

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.154.1

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22

Особенности расчета на прочность забивной железобетонной сваи малого сечения

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь*

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



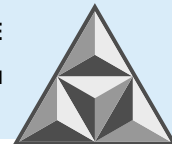
Рассмотрены сваи сечением 150×150 мм заводского изготовления, применяемые в строительстве малоэтажных легких домов. Приведены результаты расчета их несущей способности в фундаментах с низким и высоким ростверками. Изучены основания, соотнесенные к различным прочностным и деформационным свойствам грунтов. Результаты представлены с применением электронных таблиц. Усилия в сечениях свай в составе свайного фундамента определены в программном комплексе статического расчета строительных конструкций. Свая в расчетной схеме моделировалась с учетом бокового отпора грунта и влияния соседних свай. На основе полученных результатов составлены графики несущей способности свай в зависимости от соотношения в расчетном сечении изгибающего момента и продольной силы. Даны рекомендации по применению забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм в составе фундамента с учетом условий сопряжения с конструкцией ростверка.

Ключевые слова: сваи железобетонные, несущая способность, отпор грунта, внутренние силовые факторы, гибкость, расчетные формулы

Для цитирования:

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Особенности расчета на прочность забивной железобетонной сваи малого сечения // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 8-22.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22

Special features of strength calculation for small-section precast reinforced concrete driven piles

S.A. Tumakov, G.N. Golub'

Sergey Anatolevich Tumakov, Grigoriy Nikolaevich Golub'*

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



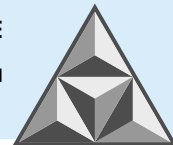
The paper considers factory-made piles with a cross-section of 150×150 mm used in the construction of low-rise light houses. The authors present the results of calculating their bearing capacity in foundations with low and high pile caps. The bases related to various strength and deformation properties of soils are studied. The results are presented using spreadsheets. The forces in the pile cross-sections as part of the pile foundation were obtained using a software package for static calculation of building structures. The pile in the calculation scheme was modelled taking into account the lateral resistance of the soil and the influence of neighbouring piles. Based on the results obtained, graphs of the bearing capacity of piles were compiled depending on the ratio of the bending moment and longitudinal force in the design section. The authors provide recommendations for the use of driven reinforced concrete piles with a cross-section of 150×150 mm as part of the foundation, taking into account the conditions of connection with the pile cap structure.

Keywords: reinforced concrete piles, bearing capacity, soil resistance, internal force factors, flexibility, calculation formulas

For citation:

Tumakov S.A., Golub' G.N. Special features of strength calculation for small-section precast reinforced concrete driven piles // *Smart composites in construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 8-22.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22



ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена вопросу анализа несущей способности забивной железобетонной сваи малого сечения в грунтовых основаниях в фундаментах с низким и высоким ростверками. Проведены исследования свай сечением 150×150 мм, выполненных из тяжелого бетона с армированием рабочей продольной арматурой класса А400 и А500.

Забивные железобетонные сваи малого сечения размером 200×200 мм широко применялись в сельском строительстве еще с прошлого столетия. Заводское изготовление таких свай осуществлялось по ГОСТ 19804 и серии 1.011.1-10 в.1 [1]. В последнее время с ростом строительства легких малоэтажных домов с деревянным каркасом и домов со стенами из легких материалов, наряду с традиционными видами фундаментов, начали массово применять свайные фундаменты, исполненные с применением забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм. Однако сваи с указанным сечением в [1] и иных нормативных документах отсутствуют. На производителей железобетонных конструкций и проектировщиков ложится повышенная ответственность за изготовление этих свай и проектные решения для фундаментов.

Следовательно, исследование несущей способности забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм в свайных фундаментах, устроенных в различных грунтовых основаниях, является необходимым и актуальным.

Использование свай малого сечения в свайных фундаментах для малоэтажных объектов с небольшими нагрузками на фундаменты обусловлено следующими причинами:

- достаточность прочностных и геометрических параметров свай для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации объекта;
- снижение материалоемкости по сравнению со стандартными сваями;
- снижение затрат на погружение и транспортировку свай.

Общепризнано, что расчет свайных оснований и практическое использование свай в различных грунтовых условиях подтверждается колоссальным объемом экспериментальных и теоретических исследований, выполненных как в России, так и за рубежом, и большим опытом безаварийной эксплуатации зданий и сооружений на свайных фундаментах. Однако значительный ряд вопросов, имеющих отношение к конструктивным решениям свай и методам их расчета, требует уточнения и дальнейшего развития.

