

DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.03

УДК 624.154.1

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВАЙНОГО ПОЛЯ ПЛИТНО-СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА 21-ЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА

Г.М. Скибин, В.М. Дереховский

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
Новочеркасск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 19 мая 2023  
Одобрена: 22 июня 2023  
Принята к публикации:  
24 июля 2023

#### Ключевые слова:

свайный фундамент, многоэтажное здание, оптимизация, несущая способность, численное моделирование, сравнение методов, сваи разной длины.

### АННОТАЦИЯ

Данная работа направлена на изучение методов оптимизации свайного поля с целью обеспечения наибольшего использования принятой в проекте несущей способности свай, с учетом наиболее неблагоприятных расчетных сочетаний усилий. Объектом исследования является многоэтажный жилой дом на плитно-свайном фундаменте с регулярной сеткой свай, в котором наглядно видно несовершенство методов расчета, ввиду неполного использования несущей способности значительного количества свай, но описанные в работе способы применимы и к другим зданиям на плитно-свайных фундаментах, особенно ярко будет видна разница исходной схемы и оптимизированной на примере с более длинными сваями в менее несущих грунтах, распространенных на всю глубину заложения фундамента. Целью данного исследования является изучение методов оптимизации свайного поля, изучение методики использования данных методов на конкретном примере и их сравнение по параметрам использования несущей способности свай: абсолютному и относительному значению минимальной нагрузки на сваю, абсолютному и относительному значению максимальной нагрузки на сваю, абсолютному и относительному значению средней нагрузки на сваю, а также их сравнение по экономической эффективности. В ходе работы были использованы численное моделирование с применением метода конечных элементов и анализ результатов многовариантного расчета. Результатом данной работы является применение методов оптимизации свайного поля к конкретному многоэтажному зданию на плитно-свайном фундаменте, оценка каждого из методов и их сравнение по этим показателям, а также понимание дальнейшего развития данной тематики.

© ПНИПУ

© Скибин Геннадий Михайлович – доктор технических наук, профессор, e-mail: skibingm@mail.ru.  
Дереховский Виталий Максимович – аспирант, e-mail: vitaliyderex@gmail.com.

Gennadii M. Skibin – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: skibingm@mail.ru.  
Vitalii M. Derekhovskii – Postgraduate Student, e-mail: vitaliyderex@gmail.com.

## THE EFFECTIVENESS OF USING THE BEARING CAPACITY OF PILES IN THE FORMATION OF THE PILE FIELD OF THE SLAB PILE FOUNDATION OF A 21-STOREY APARTMENT BUILDING

G.M. Skibin, V.M. Derekhovskii

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 19 May 2023  
Approved: 22 June 2023  
Accepted for publication:  
24 July 2023

#### Keywords:

pile foundation, multi-storey building, optimization, bearing capacity, numerical modelling, comparison of methods, piles of different length.

### ABSTRACT

This article is aimed at studying methods for optimizing the pile field in order to ensure the greatest use of the bearing capacity of piles, adopted in the project, considering the most unfavorable design combinations of forces. The object of the study is a multi-storey apartment building on a slab-pile foundation with a regular grid of piles, which clearly shows the imperfection of the calculation methods, due to the incomplete use of the bearing capacity of a significant number of piles, but the methods described in the article are also applicable to other buildings on slab-pile foundations, especially the difference between the original scheme and the optimized scheme will be clearly visible on the example with longer piles in less bearing soils, spread over the entire depth of the foundation. The purpose of this study is to study methods for optimizing a pile field, to study the methodology for using these methods on a specific example and compare them in terms of the parameters of using the bearing capacity of piles: the absolute and relative value of the minimum load on the pile, the absolute and relative value of the maximum load on the pile, the absolute and relative value average load per pile, as well as their comparison of economic efficiency. In the course of the article, numerical modeling was used, using the finite element method and analysis of the results of multivariate calculation. The result of this article is the application of pile field optimization methods to the multi-storey building on a slab-pile foundation, the evaluation of each of the methods and their comparison according to these indicators, as well as an understanding of the further development of this topic.

© PNRPU

---

## Введение

В современной практике проектирования применяются совершенно разные типы фундаментов [1], но свайные фундаменты более широко распространены в современном строительстве как высотных зданий и сооружений, так и рядовых многоэтажных домов из-за их устойчивости и высокой несущей способности [2, 3]. Сравнение конструкций фундаментов для многоэтажного дома анализировалось в работе [4]. Использование свайных фундаментов – распространенная практика как в России, так и за рубежом [5, 6]. Но, к сожалению, проектные организации, занимающиеся проектированием свайных фундаментов, не всегда заинтересованы в применении оптимизации своих инженерных решений в связи с высокими трудозатратами при проектировании или ограниченностью времени на проектирование, а, возможно, и из-за недостатка квалифицированных инженерных кадров. Исследование методов определения осадки и длительной несущей способности одиночной сваи было представлено в работе [7]. Применение метода конечных элементов (МКЭ) для расчета плитно-свайных фундаментов приведено в статьях [8–11].

Вопросам взаимодействия одиночной сваи с окружающим и подстилающими грунтами посвящено большое количество научных работ как российских, так и зарубежных авторов. С опорой на экспериментальные, численные и теоретические исследования в научных работах были получены различные методы, подходы и решения, позволяющие наиболее корректно спрогнозировать осадку и несущую способность одиночной сваи. Исследования в данной области являются актуальными, поскольку определение осадки сваи, а также изучение механизма распределения нагрузки, передаваемой на неё, играют важную роль при проектировании свайных фундаментов.

