

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК [624.154:624.131.35]:004.9

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.2

## Оптимизация конструктивных расчетов свайного поля на основе данных статического зондирования

Павел Никитич Недвига, Анна Алексеевна Кукина,  
Максим Александрович Тачков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);  
г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Существующая практика подбора свайного фундамента представляет собой трудоемкий, несвязанный и не стандартизированный процесс. Целью исследования является разработка методики оптимизации конструктивных расчетов на примере свайного поля на основе данных статического зондирования. Для этого необходимо: подготовить алгоритм по обработке данных из инженерно-геологических изысканий; разработать строго детерминированный процесс обоснования лучшего варианта в зависимости от стоимости свайного фундамента; получить наглядное представление данных для возможности проверки выбранного решения.

**Материалы и методы.** С целью оптимизации конструктивных расчетов свайного поля применяется генетический алгоритм, который реализован при помощи плагина Galapagos на основе языка визуального программирования Grasshopper. Для подготовки исходной информации инженерно-геологических изысканий используется язык программирования Python.

**Результаты.** Разработаны увязанные друг с другом алгоритмы обработки данных статического зондирования и предварительной оценки оптимальной конфигурации свайного фундамента на основе его суммарной стоимости по несущей способности грунта основания свай.

**Выводы.** Разработанные алгоритмы могут использоваться для предварительного расчета и быстрой оценки вариантов свайного фундамента. Необходимые исходные сведения могут генерироваться из расчетных программ. В качестве альтернативы можно проводить подбор и оптимизацию непосредственно в коде Python, применяя Grasshopper и Rhino только для извлечения усилий и последующей визуализации результатов. Направления для дальнейших исследований и разработок: учет слоистозалегающих инженерно-геологических элементов (ИГЭ); оценка несущей способности каждого ростверка независимо и согласно залегающим ИГЭ под ним; группировка свай по положению в свайном поле и нагрузкам; учет нелинейности поведения грунтового массива.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оптимизация, генетический алгоритм, автоматизация проектирования, Grasshopper, Galapagos, визуальное программирование, свайный фундамент, оптимизация свай, конструктивный расчет

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Недвига П.Н., Кукина А.А., Тачков М.А. Оптимизация конструктивных расчетов свайного поля на основе данных статического зондирования // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.2

Автор, ответственный за переписку: Максим Александрович Тачков, [politeh\\_maks21992199@mail.ru](mailto:politeh_maks21992199@mail.ru).

## Optimization of pile field structural calculations based on CPT data

Pavel N. Nedviga, Anna A. Kukina, Maksim A. Tachkov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The current practice of pile foundation selection is a time-consuming, incoherent and non-standardized process. The aim of the study is to develop a methodology for optimizing structural calculations on the example of a pile field,

based on cone penetration test data. For this purpose it is necessary: to prepare an algorithm for processing data from engineering-geological surveys; to develop a strictly deterministic process of justification of the best option depending on the cost of the pile foundation; to obtain a visual representation of the data for the possibility of verification of the selected solution.

**Materials and methods.** A genetic algorithm is used to optimize structural calculations of the pile field, which is implemented using the Galapagos plug-in based on the Grasshopper visual programming language. Python programming language is used to prepare initial data of geotechnical engineering surveys.

**Results.** Linked algorithms for cone penetration test data processing and preliminary estimation of the optimal pile foundation configuration based on its total cost, on the bearing capacity of the pile foundation soil were developed.

**Conclusions.** The developed algorithms can be used for preliminary calculation and rapid evaluation of pile foundation options. The required input data can be generated from calculation programmes. Alternatively, selection and optimization can be performed directly in Python code, using Grasshopper and Rhino only for force extraction and subsequent visualization of the results. Areas for further research and development include: consideration of layered geotechnical elements; estimation of the bearing capacity of each foundation footing independently and according to the underlying geotechnical elements; grouping of piles according to their position in the pile field and loads; consideration of the non-linear behaviour of the soil mass.

**KEYWORDS:** optimization, genetic algorithm, design automation, Grasshopper, Galapagos, visual programming, pile foundation, pile optimization, structural design

**FOR CITATION:** Nedviga P.N., Kukina A.A., Tachkov M.A. Optimization of pile field structural calculations based on CPT data. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.2

*Corresponding author:* Maksim A. Tachkov, [politeh\\_maks21992199@mail.ru](mailto:politeh_maks21992199@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование посвящено алгоритмизации конструктивных расчетов на примере проектирования свайного фундамента.

Свайные фундаменты имеют ряд преимуществ: возможность устройства на многих типах грунта, высокий уровень устойчивости и долговечности, быстрые сроки возведения, низкая себестоимость [1]. Выбор наиболее оптимального варианта свайного фундамента здания играет важную роль, так как доля строительства подземной части достигает 15–25 % в общей сметной стоимости объекта [2–4].

На данный момент практика подбора свайного фундамента представляет собой итеративный процесс, при котором рассматриваются и рассчитываются сваи различных сечений для заданных нагрузок на фундамент и определяется наиболее дешевый вариант. При этом отсутствует связность процесса, стандартизация форматов, а поиск оптимального решения выполняется вручную при сравнении нескольких вариантов. Такой подход затрачивает много (до нескольких недель) времени.

Основные недостатки существующего подхода:

1. Нет единой методики, зафиксированной в алгоритме.
2. Выполняется опытным инженером пошагово.
3. Выполняется в различных файлах.
4. Подбор вариантов происходит вручную.
5. Обработка расчетов может происходить до нескольких недель — зависит от масштабов сооружения.
6. Требуется участия нескольких специалистов, в том числе сметчиков.
7. Выбор варианта происходит не по «стоимости», а по различным инженерным метрикам.
8. Как правило, в компании есть собственные калькуляторы для расчета, что обуславливает задачу мониторинга и актуализации этих калькуляторов у каждого отдельного инженера.

9. Результаты расчетов представляются в табличном виде и не наглядны для эксперта.

Среда визуального программирования Grasshopper применяется в проектировании для решения различных задач: создание сложной параметрической геометрии, автоматизация построения трехмерной модели сооружения, работа с чертежами и таблицами, автоматизация расчетов, оптимизация [5].

Распространенной сферой применения Grasshopper является параметрическое моделирование зданий и сооружений. Grasshopper используется для автоматизации проектирования модульных зданий [6], линейных объектов [7]; создания сложных геометрических форм зданий [5], элементов фасада [8]; оценки инсоляционных параметров зданий [9]; автоматизации расчета конструкций с применением метода конечных элементов [10, 11].

Также Grasshopper широко используется для решения оптимизационных задач по: обеспечению энергоэффективности зданий [12–14], компоновке строительной площадки [15], подбору наиболее эффективной конструкции [16, 17]. Решение оптимизационных задач в Grasshopper осуществляется при помощи плагина Galapagos, который применяет генетический алгоритм для поиска целевой функции. Генетический алгоритм позволяет найти достаточно точное решение [18].

В исследованиях, затрагивающих проблемы проектирования свайных фундаментов, проводится сравнение различных типов фундаментов [1], сравнение вариантов технологий устройства свайных фундаментов [19], предлагается более экономичный метод для определения несущей способности сваи, оптимизации ее длины [20], но не предлагается методика подбора, обоснования выбора оптимальной конфигурации для конкретного типа свайного фундамента.

Разработка единой методологии, подхода/процесса и решения по оптимизации проектирования свайного фундамента позволила бы сократить временные

заграта на принятие основных конструкторских решений, а также обосновать выбранное решение, опираясь на конкретные метрики, например стоимость свайного фундамента (как рассмотрено в этой работе), скорость возведения, потребность в человеческих ресурсах. Grasshopper применяется в проектировании для решения различных оптимизационных задач и рассмотрен в данной статье для решения задачи по проектированию свайного фундамента.

Цель исследования — разработка методики оптимизации конструктивных расчетов на примере свайного поля, на основе данных статического зондирования.

Задачи исследования:

1. Подготовка «конвейера» по обработке данных из инженерно-геологических изысканий (ИГИ).
2. Разработка строго детерминированного процесса обоснования и выбора «лучшего варианта» в зависимости от цены всего свайного основания.
3. Получение наглядного представления данных для возможности проверки выбранного решения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оптимизации конструктивных расчетов свайного поля на основе сведений статического зондирования применяется генетический алгоритм, где в качестве генов выступают длина и тип свай (поперечное сечение), а в качестве функции приспособленности — суммарная стоимость свайного поля (с учетом стоимости погружения свай). Для подготовки исходных данных для реализации генетического алгоритма разработан скрипт Python, для обработки этой информации и геометрии фундамента применяются инструменты Rhino, Grasshopper. Реализация генетического алгоритма осуществлена с помощью плагина Galapagos для Grasshopper.

Основные этапы разработанной методики представлены в табл. 1, на рис. 1 отображена схема разработанной методики.

Расчет свайного фундамента в разработанном алгоритме осуществляется согласно формулам и методам, описанным в СП 24.13330.2011 «Свайные фундамента»<sup>1</sup>. Для предварительной оценки стоимости свайного поля производится расчет свайного фундамента по несущей способности грунта основания свай, согласно п. 7.1.1 б<sup>1</sup>, на основании данных статического зондирования. Предлагаемая методика является инструментом для быстрой предварительной оценки по ограниченному набору исходных данных исключительно для подбора по несущей способности. Не рассматриваются испытания грунтов, используются только сведения статического зондирования.

Данные статического зондирования позволяют сделать заключения о предварительной несущей способности свайного поля и осуществить быстрый подбор из нескольких десятков вариантов, выбрав предварительно наиболее оптимальный. Важность такой быстрой предварительной оценки заключается в том, что она дает возможность выбрать основные конструктивные решения через несколько дней после начала изысканий, не дожидаясь основных результатов, которые могут быть только через пару месяцев.

### Допущения

В основу вычислений положены следующие допущения.

Геология:

- не рассматривается положение/величина слоев ИГЭ;

<sup>1</sup> СП 24.13330.2011. Свайные фундамента.

Табл. 1. Основные этапы разработанной методики

Номер этапа	Исходные данные	Что выполняется на этапе	Используемый инструмент
1	1. Результаты статического зондирования. 2. Характеристики свай	1. Статистическая обработка результатов статического зондирования. 2. Вычисление несущих способностей различных конфигураций свай	Python
2	Нагрузки на фундамент	Чтение файла AutoCAD с информацией о положении нагрузок и их значениях	Rhino
3	1. Несущие способности свай. 2. Нагрузки на фундамент	1. Слияние нагрузок, локализованных рядом. 2. Использование результатов несущих способностей свай из Python. 3. Оптимизация свайного поля по цене на основе вертикальных нагрузок на кусты. 4. Визуализация «гиперпространства вариантов». Подтверждение, что найден оптимум. 5. Генерация «паттернов» свайных кустов. 6. Расстановка сгенерированных свайных кустов. 7. Повторная оценка стоимости и уточнение измененных параметров	Grasshopper

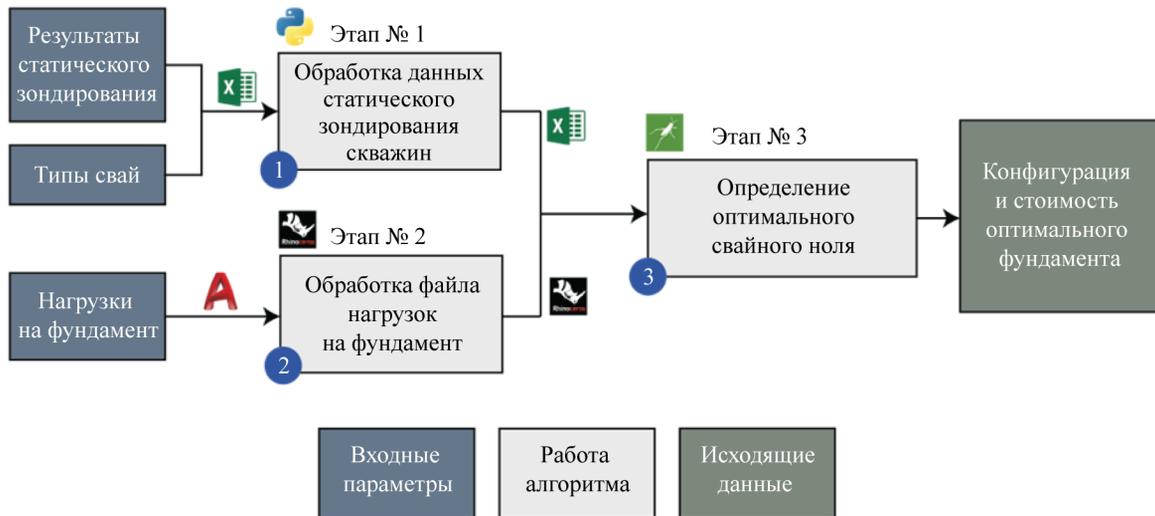


Рис. 1. Схема разработанной методики

- расчет ведется только на основе статистически обработанных результатов статического зондирования;

- не учтено нелинейное поведение грунта.

Конфигурация фундамента:

- реализован подбор только одного типа свай на все свайное поле.

Расчет:

- расчет только по несущей способности грунта основания свай;

- ростверки рассматриваются как абсолютно жесткие тела;

- выбор оптимальной длины и сечения свай происходит при рассмотрении только вертикальных сил;

- не учтена нагрузка от веса свай и ростверка.

### Расчет свайного фундамента

Согласно п. 7.1.12<sup>1</sup> расчетную нагрузку на сваю  $N$ , кН, следует определять, рассматривая фундамент как группу свай, объединенную жестким ростверком, воспринимающим вертикальные и горизонтальные нагрузки и изгибающие моменты:

$$N = \frac{N_d}{n} \pm \frac{M_x y}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x}{\sum x_i^2}, \quad (1)$$

где  $N_d$  — расчетная сжимающая сила, кН, передаваемая на свайный ростверк в уровне его подошвы;  $M_x, M_y$  — передаваемые на свайный ростверк в плоскости подошвы расчетные изгибающие моменты, кН·м, относительно главных центральных осей  $x$  и  $y$  плана свай в плоскости подошвы ростверка;  $n$  — число свай в фундаменте;  $x, y$  — расстояния от главных осей до оси каждой сваи, для которой вычисляют расчетную нагрузку, м;  $x_i, y_i$  — расстояния от главных осей до оси каждой сваи, м.

Согласно п. 7.1.13<sup>1</sup> горизонтальную нагрузку, действующую на фундамент с жестким ростверком

с вертикальными сваями одинакового поперечного сечения, допускается принимать равномерно распределенной между всеми сваями.

Согласно п. 7.1.11<sup>1</sup> сваю в составе фундамента следует рассчитывать исходя из условия:

$$N \leq \frac{\gamma_0 F_d}{\gamma_n \gamma_k}, \quad (2)$$

где  $N$  — расчетная нагрузка, передаваемая на сваю (продольное усилие, возникающее в ней от расчетных нагрузок, действующих на фундамент при наиболее невыгодном их сочетании), определяемая в соответствии с п. 7.1.12;  $\gamma_0$  — коэффициент условий работы, учитывающий повышение однородности грунтовых условий при применении свайных фундаментов, принимаемый  $\gamma_0 = 1$  при односвайном фундаменте и  $\gamma_0 = 1,15$  при кустовом расположении свай;  $F_d$  — несущая способность (предельное сопротивление) грунта основания одиночной сваи, называемая в дальнейшем несущей способностью сваи и определяемая в соответствии с подразделами 7.2 и 7.3;  $\gamma_n$  — коэффициент надежности по назначению (ответственности) сооружения, принимаемый равным 1,2; 1,15 и 1,10 соответственно для сооружений I, II и III уровней ответственности;  $\gamma_k$  — коэффициент надежности по грунту, принимаемый согласно п. 7.1.11.

### Определение несущей способности свай по результатам полевых испытаний, согласно СП 24.13330.2011

В соответствии с п. 7.3.1<sup>1</sup> несущая способность свай в полевых условиях может быть определена испытанием грунтов статическим зондированием.

Согласно п. 7.3.10<sup>1</sup> частное значение предельного сопротивления забивной сваи в точке зондирования  $F_u$ , кН, устанавливается по формуле:

$$F_u = R_s A + fhu, \quad (3)$$

где  $R_s$  — предельное сопротивление грунта под нижним концом сваи по данным зондирования в рассматриваемой точке, кПа;  $A$  — площадь поперечного сечения сваи, м<sup>2</sup>;  $f$  — среднее значение предельного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи по данным зондирования в рассматриваемой точке, кПа;  $h$  — глубина погружения сваи от поверхности грунта около сваи, м;  $u$  — периметр поперечного сечения ствола сваи, м.