Так, в [2] выполнена оценка несущей способности железобетонных свай на горизонтальную нагрузку, рассмотрены методы расчета свай, проведено сравнение опытных данных с результатами, полученными по существующим методикам, и даны рекомендации по оценке несущей способности сваи с учетом действующих на нее нагрузок. В [3] оцениваются факторы, которые часто упускаются из виду при анализе свай (пассивное давление грунта и метод контакта сваи с грунтом), и дается количественная оценка их совокупного влияния на несущую способность сваи и деформацию свайного фундамента.

В [4] представлен анализ численного исследования взаимодействия с грунтом сваи, подверженной осевым и горизонтальным нагрузкам. При этом изучение системы свая – грунт выполнено в программном комплексе с использованием конечно-разностного метода.

Задача о длительной несущей способности одиночной сваи, с учетом ее взаимодействия с грунтами и использованием реологической модели А.З. Тер-Мартirosяна, решена в [5], где приведены основные формулы для расчета в упругой и упруго-вязкой постановке.

В [6] рассмотрено применение в проектах железобетонных забивных свай малого сечения, применяемых в строительстве легких зданий, и проанализированы требования действующих



документов к расчету фундаментов из этих свай. Основные результаты исследований по использованию таких конструкций для фундаментов малоэтажных зданий представлены в [7]. По итогам натурных испытаний свай малого сечения получены уточненные расчетные характеристики лобового сопротивления грунта и сил трения по боковой поверхности.

Экономический аспект применения забивных железобетонных свай малого сечения исследован в [8].

Целью настоящей работы является исследование несущей способности забивной железобетонной сваи малого сечения 150×150 мм в различных грунтовых условиях, анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по практическому применению и повышению надежности проектных решений малоэтажного строительства.

Актуальность исследования связана с необходимостью уточнения несущей способности и, соответственно, возможностью использования забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм в различных грунтовых условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выпускаемые забивные железобетонные сваи малого квадратного сечения 150×150 мм различаются по длине, классу бетона, а также классу и диаметру продольного армирования. Сечение сваи показано на рис. 1.

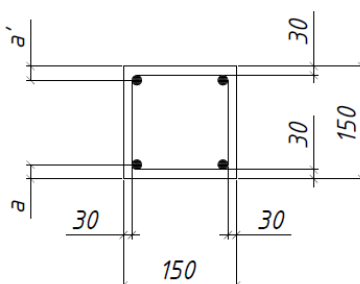


Рис. 1. Поперечное сечение сваи

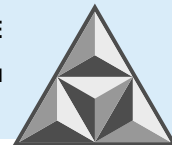
Fig. 1. Cross section of the pile

Наиболее распространенными на рынке являются сваи малого квадратного сечения 150×150 мм, изготовленные из бетона классов В20 и В25, армированные четырьмя продольными стержнями из арматуры А400 диаметром 8 или 10 мм, или арматуры А500 диаметром 8 мм. Длина выпускаемых забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм находится в диапазоне 2.0-6.0 м. Сваи сечением 150×150 мм длиной свыше 6.0 м встречаются крайне редко.

В настоящей работе рассмотрены железобетонные забивные сваи малого квадратного сечения 150×50 мм из бетона классов В15, В20 и В25, армированные четырьмя продольными стержнями из стержневой арматуры А400 диаметром 8 мм или 10 мм либо арматурой А500 диаметром 8 мм. Расчеты несущей способности свай, в соответствии с действующими нормативами, выполнены по несущей способности по грунту (СП 24.13330.2021), по несущей способности по материалу (СП 63.13330.2018).

При определении несущей способности по материалу сваю рассматривали как стержневой элемент, защемленный в грунте на расстоянии l_1 . Указанное расстояние рассчитывали:

$$l_1 = l_0 + \frac{2}{\alpha_\varepsilon}, \quad (1)$$



где l_0 – длина участка сваи от подошвы высокого ростверка до уровня планировки грунта, м (рис. 2); при низком ростверке $l_0 = 0$;

α_ε – коэффициент деформации, м^{-1} ; его вычисляли по формуле, представленной в [10]:

$$\alpha_\varepsilon = \sqrt[5]{\frac{K b_p}{EI}} \quad (2)$$

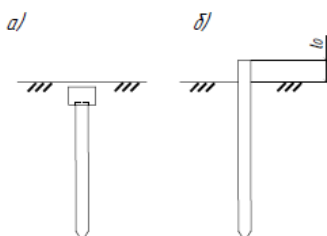


Рис. 2. Схема к вычислению расчетной длины сваи: а – с низким ростверком; б – с высоким ростверком

Fig. 2. Diagramm for calculating the estimated length of a pile: a – with low pile cap; b – with high pile cap

В произведенных расчетах коэффициент пропорциональности K , $\text{кН} \cdot \text{м}^{-4}$, характеризующий боковой отпор грунта на сваю, принят по СП 24.13330.2021 (см. табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты пропорциональности, характеризующие боковой отпор на сваю

