

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-55-64

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ КОМБИНИРОВАННОГО ФУНДАМЕНТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НДС ЕГО ОСНОВАНИЯ

**В. В. Сидоров, А.З. Тер-Мартirosян**

Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Объектом исследования является основание, взаимодействующее с комбинированным плитно-свайным фундаментом. Процесс выбора параметров свайно-плитного фундамента в настоящее время является во многом эвристичным и зависит от того, на каком из полученных вариантов (концепций) остановится проектировщик. Требования нормативных документов оставляют большой простор для принятия решений, а вопрос поиска оптимизированного варианта нередко не рассматривается. В это же время сама проблема оптимизации комбинированного фундамента при изменении различных его параметров является актуальной научно-практической задачей, исследуемой как отечественными, так и зарубежными учёными.

Целью представленного исследования является проиллюстрировать возможность оптимизации свайно-плитного фундамента по предлагаемой методике численными методами, опираясь на желаемые показатели НДС проекта.

Для исследования принята схема реально существующего каркаса высотного здания с нагрузками на него, а также данными инженерно-геологических изысканий. В статье показывается методика и процесс управления НДС основания с помощью изменения расстояния свай, которые играют роль элементов, локально снижающих осадку.

Основными результатами исследования на представляемом этапе являются методика проведения дополнительных расчётов ячеек по интересующим зонам, а также проведения поверочных расчётов в пространственной постановке. С некоторой достаточной точностью показаны положительные результаты предлагаемого алгоритма, вместе с этим выделены недостатки и предполагаемые дальнейшие шаги по совершенствованию предлагаемых шагов.

**Ключевые слова:** свайно-плитный фундамент, комбинированный фундамент, оптимизация, расстановка свай, жесткость, осадка, расчётная ячейка

## OPTIMIZATION XPERIENCE OF USING NUMERICAL CALCULATIONS OF A COMBINED FOUNDATION TO MANAGE THE STRESS-STRAIN STATE OF ITS BASE

**V. V. Sidorov, A. Z. Ter-Martirosyan**

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russia

**Annotation.** The object of this study is a foundation interacting with a combined pile-raft foundation. The process of selecting pile-raft foundation parameters is currently largely heuristic and depends on which of the resulting options (concepts) the designer selects. Regulatory requirements leave considerable latitude for decision-making, and the search for an optimized option is often overlooked. At the same time, the problem of optimizing a combined foundation by varying its various parameters is a pressing scientific and practical challenge, studied by both domestic and international researchers.

*The objective of this study is to illustrate the feasibility of optimizing a pile-slab foundation using the proposed methodology using numerical methods, based on the desired stress-strain state indicators of the design.*

*The study utilizes a diagram of an actual high-rise building frame with loads applied to it, as well as engineering and geological survey data. This article presents a methodology and process for managing the foundation stress-strain state by varying the arrangement of piles, which act as localized settlement-reducing elements. The main results of the study at this stage are a methodology for conducting additional cell calculations for the zones of interest, as well as for performing verification calculations in a spatial setting. The positive results of the proposed algorithm are demonstrated with reasonable accuracy, while its shortcomings and proposed further steps for improving these proposed steps are also highlighted.*

**Keywords:** *piled-raft foundation, combined foundation, optimization, pile arrangement, stiffness, settlement, design cell*

## **Введение**

Ввиду постоянного роста нагрузок от современных зданий и сооружений, передаваемых на грунтовое основание, остаётся практически одна общая концепция их восприятия и распределения – посредством фундаментов со сваями (традиционно свайный или комбинированный варианты). При этом, очевидно, для каждого расчётного случая можно подобрать несколько альтернативных вариантов решения таких фундаментов, варьируя различными параметрами, такими как шаг (или картина расстановки свай в целом), длина, форма в плане. Причём долгое время основной концепцией решения для фундаментов была равномерная схема распределения свай, использование одинаковой длины. Это делалось для простоты реализации решений на площадке и унификации устраиваемых элементов в составе проекта. Однако особенности распределения напряжений в основании при взаимодействии с фундаментами различной жесткости показывают, что в общем случае оно не равномерно (например, реализация «седлообразных» эпюр и с максимумом в центре при прикладываемой равномерной нагрузке). Таким же образом практически всегда наиболее равномерное распределение свай в пределах фундамента не приводит к равномерности в реализуемых осадках. Задача оптимизации параметров комбинированного фундамента заключается в том, чтобы тем или иным методом отыскать наиболее экономически эффективное решение, которое бы отвечало запросу проектировщиков в соответствии с нормативными или другими технологическими ограничениями результирующих компонент НДС.

