

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 519.237.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1401-1418

Оценка факторов и модель производства свайных работ при строительстве и восстановлении зданий

Александр Алексеевич Руденко, Сергей Викторович Сазонов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования объясняется тем обстоятельством, что вопросы расчета, оценки несущего основания, конструкционного проектирования свай проработаны достаточно подробно, а вопросы оценки эффективности производства свайных работ на этапах нового строительства и различных видов ремонта изучены недостаточно. Целью исследования является определение наиболее значимых факторов, влияющих на трудоемкость устройства свайных фундаментов, с разработкой модели их воздействия на результирующий показатель. Задача исследования — определить и рассчитать вес факторов, влияющих на трудоемкость свайных работ, и разработать математическую модель, учитывающую характер влияния наиболее значимых факторов.

Материалы и методы. Для достижения цели и задач исследования применялись экспертная оценка, методы статистической обработки, оценки информации, что позволило выявить зависимость между переменными и определить количественные характеристики их учета.

Результаты. Разработана математическая модель по оценке трудоемкости работ при устройстве свайных фундаментов, позволяющая выявить характер влияния значимых факторов на результирующий показатель. В качестве наиболее рационального и универсального по совокупности преимуществ в исследовании принят метод вдавливания свай с дополненной в данном исследовании технологией производства работ.

Выводы. Выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на эффективность свайных работ. Разработанная математическая модель (уравнения регрессии) комплексно учитывает степень влияния каждого фактора на результирующий показатель Y_i (трудозатраты), что позволит эффективно планировать работы по устройству фундаментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: регрессионный анализ, экспертная оценка, трудоемкость, свайные фундаменты, участок строительства, факторы оценки

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта НПР СПбГАСУ № 20-НПР-25 «Организация восстановления и ремонта зданий после взрывного воздействия на основе комплексного подхода с использованием лазерного сканирования, нейросетевого и 3-D моделирования».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Руденко А.А., Сазонов С.В. Оценка факторов и модель производства свайных работ при строительстве и восстановлении зданий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1401–1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1401-1418

Автор, ответственный за переписку: Александр Алексеевич Руденко, rudenkoa.a@mail.ru.

Factor assessment and piling production model for construction and restoration of buildings

Aleksandr A. Rudenko, Sergey V. Sazonov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is explained by the fact that the issues of calculation, assessment of the bearing base, and structural design of piles have been worked out in sufficient detail, while the issues of evaluating the effectiveness of pile work at the stages of new construction and various types of repairs have not been sufficiently investigated. The aim of the study is to identify the most significant factors affecting the complexity of pile foundations with the development of a model of their impact on the resulting indicator. The objective of the study is to determine and calculate the weight of factors affecting the complexity of pile work and to develop a mathematical model that takes into account the nature of the influence of the most significant factors.

Materials and methods. To achieve the goals and objectives of the study, expert assessment, statistical processing methods, and information evaluation were used, which made it possible to identify the relationship between variables and quantify their accounting.

Results. A mathematical model has been developed to assess the complexity of work in the construction of pile foundations, which makes it possible to identify the nature of the influence of significant factors on the resulting indicator. As the most

rational and universal, according to the set of advantages, the study adopted the method of "pile pressing", with the technology of work supplemented in this study.

Conclusions. The conducted study made it possible to identify and study the most significant factors affecting the efficiency of pile work. The developed mathematical model (regression equations) allowed to comprehensively take into account the degree of influence of each factor on the resulting indicator Y_i (labour costs), which will allow to effectively plan the work on the construction of foundations.

KEYWORDS: regression analysis, expert assessment, labour intensity, pile foundations, construction site, assessment factors

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of grant of the Scientific and Practical Works of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering No. 20-NPR-25 "Organization of restoration and repair of buildings after explosive impact based on an integrated approach using laser scanning, neural network and 3-D modeling".

FOR CITATION: Rudenko A.A., Sazonov S.V. Factor assessment and piling production model for construction and restoration of buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1401-1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1401-1418 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr A. Rudenko, rudenkoa.a@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Новое строительное и различные виды ремонта (восстановления) обладают большим разнообразием конструкций, применяемых для создания устойчивых и долговечных фундаментов зданий и сооружений. При этом следует отметить, что достаточно часто используются свайные фундаменты, обладающие неоспоримыми преимуществами.

Построенные и эксплуатируемые в настоящее время, а также проектируемые здания все чаще характеризуются:

- большой высотой (Бурдж-Халифа в ОАЭ, Шанхайская башня в КНР, Останкинская башня в России, Си-Эн Тауэр в Канаде и т.д.);
- массой (Глобальный центр «Новый век» в Китае; терминал из 3 аэропортов в ОАЭ; Абрадж аль-Бейт в Мекке, Саудовская Аравия и т.д.);
- слабым несущим грунтовым основанием (что характерно для многих эксплуатируемых и строящихся зданий в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области, а также на других территориях).