## Основная часть

Расчет количества свай в плитно-свайных фундаментах, с одной стороны, является довольно тривиальной задачей, сводящейся к простому алгебраическому выражению, а именно к дроби, где в числителе – расчетная сжимающая сила, передаваемая на свайный ростверк в уровне его подошвы, а в знаменателе – несущая способность единичной сваи.

$$n = \frac{N_d}{F_d},$$

где  $n$  – количество свай, шт.;  $N_d$  – расчетная сжимающая сила, передаваемая на свайный ростверк в уровне его подошвы, кН;  $F_d$  – несущая способность единичной сваи.

Расположение свай в плитно-свайных фундаментах также не является особо сложной задачей, сводящейся к соблюдению конструктивных требований пункта 8.13 СП24.13330.2021, регламентирующего расстояния между различными видами свай. С другой же стороны, задача усложняется неравномерностью усилий в сваях вследствие неравномерности распределения вертикальных несущих конструкций, а также воздействия горизонтальных нагрузок, особенно это присуще высотным зданиям [6].

Решением данной задачи может являться более оптимизированная расстановка свай по площади плитного ростверка с учетом всех вариантов сочетаний нагрузок [12, 13]. Похожей проблемой, только для кустов свай, занимались А.П. Малышкин и А.В. Есипов [14].

Для примера используем 21-этажный жилой дом в г. Батайске Ростовской области. Конструктивная схема здания – каркасно-монолитная, на плитно-свайном фундаменте, сваи – буронабивные, круглого сечения  $\varnothing 350$  мм. Вертикальные несущие конструкции здания представлены монолитными ж.-б. пилонами толщиной 200, 250 мм и диафрагмами жесткости толщиной 200 и 250 мм, а также ограждающими стенами подвала толщиной 250 мм. Горизонтальными несущими конструкциями являются монолитные ж.-б. перекрытия толщиной 180 и 220 мм (рис. 1).

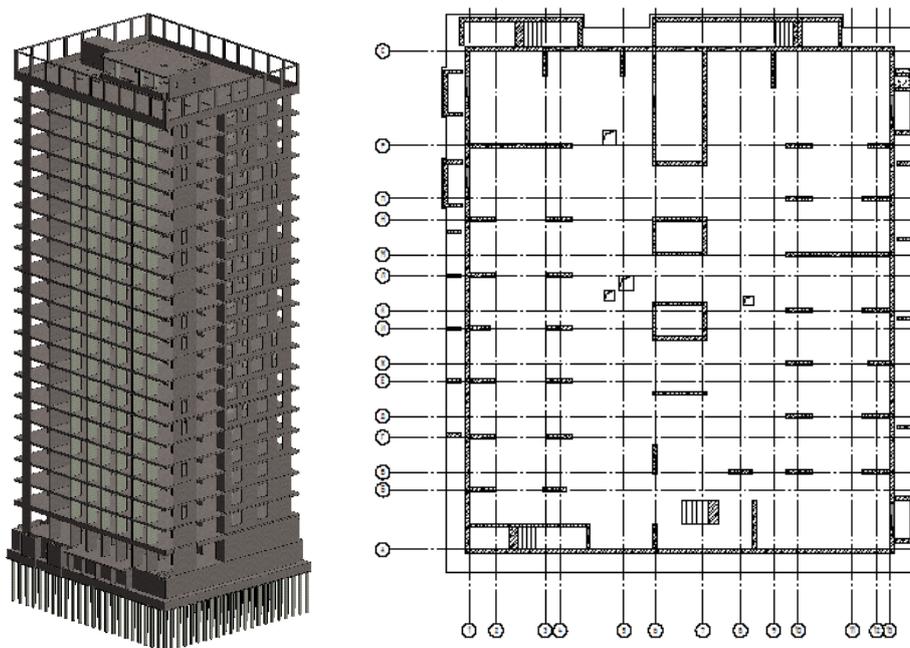


Рис. 1. 3D-вид каркаса здания и план несущих конструкций подвала  
Fig. 1. 3D-view of the building frame and plan of the supporting structures of the basement

В геологическом отношении участок строительства представляет собой многослойное основание с равномерным расположением инженерно-геологических элементов по глубине: ИГЭ-1 – суглинок текуче-пластичной консистенции мощностью в среднем 1,3 м; ИГЭ-2 – суглинок полутвердый мощностью 2,6 м; ИГЭ-3 – песок средней плотности мощностью 4,4 м; ИГЭ-4 – песок плотный. Несущая способность одиночной сваи длиной 12 м составляет 66,5 т.

Свайное поле в данном проекте представляет собой регулярную сетку свай круглого сечения  $\varnothing 300$  мм, с шагом 1200 мм, в количестве 586 шт. Схема расположения свайного поля до оптимизации представлена на рис. 2.