При этом любой вариант неравномерного решения фундаментов в общем случае приводит к усложнению проекта, так как сваи имеют непостоянный шаг, различную длину и даже поперечные сечения. В результате такие варианты сложнее обосновать традиционными способами, даже могут потребоваться дополнительные научные и практические исследования.

Результаты данной статьи иллюстрируют возможности определения параметров комбинированного свайно-плитного фундамента с неравномерным распределением свай численным методом в плоской и пространственной постановках.

## **Основная часть**

### **1. Предпосылки**

Проблемы оптимизации фундаментов со сваями декларируются некоторыми отечественными и зарубежными нормативными документами. Так в СП 24.13330.2021 рекомендуется производить технико-экономическое сравнение проектных решений с использованием различного типа и длины свай, ориентируясь на критерии конструктивной и экономической эффективности. Определяется порядок выбора числа свай в фундаменте и их размеров из условия максимального использования прочности материала свай и грунтов основания при расчётной нагрузке, допускаемой на сваю, с учётом допустимых перегрузок крайних свай в фундаменте. При размещении свай в плане устанавливается стремиться к минимальному числу их в свайных кустах или к максимально возможному шагу свай в лентах, добиваясь наибольшего использования принятой в проекте несущей способности свай.

СП 267.1325800.2016 предлагает весьма широкую рекомендацию о необходимости размещения свай под нагрузкой, а также об учёте перегрузки крайних и угловых свай относительно центральных. При этом говорится о пути снижения такой неравномерности путём укорочения крайних и угловых свай, уменьшения их диаметра, либо снижения сопротивления по боковой поверхности.

Также некоторые достаточно очевидные, но оставляющие широкие возможности для альтернативных решений, рекомендации приводятся в зарубежных EN 1997-1 (Eurocode 7) и ЕМ 1110-2-2006, однако и они не содержат последовательных и конкретных рекомендаций ни о способах выбора наиболее эффективных решений плитно-свайных фундаментов, ни об общепризнанных и нормируемых методах проведения параметрических расчётов для наиболее экономически выгодного фундамента.

В своих исследованиях Г. М. Скибин с соавторами [1–2] сделали заключения о том, что есть необходимость назначать параметры свайно-плитного фундамента из условия максимального использования прочности материала свай и грунтов, в том числе с учётом перегрузок крайних свай в фундаменте. Также авторы утверждают, что при накладываемых ограничениях при проектировании (на минимальный шаг свай и максимально допустимое воспринимаемое усилие), теоретически существует оптимальный вариант расположения свай (когда их количество минимально), но в этом случае расстояния между сваями будут переменными.

В последнее время также постоянно выходит множество работ, посвящённых тем или иным приёмам оптимизации комбинированных фундаментов. Среди них можно отметить работу С. Changfu с соавторами [3], основанную на экономических индикаторах, численные приёмы в работах А. Ferchat с соавторами [4] и В. Asefa [5] с большим числом рассматриваемых конфигураций реализации свай и рассматриваемых параметров, влияющих на конечный результат проектирования. Подход Е.Л. Suresh Babu с соавторами [6] заключался в том, что сначала численную модель верифицировали по известному экспериментальному исследованию, убедившись в схожести кривых «нагрузка-осадка», а затем проводили анализ изменения параметров: относительной длины свай (отношение длины элемента к его диаметру,  $l/d$ ), жесткости ростверка (при изменении его толщины), способа распределения свай.