Предельное сопротивление грунта под нижним концом забивной сваи  $R_s$ , кПа, по данным зондирования в рассматриваемой точке следует определять по формуле:

$$R_s = \beta_1 q_s, \quad (4)$$

где  $\beta_1$  — коэффициент перехода от  $q_s$  к  $R_s$ , принимаемый по табл. 7.16;  $q_s$  — среднее значение сопротивления грунта, кПа, под наконечником зонда, полученное из опыта, на участке, расположенном в пределах одного диаметра  $d$  выше и четырех диаметров  $4d$

ниже отметки острия проектируемой сваи (где  $d$  — диаметр круглого или сторона квадратного, или большая сторона прямоугольного сечения сваи, м).

Среднее значение предельного сопротивления грунта на боковой поверхности забивной сваи  $f$ , кПа, по данным зондирования грунта в рассматриваемой точке, рассчитывается следующим образом:

$$f = \frac{\sum \beta_i f_{si} h_i}{h}, \quad (5)$$

где  $\beta_i$  — коэффициент, принимаемый по табл. 7.16;  $f_{si}$  — среднее сопротивление  $i$ -го слоя грунта на боковой поверхности зонда, кПа;  $h_i$  — толщина  $i$ -го слоя грунта, м.

### Этап 1. Обработка данных статического зондирования скважин. Алгоритм Python

Алгоритм данного этапа представлен на рис. 2.

Задача этапа 1 — преобразование неподготовленных результатов статического зондирования

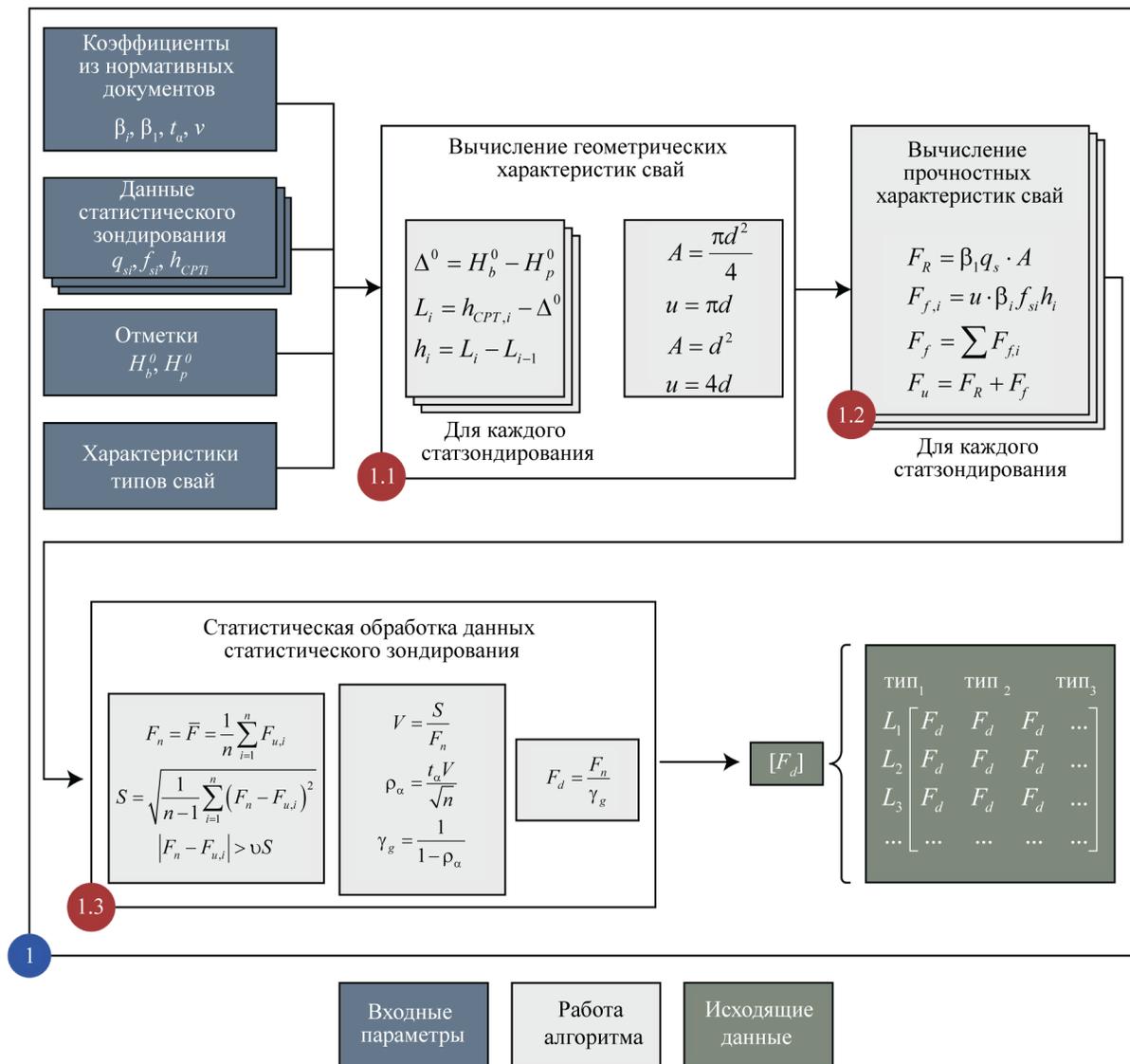


Рис. 2. Схема алгоритма обработки данных статического зондирования и вычисления несущих способностей свай

в удобную форму для последующей обработки алгоритмом в Grasshopper. Результатом работы алгоритма служат расчетные значения несущих способностей свай разных типов для разных длин свай (глубин залегания)  $[F_d]$ .

*Входные параметры*

Входными параметрами на этапе 1 являются:

1. Коэффициенты из нормативных документов.
2. Результаты статического зондирования.
3. Отметки зондирования и свай.
4. Характеристики типов свай.
5. Файл AutoCAD с информацией о положении нагрузок и их значениях.

*Вычисление геометрических характеристик свай*

Производится вычисление абсолютных отметок пяток  $H_{p,i}$  и длин свай  $L_i$  для всех точек (глубин) зондирования (рис. 3), для этого вычисляется разница между отметками поверхности земли и оголовка свай:

$$\Delta^0 = H_b^0 - H_p^0 \quad (6)$$

Далее вычисляется длина свай, как разница между глубиной точки статзондирования и величиной  $\Delta^0$ :

$$L_i = h_{CPT,i} - \Delta^0 \quad (7)$$

Определяется отметка пяты свай:

$$H_{p,i} = H_b^0 - h_{CPT,i} \quad (8)$$

*Вычисление несущих способностей свай*

Для каждого варианта свай и для каждого файла данных статзондирования определяются несущие способности свай при разной длине свай.

Исходя из типа свай устанавливаются ее площадь и наружный периметр сечения.

Для круглых свай:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}; \quad (9)$$

$$u = \pi d.$$

Для квадратных:

$$A = d^2; \quad (10)$$

$$u = 4d,$$

где  $d$  — диаметр и сторона в случае круглой и квадратной свай соответственно, м.

Вычисляются толщины слоев грунта, как разницы двух соседних значений длин свай:

$$h_i = L_i - L_{i-1} \quad (11)$$

Далее, согласно п. 7.3.10<sup>1</sup>, для каждого значения длины свай определяется  $q_s$ , как среднее значение  $q_s$  на участке, расположенном в пределах одного диаметра  $d$ , выше четырех диаметров  $4d$ , ниже отметки острия проектируемой свай.

Устанавливается значение несущей способности по острию свай, исходя из формул (3) и (4):

$$F_R = \beta_1 q_s \cdot A \quad (12)$$

Значение погонной несущей способности по поверхности свай для  $i$ -го слоя ( $i$ -й глубины), исходя из формул (3) и (5):

$$F_{f,i} = u \cdot \beta_i f_{si} h_i \quad (13)$$

Суммарное значение несущей способности по поверхности свай:

$$F_f = \sum F_{f,i} \quad (14)$$

Предельное сопротивление свай, согласно формуле (3):

$$F_u = F_R + F_f \quad (15)$$

Таким образом, получаются значения предельных сопротивлений для разных свай для каждого имеющегося файла статзондирования. Далее осуществляется статистическая обработка этих таблиц.

*Статистическая обработка по ГОСТ 20522–2012*

Выполняется статистическая обработка полученных предельных сопротивлений. Опытными данными для статистической обработки является список значений несущих способностей, полученных по результатам расчета по различным файлам статзондирования в конкретной точке (глубине) при конкретном типе свай. Такая статистическая обработка проводится для каждого типа и длины свай. Результат обработки — расчетные значения несущих способностей свай.

В случае, если количество испытаний (файлов статзондирования) меньше 6, то, согласно п. 7.3.4<sup>1</sup>, нормативное значение предельного сопротивления свай принимается равным наименьшему, иначе, согласно п. 6.2<sup>2</sup>, нормативное значение несущей спо-

<sup>2</sup> ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.

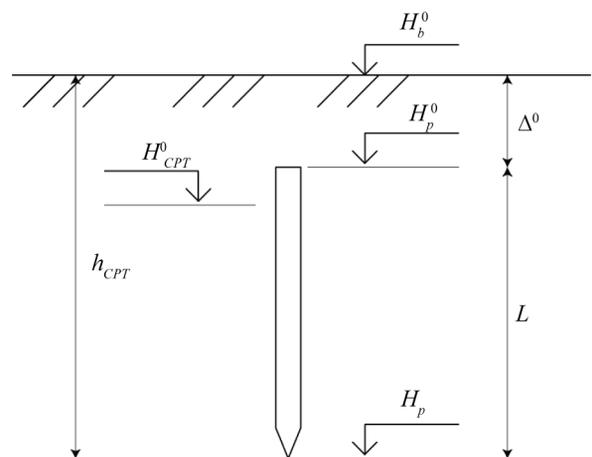


Рис. 3. Вычисление отметок пяток и длин свай

способности сваи  $F_n$  принимается равным среднеарифметическому значению  $\bar{F}$  и вычисляется по формуле:

$$F_n = \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{u,i}, \quad (16)$$

где  $n$  — число определений характеристики (количество файлов статзондирования);  $F_{u,i}$  — несущая способность сваи определенного типа на определенной глубине для отдельного статзондирования.

Далее, согласно п. 6.3, устанавливается среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_n - F_{u,i})^2}. \quad (17)$$

Производится статистическая проверка для исключения возможных ошибок. Исключается частное значение  $F_p$ , для которого выполняется условие:

$$|F_n - F_{u,i}| > vS, \quad (18)$$

где  $v$  — статистический критерий, принимаемый в зависимости от  $n$  по табл. Е.1 приложения Е.

Согласно п. 6.4 вычисляется коэффициент вариации  $V$  несущей способности сваи и показатель точности (погрешности) ее среднего значения  $\rho_\alpha$ :

$$V = \frac{S}{F_n};$$

$$\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, \quad (19)$$

где  $t_\alpha$  — коэффициент, принимаемый по табл. Е.2 приложения Е в зависимости от заданной односторонней доверительной вероятности  $\alpha$  и числа степеней свободы  $K = n - 1$ . Согласно п. 7.3.4<sup>1</sup> принимается  $\alpha = 0,95$ .

Согласно п. 6.5 вычисляется коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$ :

$$\gamma_g = \frac{1}{1 - \rho_\alpha}. \quad (20)$$

В соответствии с п. 6.6 определяется расчетное значение  $F_d$  несущей способности сваи:

$$F_d = \frac{F_n}{\gamma_g}. \quad (21)$$

Таким образом вычисляются расчетные значения несущих способностей свай всех типов для разной длины сваи (глубины залегания)  $[F_d]$ .

Табл. 2. Прайс-лист свай различных типов

Тип сваи	Стоимость, руб.
C60.30.4-8	5990
C80.35.8-12	7910
C90.35.6-12	8570
C100.35.6-12	9640
C110.35.6-12	10 510
C120.35.6-12	10 080
C130.35.7-13	13 990
C140.35.8-13	15 390
C150.35.8-13	16 590
C160.35.8-13	18 590
C120.40.6-13	14 390
C130.40.7-13	17 590
C150.40.8-13	20 240
C160.40.8-13	21 090

Оценка стоимости для различных свай

В данной работе оценка стоимости свай осуществляется путем статистической обработки прайс-листа свай, взятого в свободном доступе в сети интернет (табл. 2). Из исходных данных импортируется таблица, содержащая тип, стоимость и геометрические параметры сваи.

Для каждой пары величин: цена, длина, диаметр, объем сваи, определен коэффициент ранговой корреляции Спирмана, составлена матрица корреляций (табл. 3). Из табл. 3 видно, что цена сваи больше всего коррелирует с ее объемом, поэтому стоимость свайного поля далее оценивается исходя из суммарного объема всех свай.

Составлена модель линейной регрессии для переменных объем–цена, исходя из которой определены коэффициенты: тангенс угла наклона линейной зависимости объем–цена  $v$  и ордината пересечения с осью  $Y$ ,  $v_0$ . Найденные коэффициенты используются для оценки цены свайного основания в Grasshopper. Функция регрессии представлена в формуле, график — на рис. 4:

$$P(V) = v_0 + v \cdot V, \quad (22)$$

где  $P$  — цена одной сваи;  $V$  — объем одной сваи;  $v_0$ ,  $v$  — параметры регрессии.

Стоимость всего свайного поля составит:

$$n \cdot P = n \cdot v_0 + v \cdot V_{tot}, \quad (23)$$

Табл. 3. Матрица корреляций

Величина	Цена	Длина	Диаметр	Объем
Цена	1,00	0,94	0,72	0,97
Длина	0,94	1,00	0,59	0,92
Диаметр	0,72	0,59	1,00	0,84
Объем	0,97	0,92	0,84	1,00

где  $n$  — количество свай;  $V_{tot}$  — суммарный объем всех свай.

Суммарная стоимость свайного фундамента  $P_{tot}$ , млн руб., с учетом стоимости погружения свай:

$$P_{tot} = \frac{n \cdot v_0 + v \cdot V_{tot} + L_{tot} \cdot l_0}{10^6}, \quad (24)$$

где  $L_{tot}$  — суммарная длина всех свай;  $l_0$  — стоимость погружения 1 погонного метра свай.

**Этап 2. Обработка файла нагрузок на фундамент. Импорт AutoCAD в Rhino**

*Входные параметры*

Файл AutoCAD с информацией о положении нагрузок и их значениях.

*Считывание данных из файла AutoCAD*

Обрабатываемый на входе файл представляет собой план расположения колонн здания со значениями, приходящих от них нагрузок (рис. 5). В отдельных слоях располагаются колонны, вертикальные нагрузки и моменты. Для корректной обработки файла необходимо распределить объекты по определенным слоям (табл. 4) и импортировать файл .dwg в Rhino. Далее по названию слоев алгоритм Grasshopper определяет значения нагрузок на ростверки.

**Этап 3. Определение оптимального свайного поля. Алгоритм Grasshopper**

Алгоритм этапа 3 представлен на рис. 6.

Задачей данного алгоритма является оптимизация (определение количества и расстановка свай

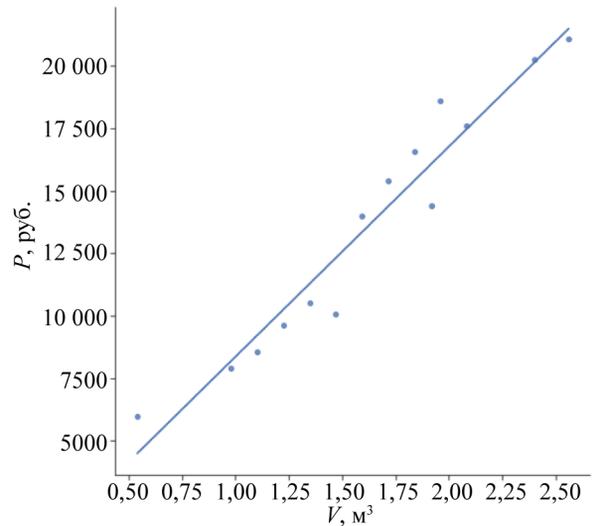


Рис. 4. График функции линейной регрессии

Табл. 4. Название слоев в файле AutoCAD

Объект	Название слоя
Колонны	Ren_column
Вертикальная нагрузка $N$ , кН	$N$
Момент $M_y$ , кН·м	$M_y$
Момент $M_x$ , кН·м	$M_x$

в кустах) свайного поля по цене на основе нагрузок на кусты и несущих способностей свай.

