влияния:

$$c_2 = \frac{R}{S + \sum S_{ad}} = \frac{491,23}{0,0217} = 22\,637,3 \text{ кН/м.}$$

После выполнения расчета в ПК «ЛИРА» осадка одиночной сваи при жесткости  $c_1$  составила  $S = -12,5001$  мм, усилие в связи  $R_z = -491,23$  кН, изгибающий момент в центре ростверка  $M_x = 55,15$  (кН · м)/м. При жесткости  $c_2$  получены уточненные результаты, и осадка сваи составила  $S = -21,7$  мм, усилие в связи  $R_z = -491,23$  кН, изгибающий момент в центре ростверка  $M_x = 55,15$  (кН · м)/м. Сравнение численных результатов расчета осадки в ПК «ЛИРА» при использовании КЭ-51 представлены в виде мозаик перемещений на рис. 5.

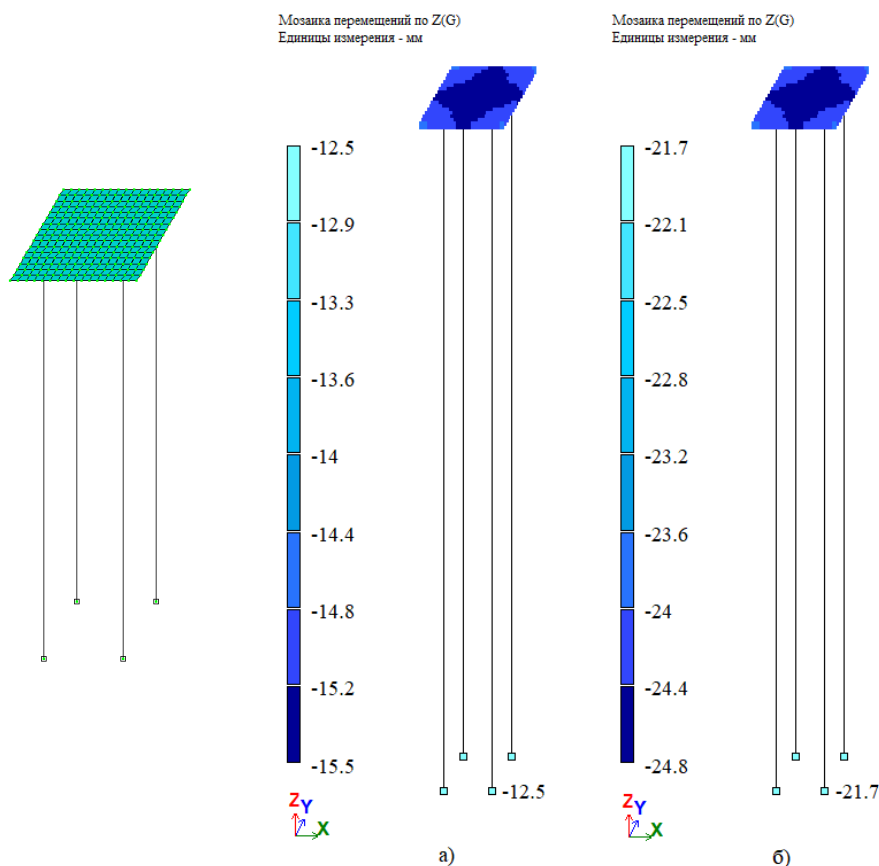


Рис. 4. Расчетная модель свайного куста в «ЛИРА-САПР»

Рис. 5. Мозаики перемещений по оси z:  
 а — КЭ-51 с жесткостью  $c_1$ ;  
 б — КЭ-51 с жесткостью  $c_2$

### Расчет при помощи МКЭ в КСМ

Применение МКЭ в смешанной форме для анализа свайных ростверков позволяет:

- учесть нелинейное поведение упругой связи;
- повысить точность расчета внутренних усилий.