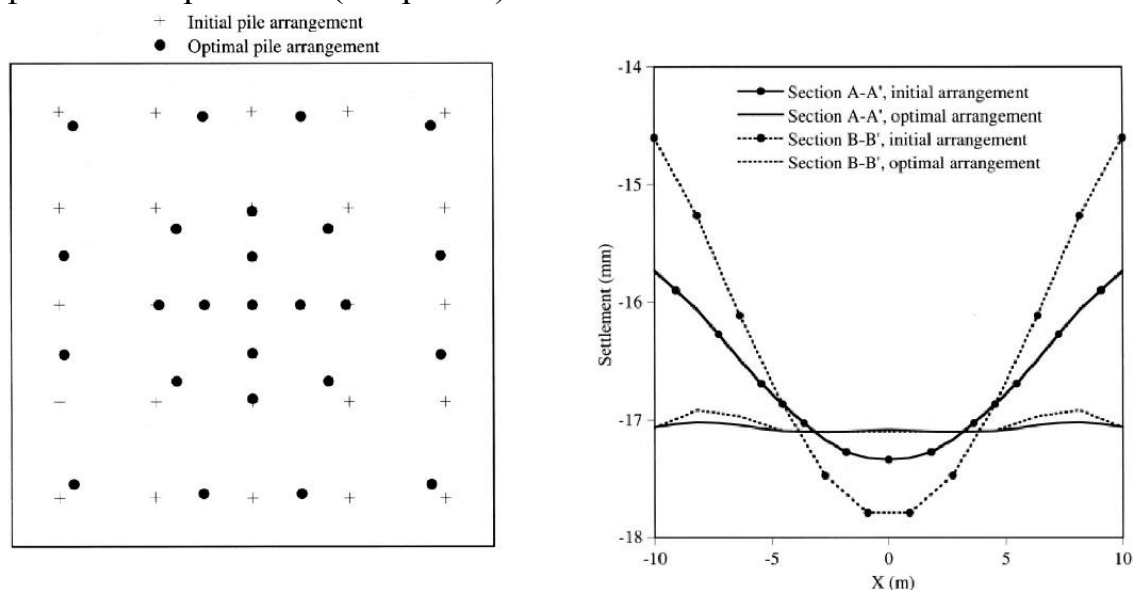
Базовые же зависимости для рассмотрения свайно-плитных фундаментов появлялись достаточно давно. Среди них труды К. Horikoshi и Randolph [7], Н. G. Poulos [8], где представлены основные формулы для представления жесткости элементов фундамента, различных коэффициентов взаимодействия между ними в системе, а также основных алгоритмов расчёта и рассматриваемых при проектировании параметров фундамента и результирующих величин (толщины ростверка, длины свай, жесткости материалов, внутренних усилий, осадок и их разностей). За этими работами следуют различные труды по непосредственно оптимизации, среди которых необходимо отметить Y. F. Leung с соавторами [9] К. Nakanishi с соавторами [10] и М. Rabiei с соавторами [11].

## **2. Поиск оптимальной расстановки свай**

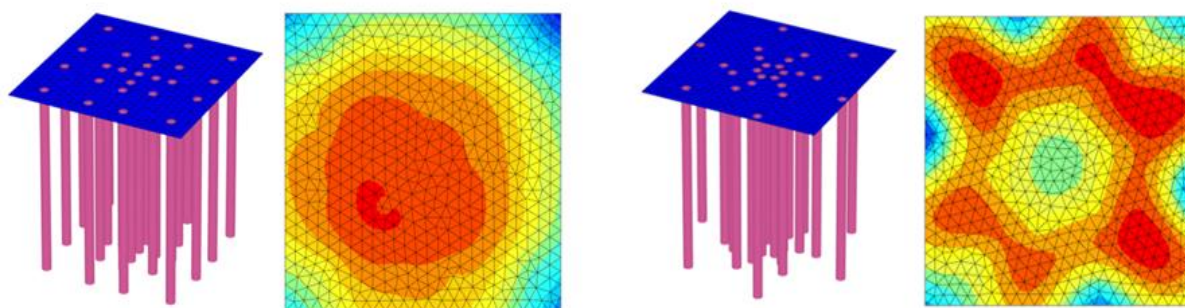
Однако при относительном достатке работ всех типов, достаточно мало внимания уделяется фактору расстановки свай, в то время как более охотно пользуются возможностями варьирования длины элементов. С точки зрения поиска картины расстановки показательной работой можно назвать исследование К. N. Kim [12] с соавторами, которые создали оптимизационный алгоритм и показали его работу на примере квадратной по-разному нагруженной плиты, поддерживаемой сваями. Авторы принимали в качестве целевой функции для оптимизации относительную разность осадок фундамента (через вектор прогиба плиты), которая зависит от расположения свай.