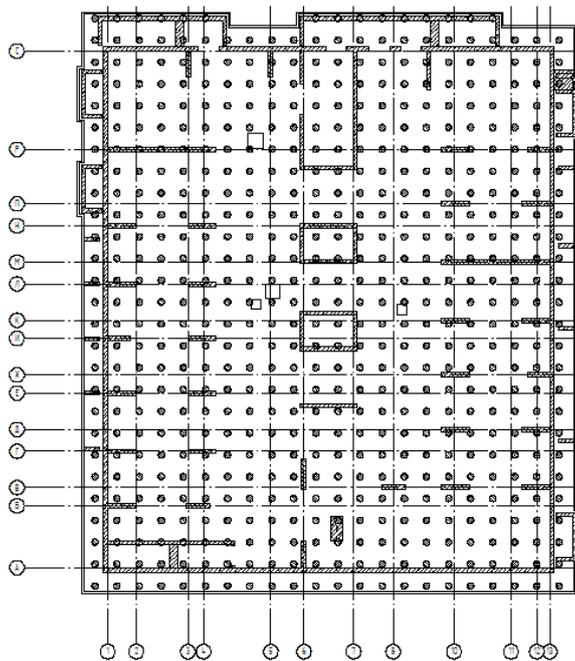


Рис. 2. Схема расположения свайного поля до оптимизации  
Fig. 2. Pile field scheme before optimization

Расчет несущих конструкций здания выполнен в программно-вычислительном комплексе, основанном на методе конечных элементов. Одиночные сваи в составе группы замоделированы при помощи одноузловых элементов конечной жесткости по направлению вертикальной оси  $Z$  [15].

## Результаты и обсуждение

В результате расчета получаем мозаику усилий в каждой отдельной свае при наихудшем расчетном сочетании усилий (рис. 3).

На рисунке видно, что расчетная нагрузка на сваи, расположенные в районе осей 4–10, Б-Д, недогружены почти в полтора раза.

Если посчитать нагрузку в уровне обреза плитного ростверка  $N_d = 29591$  т и разделить её на несущую способность одиночной сваи  $F_d = 66,5$  т, получим  $29591/66,5 = 445$  шт. Таким образом, в идеальных условиях, количество свай должно составлять 445, а не 586 шт., что, конечно же, невозможно, ввиду неравномерного расположения вертикальных несущих конструкций, а также горизонтальных нагрузок. Но к такому числу свай стоит стре-

миться, т.е. стоит стремиться к максимальному использованию несущей способности каждой сваи, согласно пункту 8.7 СП 24.

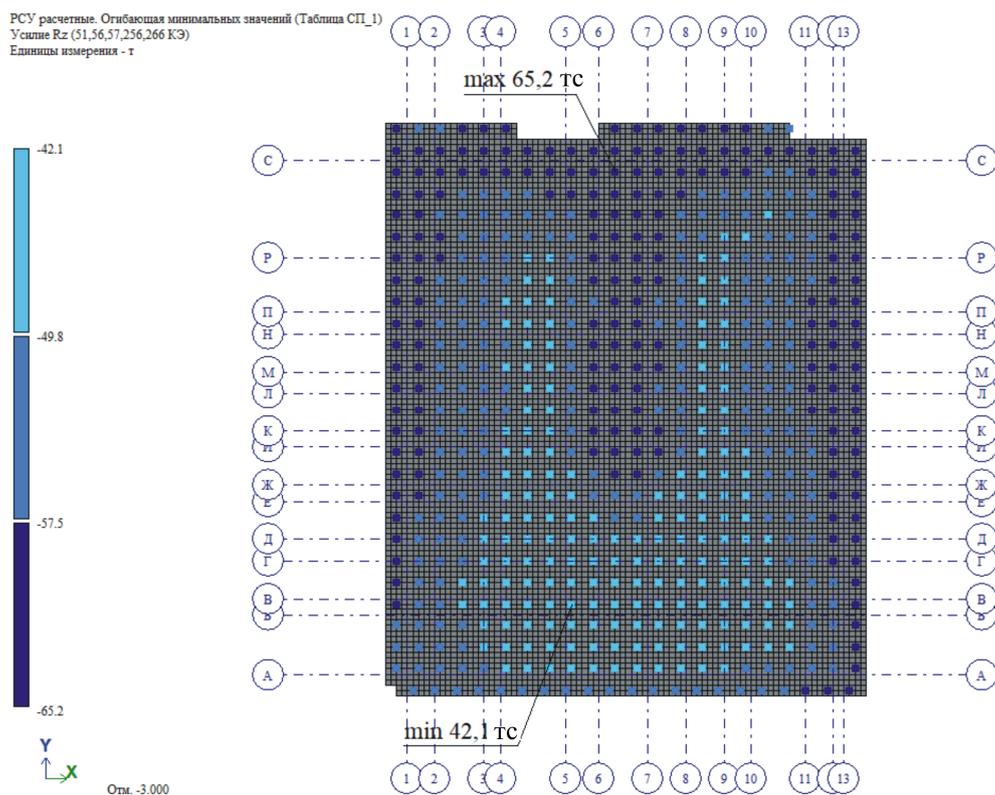


Рис. 3. Мозаика усилий в сваях до оптимизации  
 Fig. 3. Mosaic of forces in piles before optimization