Table 1. Proportionality coefficients characterising lateral resistance to piles

Грунты, окружающие сваю, и их характеристики	Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН} \cdot \text{м}^{-4}$
Глины и суглинки текучепластичные ($0.75 < I_L \leq 1$)	1350 – 2350
Глины и суглинки мягкопластичные ($0.5 < I_L \leq 0.75$); супеси пластичные ($0 \leq I_L \leq 1$); пески пылеватые ($0.6 \leq e \leq 0.8$)	2350 – 4000
Глины и суглинки тугопластичные и полутвердые ($0 \leq I_L \leq 0.5$); супеси твердые ($I_L < 0$); пески мелкие ($0.6 \leq e \leq 0.75$); пески средней крупности ($0.55 \leq e \leq 0.70$)	4000 – 6000
Глины и суглинки твердые ($I_L < 0$); пески крупные ($0.55 \leq e \leq 0.70$)	6000 – 10000
Пески гравелистые ($0.55 \leq e \leq 0.70$); крупнообломочные грунты с песчаным заполнителем	16750 – 33350

Условная ширина сваи квадратного сечения 150×150 мм равна:

$$b_p = (1.5 \cdot 0.15 + 0.5) = 0.725 \text{ м};$$

момент инерции поперечного сечения $I = 4.22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$.

Начальные модули упругости (E) бетона сваи в расчетах принимали согласно СП 63.13330.2018: для класса прочности В15 – $E = 24 \cdot 10^6$ кПа; для класса прочности В20 – $E = 27.5 \cdot 10^6$ кПа; для класса прочности В25 – $E = 30 \cdot 10^6$ кПа.

В исследовании рассматривали однорядное расположение свай и два варианта сопряжения сваи с ростверком. Первый вариант – шарнирное сопряжение, а второй – жесткое сопряжение сваи с ростверком. В свайных фундаментах невозможность смещения голов свай в расчетном горизонтальном направлении обеспечивается устройством в составе фундаментов наклонных свай. Реализуемые решения свайных фундаментов из свай малого сечения под малоэтажные легкие дома не предусматривают в своем составе устройства наклонных свай. По первому варианту сопряжения сваи с ростверком при определении расчетной длины сваи назначили коэффициент $\mu = 2$. По второму варианту назначение коэффициента μ требует отдельных расчетов для каждого конкретного проектного решения, поскольку размеры сечения ростверков для легких зданий при однорядном расположении



свай не обеспечивают ограничение поворота головы сваи. В настоящей работе для жесткого сопряжения сваи с ростверком сначала выполнены вычисления при $\mu = 1$, а затем они были скорректированы для коэффициента $\mu = 1.11$, определенного в программном комплексе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет несущей способности железобетонной забивной сваи малого сечения 150×150 мм при действии продольной нагрузки, приложенной с небольшими эксцентриситетами $e_0 \leq h/30 = 0.005$ м, выполнен по формуле:

$$N_{ult} = \varphi (AR_b + A_{s,tot} R_{sc}). \quad (3)$$

где A – площадь поперечного сечения сваи;

$A_{s,tot}$ – площадь продольной арматуры в сечении элемента;

R_b и R_{sc} – расчетные сопротивления сжатию бетона и арматуры.

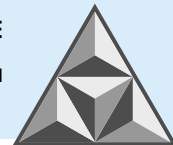
Результаты расчетов представлены в табл. 2-5.

Таблица 2. Предельная нагрузка N_{ult} при низком ростверке и шарнирном сопряжении сваи с ростверком ($\mu = 2$)

Table 2. Ultimate load N_{ult} with low pile cap and hinged coupling between pile and pile cap ($\mu = 2$)

Бетон класса B15			
Коэффициент пропорциональности $K, \text{кН} \cdot \text{м}^{-4}$	1350	6000	10000
$l_1, \text{м}$	2.01	1.49	1.35
$l_{ef}, \text{м}$	4.03	3.00	2.70
l_{ef}/h	26.9 > 20.0	19.9	18.00
φ	–	0.70	0.75
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d10A400	–	213	228
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d 8A400	–	184	197
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d 8A500	–	196	210
Бетон класса B20			
Коэффициент пропорциональности $K, \text{кН} \cdot \text{м}^{-4}$	1350	7000	10000
$l_1, \text{м}$	2.07	1.49	1.39
$l_{ef}, \text{м}$	4.14	2.98	2.77
l_{ef}/h	27.6 > 20.0	19.9	18.48
φ	–	0.70	0.74
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d10A400	–	260	274
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d 8A400	–	231	244
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d 8A500	–	243	256
Бетон класса B25			
Коэффициент пропорциональности $K, \text{кН} \cdot \text{м}^{-4}$	1350	7400	10000
$l_1, \text{м}$	2.11	1.50	1.41
$l_{ef}, \text{м}$	4.21	3.00	2.82
l_{ef}/h	28.1 > 20.0	19.98	18.81
φ	–	0.70	0.73
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d10A400	–	307	320
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d 8A400	–	279	291
$N_{ult}, \text{кН}$, при 4d 8A500	–	290	302