Как видно по результатам предложенной авторами оптимизации, даже равномерное распределение нагрузки по квадратному в плане фундаменту тяготеет к радиальному распределению в расположении свай со сгущением в центральной части и разрежением по периферии. Однако, несмотря на разработанный математический алгоритм, решение имеет ряд существенных ограничений, таких как однородность грунтовых условий и упругое поведе-

ние основания. Впрочем, это же решение можно проверить с помощью современного численного подхода и, как оказалось, даже предложить более эффективные решения (см. рис. 2).



**Рис. 1. Пример оптимизации по алгоритму К. N. Kim [12]:**  
слева обозначено крестами исходное расположение свай; кругами – оптимальное распределение; справа – кривые осадки фундамента вдоль его стороны (исходный и оптимизированный варианты)



**Рис. 2. Результаты численного расчёта по решению К. N. Kim [12]**  
(слева, изменение осадок от 9,7 до 12 мм) и результаты альтернативного радиального распределения (справа, изменение осадок от 11,9 до 12,9 мм)

Перейдём к более практическому примеру фундамента реального здания с известным распределением нагрузки на него, а также спроектированным каркасом подземной части, влияющим на распределение осадки за счёт жесткости.

В данной статье предлагается следующий алгоритм действий по управлению НДС основания под заданными нагрузками с помощью свай.

1. На первом этапе производится расчёт в пространственной постановке здания на плитном фундаменте. На этом этапе, скорее всего, будет получена нежелательная картина осадок и величины относительных разностей осадок.

2. Строится зонированная схема, где для каждого выделенного участка может быть определен процент необходимого повышения жесткости. Этот процент находится отношением полученной средней осадки на плите в зоне к желаемой осадке (может быть нормативной для рассматриваемого типа здания, либо иной, например, заданной по технологическим или эксплуатационным соображениям).

3. Для каждой зоны решается расчётная ячейка в осесимметричной постановке, где сравнивается осадка на плите и на свае. Задаваемая нагрузка может быть принята в виде среднего давления под подошвой фундамента. По сути, тут важен именно вклад сваи в увеличение жесткости в рассматриваемой зоне. Выполняется подбор шага свай в расчётной ячейке вплоть до получения требуемой величины (см. п. 2).

4. По полученным величинам шагов расчётных ячеек, производится расстановка свай на схеме.

5. Производится поверочный трёхмерный расчёт, анализируются изополя осадок (удалось ли добиться желаемой осадки по всей плите).

Рассмотрим конкретный пример следования такому алгоритму.

Шаг 1. Результаты расчёта здания на плите показали достаточно большие и неравномерные осадки от 21,3 до 26,7 см с неравномерностью по диагонали плиты.

Шаг 2. Полученные изополя были разделены на 11 зон (см. рис. 3).