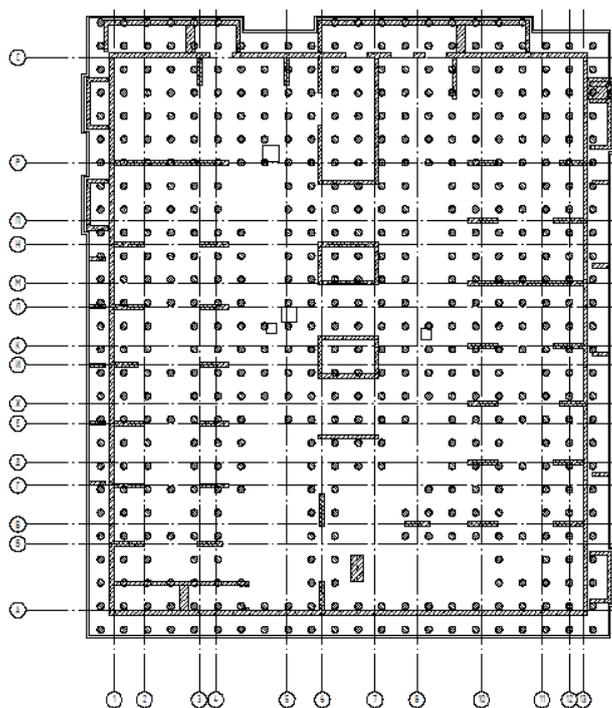


Рис. 4. Схема расположения свайного поля после оптимизации  
 Fig. 4. Pile field scheme after optimization

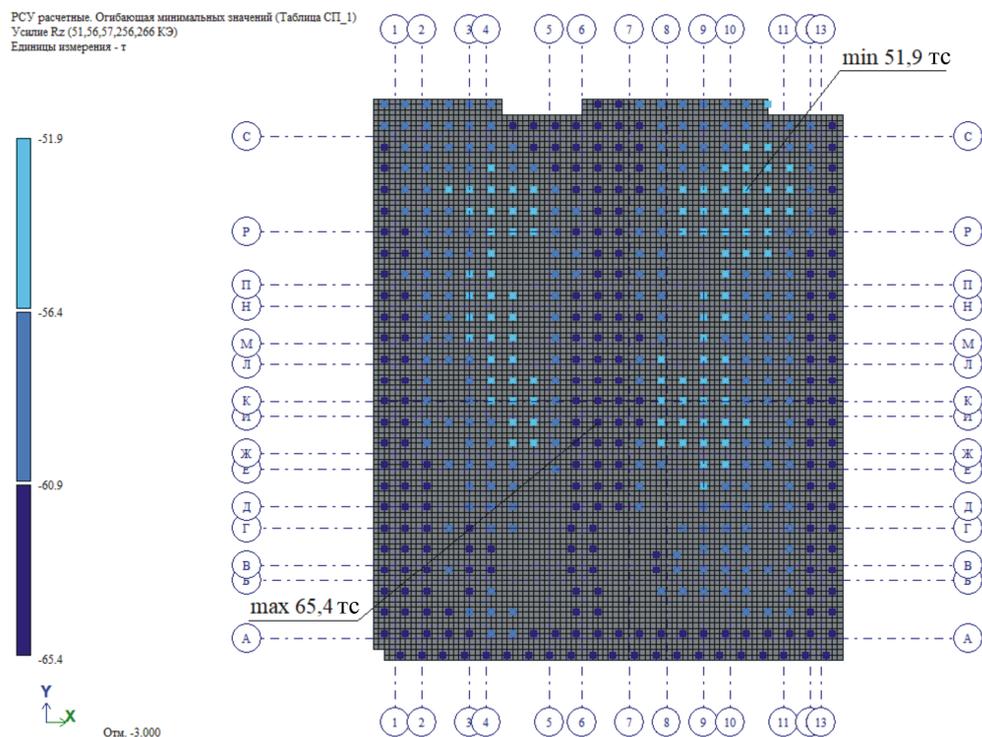


Рис. 5. Мозаика усилий в сваях после оптимизации  
 Fig. 5. Mosaic of forces in piles after optimization

Посредством оптимизации данного свайного поля, за счет изменения шага и расположения свай (рис. 4, 5), удалось в несколько итераций уменьшить количество свай на 64 шт. – с 586 до 522 шт., увеличив при этом нагрузку на наиболее нагруженные сваи всего лишь на 0,3 % и не превысив допустимую нагрузку на сваю, а на наиболее ненагруженные сваи нагрузка увеличилась на 14,7 %, в среднем же нагрузка на все сваи увеличилась на 9,7 % и составляет 90,1 % от максимальной несущей способности одиночной сваи вместо 79,8 % в исходной схеме. Данные по оптимизации свайного поля представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение показателей свайного поля исходной схемы и схемы после оптимизации

Table 1

Comparison of the rates of the pile field of the original scheme and the scheme after optimization

Вид нагрузки	Исходная схема		После оптимизации	
	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$
Суммарная нагрузка на сваи	31079,0	–	31064,1	–
Средняя нагрузка на сваю	53,0	79,8	59,9	90,1
Максимальная нагрузка на сваю	65,2	98,0	65,4	98,3
Минимальная нагрузка на сваю	42,1	63,3	51,9	78,0

Рассмотрим еще один вариант оптимизации свайного поля, а именно уменьшение несущей способности недогруженных свай за счет уменьшения их длины. Вслед за уменьшением несущей способности посредством уменьшения длины свай изменится и их расчетная осадка, а значит и жесткость этих свай, что также следует отразить в расчетной схеме.

Существуют разные методы расчета и проектирования свайных фундаментов со сваями различной длины [16]. Для расчета используется метод полных решений теории упругости, рассматривающий все сваи в группе с численным решением по МКЭ [17].

Подбирать длину свай будем с шагом 1 м. В результате расчета получили несущую способность: сваи длиной 11 м – 59,4 т; сваи длиной 10 м – 53,3 т; сваи длиной 9 м – 47,6 т. Мозаика усилий в сваях до оптимизации с учетом несущей способности свай различной длины представлена на рис. 6.