Исследованию расчета свайных фундаментов посвящены работы многих ученых, в том числе П.А. Аббасова, А.А. Бартоломея, Б.В. Бахолдина, А.С. Буслова, Г.И. Глушкова, В.В. Верстова, А.Н. Гайдо, Б.В. Гончарова, А.А. Григорян, Н.М. Дорошкевич, К.С. Завриева, В.В. Знаменского, В.А. Ильичева, Э.В. Костерина, А.А. Луга, Ю.Г. Трофименкова, В.М. Улицкого, В.Г. Федоровского, С.Г. Богова, П.А. Коновалова, М.Б. Лисюка, Р.А. Мангушева, В.М. Улицкого, А.Г. Шашкина, R. Cooke, T. Dawson, S. Lacasse, H. Matlock, L. Reese, P. Sparrevika, H. Poulosa и др. Вместе с тем комплексная оценка эффективности устройства свайных фундаментов исследована недостаточно.

Оценка эффективности выполнения свайных работ в процессе нового строительства изучена в большей степени, чем эффективность свайных работ при восстановлении, ремонте и реконструкции зданий. Это необоснованно, так как в послед-

нее время в России и в других странах для большого количества зданий требуется проведение работ по реконструкции, ремонту и восстановлению. Последнее, кроме всего прочего, является актуальным ввиду повреждения существенного количества зданий на территориях с введенным режимом контртеррористической операции, где при восстановлении предусматриваются и процессы реконструкции с устройством пристроек, мансард, надстройкой дополнительных этажей, заменой несущих конструкций и т.п. В таких случаях обычно возникает необходимость в усилении или устройстве дополнительных свайных фундаментов.

Инженерно-геологические условия строительной площадки в значительной степени определяют типы фундаментов, а также прочность и устойчивость оснований зданий и сооружений [1–3].

Свайные фундаменты, как один из наиболее эффективных способов передачи нагрузки на слабые и неустойчивые грунты, подтвердили важность в инженерной практике. Однако успешность их реализации во многом зависит от корректной оценки трудоемкости работ, осуществляемых при устройстве свай, что требует глубокого понимания влияния различных факторов.

Планируя оценку факторов, в качестве критерия оценки эффективности свайных работ были приняты трудозатраты, определяющие и продолжительность свайных работ, и их сметную стоимость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С появлением новых методов строительства, строительных конструкций, машин и механизмов необходимо более тщательное технико-экономическое сравнение возможных вариантов устройства фундаментов, что актуально с увеличением объемов капитального строительства. Под строительство отводятся все чаще площадки со сложными для строительства инженерно-геологическими условиями. Вследствие увеличения пролетов в промышленном строительстве

и числа этажей в гражданском строительстве резко возрастают нагрузки на фундаменты [4].

Для оценки трудоемкости в этой области часто полагаются на эмпирические данные и интуитивный подход, что часто приводит к значительным отклонениям от реальных затрат времени и ресурсов. В связи с этим возникает необходимость в апробированных аналитических подходах, которые позволят не только повысить точность оценки трудоемкости, но и оптимизировать процессы проектирования, выбора методов производства и выполнения работ.

Регрессионный анализ, как метод математической статистики, дает возможность выявлять зависимость между множеством переменных и находить количественные характеристики, которые могут служить основанием для принятия обоснованных решений в проектировании и планировании строительных работ [5, 6].

В настоящей статье рассматривается применение регрессионного анализа как инструмента, позволяющего определить ключевые параметры, влияющие на оценку трудоемкости устройства свайных оснований от различных факторов, и выявить зависимость.

В процессе формирования и выбора решения указанной задачи применен метод экспертных оценок. Его сущность заключается в рациональной организации проведения экспертами анализа задачи с количественной оценкой суждений и обработкой их результатов. Мнение группы экспертов в обобщенном виде принимается за решение задачи. При принятии решений эксперты выполняют информационную и аналитическую работу по формированию и оценке решений. Все многообразие решаемых ими задач сводится к одному: формированию и оценке характеристик объектов. В качестве экспертов выступили шесть специалистов, обладающих огромным практическим и теоретическим опытом и необходимыми компетенциями в области фундаментостроения, проектирования, геотехники, а также производства работ по устройству свайных оснований, что повышает качество анализа данных.

За критерий оценки устройства свайных оснований современными методами в зависимости от расположения участка строительства был принят показатель трудоемкость Y_i . При этом для усреднения и возможности оценки применительно к различным методам и технологиям устройства свайных оснований Y_i считаем на 1 м^3 произведенного свайного фундамента.

В результате опроса группы экспертов, определения согласованности мнений и обобщения данных отобрано 33 фактора, оказывающих влияние на Y_i в зависимости от расположения площадки строительства и применяемой технологии/метода устройства свайного основания.

На основании нормативных документов^{1, 2, 3} и с учетом практической деятельности массового применения и обоснования выбора технологий, экономических факторов и эксплуатационных требований, анализа грунтовых условий, в которых производилось заложение свайных фундаментов, были выделены следующие методы: ударный метод (забивкой), вдавливанием, буровые (выполняемые на месте) [7–9].