Их анализ показал, что при эксцентриситетах продольной силы, не превышающих $h/30 = 0.005$ м, для грунтов, расположенных в расчетной зоне, предельная нагрузка при шарнирном сопряжении сваи с ростверком по формуле (3) определяться не может.

**Таблица 3.** Предельная нагрузка N_{ult} при низком ростверке и жестком сопряжении свай с ростверком ($\mu = 1$)**Table 3.** Ultimate load N_{ult} with low pile cap and rigid coupling between pile and pile cap ($\mu = 1$)

Бетон класса В15			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	6000	10000
l_1 , м	2.01	1.49	1.35
l_{ef} , м	2.01	1.49	1.35
l_{ef}/h	13.40	19.90	17.99
φ	0.85	0.90	0.91
N_{ult} , кН, при 4d10A400	258	272	274
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	224	236	238
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	237	251	252
Бетон класса В20			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7000	10000
l_1 , м	2.07	1.49	1.39
l_{ef} , м	2.07	1.49	1.39
l_{ef}/h	13.80	9.93	9.24
φ	0.85	0.90	0.90
N_{ult} , кН, при 4d10A400	314	333	335
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	280	297	298
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	293	312	313
Бетон класса В25			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7400	10000
l_1 , м	2.11	1.50	1.41
l_{ef} , м	2.11	1.50	1.41
l_{ef}/h	14.04	9.90	9.40
φ	0.84	0.90	0.90
N_{ult} , кН, при 4d10A400	369	397	395
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	335	358	359
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	349	372	374

В этих случаях расчет требуется проводить по прочности материала как внецентренно-сжатого элемента:

$$N \cdot e \leq R_b \cdot bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a'). \quad (4)$$

Анализ результатов расчета также показал, что при эксцентриситетах продольной силы, не превышающих $h/30 = 0.005$ м, при жестком сопряжении свай с ростверком предельная нагрузка по формуле (3) может быть определена для всех грунтов, расположенных в расчетной зоне.

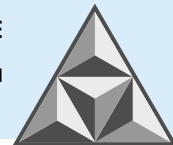
Дальнейшее исследование касается свайного фундамента с высоким ростверком. Размер участка l_0 принимали равным 0.5 м и 1.0 м. Попытки вычислить по формуле (3) несущую способность железобетонной забивной свай малого квадратного сечения 150×150 мм с шарнирным сопряжением с ростверком при действии продольной нагрузки, приложенной с небольшими эксцентриситетами $e_0 \leq h/30 = 0.005$ м, не привели к успеху. В обоих случаях для любых грунтов, находящихся в расчетной зоне, значение l_{ef}/h превысило предельный размер. Более того, для высокого ростверка с $l_0 = 1.0$ м и грунтов, расположенных в расчетной зоне, при коэффициенте пропорциональности $K < 4000$ кН·м⁻⁴ для бетона класса В15, $K < 4600$ кН·м⁻⁴ для бетона класса В20 и $K < 5000$ кН·м⁻⁴ для бетона класса В25, гибкость свай превышает предельное значение, что приводит к необходимости изменять конструктивное решение при проектировании свайного фундамента (увеличивать сечение свай либо снижать параметр l_0).

**Таблица 4.** Предельная нагрузка N_{ult} при высоком ростверке ($l_0 = 0.5$ м) и жестком сопряжении свай с ростверком ($\mu = 1$)**Table 4.** Ultimate load N_{ult} with high pile cap ($l_0 = 0.5$ m) and rigid coupling of pile with pile cap ($\mu = 1$)

Бетон класса В15			
Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН}\cdot\text{м}^{-4}$	1350	6000	10000
l_1 , м	2.51	1.99	1.85
l_{ef} , м	2.51	1.99	1.85
l_{ef}/h	16.80	13.30	12.30
φ	0.78	0.85	0.87
N_{ult} , кН, при 4d10A400	237	259	262
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	206	224	228
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	218	238	242
Бетон класса В20			
Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН}\cdot\text{м}^{-4}$	1350	6800	10000
l_1 , м	2.57	2.00	1.89
l_{ef} , м	2.57	2.00	1.89
l_{ef}/h	17.12	13.32	12.58
φ	0.78	0.85	0.86
N_{ult} , кН, при 4d10A400	287	316	320
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	256	282	285
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	268	296	299
Бетон класса В25			
Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН}\cdot\text{м}^{-4}$	1350	7400	10000
l_1 , м	2.61	2.00	1.91
l_{ef} , м	2.61	2.00	1.91
l_{ef}/h	17.37	13.32	12.74
φ	0.77	0.85	0.86
N_{ult} , кН, при 4d10A400	336	374	377
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	305	340	343
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	318	353	357