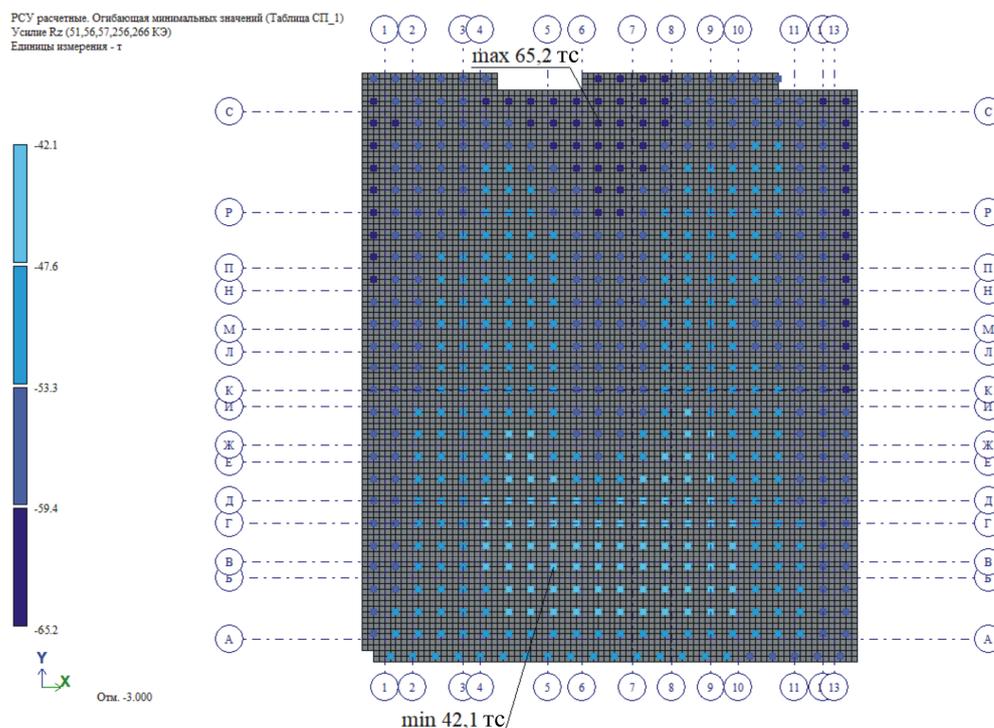


Рис. 6. Мозаика усилий в сваях до оптимизации  
Fig. 6. Mosaic of forces in piles before optimization

В результате оптимизации свайного поля за счет изменения длины свай в несколько итераций удалось распределить сетку свай по длине в зависимости от нагрузки на каждую конкретную сваю, учитывая при этом изменение их жесткости. Интересно, что в работе [18] описано применение фундамента со сваями различной длины, но характер их расположения отличается от нашего варианта тем, что более длинные сваи расположены в середине здания, в то время как у нас более длинные сваи расположены преимущественно по контуру здания, связано это с разной высотностью зданий и большими горизонтальными нагрузками на него. Результат оптимизации представлен на рис. 7, где синим цветом показаны сваи длиной 12 м, красным – сваи длиной 11 м, коричневым – длиной 10 м и зеленым – 9 м. Мозаика усилий в сваях после оптимизации представлена на рис. 8.

В итоге после оптимизации свайного поля за счет изменения длины свай получили результаты, представленные в табл. 2. Средняя нагрузка на сваю увеличилась по сравнению с исходной схемой на 0,2 % и составила 53,1 т. Казалось бы, прирост совсем незначительный, но это в абсолютных величинах, а вот относительно общей несущей способности свай разница составляет 13,1 %, что уже достаточно весомо. При этом минимальная нагрузка на сваю в абсолютных величинах даже снизилась с 42,1 до 41,7 т, но в относительных величинах, наоборот, выросла на 21,9 %. В свою очередь, максимальная нагрузка на

сваю увеличилась как в абсолютных единицах, так и в относительных с 65,2 до 66,4 т, но при этом не превышает несущую способность сваи. Также стоит подчеркнуть, что материалоёмкость свайного поля снизилась на 909 м длины свай, что эквивалентно 75 сваям длиной 12 м.

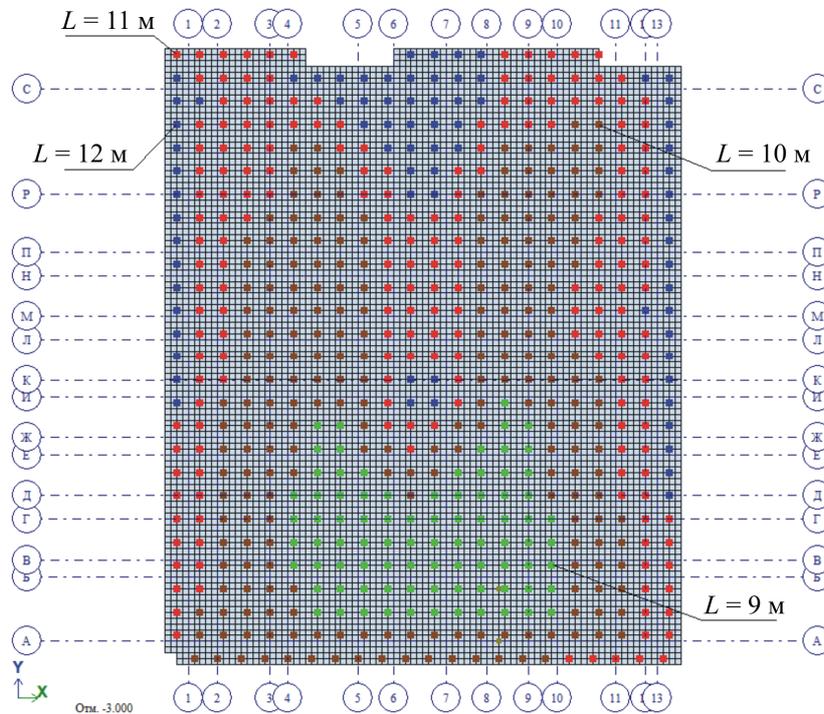


Рис. 7. Схема расположения свай различной длины после оптимизации  
 Fig. 7. Scheme of piles of various lengths after optimization