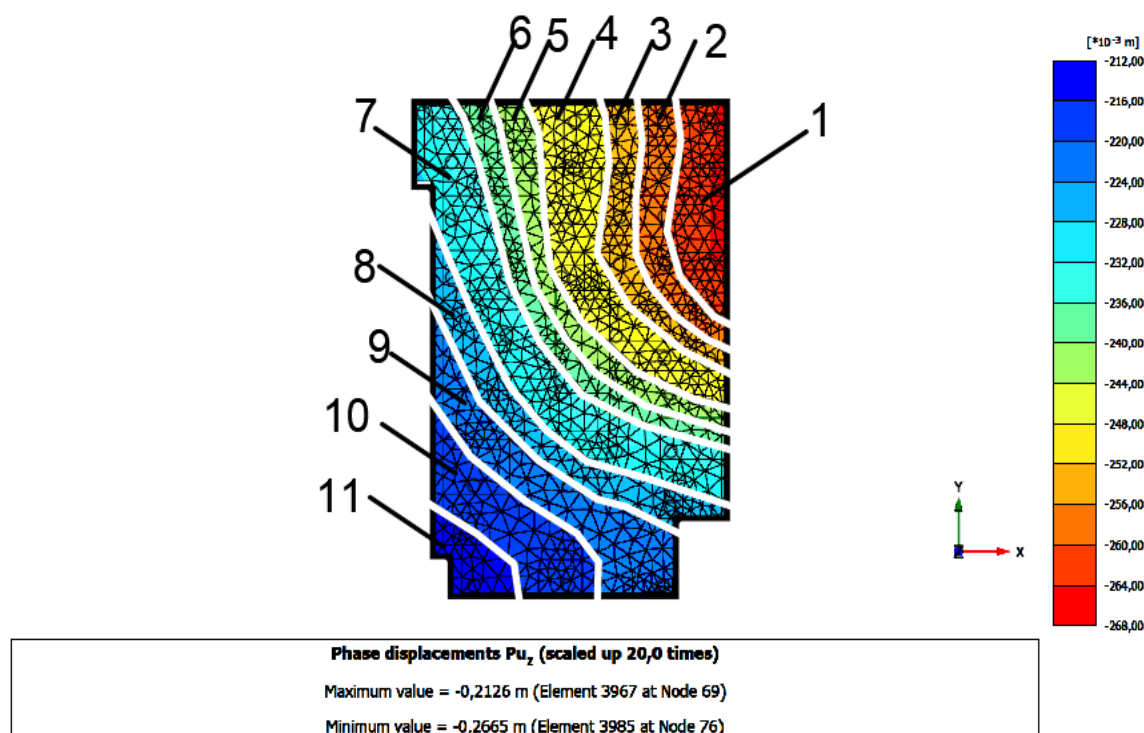


Рис. 3. Вид результирующих изополей осадки и разбиения зон корректировки

Шаг 3. Выполним моделирование расчётной ячейки для каждой рассматриваемой зоны, подберём шаг свай в соответствии с требуемым процентом повышения жесткости основания.

Приведём пример анализа для первых зон.

Зона 1. Требуемое соотношение осадок ячейки ( $S_1/S_2$ ) с плитой без свай  $S_2$  и свайным вариантом  $S_1$  составляет при шаге свай 3,8 м – 46,7 % (при требуемых 46,7 %, желаемая осадка 18 см).

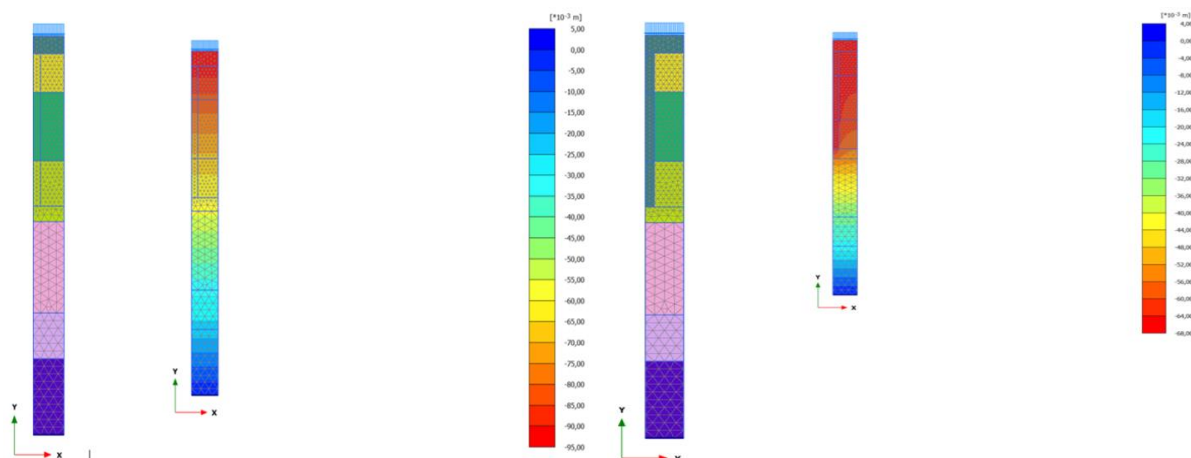
Зона 2. Требуемое соотношение осадок ячейки ( $S_1/S_2$ ) с плитой без свай  $S_2$  и свайным вариантом  $S_1$  составляет при шаге свай 4,2 м – 42,4 %, при шаге свай 4 м – 44,7 %. Останавливаемся на шаге свай  $a_2 = 4,1$  м (требуемое повышение равно 43,3 %).