*Входные параметры*

1. Файл Rhino с информацией о положении нагрузок и их значениях.

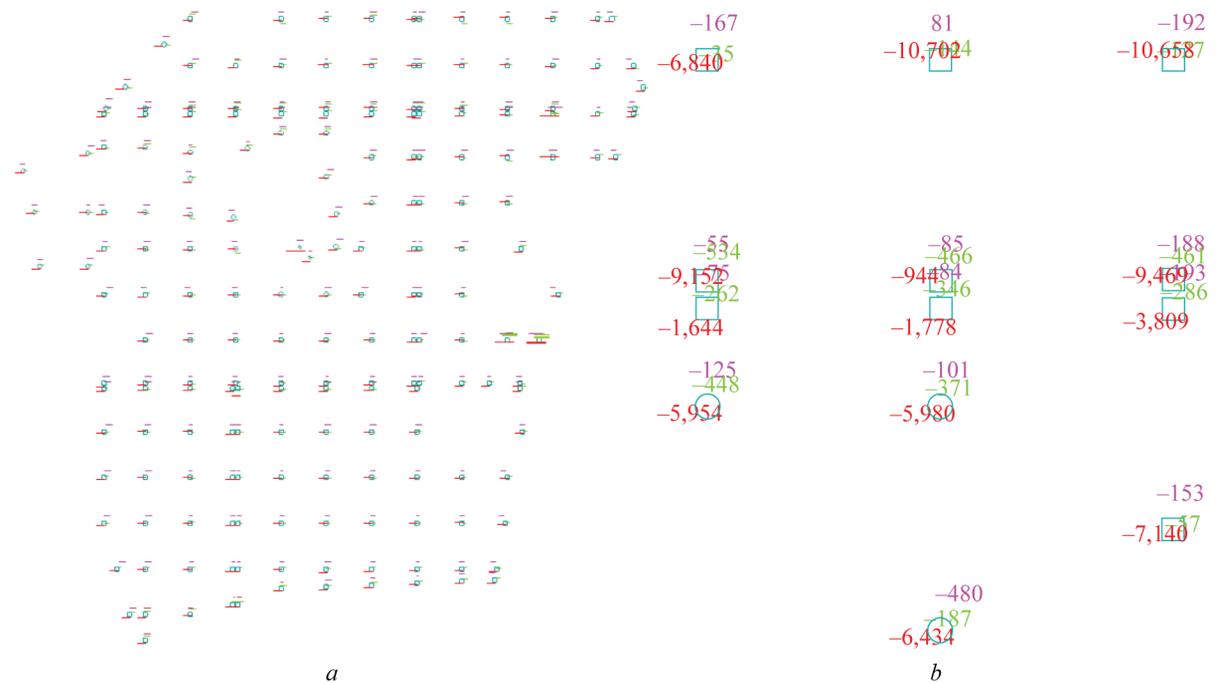


Рис. 5. Входной файл AutoCAD: *a* — все здание; *b* — фрагмент. На рисунке бирюзовым цветом изображены контуры колонн; красным — вертикальная нагрузка  $N$ , кН; розовым —  $M_y$ , кН·м; светло-зеленым —  $M_x$ , кН·м

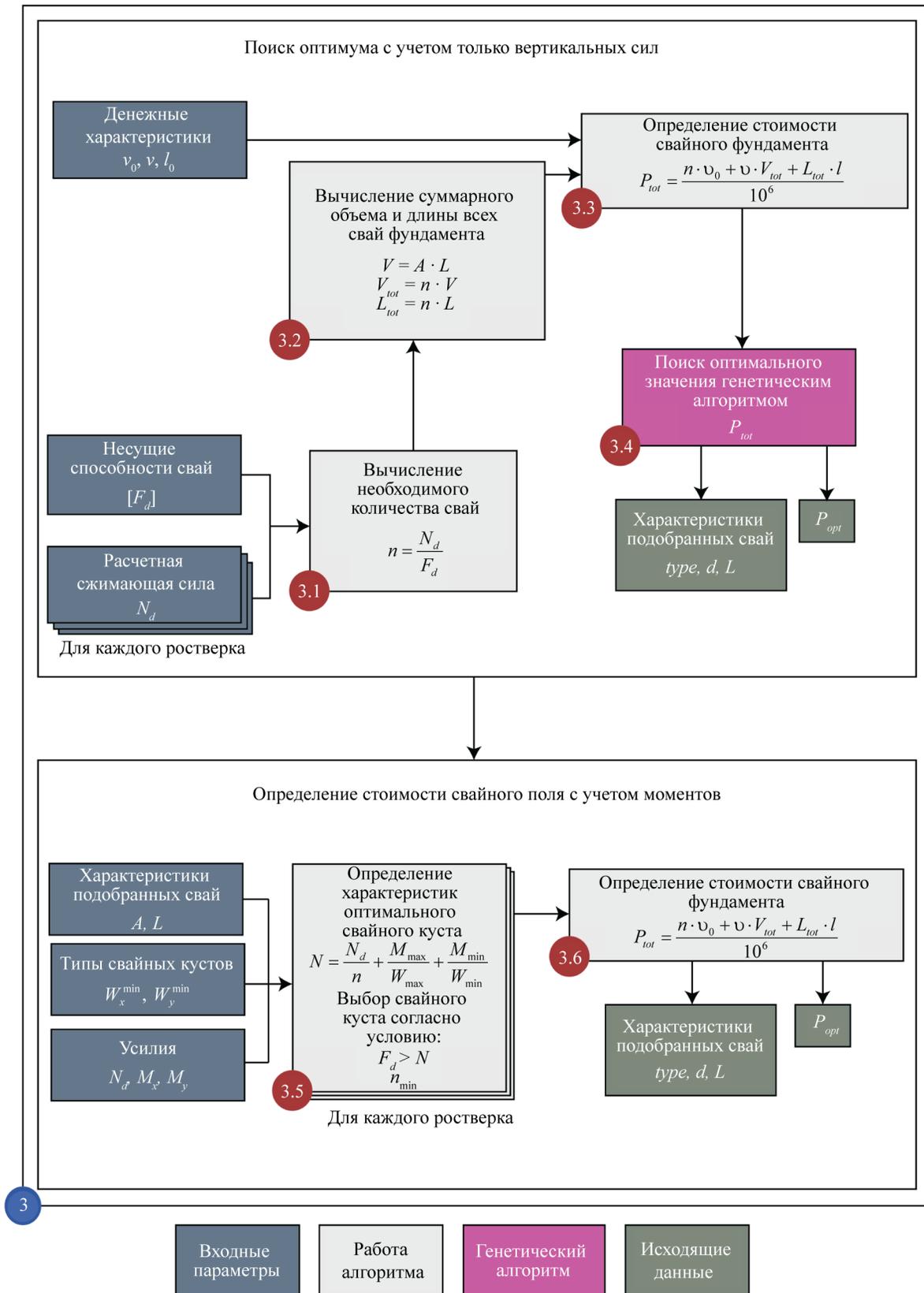


Рис. 6. Схема алгоритма определения оптимального свайного поля

2. Файл, содержащий расчетные значения несущих способностей свай разных типов для разных длин свай (глубин залегания)  $[F_d]$ .
3. Значения денежных характеристик.

### Считывание данных из файла Rhino

Алгоритм определяет колонны, находящиеся рядом друг с другом. Если около одной колонны в радиусе 1200 мм от ее центра располагается другая колонна, то они будут принадлежать одному и тому же ростверку, а нагрузки от них суммируются. Результат обработки файла — список значений нагрузок на ростверки  $N_d$ .

### Поиск оптимума с учетом только вертикальных сил

На первой итерации не учитываются моменты, приложенные к ростверку. При учете только вертикальных сил выбираются оптимальные длины и сечения свай.

### Считывание данных $[F_d]$

Обрабатываемый на входе файл представляет собой таблицу расчетных значений несущих способностей свай различных типов при различных длинах этих свай. Результатом обработки файла является массив значений несущих способностей различных типов свай при различной их длине, значения длин свай и их объемов, определенных исходя из шифра типа свай (диаметр\_круглая/прямоугольная). Для квадратной сваи диаметр — это длина стороны.

### Вычисление необходимого количества свай

Необходимое количество свай для каждого ростверка вычисляется по формуле (25) и округляется вверх:

$$n = \frac{N_d}{F_d}. \quad (25)$$

### Вычисление суммарного объема $V_{tot}$ и суммарной длины $L_{tot}$ всех свай фундамента

Найденные необходимые количества свай для каждого ростверка суммируются и находится суммарное количество свай в фундаменте. Далее, исходя из этого значения, вычисляется суммарный объем и суммарная длина необходимых свай:

$$V = A \cdot L; \quad (26)$$

$$V_{tot} = n \cdot V;$$

$$L_{tot} = n \cdot L. \quad (27)$$

### Определение стоимости свайного фундамента

Стоимость свайного фундамента, млн руб., вычисляется по формуле (24):

$$P_{tot} = \frac{n \cdot v_0 + v \cdot V_{tot} + L_{tot} \cdot l_0}{10^6}.$$

### Поиск оптимальной (минимальной) стоимости фундамента $P_{opt}$

Решение оптимизационной задачи реализовано при помощи плагина Galapagos для Grasshopper,

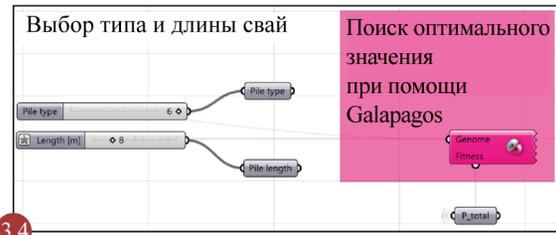


Рис. 7. Применение плагина Galapagos в Grasshopper для реализации генетического алгоритма поиска оптимального решения

который применяет генетический алгоритм для поиска оптимального значения целевой функции (функции приспособленности). В качестве переменных (генов) выступают длина и тип свай, которые формируют множество несущих способностей свай  $[F_d]$ , в качестве целевой функции — стоимость свайного фундамента  $P_{tot}$ , которая минимизируется (рис. 7).

Плагин Galapagos реализует применение эволюционных алгоритмов для решения различных задач<sup>3</sup>. Такие алгоритмы являются медленными и не гарантируют точного решения, однако могут быть использованы для решения большого спектра проблем, позволяют решать плохо сформулированные задачи и извлекать результаты решения во время его поиска, обеспечивают простоту взаимодействия пользователя и алгоритма.

### Генерация кустов свай

В данном блоке генерируются различные типы свайных кустов:  $\{2 \times 2, 3 \times 3, \dots, 11 \times 11\}$ ,  $\{2 \times 3, 3 \times 4, \dots, 11 \times 12\}$ ,  $\{2 \times 4, 3 \times 5, \dots, 11 \times 13\}$ .

Согласно п. 8.13<sup>1</sup> расстояние между осями свай принимается  $3d$ . Согласно п. 7.1.12<sup>1</sup> для выявления расчетной нагрузки на сваю для каждого типа куста определяется:

- количество свай в кусте  $n$ ;
- сумма квадратов расстояний от главной оси до оси каждой сваи в кусте  $\sum y_i^2$  и  $\sum x_i^2$ ;
- максимальное расстояние от главной оси до оси сваи  $y_{max}$  и  $x_{max}$ .

Вычисляются наименьшие в кусте моменты сопротивления относительно осей  $X$  и  $Y$  (расчет осуществляется для наиболее нагруженной сваи в кусте):

$$W_x^{min} = \frac{\sum y_i^2}{y_{max}}; \quad (28)$$

$$W_y^{min} = \frac{\sum x_i^2}{x_{max}}.$$

<sup>3</sup> I eat bugs for breakfast: Evolutionary principles applied to problem solving. URL: <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/>

**Табл. 5.** Таблица из файла *Betta\_f.csv*, содержащая значения коэффициента  $\beta_p$ , принимаемого по табл. 7.16<sup>1</sup>

soil_type	f_kPa	beta_i
sand	0	0,75
sand	20	0,75
sand	40	0,6
sand	60	0,55
sand	80	0,5
sand	100	0,45
sand	120	0,4
clay	0	1
clay	20	1
clay	40	0,75
clay	60	0,6
clay	80	0,45
clay	100	0,4
clay	120	0,3

**Табл. 6.** Таблица из файла *Betta1\_q.csv*, содержащая значения коэффициента  $\beta_1$ , принимаемого по табл. 7.16<sup>1</sup>

q_kPa	beta_1
0	0,9
1000	0,9
2500	0,8
5000	0,65
7500	0,55
10 000	0,45
15 000	0,35
20 000	0,3
30 000	0,2
100 000	0,2

**Табл. 7.** Фрагмент таблицы входящих данных результатов статического зондирования

depth_m	q_MPa	f_kPa	soil_type	depth_m
2,3	2,8	0,8	sand	2,3
2,4	13,8	20	sand	2,4
2,5	11,7	41	sand	2,5
2,6	16	47	sand	2,6
2,7	17,5	49	sand	2,7
2,8	18,1	51	sand	2,8
2,9	18,2	48	sand	2,9
...	...	...	...	...

### Определение стоимости свайного поля с учетом моментов

#### Чтение моментов

Алгоритм обрабатывает входной файл *Rhino* и суммирует моменты, принадлежащие одному ростверку (в случае, когда в одном ростверке несколь-

**Табл. 8.** Таблица из файла *Boring\_elev.csv*, содержащая значения отметок

CPT_label	bore_elevation_m	pile_top_elevation_m	CPT_top_elevation_m
1_18	38,9	38,5	36,6
5_18	38,5	38,5	37,2
10_18	38,1	38,5	36,6
11_18	38,5	38,5	36,4
12_18	38,2	38,5	36,4
15_18	37,8	38,5	36,5
18_18	37,9	38,5	35,5
19_18	37,6	38,5	33,9
25_18	37	38,5	33,7

**Табл. 9.** Таблица из файла *pile\_variants.csv*, содержащая варианты свай

Type	Diameter
circular	0,3
rectangular	0,3
circular	0,35
rectangular	0,35
circular	0,4
rectangular	0,4

ко колонн). Таким образом, определяются суммарные моменты  $M_x$  и  $M_y$  для каждого ростверка. Далее наибольшему из значений  $M_x$  и  $M_y$  присваивается обозначение  $M_{max}$ , наименьшему —  $M_{min}$ .

#### Подбор свайных кустов

Для каждого ростверка подбирается тип куста с наименьшим количеством свай, проходящий по условию прочности, согласно формулам (1) и (2):

$$F_d \geq N; \quad (29)$$

$$N = \frac{N_d}{n} + \frac{M_{max}}{W_{max}} + \frac{M_{min}}{W_{min}}, \quad (30)$$

где  $W_{max}$  и  $W_{min}$  соответствуют  $W_x^{min}$  и  $W_x^{min}$ .