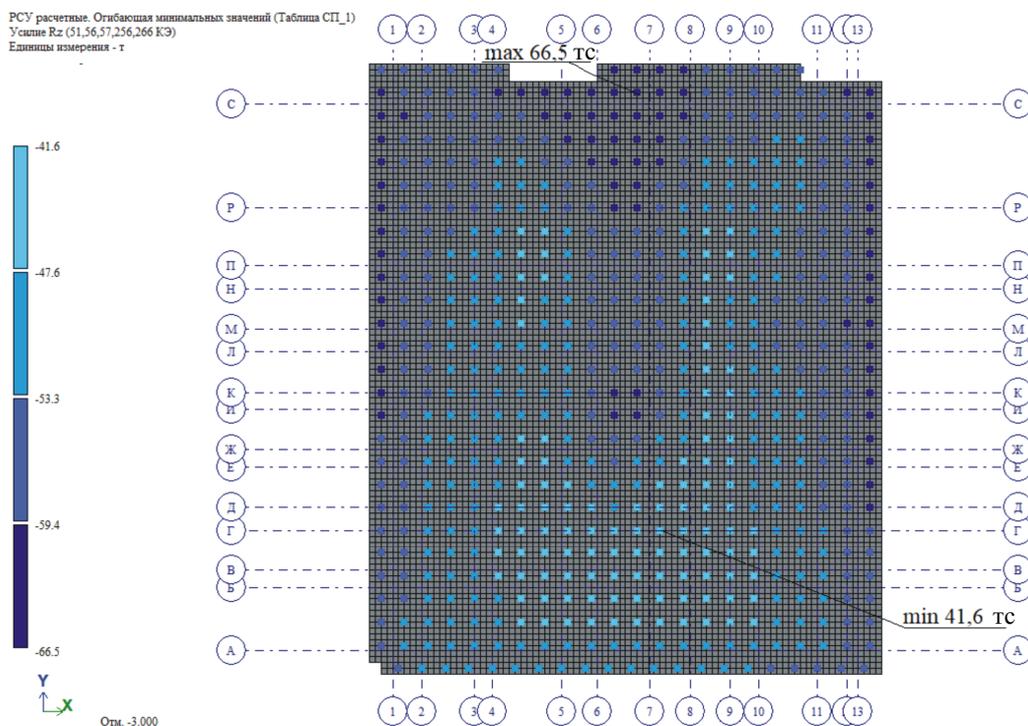


Рис. 8. Мозаика усилий в сваях после оптимизации  
 Fig. 8. Mosaic of forces in piles after optimization

Таблица 2

Сравнение показателей свайного поля исходной схемы и схемы  
 после оптимизации за счет изменения длины свай

Table 2

Comparison of the rates of the pile field of the original scheme and the scheme after optimization  
 by changing the length of the piles

Вид нагрузки	Исходная схема		После оптимизации за счет изменения длины свай									
			L = 12 м		L = 11 м		L = 10 м		L = 9 м		итого	
	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$
Суммарная нагрузка на сваи	31079	–	4761	–	10344	–	11425	–	3571	–	31139	–
Средняя нагрузка на сваю	53,0	79,8	63,5	95,5	50,2	94,2	49,9	93,6	42,0	88,2	53,1	92,9
Максимальная нагрузка на сваю	65,2	98,0	66,4	99,8	59,3	99,8	53,0	99,4	45,4	95,4	66,4	99,8
Минимальная нагрузка на сваю	42,1	63,3	60,5	91,0	47,5	89,1	45,4	85,2	41,7	87,6	41,7	85,2

Таблица 3

Сравнение методов оптимизации свайного поля

Table 3

Comparison of pile field optimization methods

Вид нагрузки	Исходная схема		После оптимизации за счет изменения шага и расположения свай		После оптимизации за счет изменения длины свай	
	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$	$R_z$ , т	% от $F_d$
Суммарная нагрузка на сваи	31079	–	31064	–	31139	–
Средняя нагрузка на сваю	53,0	79,8	59,9	90,1	53,1	92,9
Максимальная нагрузка на сваю	65,2	98,0	65,4	98,3	66,4	99,8
Минимальная нагрузка на сваю	42,1	63,3	51,9	78,0	41,7	85,2

Финалом данной работы можно считать сравнение двух методов оптимизации свайного поля по показателю максимального использования несущей способности свай, рассмотренном в [19, 20], представленное в табл. 3. В данном случае абсолютное значение средней и минимальной нагрузки на сваи выше при использовании метода оптимизации посредством изменения шага и количества свай, но относительные значения выше у метода с изменением длины свай. Т.е. эффективность использования несущей способности свай по пункту 8.7 СП 24 выше при применении второго способа оптимизации. Также, если рассматривать экономическую эффективность по материалоемкости, видно, что при применении первого метода удалось снизить количество свай на 64 шт., что значительно по срав-

нению с исходной схемой, но при применении второго метода количество свай осталось прежним, а вот общая длина уменьшилась на 909 погонных метров, что эквивалентно 75 сваям длиной 12 м. Таким образом, и экономическая эффективность выше при применении второго способа оптимизации свайного поля.