Расчет свайного ростверка с применением МКЭ в форме КСМ выполнялся авторами в работе [2]. Предложенный алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния плитных фундаментов основывается на работах [3—5].

Для исследуемого в статье объекта была проведена верификация ручного расчета при помощи МКЭ в форме КСМ с использованием модифицированного пластинчатого конечного элемента с односторонней упругой связью. Жесткости принимались аналогично предыдущим расчетам в ПК «ЛИРА-САПР». Особенностью данной модели является возможность получения всех неизвестных из решения одной системы уравнений.

Рассматриваемую плиту с габаритными размерами  $1,6 \times 1,6$  м разбиваем на конечные элементы сеткой  $16 \times 16$ , расчетная схема представлена на рис. 6.

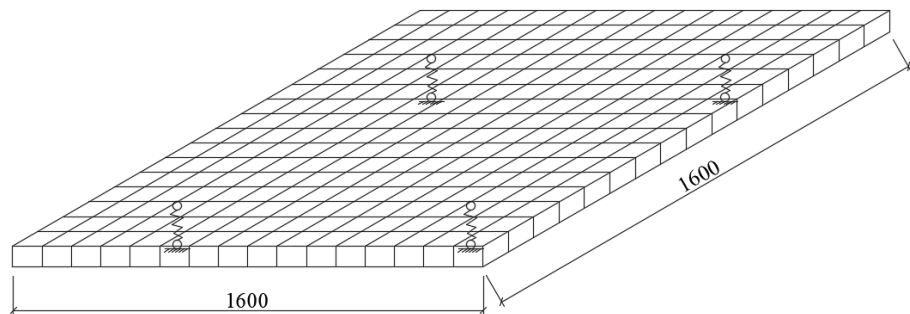


Рис. 6. Расчетная схема ростверка на упруго-податливых опорах

Для получившейся расчетной схемы система уравнений имеет 803 неизвестных. С 1 по 289 — вертикальные перемещения, с 290 по 799 — изгибающие моменты по осям  $x$  и  $y$ , и четыре неизвестные реакции в упругих связях. Формируем глобальную матрицу и определяем основные неизвестные:

$$[D] \begin{Bmatrix} q \\ \tilde{q} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_F \\ \Delta_F \end{Bmatrix} = \{0\}.$$

$\begin{matrix} 803 \times 803 & & \\ & 803 \times 1 & \\ & & 803 \times 1 \end{matrix}$

Получены следующие численные значения: осадка одиночной сваи при жесткости  $c_1$  составила  $S = -12,49$  мм; усилие в связи  $R_z = -491,2$  кН; изгибающий момент в центре ростверка  $M_x = 55,653$  (кН · м)/м. При жесткости  $c_2$  осадка сваи составила  $S = -21,69$  мм; усилие в связи  $R_z = -491,2$  кН; изгибающий момент в центре ростверка  $M_x = 55,65$  (кН · м)/м.

#### **Расчет в ПК «ЛИРА-САПР» с использованием КЭ-57**

КЭ-57 предназначен для моделирования работы одиночной сваи совместно с окружающим ее грунтом и реализует взаимосвязь с системой «ГРУНТ» (рис. 7). В отличие от КЭ-51, жесткость упругой связи задавалась не эмпирически, а с учетом физико-механических характеристик грунта. Характеристики грунта были приняты в соответствии с данными инженерно-геологических изысканий участка.

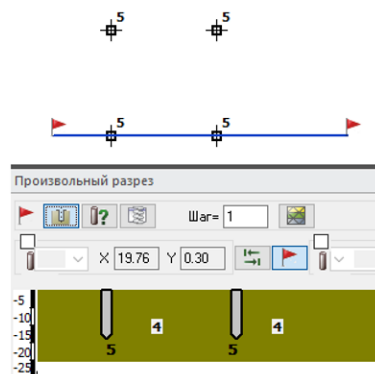


Рис. 7. Схема свайного куста при моделировании с использованием КЭ-57 в системе «ГРУНТ»