После выбора подходящего типа куста для каждого ростверка вычисляются:

- коэффициент эффективности  $k_{M/N}$ :

$$k_{M/N} = \frac{N}{N_d}; \quad (31)$$

- коэффициент добавленных свай:

$$\frac{n_M}{n}. \quad (32)$$

Проверяется наличие вырывающих сил:

$$F_{выр} = \frac{N_d}{n} - \frac{M_{max}}{W_{max}} - \frac{M_{min}}{W_{min}} < 0. \quad (33)$$

Табл. 10. Таблица из файла Student.csv, содержащая значения коэффициента  $t_{\alpha}$

$K = n - 1$	0,85	0,9	0,95	0,975	0,98	0,99
3	1,25	1,64	2,35	3,18	3,45	4,54
4	1,19	1,53	2,13	2,78	3,02	3,75
5	1,16	1,48	2,01	2,57	2,74	3,36
6	1,13	1,44	1,94	2,45	2,63	3,14
7	1,12	1,41	1,9	2,37	2,54	3
8	1,11	1,4	1,86	2,31	2,49	2,9
9	1,1	1,38	1,83	2,26	2,44	2,82
10	1,1	1,37	1,81	2,23	2,4	2,76
11	1,09	1,36	1,8	2,2	2,36	2,72
12	1,08	1,36	1,78	2,18	2,33	2,68
13	1,08	1,35	1,77	2,16	2,3	2,65
14	1,08	1,34	1,76	2,15	2,28	2,62
15	1,07	1,34	1,75	2,13	2,27	2,6
16	1,07	1,34	1,75	2,12	2,26	2,58
17	1,07	1,33	1,74	2,11	2,25	2,57
18	1,07	1,33	1,73	2,1	2,24	2,55
19	1,07	1,33	1,73	2,09	2,23	2,54
20	1,06	1,32	1,72	2,09	2,22	2,53
25	1,06	1,32	1,71	2,06	2,19	2,49
30	1,05	1,31	1,7	2,04	2,17	2,46
40	1,05	1,3	1,68	2,02	2,14	2,42
60	1,05	1,3	1,67	2	2,12	2,39

*Вычисление конечной цены*

Исходя из полученного нового значения суммарного количества необходимых свай пересчитываются суммарный объем и длина свай, и, согласно формуле (24), уточняется стоимость свайного фундамента.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Описанные выше алгоритмы реализованы при помощи языка Python — этап 1, программы для трехмерного моделирования Rhino — этап 2, и языка визуального программирования Grasshopper — этап 3. Определены конфигурация и оптимальная стоимость свайного фундамента, в качестве исходных данных принят проект задания, разрабатываемого Renaissance Construction.

**Обработка данных статического зондирования скважин. Алгоритм Python**

Входящие данные на этапе 1 представляют собой таблицы в формате Excel, их содержание представлено на табл. 5–11. Входящими данными являются:

1. Файлы Beta\_f.csv и Beta1\_q.csv со значениями коэффициентов  $\beta_i$  и  $\beta_1$ , принимаемые по табл. 7.16<sup>1</sup> (табл. 5, 6).

2. Набор файлов результатов статического зондирования CPTs\[file].csv. Каждый файл в директории CPTs содержит таблицу значений: qsi, fsi, тип

Табл. 11. Фрагмент таблицы из файла v\_criteria.csv, содержащей значения статистического критерия  $\nu$

$n$	$\nu$
3	1,41
4	1,71
5	1,92
6	2,07
7	2,18
8	2,27
9	2,35
...	...

грунта для различных точек (глубин) зондирования hCPTi (табл. 7).

3. Файл Boring\_elev.csv, содержащий значения отметок: бурения (поверхности земли) Hb0, оголовка сваи Нруровня начала зондирования HCPT0 для каждого отдельного статзондирования (табл. 8).

4. Файл pile\_variants.csv, содержащий варианты свай. Каждому варианту соответствует форма circular или rectangular и диаметр  $d$ , м (табл. 9).

5. Файл Student.csv, содержащий значения коэффициента  $t_{\alpha}$ , принимаемого по табл. E2 приложения E<sup>2</sup> (табл. 10).

6. Файл v\_criteria.csv, содержащий значения статистического критерия  $\nu$ , принимаемого по табл. E1 приложения E<sup>2</sup> (табл. 11).

Табл. 12. Фрагмент таблицы несущих способностей, результат работы алгоритма этапа № 1, файл pile\_bc.csv

pile_length_m	0.3_circular	0.3_rectangular	0.35_circular	0.35_rectangular	0.4_circular	0.4_rectangular
1,6	164.13	208.98	–	–	–	–
1,7	230.50	293.48	352.96	449.40	454.33	578.47
1,8	271.53	345.73	401.08	510.67	497.84	633.87
1,9	278.20	354.22	393.76	501.35	477.07	607.42
2,0	268.43	341.77	372.25	473.96	449.32	572.09
2,1	272.77	347.30	345.93	440.46	412.81	525.60
2,2	207.13	263.73	331.24	421.74	395.01	502.94
2,3	204.11	259.89	269.78	343.50	325.40	414.32
2,4	170.66	217.29	249.38	317.52	301.15	383.44
2,5	175.72	223.73	259.16	329.97	329.77	419.87
2,6	192.29	244.83	275.29	350.50	339.34	432.06
2,7	175.15	223.01	231.49	294.74	281.40	358.29
2,8	177.96	226.59	231.56	294.83	282.23	359.34
2,9	178.05	226.70	225.12	286.63	273.36	348.05
3,0	152.15	193.72	190.52	242.58	231.21	294.39
3,1	143.40	182.58	181.16	230.67	226.66	288.59
3,2	144.70	184.24	188.82	240.41	237.28	302.11
3,3	171.36	218.18	196.62	250.35	242.39	308.62
...	...	...	...	...	...	...

Все входные данные импортируются в таблицы data frame библиотеки Pandas (Python) и преобразуются для удобства обработки. Далее происходит обработка данных из таблиц по описанному в предыдущем разделе алгоритму: вычисляются геометрические характеристики свай, их несущие способности. Результат этой обработки — таблица

несущих способностей, которая сохраняется в файл pile\_bc.csv (табл. 12).

### Оценка стоимости свай

Исходными данными является файл pile\_prices.csv, содержащий значения стоимости различных свай (см. табл. 2). По этим данным составлена мо-

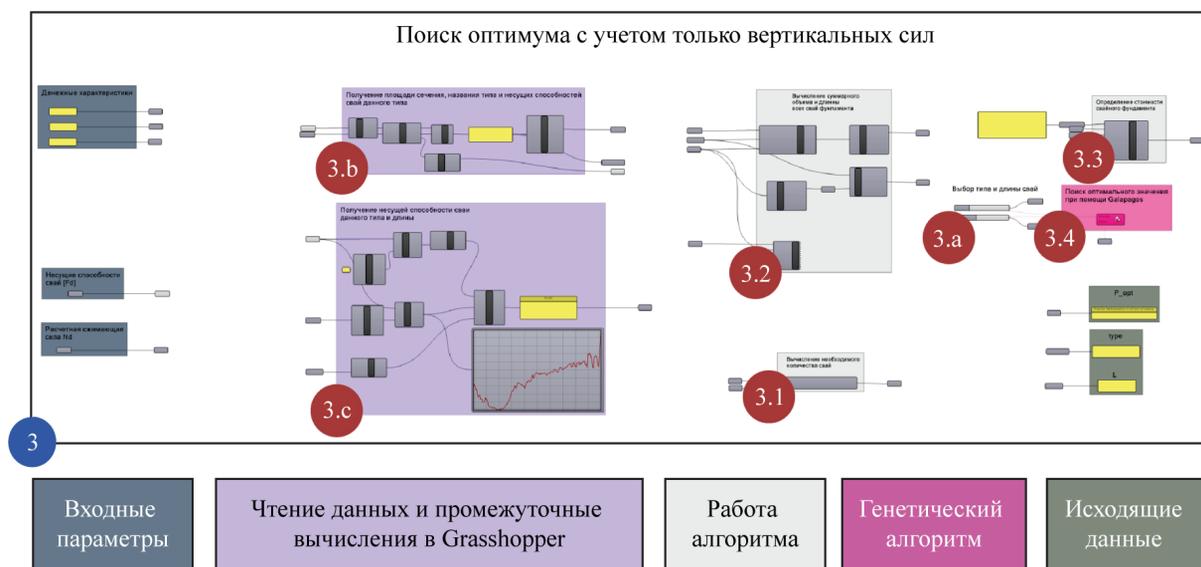


Рис. 8. Поиск оптимума с учетом только вертикальных сил, алгоритм Grasshopper: 3.a — выбор типа и длины свай; 3.b — получение площади сечения, названия типа и несущих способностей свай данного типа; 3.c — получение несущей способности сваи данного типа и длины; 3.1 — вычисление необходимого количества свай; 3.2 — вычисление суммарного объема и длины всех свай фундамента; 3.3 — определение стоимости свайного фундамента; 3.4 — поиск оптимального значения стоимости фундамента при помощи Galapagos

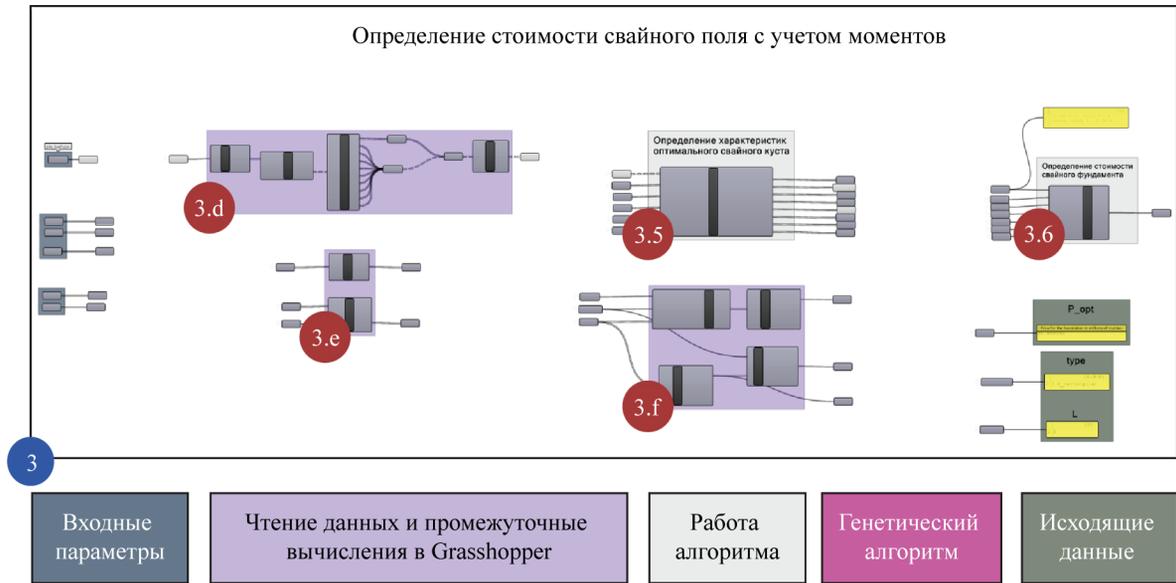


Рис. 9. Определение стоимости свайного поля с учетом моментов, алгоритм Grasshopper: 3.d — обработка данных свайных кустов; 3.e — обработка данных о нагрузках и несущих способностях свай; 3.f — определение суммарного количества, длины и объема всех свай; 3.5 — определение характеристик оптимального свайного куста; 3.6 — определение стоимости свайного фундамента

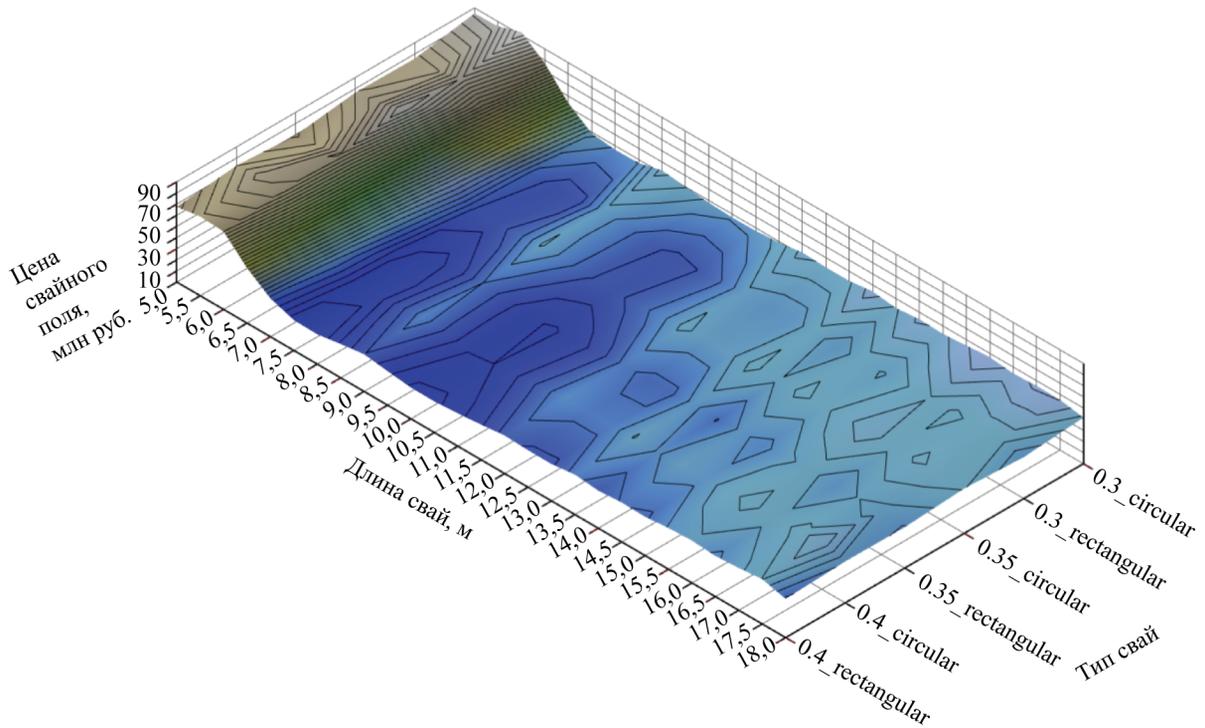


Рис. 10. Оптимизационное пространство: X — тип свай (диаметр\_форма); Y — длина свай, м; Z — цена свайного поля, млн руб.

дель линейной регрессии для переменных объем-цена, исходя из которой определены коэффициенты:

$$v_0 = -53,37;$$

$$v = 8416,95.$$

Стоимость погружения 1 п. м. сваи принята согласно опытным данным компании Renaissance Construction:

$$l_0 = 650.$$

### Исходные данные фундамента. Файл AutoCAD

В качестве исходных данных принят проект здания, разрабатываемого Renaissance Construction, в виде графического задания на фундаменты в формате чертежа AutoCAD.

### Определение оптимального свайного поля

На схемах рис. 8, 9 представлены схемы алгоритма в Grasshopper определения оптимального свайного фундамента.

На основе вычислений стоимости фундаментов построено оптимизационное пространство (рис. 10).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При реализации разработанного алгоритма доступны следующие результаты:

- 1) статистическая обработка:
  - значение несущих способностей свай;
  - цена свай;
- 2) визуализация оптимизационного пространства;
- 3) генерация вариантов свайных кустов и расчет их параметров;
- 4) информация по подобранным кустам свай:
  - коэффициент использования;
  - подобранный оптимальный свайный куст;
  - наличие растянутых свай в кустах;

- сравнение результатов оптимизации с фактическими из параметров кустов;
  - минимальные и максимальные вертикальные силы, приведенные на сваю в каждом кусте;
- 5) экспорт в текстовый, табличный, графический формат.

Разработанный алгоритм может использоваться для предварительного расчета и быстрой оценки вариантов свайного основания. Необходимые данные могут генерироваться из расчетных программ.

В качестве альтернативы можно проводить подбор и оптимизацию непосредственно в коде Python, используя Grasshopper и Rhino только для извлечения усилий и последующей визуализации результатов.