## Заключение

В конечном итоге в данной работе были рассмотрены два метода оптимизации свайного поля при проектировании многоэтажных зданий: метод изменения расположения и количества свай и метод изменения длины свай без изменения их количества. В обоих случаях оптимизация значительно повышает долю использования несущей способности свай, а также экономическую эффективность свайного фундамента. Стоит отметить и тот факт, что при большей длине свай в исходном проекте экономическая эффективность оптимизации свайного поля может оказаться сильно выше, чем в представленном примере. Дальнейшее развитие данной тематики предполагает изучение взаимовлияния свай различной длины в составе группы свай [21, 22], применение вертикальной опрессовки для увеличения несущей способности перегруженных свай [23], а также натурные испытания, наблюдения за реальными объектами и разработка конкретной методики оптимизации свайного поля для практического использования в проектировании [24]. Также следует рассмотреть влияние жесткости фундамента на жесткость надземной части здания.

*Финансирование.* Исследование не имело спонсорской поддержки.

*Конфликт интересов.* Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Вклад авторов.* Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. Сорочан Е.А. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. – 479 с.
2. Шулятьев О.А. Основные принципы расчета и конструирования плитных и свайных фундаментов высотных зданий: дис. ... д-ра техн. наук, 2019. – 352 с.
3. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / Р.А. Мангушев, В.В. Знаменский, А.Л. Готман, А.Б. Пономарев. – 2-е изд. – М.: АСВ, 2018. – 320 с.
4. Sobolev E.S., Berezin E.K., Kechina T.V. Comparative analysis of the dynamic stability of a multistorey building with different base arrangements // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1928. Deep Foundations and geotechnical problems of territories (DFGC 2021) 26–28 May 2021, Perm, Russian Federation. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012018
5. Ke Chen. On the Influence of Pile Foundation Settlement of Existing High-Rise Buildings on the Surrounding Buildings // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Article ID 5560112. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5560112>
6. Heinrich M., Beutler S. Foundations of High Rise Buildings around the World Best Practice and New Developments. – Moscow, 25.05.2015. – 43 p.
7. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ермошина Л.Ю. Осадка и длительная несущая способность свай с учетом реологических свойств грунтов // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.01

8. Сычкина Е.Н., Офрихтер Я.В., Антипов В.В. Прогноз длительной осадки свай на песчаниках и аргиллитоподобных глинах пермского возраста // *Construction and Geotechnics*. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 5–13. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.01
9. Нуждин Л.В., Михайлов В.С. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе Scad Office // *Construction and Geotechnics*. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01
10. Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Лузин И.Н. Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения // *Construction and Geotechnics*. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 96–103. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.09
11. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Genetically nonlinear combined model of pile field under dynamic impacts // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1928. Deep Foundations and geotechnical problems of territories (DFGC 2021) 26–28 May 2021, Perm, Russian Federation. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012018
12. Шулятьев О.А., Харичкин А.И. Распределение усилий в сваях в зависимости от их расположения и прочности грунта // *Сб. науч. тр. НИИОСП им. Н.М. Герсевича*. – 2011. – № 100. – С. 408–413.
13. Скибин Г.М., Чутченко С.Г. Оценка эффективности параметров свайных фундаментов на стадии проектирования // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: междунар. науч.-практ. конф.* – Новочеркасск, 2022. – С. 224–228.
14. Малышкин А.П., Есипов А.В. Численные исследования распределения нагрузки между сваями в кустах // *Construction and Geotechnics*. – 2016. – Т. 7, № 4. – С. 31–38. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.03
15. Применение метода конечных элементов в геотехнических расчетах по первому предельному состоянию / В.Г. Федоровский, Г.А. Бобырь, И.А. Боков, С.В. Ильин // *Вестник НИЦ Строительство*. – 2019. – Т. 20, № 1.
16. Боков И.А. Расчет осадок свайных фундаментов со сваями различной длины: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2020. – 148 с.
17. Bull J.W. Numerical analysis and modelling in geomechanics. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 397 с.
18. Tan Y.C., Chow C.M., Gue S.S. Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay // *Proceedings of the sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – Burke: IOS Press, Incorporated, 2005. – P. 2045–2049.
19. Шакиров М.И. Особенности изменения напряженно-деформируемого состояния глинистых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2022. – 146 с.
20. Шакиров М.И. Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении // *Известия Казан. гос. архитектур.-строит. ун-та*. – 2022. – № 1 (№ 59). – С. 19–28.
21. Боков И.А., Федоровский В.Г. Взаимовлияние свай через грунт: сравнение аналитических и численных оценок // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2016. – № 10. – С. 19–23.
22. Готман Н.З., Алехин В.С., Сергеев Ф.В. Определение предельного сопротивления основания свай в составе группы свай // *Construction and Geotechnics*. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 13–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02
23. Влияние вертикальной опрессовки грунта однослойного и двухслойного оснований на несущую способность свай / М.А. Степанов, К.Р. Джабраилова, Г.И. Рыбак,

М.А. Степанов // *Construction and Geotechnics*. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 5–16. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01

24. Xiaofeng Liu, Gengdong Cheng, Bo Wang and Shuzhi Lin. Optimum Design of Pile Foundation by Automatic Grouping Genetic Algorithms // *International Scholarly Research Notices*. – Vol. 2012. – Article ID 678329. DOI: 10.5402/2012/678329

## References

1. Sorochan E.A. *Osnovaniia, fundamenti i podzemnye sooruzheniia* [The based, foundations and underground structures]. Moscow, Stroizdat, 1985, 479 p.