Таблица 5. Предельная нагрузка N_{ult} при высоком ростверке ($l_0 = 1.0$ м) и жестком сопряжении свай с ростверком ($\mu = 1$)**Table 5.** Ultimate load N_{ult} with high pile cap ($l_0 = 0.5$ m) and rigid coupling of pile with pile cap ($\mu = 1$)

Бетон класса В15			
Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН}\cdot\text{м}^{-4}$	1350	4300	10000
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	213	246
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	185	213
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	196	227
Бетон класса В20			
Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН}\cdot\text{м}^{-4}$	1350	4900	10000
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	260	298
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	232	266
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	243	279
Бетон класса В25			
Коэффициент пропорциональности K , $\text{кН}\cdot\text{м}^{-4}$	1350	5400	10000
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	306	351
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	278	319
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	290	332



Следующим шагом исследования несущей способности сваи сечением 150×150 мм явилась проверка несущей способности по формуле (4) для различных комбинаций соотношения изгибающего момента и продольной силы. При выполнении такой проверки рассматривалось силовое воздействие, включающее постоянную и длительно действующую нагрузку. В реальных расчетах учет размера кратковременной нагрузки выполняется в соответствии с силовыми и прочими воздействиями на здание и сооружение. Кроме этого, в формуле (4) фигурирует расчетная длина элемента, которая напрямую зависит от характеристик грунта (выражается коэффициентом пропорциональности K). Следовательно, полученные данные являются ограниченными по виду нагрузок и могут быть использованы лишь для предварительной оценки несущей способности забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм, для конкретных грунтовых условий. Так, на рис. 3 приведены оценочные графики несущей способности сваи из бетона класса В20, армированной продольной арматурой d10A400 и d8A500, для расположенных в расчетной зоне грунтов с $K = 1350 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-4}$ и шарнирного сопряжения сваи с низким ростверком.

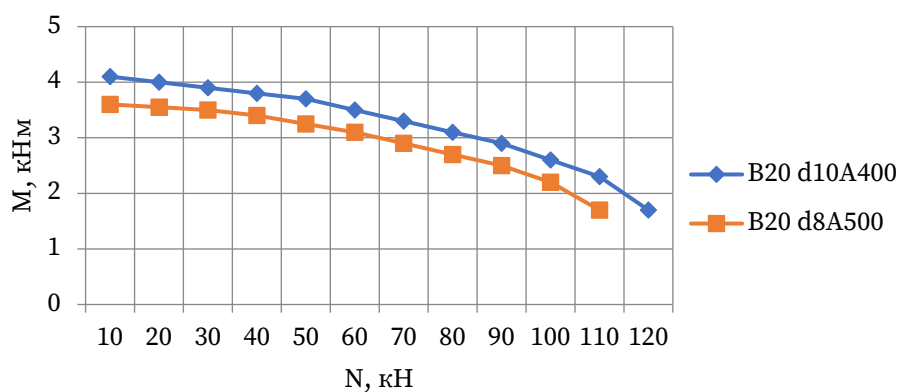


Рис. 3. Оценочные графики несущей способности сваи с шарнирным сопряжением с низким ростверком
Fig. 3. Estimated graphs of the bearing capacity of a pile with a hinged coupling with a low pile cap

На рис. 4 представлены оценочные графики несущей способности забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм из бетона класса В20, армированной продольной арматурой d10A400 и d8A500, для шарнирного сопряжения сваи с высоким ростверком. Кривые для расположенных в расчетной зоне грунтов с $K = 1350 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-4}$ при $l_0 = 0.5$ м и $K = 4900 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-4}$ при $l_0 = 1.0$ м являются идентичными.