Зона 3. Требуемое соотношение осадок ячейки ( $S_1/S_2$ ) с плитой без свай  $S_2$  и свайным вариантом  $S_1$  составляет при шаге свай  $a_3 = 4,3$  м 41,4 %, (требуемое повышение равно 41,1 %) (см. рис. 4).

Запишем результаты расчётов ячеек в осесимметричной постановке в виде табл. 1.

**Таблица 1. Расчёт требуемого шага свай расчётных зон, задача 1**

| № зоны | Осадка $S$ ,<br>см | Требуемое повышение жесткости,<br>% | Расчётный шаг свай $a$ ,<br>м |
|--------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1      | 26,4               | 46,7                                | 3,8                           |
| 2      | 25,8               | 43,3                                | 4,1                           |
| 3      | 25,4               | 41,1                                | 4,3                           |
| 4      | 24,8               | 37,8                                | 4,7                           |
| 5      | 24,2               | 34,4                                | 5,2                           |
| 6      | 23,8               | 32,2                                | 5,4                           |
| 7      | 23,4               | 30                                  | 5,7                           |
| 8      | 22,6               | 25,6                                | 6,4                           |
| 9      | 22,2               | 23,3                                | 6,8                           |
| 10     | 21,8               | 21,1                                | 7                             |
| 11     | 21,4               | 18,9                                | 7,5                           |