Направления для дальнейшего исследования:

- внести слоистое залегание инженерно-геологического элемента в расчетную модель;
- оценивать несущую способность каждого ростверка и его куста независимо и согласно залегающим ИГЭ под ним;
- добавить оптимизацию путем кластеризации по положению в свайном поле и/или нагрузкам (сочетания разных конфигураций свай);
- внести в модель и учесть нелинейность поведения грунтового массива, выполнив это не в ущерб скорости работы алгоритма;
- внести в модель расчеты по потере общей устойчивости оснований свайных фундаментов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Викторова О.Л., Фатеев Д.А. Обоснование принятого варианта конструктивного решения фундаментов // Моделирование и механика конструкций. 2021. № 13. С. 184–193. EDN NHOLMJ.
2. Соколов Н.С. Выбор типа буровых свай по технико-экономическим параметрам // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции : мат. IV Междунар. (X Всерос.) конф. 2018. С. 430–438. EDN MBODWE.
3. Мельников В.А., Алексеев Н.С., Ионов К.И. Сравнительный анализ методик расчета осадки свайных фундаментов // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 9–1 (53). С. 37–45. EDN ULQMFZ.
4. Стольникова К.А., Петроченко М.В. Зависимость сметной стоимости работ по устройству свайного фундамента от уровня детализации (LOD) BIM-модели // Неделя науки ИСИ : мат. Всерос. конф. в 3-х частях. 2021. С. 64–67. EDN AUVMEV.
5. Георгиев Н.Г., Шумилов К.А. Применение визуального программирования при моделировании строительных конструкций // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 34. С. 1418–1422. EDN AAXTTM.
6. Banihashemi S., Tabadkani A., Hosseini M.R. Integration of parametric design into modular coordination: A construction waste reduction workflow // Automation in Construction. 2018. Vol. 88. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.026
7. Girardet A., Botton C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis // Automation in Construction. 2021. Vol. 126. P. 103679. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103679
8. Nadyrshine N., Nadyrshine L., Khafizov R., Ibragimova N., Mkhitarian K. Parametric methods for constructing the Islamic ornament // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 09009. DOI: 10.1051/e3s-conf/202127409009
9. Freitas J., Cronemberger J., Soares R.M., Amorim C.N.D. Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug // Renewable Energy. 2020. Vol. 160. Pp. 1468–1479. DOI: 10.1016/j.renene.2020.05.137
10. Preisinger C. Linking structure and parametric geometry // Architectural Design. 2013. Vol. 83. Issue 2. Pp. 110–113. DOI: 10.1002/ad.1564
11. He L., Li Q., Gilbert M., Shepherd P., Rankine C., Pritchard T. et al. Optimization-driven conceptual design of truss structures in a parametric modelling

environment // Structures. 2022. Vol. 37. Pp. 469–482. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.048

12. *Lartigue B., Lasternas B., Lofiness V.* Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight // Indoor and Built Environment. 2014. Vol. 23. Issue 1. Pp. 70–80. DOI: 10.1177/1420326X13480224

13. *Li J., Zhao H.* Multi-objective optimization and performance assessments of an integrated energy system based on fuel, wind and solar energies // Entropy. 2021. Vol. 23. Issue 4. P. 431. DOI: 10.3390/e23040431

14. *Wortmann T., Natanian J.* Multi-objective optimization for zero-energy urban design in China: A benchmark // Proceedings of the SimAUD. 2020. Pp. 203–210.

15. *Benjaoran V., Peansupap V.* Grid-based construction site layout planning with particle swarm optimisation and travel path distance // Construction Management and Economics. 2020. Vol. 38. Issue 8. Pp. 673–688. DOI: 10.1080/01446193.2019.1600708

16. *Turrin M., von Buelow P., Stouffs R.* Design explorations of performance driven geometry in ar-

chitectural design using parametric modeling and genetic algorithms // Advanced Engineering Informatics. 2011. Vol. 25. Issue 4. Pp. 656–675. DOI: 10.1016/j.aei.2011.07.009

17. *Yang D., Sun Y., Turrin M., Von B.P., Paul J.* Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes: a case study // Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium. 2015.

18. *Rutten D.* Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers // Archit Design. 2013. Vol. 83. Pp. 132–135. DOI: 10.1002/ad.1568

19. *Петраш А.В., Петраш П.В.* Выбор типа свайных фундаментов при условии наиболее полного использования их несущей способности по материалу // Будущее науки — 2013 : мат. Междунар. молодежной науч. конф. 2013. С. 170–173. EDN TMFFTT.

20. *Oh Y.P., Mohamad Ismail M.A.* Pile length optimization by using shaft friction and end bearing curves developed from instrumented pile load test // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2023. Vol. 129. P. 103278. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103278

Поступила в редакцию 24 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 26 сентября 2023 г.

О Б АВТОРАХ: **Павел Никитич Недвига** — ассистент высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 194064, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 4626-6726, ResearcherID: HCN-2842-2022, ORCID: 0000-0003-0857-8301; pavel.nedviga@gmail.com;

**Анна Алексеевна Кукина** — старший преподаватель высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 194064, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 1069471, SPIN-код: 9190-9276, Scopus: 57224191176, ResearcherID: AAB-9076-2021, ORCID: 0000-0003-4271-7408; kukina\_aa@spbstu.ru;

**Максим Александрович Тачков** — студент высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 194064, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ORCID: 0000-0002-7831-7548; politech\_maks21992199@mail.ru.

Вклад авторов:

Недвига П.Н. — разработка методики.

Кукина А.А. — научное руководство.

Тачков М.А. — написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

This study is devoted to the algorithmization of structural calculations using pile foundation design as an example.

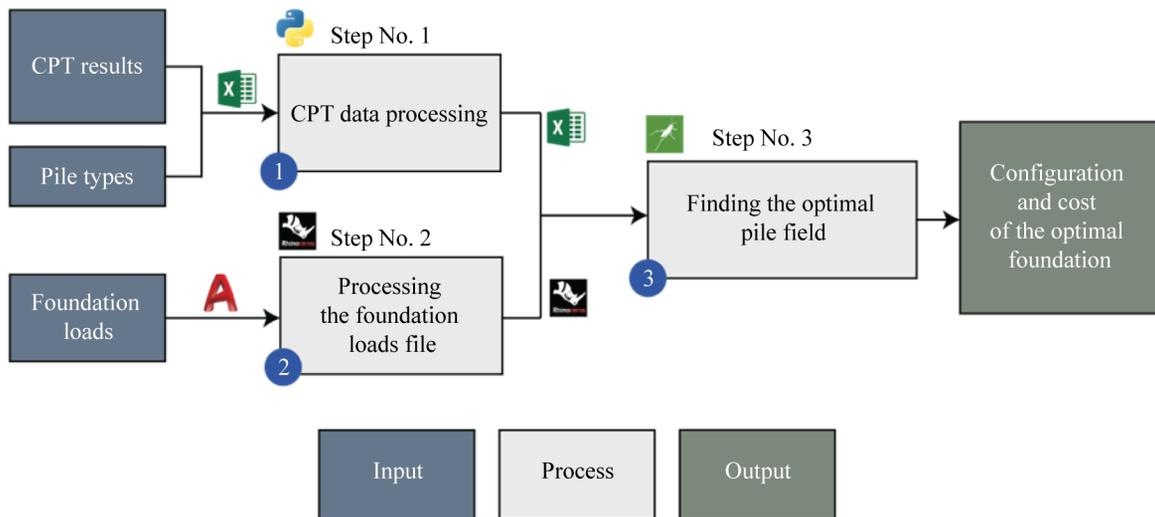
Pile foundations have a number of advantages: they can be installed on many types of soil, a high level of stability and durability, fast erection time, and low cost [1]. The choice of the most optimal variant of the pile foundation of a building plays an important

role, because the share of construction of the underground part reaches 15–25 % in the total estimated cost of the object [2–4].

The current practice of pile foundation selection is an iterative process in which piles of different configurations are considered and calculated for a given foundation load and the cheapest option among those considered is determined. There is no process coherence, no standardization of formats, and the search for the optimal solution is performed manually by compar-

**Table 1.** Main steps of the developed methodology

Step number	Initial data	What is being done at the stage	Used tool
1	1. Results of cone penetration test (CPT). 2. Pile characteristics	1. Statistical processing of CPT results. 2. Calculation of bearing capacities of various pile configurations	Python
2	1. Foundation loads	Read AutoCAD file with information about load positions and values	Rhino
3	1. Bearing capacity of piles. 2. Foundation loads	1. Merging of loads localized next to each other. 2. Using pile bearing capacity results from Python. 3. Optimization of the pile field for price based on vertical pile loads. 4. Visualization of the “hyperspace of options”. Confirmation that an optimum has been found. 5. Generation of pile pile “patterns”. 6. Arrangement of generated pile pads. 7. Re-estimation of cost and refinement of changed parameters	Grasshopper



**Fig. 1.** Scheme of the developed methodology

ing several options. This approach is time-consuming (up to several weeks).

The main shortcomings of the current approach:

1. There is no single methodology fixed in an algorithm.
2. Performed by an experienced engineer on a step-by-step basis.
3. Executed in a variety of files.
4. The selection of options is done manually.
5. Processing of calculations can take up to several weeks — depends on the scale of the construction.
6. Requires the involvement of several specialists, including cost estimators.
7. The option selection is not based on “cost” but on various engineering metrics.
8. Typically, the company has its own calculation calculators, which imposes the task of monitoring and updating these calculators with each individual engineer.
9. The results of the calculations are presented in tabular form and are not visible to the expert.

Grasshopper visual programming environment is used in design to solve various tasks: creation of complex parametric geometry, automation of building a three-dimensional model of a structure, working with drawings and tables, automation of calculations, optimization [5].

A widespread area of Grasshopper application is parametric modelling of buildings and structures. Grasshopper is used to automate the design of modular buildings [6], linear objects [7]; to create complex geometric shapes of buildings [5], facade elements [8]; to estimate insolation parameters of buildings [9]; to automate the calculation of structures using the finite element method [10, 11].

Grasshopper is also widely used for solving optimization problems on: energy efficiency of buildings [12–14], construction site layout [15], selection of the most efficient construction [16, 17] Optimization problems in Grasshopper are solved using the Galapagos plugin, which applies a genetic algorithm to find the target function. The genetic algorithm allows us to find a reasonably accurate solution [18].

In studies that address the problems of pile foundation design, different types of foundations are com-

pared [1], comparison of pile foundation technologies [19], a more economical method for determining the bearing capacity of a pile and optimizing its length [20] is proposed, but no methodology for selecting, justifying the choice of the optimal configuration for a particular type of pile foundation is proposed.

The development of a unified methodology, approach/process and solution to optimize pile foundation design would reduce the time cost of major design decisions, and justify the chosen solution based on specific metrics, e.g. cost of pile foundation (as considered in this paper), speed of erection, human resource requirements. Grasshopper is used in design to solve various optimization problems, and is considered in this paper to solve the pile foundation design problem.

*The aim of the study is to develop a methodology for optimizing structural calculations on the example of a pile field, based on static sensing data.*

*The objectives of the study are:*

1. Prepare a “pipeline” for processing data from geotechnical engineering surveys (GES).
2. Develop a strictly deterministic process for justifying and selecting the “best option” depending on the price of the entire pile foundation.
3. Obtain a visual representation of the data to be able to verify the chosen solution.

## MATERIALS AND METHODS

A genetic algorithm is used to optimize the structural calculations of the pile field based on static sensing data, where the length and type of piles (cross section) act as genes, and the total cost of the pile field (including the cost of pile sinking) acts as a fitness function. A Python script was developed to prepare the initial data for the implementation of the genetic algorithm, and Rhino and Grasshopper tools are used to process this data and the foundation geometry. The realization of the genetic algorithm itself is carried out using the Galapagos plug-in for Grasshopper.

The main stages of the developed methodology are presented in Table 1, on Fig. 1 shows the scheme of the developed methodology.

Pile foundation calculation in the developed algorithm is performed according to the formulas and methods described in SP 24.13330.2011<sup>1</sup>. For preliminary assessment of the pile field cost, the pile foundation is calculated according to the bearing capacity of the pile foundation soil, according to clause 7.1.1 b)<sup>1</sup>, on the basis of static probing data. The proposed methodology is a tool for a quick preliminary assessment based on a limited set of input data, exclusively for the selection of bearing capacity. Soil tests are not considered and only static sounding data are used.

Static sounding data allow conclusions to be drawn about the preliminary bearing capacity of the pile field

and a quick selection from several dozen options, selecting the most optimal one beforehand. The importance of such a quick preliminary assessment is that it makes it possible to select the main structural solutions a few days after the start of the survey, without waiting for the main results, which may only be a couple of months away.

## Assumptions

The calculations are based on the following assumptions.

Geology:

- no consideration is given to the position/magnitude of the GEE layers;
- the calculation is based only on statistically processed results of static sounding;
- the non-linear behaviour of the ground was not taken into account.

Foundation configuration:

- the selection of only one pile type for the entire pile field is realized.

Calculation:

- calculation based on the bearing capacity of the pile foundation soil only;
- the foundations are treated as absolutely rigid bodies;
- the optimum pile length and cross-section is selected by considering only the vertical forces;
- the load from the weight of the pile and the pile foundation was not taken into account.

## Calculation of pile foundations

According to clause 7.1.12<sup>1</sup>, the design load on the pile  $N$ , kN, should be determined by considering the foundation as a group of piles united by a rigid pile foundation supporting vertical and horizontal loads and bending moments:

$$N = \frac{N_d}{n} \pm \frac{M_x y}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x}{\sum x_i^2}, \quad (1)$$

where  $N_d$  is the calculated compressive force, kN, transmitted to the pile foundation at the level of its bottom;  $M_x, M_y$  — design bending moments, kN·m, transferred to the pile pedestal in the plane of the footing with respect to the main central axes  $x$  and  $y$  of the pile plan in the plane of the pedestal footing;  $n$  — number of piles in the foundation;  $x_i, y_i$  — distances from the main axes to the axis of each pile, m;  $x, y$  — distances from the main axes to the axis of each pile for which the design load is calculated, m.

According to clause 7.1.13<sup>1</sup>, the horizontal load acting on a rigid foundation with vertical piles of the same cross-section may be assumed to be uniformly distributed among all piles.

According to clause 7.1.11<sup>1</sup>, the pile in the foundation should be calculated on the basis of the condition:

$$N \leq \frac{\gamma_0 F_d}{\gamma_n \gamma_k}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> CP 24.13330.2011. Pile foundations.

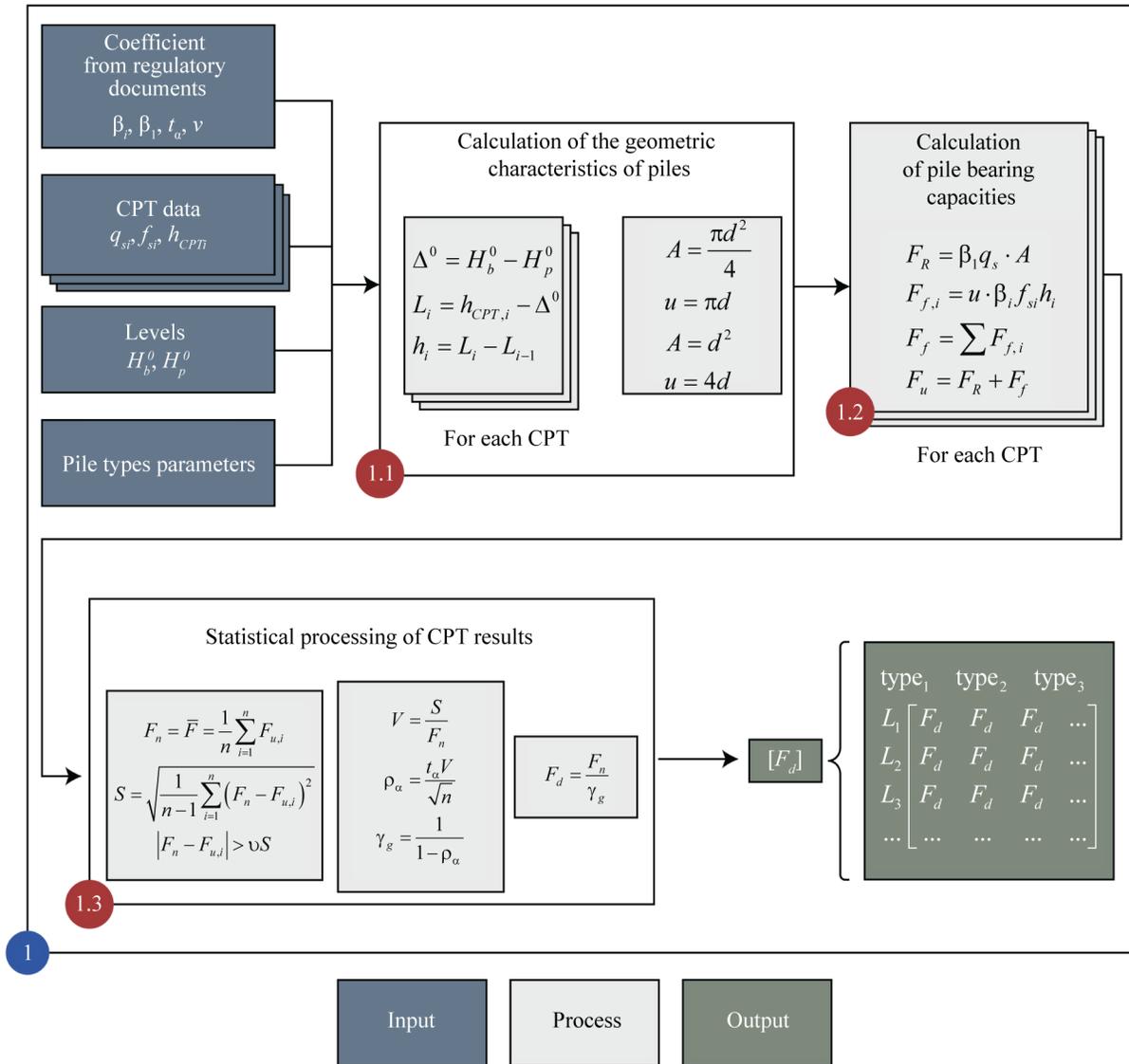


Fig. 2. Scheme of the algorithm for processing of CPT data and calculating the bearing capacity of piles

where  $N$  is the design load transferred to the pile (longitudinal force arising in the pile from the design loads acting on the foundation at the most unfavourable combination), determined in accordance with 7.1.12;  $F_d$  is

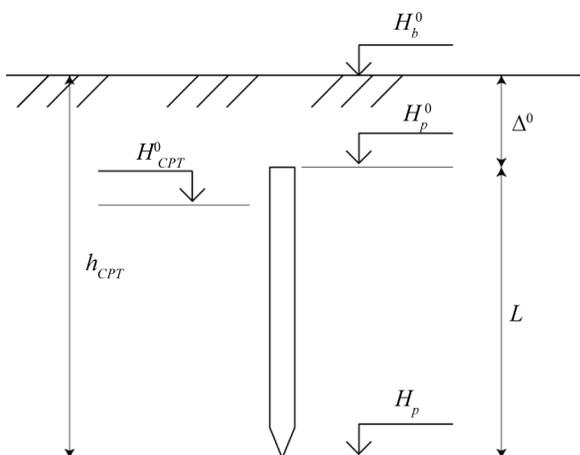


Fig. 3. Calculation of heel marks and pile lengths

the bearing capacity (ultimate resistance) of the foundation soil of a single pile, hereinafter referred to as the bearing capacity of the pile and determined in accordance with Subsections 7.2 and 7.3;  $\gamma_0$  — the coefficient of working conditions, taking into account the increase of homogeneity of ground conditions when pile foundations are used, taken  $\gamma_0 = 1$  for single pile foundations and  $\gamma_0 = 1.15$  for cluster pile arrangement;  $\gamma_n$  — the reliability coefficient for the purpose (responsibility) of the structure, taken equal to 1.2, 1.15 and 1.10 respectively for structures of I, II and III levels of responsibility;  $\gamma_k$  — the reliability coefficient for the soil, taken in accordance with clause 7.1.11 of the Code of Practice for Pile Foundations.