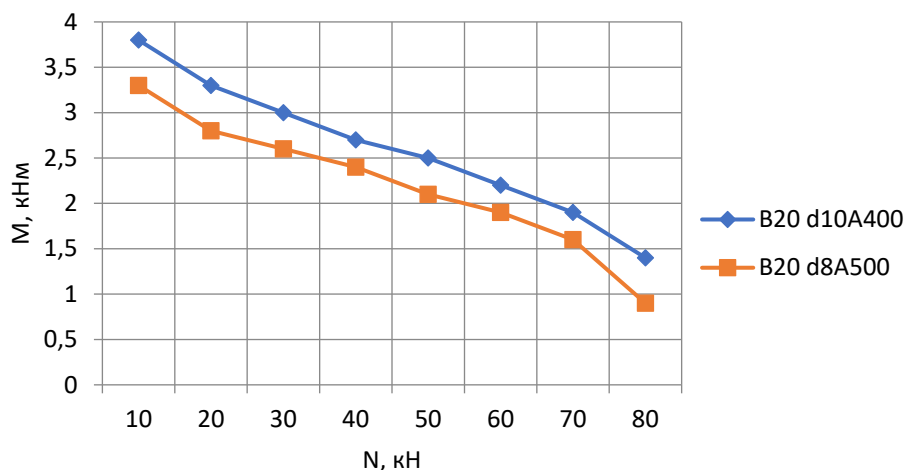


Рис. 4. Оценочные графики несущей способности сваи с шарнирным сопряжением с высоким ростверком
Fig. 4. Estimated graphs of the bearing capacity of a pile with a hinged coupling with a high pile cap



Для всех рассмотренных случаев несущая способность сваи по материалу оказывалась больше несущей способности сваи по грунту, вычисленной согласно СП 24.13330.2021.

В рамках исследований проведена проверка несущей способности сваи для конкретного примера свайного ленточного фундамента под малоэтажным зданием размером 6×8 м. Свайные фундаменты приняты ленточными с однорядным расположением забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм и длиной 3 м с шарнирным сопряжением с низким ростверком. Шаг свай составляет 2.0 м. Сваи изготовлены из бетона класса прочности В20 с армированием продольной арматурой 4d10A400. В основании расположены мелкие пески средней плотности ($K = 6000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$).

Несущая способность по грунту, определенная стандартным способом, составила $F_d = 96.5 \text{ кН}$. Тогда допускаемая нагрузка на сваю из расчета несущей способности по грунту составит 69 кН. Предварительная минимальная оценочная несущая способность сваи по материалу при $K = 1350 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ (для окончательной проверки обязательным является пересчет при $K = 6000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ по рис. 3) – комбинация $N_{ult} = 100 \text{ кН}$ ($> F_d = 96.5 \text{ кН}$) и $M = 2.6 \text{ кНм}$.

При расчетах свай очень важно знать местоположение максимальных моментов по их длине. Известны случаи, когда в расчетах не учитывали изменение внутренних силовых факторов по длине сваи и расчет прочности осуществляли на заниженные размеры M и N [9]. Для вычисления расчетной продольной силы и изгибающих моментов в сечении сваи нами создана числовая модель в программном комплексе статических расчетов (рис. 5).

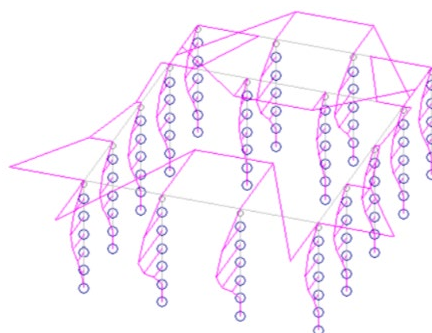


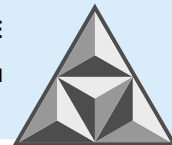
Рис. 5. Расчетная схема свайного фундамента с эпюрой моментов
Fig. 5. Calculation scheme of the pile foundation with a graph of moments

Сваи в расчетной модели заданы как пространственные стержни, опирающиеся острием на вертикальную упругую связь. Упругая вертикальная связь под острием сваи моделировалась конечным элементом КЭ-51. Жесткость вертикальной связи найдена стандартным способом [10] при помощи электронной таблицы из линейной зависимости $R_z = N/s$, где N – размер вертикальной силы на сваю, s – размер вертикальной деформации сваи. Вертикальная деформация сваи определена в соответствии с СП 24.13330.2021 как осадка отдельной сваи с номером i с учетом влияния соседних свай по формуле:

$$s = \beta \frac{N_i}{G_{1l}} + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_{1l}}. \quad (5)$$

В формуле (5) первое слагаемое является осадкой одиночной сваи с номером i ; δ_{ij} – коэффициенты влияния, вычисляемые в зависимости от расстояния a между i -свайей и соседними j -свайями; $N_{i(j)}$ – нагрузка на $i(j)$ -сваю.

Жесткость связи КЭ-51 составила $R_z = 10.7 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-1}$ для мелких песков средней плотности ($e = 0.6$; $K = 6000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$).



Жесткость специальных элементов, моделирующих отпор грунта на сваю в горизонтальном направлении, вычисляли стандартным способом по СП 24.13330.2021 и с использованием источника [11] в электронной таблице:

$$X_i = Kz_i b_p l_i. \quad (6)$$

Таким образом, в рамках выполненного исследования нами создана имитационная модель свайных фундаментов, важность которой, отмеченная в работе [12], сводится к возможности осуществления анализа свай на прочность в различных геологических условиях.