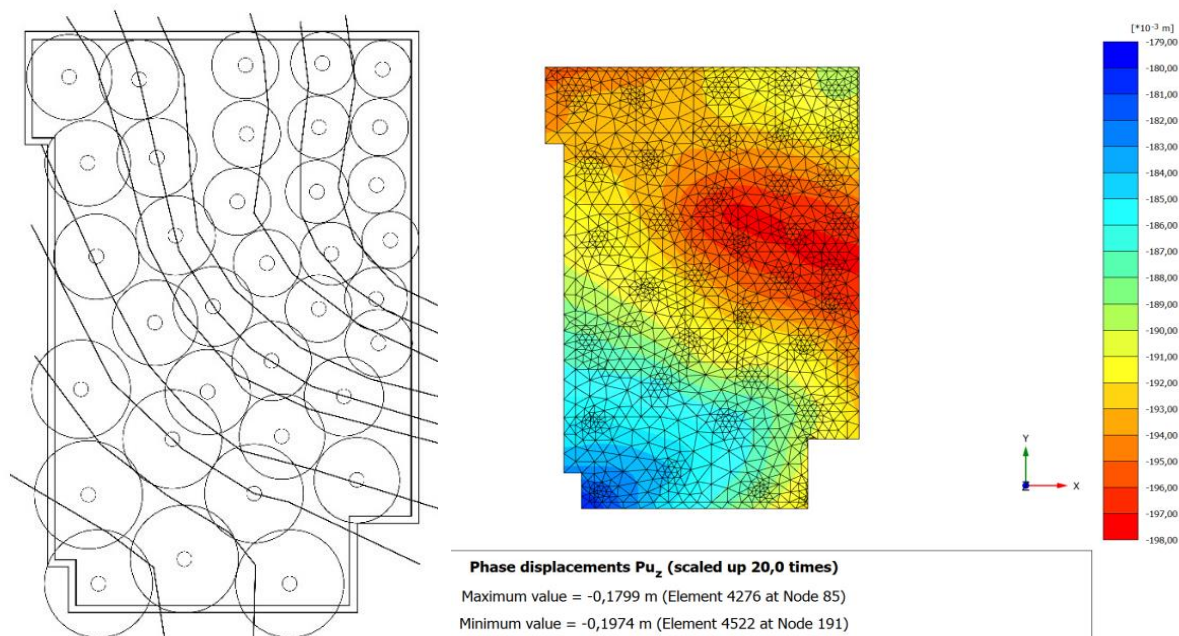


**Рис. 4. Результаты расчёта ячейки с плитой (слева) и со свай (справа) при равных размерах и нагрузке, определение шага аз для зоны № 3**



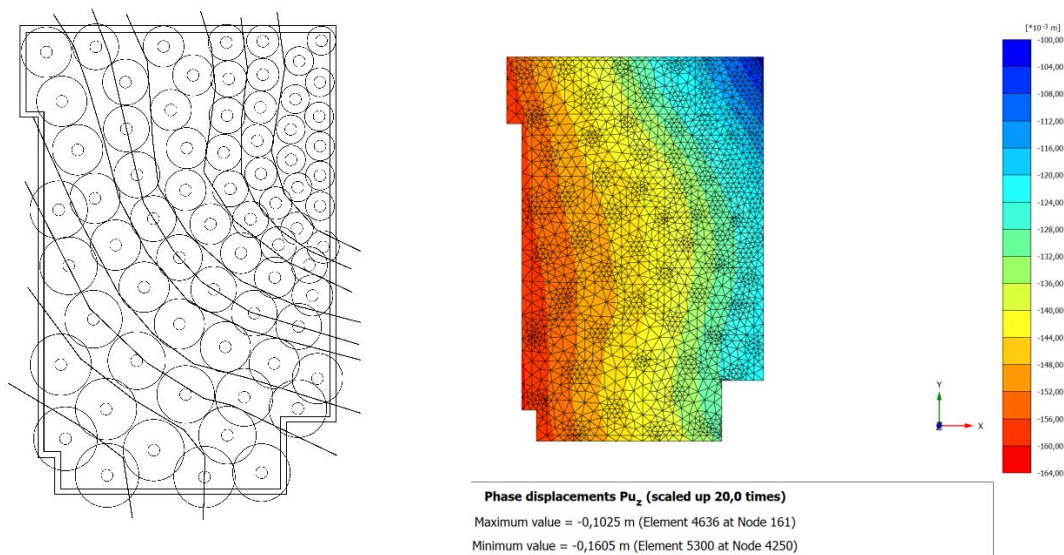
Шаг 4. Выполним расстановку свай по полученным шагам свай для каждой зоны. Результат представлен на рис. 5.

Шаг 5. Выполняем пространственный расчёт по полученному варианту расстановки свай в фундаменте.



**Рис. 5. Результат оптимизированной расстановки свай по задаче 1 с желаемой осадкой 18 см**

Как видно по полученным результатам, неравномерность деформаций по плите стала значительно ниже, чем в плитном варианте, к тому же величины осадок близки к заданной в качестве желаемой (18 см).



**Рис. 6. Результат оптимизированной расстановки свай по задаче 2 с желаемой осадкой 14 см**



Также рассмотрим дополнительно результаты проведенного такого же процесса оптимизации, но для другой желаемой осадке — величиной 14 см. В таком случае требуемые величины повышения жесткости по зонам будут превышать значения, представленные в табл. 1, а расчетный шаг будет снижаться. Например, для зоны 1 требуемый процент увеличения жесткости будет уже 88,6 %, а полученный шаг свай составит  $a_1 = 2,4$  м. Для зоны 5 процент увеличения жесткости будет 72,9 %, а полученный шаг свай составит  $a_5 = 3,7$  м. Для зоны 11 процент увеличения жесткости будет 52,9 %, а полученный шаг свай составит  $a_3 = 5,3$  м. Результаты расстановки и пространственного расчёта представлены на рис. 6.