**Determination of the bearing capacity of piles based on the results of field tests, according to CP 24.13330.2011**

According to clause 7.3.1<sup>1</sup>, the bearing capacity of piles in the field can be determined by static probing of soils.

According to clause 7.3.10<sup>1</sup>, the partial value of the ultimate resistance of the driven pile at the probing point  $F_u$ , kN, should be determined by the formula:

$$F_u = R_s A + fhu, \quad (3)$$

where  $R_s$  — ultimate resistance of soil under the bottom end of the pile according to probing data at the point under consideration, kPa;  $A$  — cross-sectional area of the pile, m<sup>2</sup>;  $f$  — average value of ultimate resistance of soil on the side surface of the pile according to probing data at the point under consideration, kPa;  $h$  — depth of pile immersion from the soil surface near the pile, m;  $u$  — perimeter of the cross-sectional area of the pile shaft, m;

The ultimate resistance of the soil under the bottom end of the driven pile  $R_s$ , kPa, according to the probing data at the point under consideration should be determined by the formula:

$$R_s = \beta_1 q_s, \quad (4)$$

where  $\beta_1$  is the transition coefficient from  $q_s$  to  $R_s$ , taken from Table 7.16;  $q_s$  is the average value of soil resistance, kPa, under the probe tip, obtained from experience, in the area located within one diameter  $d$  above and four diameters  $4d$  below the pile tip mark of the designed pile (where  $d$  is the diameter of a circular or side of a square or larger side of a rectangular cross-section of the pile, m).

The average value of the ultimate resistance of the soil on the lateral surface of the driven pile  $f$ , kPa, according to soil probing data at the point under consideration should be determined:

$$f = \frac{\sum \beta_i f_{si} h_i}{h}, \quad (5)$$

where  $\beta_i$  — coefficient taken according to Table 7.16;  $f_{si}$  — average resistance of the  $i$ -th layer of soil on the lateral surface of the probe, kPa;  $h_i$  — thickness of the  $i$ -th layer of soil, m.

### Step 1. Static well sounding data processing. Python algorithm

The algorithm of this stage is presented in the diagram in Fig. 2.

The task of step 1 is to convert the unprepared static sounding results into a convenient form for further processing by the algorithm in Grasshopper. The algorithm results are calculated values of bearing capacities of piles of different types for different pile lengths (depths) —  $[F_d]$ .

#### Input parameters

The input parameters in step 1 are:

1. Coefficients from regulations.
2. Static sensing results.
3. Probing and pile markings.
4. Characteristics of pile types.
5. AutoCAD file with information on load positions and values.

#### Calculation of pile geometric characteristics

Absolute heel marks  $H_{p,i}$  and pile lengths  $L_i$  are calculated for all probing points (depths) (see Fig. 3) for

this purpose, firstly, the difference between the ground surface and pile head marks is calculated:

$$\Delta^0 = H_b^0 - H_p^0. \quad (6)$$

Next, the pile length is calculated as the difference between the depth of the cone penetration test point and the value of  $\Delta^0$ :

$$L_i = h_{CPT,i} - \Delta^0. \quad (7)$$

The heel mark of the pile is determined:

$$H_{p,i} = H_b^0 - h_{CPT,i}. \quad (8)$$

#### Calculation of pile bearing capacities

For each pile variant and for each cone penetration test data file, the bearing capacities of the piles at different pile lengths are determined.

Based on the type of pile, its area and the outer perimeter of the cross-section are determined.

For round piles:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}; \quad (9)$$

$$u = \pi d.$$

For square:

$$A = d^2; \quad (10)$$

$$u = 4d,$$

where  $d$  is the diameter and side in the case of round and square piles, respectively, m.

The thicknesses of the soil layers are calculated as the differences of two neighbouring pile lengths:

$$h_i = L_i - L_{i-1}. \quad (11)$$

Further, according to Section 7.3.10<sup>1</sup>, for each pile length,  $q_s$ , as the average value of  $q_s$  in the section located within one diameter  $d$ , above and four diameters,  $4d$ , below the pile tip mark of the design pile, shall be determined. Defined:

Pile tip bearing capacity value based on the formulas (3) and (4):

$$F_R = \beta_1 q_s \cdot A. \quad (12)$$

The value of the linear bearing capacity on the pile surface for the  $i$ -th layer ( $i$ -th depth), based on the formulas (3) and (5):

$$F_{f,i} = u \cdot \beta_i f_{si} h_i. \quad (13)$$

The total value of bearing capacity over the surface of the pile:

$$F_f = \sum F_{f,i}. \quad (14)$$

Ultimate resistance of the pile, according to the formula (3):

$$F_u = F_R + F_f. \quad (15)$$

In this way, the values of ultimate resistances for different piles are obtained for each available cone penetration test file. The statistical processing of these tables is then carried out.

**Table 2.** Price list of piles of different types

Pile type	Price, rub.
C60.30.4-8	5.990
C80.35.8-12	7.910
C90.35.6-12	8.570
C100.35.6-12	9.640
C110.35.6-12	10.510
C120.35.6-12	10.080
C130.35.7-13	13.990
C140.35.8-13	15.390
C150.35.8-13	16.590
C160.35.8-13	18.590
C120.40.6-13	14.390
C130.40.7-13	17.590
C150.40.8-13	20.240
C160.40.8-13	21.090

*Statistical processing according to GOST 20522–2012*

Statistical processing of the obtained ultimate resistances is carried out. Experimental data for statistical processing is a list of bearing capacity values obtained from the results of calculations on different cone penetration test files at a specific point (depth) for a specific pile type. This statistical processing is carried out for each pile type and length. The result is the calculated pile bearing capacity values.

In case the number of tests (cone penetration test files) is less than 6, then, according to clause 7.3.4<sup>1</sup>, the standard value of the ultimate resistance of the pile shall be equal to the lowest value, otherwise, in accordance with clause 6.2<sup>2</sup>, the normative value of the bearing capacity of the pile  $F_n$  shall be taken to be equal to the arithmetic mean of  $\bar{F}$  and is calculated according to the formula:

$$F_n = \bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{u,i}, \tag{16}$$

where  $n$  is the number of characterization determinations (number of files of cone penetration test);  $F_{u,i}$  is the bearing capacity of a certain type of pile at a certain depth for an individual cone penetration test,  $F_u$  from the formula (15).

Further, according to clause 6.3, the standard deviation is determined:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_n - F_{u,i})^2}. \tag{17}$$

<sup>2</sup> GOST 20522–2012. Soils. Methods of statistical processing of test results.

**Table 3.** Correlation matrix

Magnitude	Price	Length	Diameter	Volume
Price	1.00	0.94	0.72	0.97
Length	0.94	1.00	0.59	0.92
Diameter	0.72	0.59	1.00	0.84
Volume	0.97	0.92	0.84	1.00

A statistical check is performed to exclude possible errors. The partial value  $F_p$ , for which the condition is fulfilled, is excluded:

$$|F_n - F_{u,i}| > \nu S, \tag{18}$$

where  $\nu$  is a statistical criterion depending on  $n$  according to Table E.1 of Annex E.

According to clause 6.4, the coefficient of variation  $V$  of the bearing capacity of the pile and the accuracy (error) of its average value  $\rho_\alpha$  are calculated:

$$V = \frac{S}{F_n};$$

$$\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, \tag{19}$$

where  $t_\alpha$  is a coefficient taken from Table E.2 of Annex E, depending on the given one-sided confidence probability  $\alpha$  and the number of degrees of freedom  $K = n - 1$ . According to paragraph 7.3.4<sup>1</sup>,  $\alpha = 0.95$  is assumed.

According to clause 6.5, the soil reliability coefficient  $\gamma_g$  is calculated:

$$\gamma_g = \frac{1}{1 - \rho_\alpha}. \tag{20}$$

According to clause 6.6. the design value  $F_d$  of the bearing capacity of the pile is calculated:

$$F_d = \frac{F_n}{\gamma_g}. \tag{21}$$

In this way the design values of the bearing capacities of all types of piles for different pile lengths (depths) are calculated [ $F_d$ ].

*Cost estimation for different piles*

In this paper, the cost of piles is estimated by statistical processing of a pile price list freely available on the Internet (see Table 2). The table containing the type, cost and geometrical parameters of the pile is imported from the source data.

For each pair of values: price, length, diameter, volume of pile, Spearman rank correlation coefficient was determined and correlation matrix was made (see Table 3). The table shows that the price of a pile is most correlated with its volume, so the cost of the pile field is further estimated based on the total volume of all piles.

A linear regression model for the volume-price variables has been developed, from which the coefficients have been determined: the tangent of the slope of the linear volume-price relationship,  $\nu$ , and the or-

ordinate of the intersection with the  $Y$  axis,  $v_0$ . The coefficients found are used to estimate the price of the pile foundation in Grasshopper. The regression function is represented in the formula (22), the graph in Fig. 4:

$$P(V) = v_0 + v \cdot V, \quad (22)$$

where  $P$  — price of one pile;  $V$  — volume of one pile;  $v_0, v$  — regression parameters.

Thus, the cost of the entire pile field:

$$n \cdot P = n \cdot v_0 + v \cdot V_{tot}, \quad (23)$$

where  $n$  is the number of piles;  $V_{tot}$  is the total volume of all piles.

Total cost of pile foundation  $P_{tot}$ , mln rub., including the cost of pile sinking:

$$P_{tot} = \frac{n \cdot v_0 + v \cdot V_{tot} + L_{tot} \cdot l_0}{10^6}, \quad (24)$$

where  $L_{tot}$  is the total length of all piles;  $l_0$  is the cost of sinking 1 linear metre of pile.

### Step 2. Processing the foundation load file. Import AutoCAD to Rhino

#### Input parameters

AutoCAD file with information on load positions and values.

#### Reading data from an AutoCAD file

The file processed at the input is a plan of the building columns location with the values of loads coming from them (see Fig. 5). Columns, vertical loads and moments are located in separate layers. For correct processing of the file it is necessary to distribute the objects on certain layers (see Table 4), and import the .dwg file

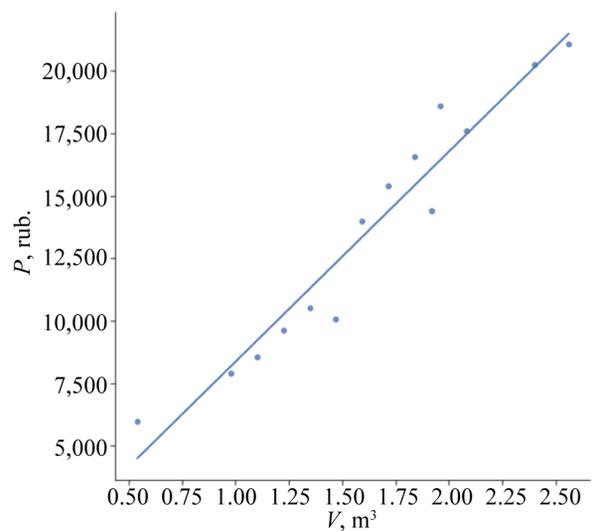


Fig. 4. Graph of the linear regression function

Table 4. AutoCAD file layer name

Object	Layer name
Columns	ren_column
Vertical load $N$ , kN	$N$
Torque $M_y$ , kN·m	$M_y$
Torque $M_x$ , kN·m	$M_x$

into Rhino. The Grasshopper algorithm then uses the layer names to determine the values of loads on the piles.

### Step 3. Determination of the optimal pile field. Grasshopper algorithm

The algorithm of step 3 is presented in Fig. 6.

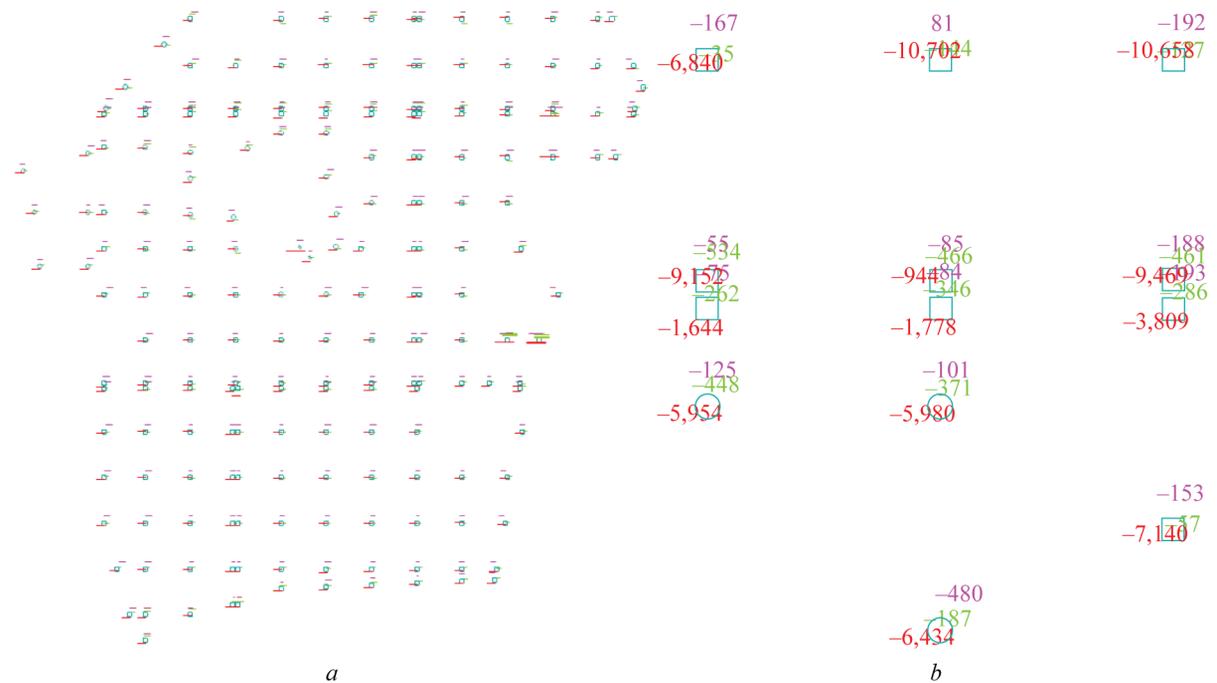


Fig. 5. Input AutoCAD file:  $a$  — whole building;  $b$  — fragment. Colors on the figure: turquoise — column contours; red — vertical load  $N$ , kN; pink — torque  $M_y$ , kN·m; light green — torque  $M_x$ , kN·m