После выполнения расчета в ПК «ЛИРА» осадка одиночной сваи при жесткости  $c_1$  составила  $S = -9,46$  мм; усилие в связи  $R_z = -488,745$  кН; изгибающий момент в центре ростверка  $M_x = 50,9$  (кН · м)/м. При жесткости  $c_2$  получены уточненные результаты, и осадка сваи составила  $S = -25,99$  мм; усилие в связи  $R_z = -488,932$  кН; изгибающий момент в центре ростверка  $M_x = 51,34$  (кН · м)/м. Сравнение численных результатов расчета осадки в ПК «ЛИРА» при использовании КЭ-57 представлено в виде мозаик перемещений на рис. 8.

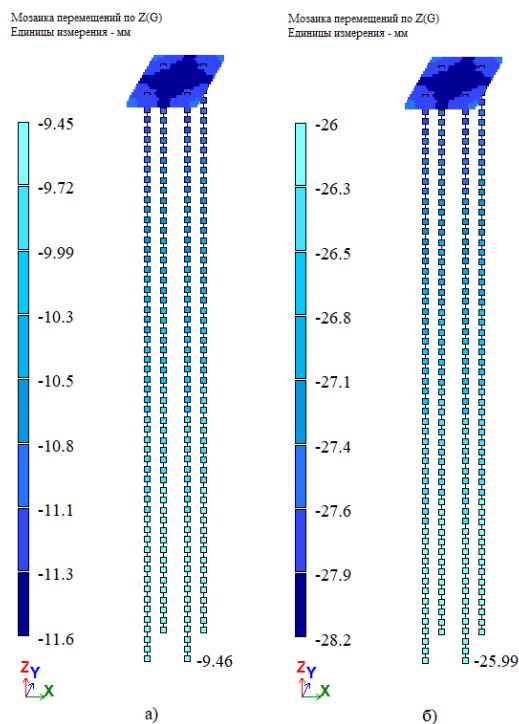


Рис. 8. Мозаики перемещений по оси  $z$ :  
 а — КЭ-57 без учета взаимного влияния свай;  
 б — КЭ-57 с учетом взаимного влияния свай

### Обсуждение полученных результатов

Выбор конкретного метода расчета должен основываться на требуемой степени точности, доступности исходных данных. Для предварительных оценок или при простых расчетных схемах ручной расчет или использование КЭ-51 может быть достаточным. При сложных грунтовых условиях и высоких требованиях к надежности конструкций ростверка целесообразно использовать более совершенные МКЭ-модели.

Достигнута высокая сходимость результатов расчета при применении МКЭ в форме КСМ. Эта модель позволяет комплексно моделировать ростверк как изгибаемую пластину и учитывать одностороннее взаимодействие сваи с грунтом. Модель обладает большим потенциалом для учета нелинейной работы односторонней связи. Это будет реализовано путем калибровки по результатам полевых испытаний сваи статическими осевыми нагрузками. Такое усовершенствование обеспечит максимально реалистичный прогноз осадок, перераспределения усилий и несущей способности фундамента, повышая надежность расчетов.

### Выводы

1. При использовании ПК «ЛИРА-САПР» с КЭ-51 и МКЭ в форме КСМ получены сходящиеся результаты расчета осадки и усилия сваи. Это подтверждает корректность использования условных линейных пружин для моделирования работы свай в данных условиях, если их жесткость подобрана на основе предварительного ручного расчета осадки.

2. Несмотря на сходимость по осадкам и усилиям в сваях, усилия, возникающие в ростверке (изгибающие моменты), значительно отличались между расчетами в «ЛИРА-САПР» и МКЭ в форме КСМ. Это говорит о большей точности МКЭ в форме КСМ при определении внутренних усилий в ростверке. Это связано с преимуществами развиваемой авторами статьи формы МКЭ.