### Заключение

Полученные результаты говорят о том, что принцип такого подбора даёт приближение к ожидаемым результатам, однако не всегда с одинаковой точностью. Требуется доработка методики расчёта с учётом взаимовлияния расчётных ячеек, а также учёт различной работы свай в центральной и краевой зонах. Очевидно, что сам процесс расчёта ячеек можно выполнять и аналитически, для чего существуют решения, которые можно дорабатывать и адаптировать к экспресс-использованию на практике. В целом предлагаемый алгоритм может быть хотя бы частично автоматизирован, что на практике должно снижать количество проводимых итераций расчётов, проводимых для подбора эффективного или оптимального решения.

### Список источников

1. Дереховский, В. М. Предложения по оптимизации параметров свайного поля многоэтажного жилого дома / В. М. Дереховский, Г. М. Скибин, С. Г. Чутченко // Строительная механика и конструкции. – 2024. – №1 (40). – С. 99-109. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.40.1.009.
2. Скибин, Г. М. Эффективность использования несущей способности свай при формировании свайного поля плитно-свайного фундамента 21-этажного жилого дома / Г. М. Скибин, В. М. Дереховский // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т.14. – № 3. – С. 24-36. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.03.
3. Settlement-based cost optimization of geogrid-reinforced pile-supported foundation / C. Changfu, F. Mao, G. Zhang, J. Huang, J.G. Zornberg, X. Liang, J. Chen // Geosynthetics International. – 2021. – Vol. 28(6). – pp. 1-39 DOI: 10.1680/jgein.21.00002.
4. Ferchat A., Benmebarek S., Houhou M.N. 3D numerical analysis of piled raft interaction in drained soft clay conditions // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14. – issue 394 DOI: 10.1007/s12517-021-06783-3.
5. Asefa B., Assefa E., Pantelidis L., Sachpazis C. Pile configuration optimization on the design of combined piled raft foundations // Modeling Earth Systems and Environment. – 2022. – Vol. 8. – pp. 3461-3472 DOI: 10.1007/s40808-021-01318-x.
6. Suresh Babu E.L., Kumar G.S., Sasmal S.K., Behera R.N. Parametric study for optimum design of combined piled raft foundation (CPRF) // Proc. of the Indian Geotechnical Conference. Lecture Notes in Civil Engineering. – May 9-11. – Trichy, India, 2021. – Vol. 5 – pp. 207-216 DOI: 10.1007/978-981-19-6998-0\_19.

7. Horikoshi K., Randolph M.F. A contribution to optimum design of piled rafts // Géotechnique. – 1998. – Vol. 48, No. 3. – pp. 301-317.
8. Poulos, H.G. Piled raft foundations: design and applications // Géotechnique. – 2001. – Vol. 51, No. 2. – pp. 95-113.
9. Leung Y.F., Klar A., Soga K., Hoult N.A. Superstructure-foundation interaction in multi-objective pile group optimization considering settlement response // Canadian Geotechnical Journal. – 2017. – Vol. 54. – pp. 1408-1420 DOI: 10.1139/cgj-2016-0498.
10. Nakanishi K., Takewaki I. Optimum pile arrangement in piled raft foundation by using simplified settlement analysis and adaptive step-length algorithm // Geomechanics and Engineering. – 2013. – Vol. 5, No. 6. – pp. 519-540 DOI: 10.12989/gae.2013.5.6.519.
11. Rabiei M., Choobbasti A.J. Economic design optimization of piled raft foundations // Innovative Infrastructure Solutions. – 2018. – Vol. 3. –65. DOI 10.1007/s41062-018-0170-3.
12. Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations / K.N. Kim, S.-H. Lee, K.-S. Kim, C.-K. Chung, M.M. Kim, H.S. Lee // Computers and Geotechnics. – 2001. – Vol. 28. – pp. 235-253.

© Сидоров В. В., Тер-Мартirosян А. З., 2026