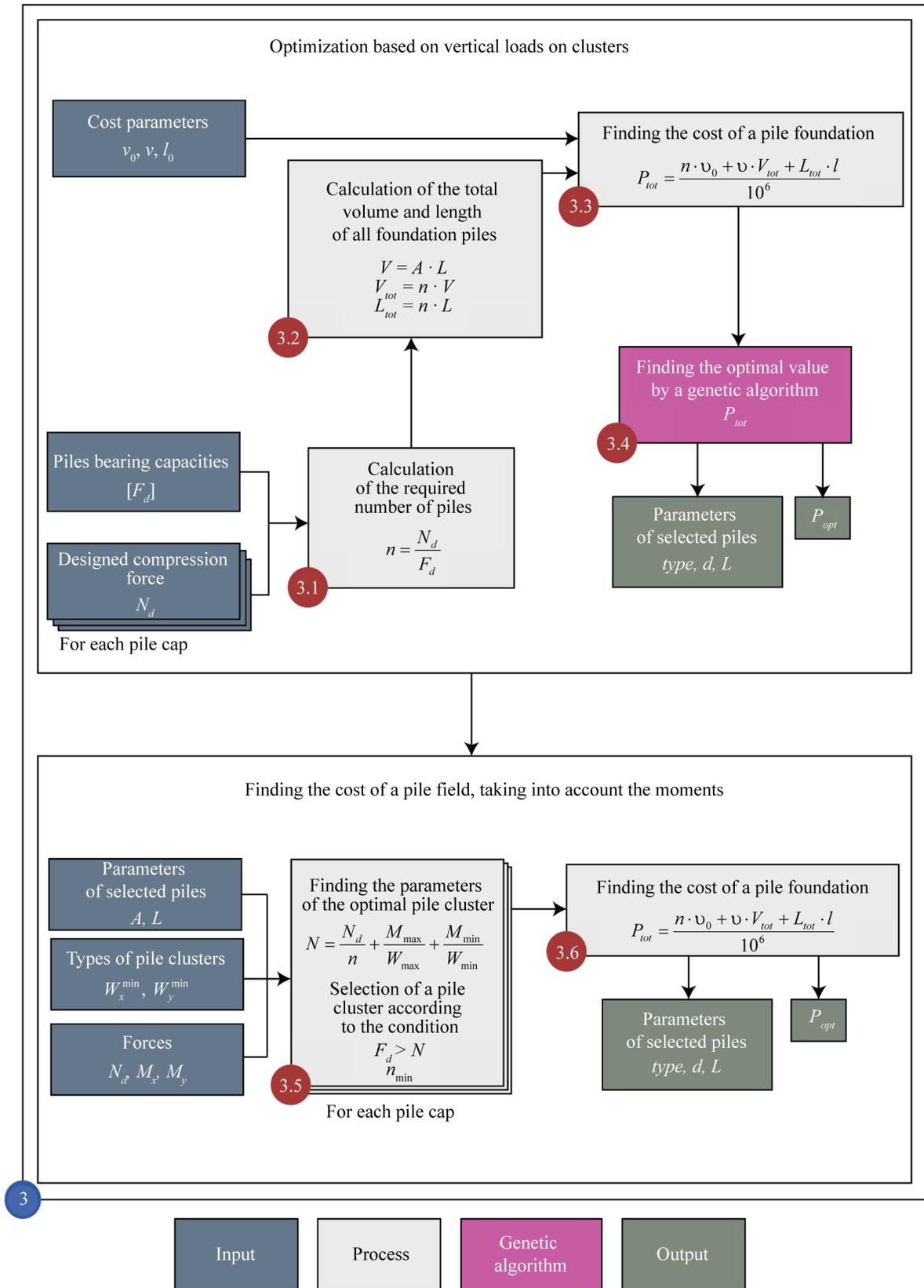


Fig. 6. Schematic diagram of the algorithm for determining the optimal pile field

The task of this algorithm is to optimize (determine the number and placement of piles in piles) the pile field for price based on pile loads and pile bearing capacities.

*Input parameters*

1. Rhino file with information about the position of loads and their values.

2. File containing calculated values of bearing capacities of piles of different types for different pile lengths (depths of embedment)  $[F_d]$ .
3. Values of monetary characteristics.

*Reading data from a Rhino file*

The algorithm determines the columns that are next to each other. If another column is located near one column within 1,200 mm radius from its centre, then they will belong to the same foundation and the loads from them are summed up. The result of file processing is a list of values of loads on  $N_d$ .

*Finding the optimum considering only vertical forces*

In the first iteration, the moments applied to the substructure are not taken into account. If only vertical forces are taken into account, the optimum pile lengths and cross sections are selected.

*Read data  $[F_d]$*

The file processed as input is a table of calculated values of bearing capacities of different pile types for different pile lengths. The result of the file processing is an array of bearing capacity values of different pile types at different pile lengths, pile lengths and pile volumes determined from the pile type code (diameter\_round/rectangular). For a square pile, the diameter is the side length.

*Calculation of the required number of piles*

The required number of piles for each footing is calculated using the formula and rounded upwards:

$$n = \frac{N_d}{F_d} \tag{25}$$

*Calculation of the total volume  $V_{tot}$  and total length,  $L_{tot}$  of all foundation piles*

The found required pile quantities for each footing are summed up and the total number of piles in the foundation is found. From this value, the total volume and total length of the required piles are calculated.

$$V = A \cdot L; \tag{26}$$

$$V_{tot} = n \cdot V;$$

$$L_{tot} = n \cdot L. \tag{27}$$

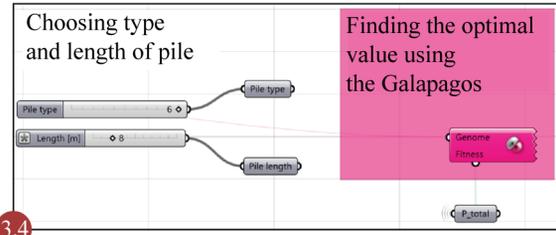
*Determining the cost of a pile foundation*

The cost of pile foundation, mln rub., is calculated by formula (24):

$$P_{tot} = \frac{n \cdot v_0 + v \cdot V_{tot} + L_{tot} \cdot l_0}{10^6}.$$

*Finding the optimal (minimum) foundation cost  $P_{opt}$*

The solution of the optimization problem is implemented using the Galapagos plug-in for Grasshopper, which applies a genetic algorithm to find the optimal value of the target function (fitness function). The vari-



**Fig. 7.** Application of the Galapagos plugin in Grasshopper to implement the genetic algorithm for finding the optimal solution

ables (genes) are the length and type of piles, which form the set of pile bearing capacities  $[Fd]$ , and the target function is the cost of pile foundation  $P_{tot}$ , which is minimized (see Fig. 7).

The Galapagos plugin implements the application of evolutionary algorithms to solve various problems<sup>3</sup>. Such algorithms are slow and do not guarantee an exact solution, but they can be applied to a wide range of problems, allow solving poorly formulated problems and retrieving the results of the solution while searching for it, provide easy interaction between the user and the algorithm.

**Generation of pile clusters**

This block generates different types of pile pads:  $\{2 \times 2, 3 \times 3, \dots, 11 \times 11\}$ ,  $\{2 \times 3, 3 \times 4, \dots, 11 \times 12\}$ ,  $\{2 \times 4, 3 \times 5, \dots, 11 \times 13\}$ .

According to clause 8.13<sup>1</sup>, the distance between the pile axes is assumed to be  $3d$ . According to clause 7.1.12<sup>1</sup>, to determine the design load on the pile, for each type of pile is determined:

- number of piles in the pile  $n$ ;
- sum of squares of distances from the main axis to the axis of each pile in the cluster  $\sum y_i^2$  and  $\sum x_i^2$ ;
- maximum distance from the main axis to the pile axis  $y_{max}$  and  $x_{max}$ .

The smallest resistance moments in the pile with respect to the  $X$  and  $Y$  axes are calculated (i.e. the calculation is carried out for the most loaded pile in the pile):

$$W_x^{min} = \frac{\sum y_i^2}{y_{max}}; \tag{28}$$

$$W_y^{min} = \frac{\sum x_i^2}{x_{max}}.$$

**Determination of the cost of the pile field taking into account the moments**

*Reading Moments*

The algorithm processes the Rhino input file and summarizes the moments belonging to a single arch (in

<sup>3</sup> I eat bugs for breakfast: evolutionary principles applied to problem solving. *Blog on WordPress.com*. URL: <https://ieatbugsforbreakfast.wordpress.com/2011/03/04/epatps01/> (accessed 12.02.2023).

**Table 5.** Table from the file “Betta\_f.csv”, containing the values of the coefficient  $\beta_f$ , taken according to Table 7.16<sup>1</sup>

soil_type	f_kPa	beta_i
sand	0	0.75
sand	20	0.75
sand	40	0.6
sand	60	0.55
sand	80	0.5
sand	100	0.45
sand	120	0.4
clay	0	1
clay	20	1
clay	40	0.75
clay	60	0.6
clay	80	0.45
clay	100	0.4
clay	120	0.3

**Table 6.** Table from the file “Betta1\_q.csv”, containing the values of the coefficient  $\beta_1$ , taken according to Table 7.16<sup>1</sup>

q_kPa	beta_1
0	0.9
1,000	0.9
2,500	0.8
5,000	0.65
7,500	0.55
10,000	0.45
15,000	0.35
20,000	0.3
30,000	0.2
100,000	0.2

**Table 7.** Fragment of the table of input data of CPT results

depth_m	q_MPa	f_kPa	soil_type	depth_m
2.3	2.8	0.8	sand	2.3
2.4	13.8	20	sand	2.4
2.5	11.7	41	sand	2.5
2.6	16	47	sand	2.6
2.7	17.5	49	sand	2.7
2.8	18.1	51	sand	2.8
2.9	18.2	48	sand	2.9
...	...	...	...	...

the case when there are several columns in one arch). In this way, the total moments  $M_x$  and  $M_y$  are determined for each of the columns. Then, the largest of the values  $M_x$  and  $M_y$  is assigned the designation  $M_{max}$ , the smallest —  $M_{min}$ .

**Table 8.** Table from the file “Boring\_elev.csv”, containing values of marks

CPT_label	bore_elevation_m	pile_top_elevation_m	CPT_top_elevation_m
1_18	38.9	38.5	36.6
5_18	38.5	38.5	37.2
10_18	38.1	38.5	36.6
11_18	38.5	38.5	36.4
12_18	38.2	38.5	36.4
15_18	37.8	38.5	36.5
18_18	37.9	38.5	35.5
19_18	37.6	38.5	33.9
25_18	37	38.5	33.7

**Table 9.** Table from file “pile\_variants.csv” containing pile variants

type	diameter
circular	0.3
rectangular	0.3
circular	0.35
rectangular	0.35
circular	0.4
rectangular	0.4

*Selection of pile clusters*

The type of pile with the smallest number of piles, which passes the strength condition, is selected for each foundation frame according to the formulas (1) and (2):

$$F_d \geq N; \tag{29}$$

$$N = \frac{N_d}{n} + \frac{M_{max}}{W_{max}} + \frac{M_{min}}{W_{min}}, \tag{30}$$

where  $W_{max}$  and  $W_{min}$  correspond to  $W_x^{min}$  and  $W_x^{min}$ .

After selecting the appropriate cluster type for each foundation frame, calculations are made:

- efficiency factor  $k_{M/N}$ :

$$k_{M/N} = \frac{N}{N_d}; \tag{31}$$

- ratio of added piles:

$$\frac{n_M}{n}. \tag{32}$$

The presence of wrenching forces is checked:

$$F_{wr} = \frac{N_d}{n} - \frac{M_{max}}{W_{max}} - \frac{M_{min}}{W_{min}} < 0. \tag{33}$$

*Calculating the final price*

Based on the new value of the total number of piles required, the total volume and length of the piles are

**Table 10.** Table from the file “Student.csv” containing the values of the coefficient  $t_\alpha$

$K = n - 1$	0.85	0.9	0.95	0.975	0.98	0.99
3	1.25	1.64	2.35	3.18	3.45	4.54
4	1.19	1.53	2.13	2.78	3.02	3.75
5	1.16	1.48	2.01	2.57	2.74	3.36
6	1.13	1.44	1.94	2.45	2.63	3.14
7	1.12	1.41	1.9	2.37	2.54	3
8	1.11	1.4	1.86	2.31	2.49	2.9
9	1.1	1.38	1.83	2.26	2.44	2.82
10	1.1	1.37	1.81	2.23	2.4	2.76
11	1.09	1.36	1.8	2.2	2.36	2.72
12	1.08	1.36	1.78	2.18	2.33	2.68
13	1.08	1.35	1.77	2.16	2.3	2.65
14	1.08	1.34	1.76	2.15	2.28	2.62
15	1.07	1.34	1.75	2.13	2.27	2.6
16	1.07	1.34	1.75	2.12	2.26	2.58
17	1.07	1.33	1.74	2.11	2.25	2.57
18	1.07	1.33	1.73	2.1	2.24	2.55
19	1.07	1.33	1.73	2.09	2.23	2.54
20	1.06	1.32	1.72	2.09	2.22	2.53
25	1.06	1.32	1.71	2.06	2.19	2.49
30	1.05	1.31	1.7	2.04	2.17	2.46
40	1.05	1.3	1.68	2.02	2.14	2.42
60	1.05	1.3	1.67	2	2.12	2.39

recalculated and the cost of the pile foundation is specified according to formula (24).

**RESEARCH RESULTS**

The algorithms described above are implemented using Python language — step 1, Rhino 3D modelling software — step 2, and Grasshopper visual programming language — step 3. The configuration and optimum cost of the pile foundation is determined, taking as input the design of the job being developed by Renaissance Construction.

**Static well sensing data processing. Python algorithm**

The input data in Step 1 are Excel spreadsheets, the contents of these spreadsheets are shown in Table 5–11. The input data are:

1. Files “Betta\_f.csv” and “Betta1\_q.csv” with values of coefficients  $\beta_i$  and  $\beta_1$  taken according to Table 7.16.<sup>1</sup> (see Table 5–6).
2. Set of static sounding results files “CPTs\[file].csv”. Each file in the “CPTs” directory contains a table of values: qsi, fsi, soil type for different probing points (depths) hCPTi (see Table 7).
3. File “Boring\_elev.csv” containing the values of the marks: boring (ground surface) Hb0, pile head Hp0, probing start level HCPT0 for each individual statzoning (see Table 8).

**Table 11.** Table fragment from the file “v\_criteria.csv”, containing values of the statistical criterion  $v$

$n$	$v$
3	1.41
4	1.71
5	1.92
6	2.07
7	2.18
8	2.27
9	2.35
...	...

4. File “pile\_variants.csv” containing pile variants. Each variant corresponds to circular or rectangular shape and diameter  $d$ ,  $m$  (see Table 9).