В результате получены расчетные значения силовых факторов для проверки прочности сечения сваи: $M = 1.4$ кНм; $M_l = 0.01$ кНм; $N = 63$ кН; $N_l = 30$ кН. Расчет прочности поперечного сечения сваи по формуле (4) показал выполнение требуемого условия:

$$N \cdot e = 4.2 \text{ кНм} \leq R_b \cdot bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a') = 10.3 \text{ кНм}.$$

В качестве второго варианта рассмотрено то же конструктивное решение, но с жестким сопряжением сваи с ростверком. Получены следующие значения силовых факторов для проверки прочности сечения сваи: $M = 1.0$ кНм; $M_l = 0.01$ кНм, $N = 63$ кН, $N_l = 30$ кН. Расчет на устойчивость определен коэффициент длины: $\mu = 1.11$. Прочность поперечного сечения сваи вновь показала выполнение требуемого условия:

$$N \cdot e = 3.6 \text{ кНм} \leq R_b \cdot bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a') = 10.3 \text{ кНм}.$$

ВЫВОДЫ

Забивные железобетонные сваи малого сечения 150×150 мм могут применяться в свайных фундаментах легких малоэтажных зданий.

Несущая способность забивных железобетонных свай малого сечения 150×150 мм по прочности, в зависимости от материалов сваи и грунтовых условий, при нагрузках, приложенных с небольшими эксцентриситетами, довольно высока (≥ 180 кН). Однако не следует полагаться на размер N_{ult} , полученный по формуле (3): при свободном сопряжении сваи с низким ростверком в грунтах с коэффициентом пропорциональности $1350 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-4}$ и с высоким ростверком в любых грунтах при $l_0 > 0.5$ м расчет несущей способности по формуле (3) невозможен даже при малых эксцентриситетах. Это связывается с большой гибкостью ствола сваи. При жестком сопряжении сваи с высоким ростверком ограничение расчета по формуле (3) наступает при $l_0 > 0.75$ м для $K = 1350 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-4}$.

При проектировании свайных фундаментов с использованием забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм необходимо выполнять их проверку как внецентренно-сжатых элементов по формуле (4) с учетом требований по ограничению гибкости. Положение сечения и действующие в нем внутренние силовые факторы следует определять расчетом. При этом коэффициент μ для вычисления длины сваи также необходимо корректировать расчетом на устойчивость в пространственной постановке задачи.

При разработке проектных решений свайных фундаментов с жестким сопряжением сваи с ростверком важнейшими являются конструктивные мероприятия, обеспечивающие такое сопряжение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Серия 1.011.1-10.** Сваи забивные железобетонные. Вып. 1. Ч. 1. Сваи цельные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой. Рабочие чертежи. М. Госстрой СССР. 1989. 150 с.



2. **Знаменский В.В., Знаменская Е.П., Чунюк Д.Ю., Халиуллина Д.Р.** К вопросу об оценке несущей способности забивных железобетонных свай стандартных сечений на горизонтальную нагрузку // *Вестник Пермского нац. исслед. политех. ун-та. Строительство и архитектура*. 2018. Т. 9. № 1. С. 60-69.
3. **Kim J., Lee J.-Y., Lim D.-B., Han J.-G.** Analysis of Influence Factor of Soil-Structure Interaction Considered in Pile Analysis using Finite Element Analysis // *Civil Engineering Journal*. 2025. 11 (7). P. 2701-2714.
4. **Khodair Y.** Numerical Analysis of Pile-Soil Interaction under Axial and Lateral Loads // *Inter. J. Concr. Struct. Mat.* 2014; DOI: 10.1007/S40069-014-0075-2
5. **Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ермошина Л.Ю.** Осадка и длительная несущая способность свай // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 9. С. 18-23.
6. **Бикметов Р.М., Денисов О.Л.** Применение фундаментов из свай малого сечения // 68-я науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых УГНТУ: Сб. мат. конф., Уфа, 18-20 апреля 2017 г. Т. 2. Уфа: Уфимский гос. нефт. тех. ун-т, 2017. С. 189-191.
7. **Кравцов В.Н., Лапатын П.В.** Свай малого поперечного сечения для фундаментов малоэтажных зданий, упрочнения грунтов и их расчет // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2016. № 16. С. 102-107.
8. **Преснов О.М., Костылев П.Н., Лукина Л.А.** Техничко-экономическая целесообразность применения микросвай из железобетона для фундаментов малоэтажного домостроения // *Экономические науки*. 2021. № 196. С. 124-127.
9. **Гаврилов А.В., Козин А.В., Тумаков С.А., Травин С.В.** О некоторых вопросах прохождения экспертизы конструктивного раздела проектной документации // *Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания*. 2011. № 2. С. 28-30.
10. **Тумаков С.А., Голубь Г.Н.** Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 4. С. 8-19.
11. **Агеев А.С., Тумаков С.А.** Моделирование и расчет комбинированных свайно-плитных фундаментов в SCAD // 75-я Всеросс. науч.-техн. конф. студ., магистрантов и аспирантов с межд. уч.: Сб. мат. конф.: в 3-х ч. Ярославль, 20-21 апреля 2022 г. Т. 75. Ярославль: Ярослав. гос. тех. ун-т, 2022. С. 444-448.
12. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И. С., Зайцева И.А.** Особенности использования отечественного и зарубежного инструментария имитационного моделирования строительных конструкций зданий и сооружений // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 2. С. 18-31.