3. При расчете с использованием КЭ-57 были получены следующие результаты: для одиночной сваи осадка оказалась меньше, чем при ручном расчете и расчете с использованием КЭ-51. Это может указывать на более «жесткую» модель взаимодействия сваи с грунтом, заложенную в КЭ-57, или на особенности интерпретации заданных характеристик грунта. Для группы свай осадка получилась больше, чем при ручном расчете и расчете с использованием КЭ-51.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочеткова М. В., Гусев Н. И. Экспериментально-теоретический подход к расчету ростверков свайных фундаментов под колонны // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 3. С. 126—129. EDN: PFICCR.
2. Шаломов Н. С. Экономические проблемы модернизации оборудования на предприятиях // Инновационная наука. 2022. № 6-1. С. 87—89.
3. Игнатьев А. В., Бочков М. И. Расчет простых систем с нелинейными моментными связями методом конечных элементов в форме классического смешанного метода // Изв. вузов. Стр.-во. 2023. № 11(779). С. 3—14. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN: RVOXQH.
4. Конечно-элементное моделирование совместной работы плитного ростверка и каркаса здания / Л. Н. Панасюк, Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, И. Д. Тарба, Л. Г. Цвейба // Строительство и архитектура. 2019. № 1. С. 34—38. DOI: [https://doi.org/10.29039/article\\_5c646f16bffb38.56532696](https://doi.org/10.29039/article_5c646f16bffb38.56532696).

5. Федоровский В. Г., Бобырь Г. А., Боков И. А., Ильин С. В. Применение метода конечных элементов в геотехнических расчетах по первому предельному состоянию // Вестн. НИЦ «Строительство». 2019. № 1(20).

© Габова В. В., Завьялов И. С., Максютова Е. А., 2026

Поступила в редакцию  
14.12.2025

Ссылка для цитирования:

Габова В. В., Завьялов И. С., Максютова Е. А. Анализ расчета осадки отдельно стоящего свайного фундамента методом конечных элементов в перемещениях и форме классического смешанного метода // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 22—33. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_22.

Об авторах:

**Габова Виктория Викторовна** — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gabovavv@yandex.ru

**Завьялов Иван Сергеевич** — канд. техн. наук, ассистент каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; is\_zavyalov@mail.ru

**Максютова Евгения Александровна** — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; evgenm00@mail.ru

**Victoria V. Gabova, Ivan S. Zavyalov, Evgenia A. Maksyutova**

*Volgograd State Technical University*

## **ANALYSIS OF THE SETTLEMENT CALCULATION OF A FREESTANDING PILE FOUNDATION USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN DISPLACEMENTS AND THE FORM OF THE CLASSICAL MIXED METHOD**

In this article, the calculations of the precipitation of a single pile and a group of piles included in a free-standing foundation are verified. A comparative analysis of the manual calculation method with numerical models implemented in the LIRA-CAD software package (using finite elements 51 and 57) and the finite element method in the form of a classical mixed method (CMM) with a modified lamellar finite element is performed. The impact of various approaches to modeling the elastic base and interaction with the soil on the results of pile deposition and efforts in the grillage is estimated. During the calculation, the convergence of numerical values of pile precipitation between manual calculation, LIRA-CAD (KE 51) and FEM in the form of CMM was revealed. The numerical values of the forces in the grillage differ and converge to the results obtained on the basis of the CMM-shaped FEM when the finite element grid is thickened, which indicates a greater accuracy of the CMM-shaped FEM when determining the stress-strain state of foundations.

**Key words:** pile bearing capacity, pile draft, calculation of piles and pile grillings, finite element method, FEM in the form of a classical mixed method.

*For citation:*

Gabova V. V., Zavyalov I. S., Maksyutova E. A. [Analysis of the settlement calculation of a freestanding pile foundation using the finite element method in displacements and the form of the classical mixed method]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 22—33. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_22.

*About authors:*

**Victoria V. Gabova** — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gabovavv@yandex.ru

**Ivan S. Zavyalov** — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; is\_zavyalov@mail.ru

**Evgenia A. Maksyutova** — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; evgenm00@mail.ru