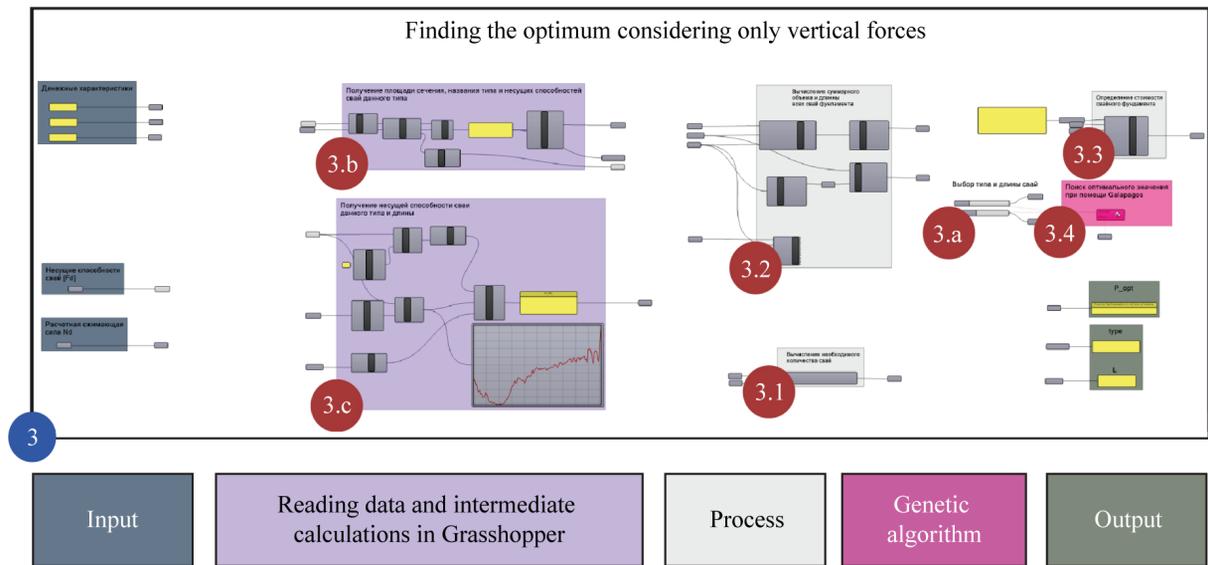
5. The file “Student.csv” containing the values of the coefficient  $t_\alpha$ , taken according to Table E2 of Annex E<sup>2</sup> (see Table 10).

6. File “v\_criteria.csv” containing the values of the statistical criterion  $v$ , taken according to Table E1 of Annex E<sup>2</sup> (see Table 11).

All input data are imported into the data frame tables of the Pandas (Python) library and transformed for convenient processing. Then, the data from the tables are processed according to the algorithm described in the previous section: geometric characteristics of piles and their bearing capacities are calculated. The result

**Table 12.** Fragment of the table of carrying capacities, the result of the algorithm of step 1, file “pile\_bc.csv”

pile_length_m	0.3_circular	0.3_rectangular	0.35_circular	0.35_rectangular	0.4_circular	0.4_rectangular
1.6	164.13	208.98	–	–	–	–
1.7	230.50	293.48	352.96	449.40	454.33	578.47
1.8	271.53	345.73	401.08	510.67	497.84	633.87
1.9	278.20	354.22	393.76	501.35	477.07	607.42
2.0	268.43	341.77	372.25	473.96	449.32	572.09
2.1	272.77	347.30	345.93	440.46	412.81	525.60
2.2	207.13	263.73	331.24	421.74	395.01	502.94
2.3	204.11	259.89	269.78	343.50	325.40	414.32
2.4	170.66	217.29	249.38	317.52	301.15	383.44
2.5	175.72	223.73	259.16	329.97	329.77	419.87
2.6	192.29	244.83	275.29	350.50	339.34	432.06
2.7	175.15	223.01	231.49	294.74	281.40	358.29
2.8	177.96	226.59	231.56	294.83	282.23	359.34
2.9	178.05	226.70	225.12	286.63	273.36	348.05
3.0	152.15	193.72	190.52	242.58	231.21	294.39
3.1	143.40	182.58	181.16	230.67	226.66	288.59
3.2	144.70	184.24	188.82	240.41	237.28	302.11
3.3	171.36	218.18	196.62	250.35	242.39	308.62
...	...	...	...	...	...	...



**Fig. 8.** Search for optimum considering only vertical forces, Grasshopper algorithm: 3.a — selection of the type and length of piles; 3.b — obtaining the cross-sectional area, type name and bearing capacity of piles of a given type; 3.c — obtaining the bearing capacity of a pile of a given type and length; 3.1 — calculating the required number of piles; 3.2 — calculating the total volume and length of all foundation piles; 3.3 — determining the cost of the pile foundation; 3.4 — finding the optimum value of the foundation cost using Galapagos

of this processing is the table of bearing capacities, which is saved in the file “pile\_bc.csv”, see Table 12.

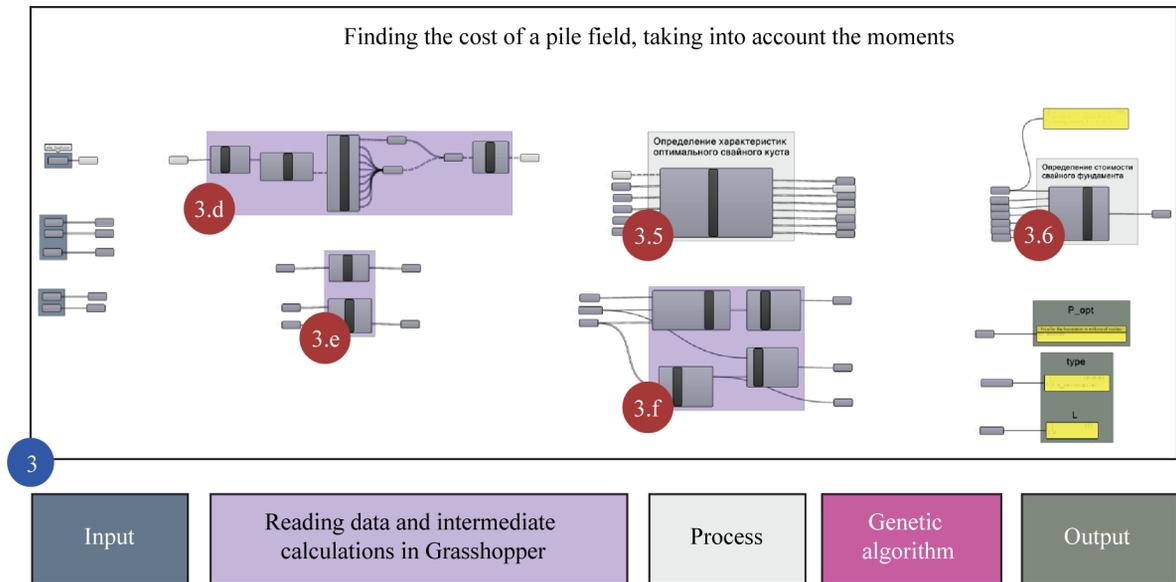
**Pile cost estimation**

The input data is the file “pile\_prices.csv” containing the cost values of the different piles (see Table 2).

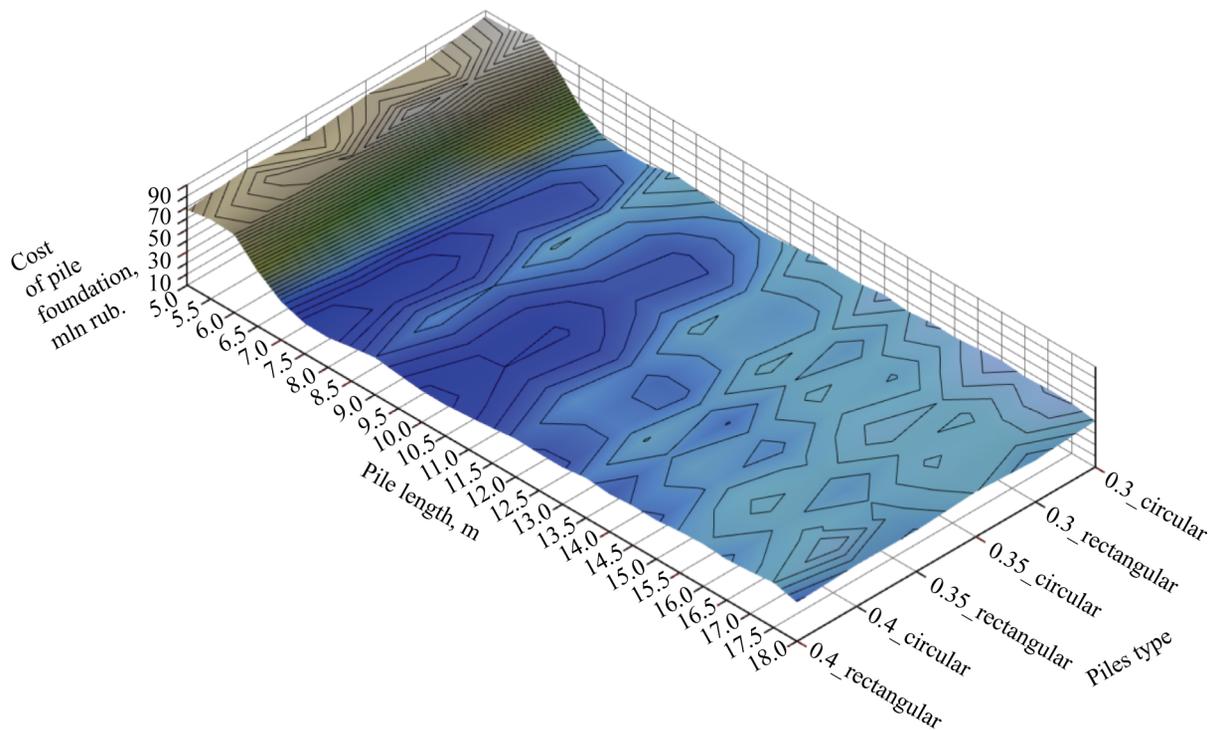
A linear regression model for the volume-price variables was created using this data, from which the coefficients were determined:

$$v_0 = -53.37;$$

$$v = 8,416.95.$$



**Fig. 9.** Determining the cost of a pile field, taking into account the moments, Grasshopper algorithm: 3.d — data processing of pile clusters; 3.e — processing of data on loads and bearing capacities of piles; 3.5 — determination of the characteristics of the optimal pile cluster; 3.f — determination of the total number, length and volume of all piles; 3.6 — finding the cost of pile foundation



**Fig. 10.** Optimization space:  $X$  — pile type (diameter\_shape);  $Y$  — pile length, m;  $Z$  — price of pile field, mln rub.

The cost of sinking 1 p.m. of pile is taken according to the experienced data of Renaissance Construction:

$$l_0 = 650.$$

**Initial foundation data. AutoCAD file**

As input data, the design of the job being developed by Renaissance Construction as a graphic job for the four

dations in AutoCAD drawing format was accepted.

**Determination of the optimum pile field**

The schematics in Fig. 8, 9 show the schematics of the algorithm in Grasshopper to determine the optimal pile foundation.

Based on the foundation cost calculations, an optimization space is constructed, see Fig. 10.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

By implementing the developed algorithm, the following results are available:

1. Statistical processing:
  - the importance of the bearing capacity of piles;
  - price of piles.
2. Visualization of the optimization space.
3. Generation of pile cluster options and calculation of their parameters.
4. Information on selected pile clusters:
  - utilization rate;
  - selected optimal pile cluster;
  - presence of stretched piles in the clusters;
  - comparison of the optimization results with the actual ones from the parameters of the clusters.
5. Export to text, tabular, graphical formats.

The developed algorithm can be used for preliminary calculation and quick evaluation of pile founda-

tion variants. The required data can be generated from calculation programmes.

Alternatively, one can perform the selection and optimization directly in Python code, using Grasshopper and Rhino only to extract the effort and then visualize the results.

Directions for further research:

- incorporate the layering of the geotechnical engineering element (GEE) into the computational model;
- evaluate the load carrying capacity of each bund and its cluster independently and according to the buried GEE beneath it;
  - add optimization by clustering by position in the pile field and/or loads (combinations of different pile configurations);
  - incorporate into the model and take into account the non-linearity of the behaviour of the soil mass, doing so without compromising the speed of the algorithm;
  - incorporate calculations for loss of overall stability of pile foundation footings into the model.

## REFERENCES

1. Viktorova O.L., Fateev D.A. Justification of the adopted version of the structural solution of the foundations. *Modeling and Mechanics of Constructions*. 2021; 13:184-193. EDN NHOLMJ. (rus.).
2. Sokolov N.S. Choice of drill piles type by technical and economic parameters. *New in architecture, design of construction structures and reconstructions : materials of the IV International (X All-Russian) Conference*. 2018; 430-438. EDN MBODWE. (rus.).
3. Melnikov V.A., Alekseev N.S., Ionov K.I. A comparative analysis of methodologies for calculating precipitation pile foundations. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2015; 9-1(53):37-45. EDN ULQMFZ. (rus.).
4. Stolnikova K.A., Petrochenko M.V. Dependence of the estimated cost of pile foundation works on the level of detail (LOD) of the BIM model. *Civil Engineering Department Science Week : proceedings of the All-Russian Conference in 3 parts*. 2021; 64-67. EDN AUVMEV. (rus.).
5. Georgiev N.G., Shumilov K.A. The use of visual programming in the modeling of building structures. *Innovation. Science. Education*. 2021; 34:1418-1422. EDN AAXTTM. (rus.).
6. Banihashemi S., Tabadkani A., Hosseini M.R. Integration of parametric design into modular coordination: A construction waste reduction workflow. *Automation in Construction*. 2018; 88:1-12. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.026
7. Girardet A., Botton C. A parametric BIM approach to foster bridge project design and analysis. *Automation in Construction*. 2021; 126:103679. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103679
8. Nadyrshine N., Nadyrshine L., Khafizov R., Ibragimova N., Mkhitarian K. Parametric methods for constructing the Islamic ornament. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:09009. DOI: 10.1051/e3sconf/202127409009
9. Freitas J., Cronemberger J., Soares R.M., Amorim C.N.D. Modeling and assessing BIPV envelopes using parametric Rhinoceros plugins Grasshopper and Ladybug. *Renewable Energy*. 2020; 160:1468-1479. DOI: 10.1016/j.renene.2020.05.137
10. Preisinger C. Linking structure and parametric geometry. *Architectural Design*. 2013; 83(2):110-113. DOI: 10.1002/ad.1564
11. He L., Li Q., Gilbert M., Shepherd P., Rankine C., Pritchard T. et al. Optimization-driven conceptual design of truss structures in a parametric modeling environment. *Structures*. 2022; 37:469-482. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.048
12. Lartigue B., Lasternas B., Loftness V. Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. *Indoor and Built Environment*. 2014; 23(1):70-80. DOI: 10.1177/1420326X13480224
13. Li J., Zhao H. Multi-objective optimization and performance assessments of an integrated energy system based on fuel, wind and solar energies. *Entropy*. 2021; 23(4):431. DOI: 10.3390/e23040431
14. Wortmann T., Natanian J. Multi-objective optimization for zero-energy urban design in China: A benchmark. *Proceedings of the SimAUD*. 2020; 203-210.
15. Benjaoran V., Peansupap V. Grid-based construction site layout planning with particle swarm optimisation and travel path distance. *Construction Management and Economics*. 2020; 38(8):673-688. DOI: 10.1080/01446193.2019.1600708
16. Turrin M., von Buelow P., Stouffs R. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic

algorithms. *Advanced Engineering Informatics*. 2011; 25(4):656-675. DOI: 10.1016/j.aei.2011.07.009

17. Yang D., Sun Y., Turrin M., Von B.P., Paul J. Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes: a case study. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. 2015.

18. Rutten D. Galapagos: On the Logic and Limitations of Generic Solvers. *Archit Design*. 2013; 83; 132-135. DOI: 10.1002/ad.1568

19. Petrash A.V., Petrash R.V. The choice of the type of pile foundations, subject to the most complete use of their bearing capacity by material. *The Future of Science — 2013 : Proceedings of the International Youth Scientific Conference*. 2013; 170-173. EDN TMFFTT. (rus.).

20. Oh Y.P., Mohamad Ismail M.A. Pile length optimization by using shaft friction and end bearing curves developed from instrumented pile load test. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2023; 129:103278. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103278

*Received February 24, 2023.*

*Adopted in revised form on May 25, 2023.*

*Approved for publication on September 26, 2023.*

**B I O N O T E S :** **Pavel N. Nedviga** — assistant of higher school of industrial, civil and road construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; ID RSCI: 4626-6726, ResearcherID: HCH-2842-2022, ORCID: 0000-0003-0857-8301; pavel.nedviga@gmail.com;

**Anna A. Kukina** — senior lecturer of higher school of industrial, civil and road construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; ID RSCI: 1069471, Scopus: 57224191176, ResearcherID: AAB-9076-2021, ORCID: 0000-0003-4271-7408; kukina\_aa@spbstu.ru;

**Maksim A. Tachkov** — student of higher school of industrial, civil and road construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7831-7548; politech\_maks21992199@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Pavel N. Nedviga — development of the method.*

*Anna A. Kukina — scientific editing.*

*Maksim A. Tachkov — writing of the article.*

*Authors have no conflict of the interests.*