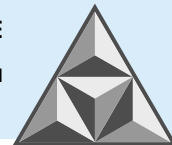
Поступила в редакцию 03.10.2025

Одобрена после рецензирования 27.10.2025

Принята к опубликованию 18.11.2025

REFERENCES

1. **Series 1.011.1-10** (1989), Driven reinforced concrete piles, iss. 1, part 1. Solid solid square piles with non-stressed reinforcement. Working drawings. M. Gosstroy of the USSR.
2. **Znamenskiy, V.V., Znamenskaya, E.P., Chunya, D.Yu. and Khaliullina, D.R.** (2018), "To the question about the assessment bearing capacity driving reinforced concrete piles of standard cross sections on horizontal load", *Bull. of Perm. Nats. Issled. Un-ta. Construction and Architecture*, no. 1, pp. 60-69. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.06 (in Russian).
3. **Kim, J., Lee, J.-Y., Lim, D.-B. and Han, J.-G.** (2025), "Analysis of Influence Factor of Soil-Structure Interaction Considered in Pile Analysis using Finite Element Analysis", *Civ. Eng. J.*, vol. 11, no. 7, pp. 2701-2714. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-04>.
4. **Khodair, Y.** (2014), "Numerical Analysis of Pile-Soil Interaction under Axial and Lateral Loads", *Inter. J. Concr. Struct. Mat.*; doi:10.1007/S40069-014-0075-2.
5. **Ter-Martirosyan, Z.G., Ter-Martirosyan, A.Z. and Ermoshina, L.Yu.** (2021), "Settlement and long-term bearing capacity of the pile", *Ind. and Civ. Eng.*, no. 9, pp. 18-23. DOI 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23 (in Russian).



6. **Bikmetov, R.M. and Denisov, O.L.** (2017), "Application of foundations from small-section piles", 68th scientific and technical conf. of students, graduate students and young scientists of USTU: Coll. of conf. mat., vol. 2, Ufa, Ufa State Petroleum Technical University, pp. 189-191 (in Russian).
7. **Kravtsov, V.N. and Lapatin, P.V.** (2016), "Piles of small cross section for foundations of low-rise buildings, soil hardening and their calculation", *Bull. of Polotsk State University, Ser. F. Construction. Appl. Sci.*, no. 16, pp. 102-107 (in Russian).
8. **Presnov, O.M., Kostylev, P.N. and Lukina, L.A.** (2021), "Technical and economic feasibility of using micro-piles made of reinforced concrete for foundations of low-rise housing construction", *Economic Sci.*, no. 196, pp. 124-127. DOI 10.14451/1.196.124 (in Russian).
9. **Gavrilov, A.V., Kozin, A.V., Tumakov, S.A. and Travin, S.V.** (2011), "On some issues of passing the examination of the design section of project documentation", *Technical regulation. Construction, design and survey*, no. 2, pp. 28-30 (in Russian).
10. **Tumakov, S.A. and Golub, G.N.** (2023), "Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation", *Smart Composite in Construction*, vol. 4, no. 4, pp. 8-19 (in Russian).
11. **Ageev, A.S. and Tumakov, S.A.** (2022), "Modeling and calculation of combined pile-slab foundations in SCAD", *Seventy-fifth all-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students with international participation: Coll. conf. mat.: in 3 parts*, Yaroslavl, Yaroslavl State Technical University, vol. 75, pp. 444-448 (in Russian).
12. **Fedosov, S.V. Fedoseev, V.N., Zaitsev, I.S. and Zaitseva, I.A.** (2023), "Features of domestic and foreign simulation tools use for structural modeling of civil engineering buildings and constructions", *Smart Composite in Construction*, vol. 4, no. 2, pp. 18-31 (in Russian).

Received 03.10.2025

Approved 27.10.2025

Accepted 18.11.2025