2. Shuliat'ev O.A. *Osnovnye printsipy rascheta i konstruirovaniia plitnykh i svaiynykh fundamentov vysotnykh zdaniĭ* [Basic principles of calculation and design of slab and pile foundations for high-rise buildings]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 2019, 352 p.

3. Mangushev R.A., Znamenskij V.V., Gotman A.L., Ponomarev A.B. *Svai i svajnye fundamenti. Konstrukcii, proektirovanie i tekhnologii* [Piles and pile foundations. Constructions, design and technology]. 2nd ed. Moscow, ASV, 2018, 320 p.

4. Sobolev E.S., Berezin E.K., Kechina T.V. Comparative analysis of the dynamic stability of a multistorey building with different base arrangements. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1928, pp. 012018. DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012018/

5. Ke Chen. On the influence of pile foundation settlement of existing high-rise buildings on the surrounding buildings. *Advances in Civil Engineering*, 2021, vol. 2021, p. 8. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5560112>

6. Heinrich M., Beutler S. Foundations of high rise buildings around the world best practice and new developments. Moscow, 43 p.

7. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Y. Settlement and long-term bearing capacity of the pile taking into account the rheological properties of soils. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.01.

8. Sychkina E.N., Ofrikhter I.V., Antipovov V.V. The forecast of long-term settlement of the pile on sandstones and claystones of the permian age. *Construction and Geotechnics*, 2019, vol. 10, iss. 2, pp. 5-13. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.01.

9. Nuzhdin L.V., Mikhaylov V.S. Numerical modeling of pile foundations using scad office structural analysis software. *Construction and Geotechnics*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01/

10. Ter-Martirosian A.Z., Ter-Martirosian Z.G., Luzin I.N. Stress-strain condition of base of deep foundations. *Construction and Geotechnics*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 96-103. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.09

11. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Genetically nonlinear combined model of pile field under dynamic impacts. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, p. 012018. DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012018.

12. Shuliat'ev O.A., Kharichkin A.I. *Raspredelenie usiliĭ v svaiakh v zavisimosti ot ikh raspolozheniia i prochnosti grunta* [Distribution of forces in piles depending on their location and soil strength]. *Sb. nauchn. tr. NIIOSP im. N.M. Gersevanova*, 2011, no. 100, pp. 408–413.

13. Skibin G.M., Chutchenko S.G. Evaluation of the effectiveness of the parameters of pile foundations at the design stage. *Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia «Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii»*. Novocherkassk, 2022, pp. 224-228.

14. Malyshevskii A.P., Esipov A.V. Numerical study load distribution between piles in groups. *Construction and Geotechnics*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 31-38. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.03/
15. Fedorovskii V.G., Bobyr G.A., I.A. Bokov, Il'in S.V. Application of finite element method to the geotechnical ULS analysis. *Vestnik NIITS Stroitel'stvo*, 2019, vol. 20, no. 1.
16. Bokov I.A. Raschet osadok svainykh fundamentov so svaiami razlichnoi dliny [Calculation of the settlement of pile foundations with piles of various lengths]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow, 2020, 148 p.
17. Bull J.W. Numerical analysis and modelling in geomechanics. Boca Raton, CRC Press, 2014, 397 p.
18. Tan Y.C., Chow C.M., Gue S.S. Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay. *Proceedings of the sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Burke, IOS Press, Incorporated, 2005, pp.2045– 2049.
19. Shakirov M.I. Osobennosti izmeneniia napriazhenno-deformiruemogo sostoianiia glinistykh osnovanii plitno-svainykh fundamentov pri tsiklicheskom nagruzhении [Features of the change in the stress-strain state of clay foundations of slab-pile foundations under cyclic loading]. Abstract of Ph.D. thesis. Kazan, 2020, 145 p.
20. Shakirov M.I. Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading. *Izvestiia KGASU*, 2022, no. 1 (№ 59), pp.19-28.
21. Bokov I.A., Fedorovskii V.G. Vzaimovliianie svaĩ cherez grunt: sravnenie analiticheskikh i chislennykh otsenok [Mutual influence of piles through the soil: comparison of analytical and numerical estimates]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2016, no. 10, pp.19–23.
22. Gotman N.Z., Alekhin V.S., Sergeev F.V. Determination of bearing capacity of piles in the group. *Construction and Geotechnics*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 13-21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02/
23. Stepanov M.A., Dzhabrailova K.R., Rybak G.I., Stepanov M.A. The influence of single-layer and double-layer bases vertical soil pressing on the bearing capacity of piles. *Construction and Geotechnics*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 5-16. doi: 10.15593/2224-9826/2019.1.01.
24. Xiaofeng Liu, Gengdong Cheng, Bo Wang and Shuzhi Lin. Optimum design of pile foundation by automatic grouping genetic algorithms. *International Scholarly Research Notices*, vol. 2012. DOI: 10.5402/2012/678329.