Использование любой технологии представляет опасность для окружающей застройки, так как технологические процессы, связанные с производством работ, оказывают негативные воздействия на ближайшие здания и сооружения [10–12].

В этой связи выбор свайных технологий следует проводить в зависимости от расположения участка строительства относительно окружающей застройки и инженерно-геологических характеристик его разреза. По расположению участка строительства выделено три варианта: в исторической части города; в квартале нового строительства; в современном застроенном квартале [13–16].

Анализ исследований [15, 16] позволил определить факторы, влияющие на показатель трудозатраты. Факторы, воздействующие на Y_i , вначале были сформированы в группы (рис. 1), что сделало анализ более структурированным и понятным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Далее анализ [17–20] каждой из групп дал возможность сформировать факторы по каждой группе, которые могут оказывать влияние на эффективность

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16.12.2016 № 970/пр; дата введения 17.06.2017 / Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича (НИИОСП им. Н.М.Герсевича) — институт АО «НИЦ “Строительство”». М., 2016. 204 с.

² СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85 : утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14.12.2021 № 926/пр; дата введения 15.01.2022 / Акционерное общество «Научно-исследовательский центр “Строительство”» (АО «НИЦ “Строительство”») — Научно-исследовательский проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича (НИИОСП им. Н.М. Герсевича). М., 2021. 113 с.

³ ТСН 50-302–2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге : принят распоряжением Комитета по строительству Правительства Санкт-Петербурга от 05.08.2004 № 11 / Санкт-Петербургская экспертно-консультативная комиссия по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям. М., 2004. 58 с.

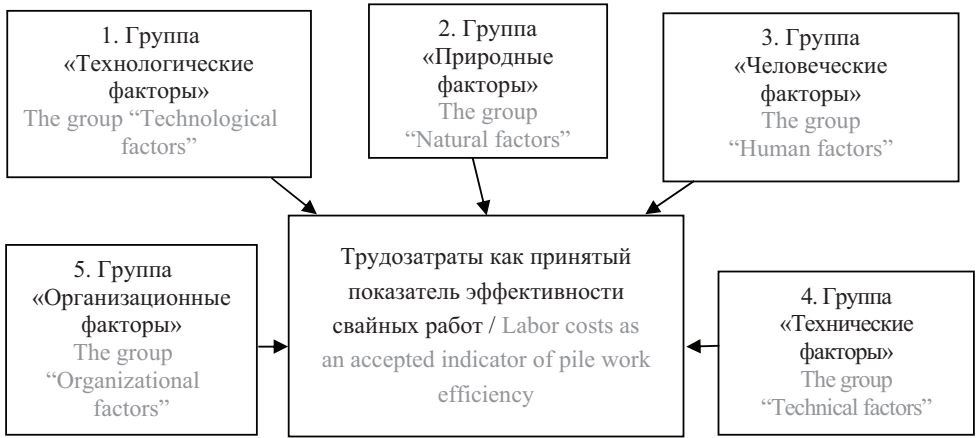


Рис. 1. Структурная модель учета факторов, влияющих на эффективность работ по устройству фундаментов
Fig. 1. Structural model of factors influencing the efficiency of foundation construction

Табл. 1. Элементы структурной модели учета факторов, влияющих на трудоемкость Y_i выполнения работ по устройству свайных фундаментов
Table 1. Elements of the structural model of factors affecting labour intensity Y_i of pile foundation work

Номер Number	Наименование фактора Name of the factor	Группа факторов A group of factors
1.1	Тип и параметры свай (заводского изготовления, буронабивные, длина, вес, сечение/диаметр свай, тип основной арматуры) Type and parameters of piles (factory type, boring, length, weight, cross-section/diameter of piles, main type fittings)	1. Технологические факторы Technological factors
1.2	Используемая технология (забивка свай, вдавливание, выполняемые на месте буронабивные) The technology used (pile driving, indentation, on-site drilling)	
1.3	Параметры свайного поля (расстояние, количество и кучность расположения свай) The technology used (pile driving, deepening, on-site drilling)	
1.4	Основные технологические машины (мощность, тип применяемых машин) Main technological machines (power, type of machines used)	
1.5	Техническое обслуживание оборудования (ремонтпригодность на объекте), аварийность Equipment maintenance (maintainability at the facility), accident rate	
1.6	Сложность монтажа и демонтажа оборудования The complexity of installation and disassembly of equipment	
1.7	Сроки выполнения работ (жесткие или гибкие) Deadlines for work (rigid or flexible)	
2.1	Грунтовые условия (уровень грунтовых вод, плотность, состав) Ground conditions (groundwater level, density, composition)	2. Природные факторы Natural factors
2.2	Гидрологические условия площадки строительства (уровень подземных вод) Hydrological conditions of the construction site (groundwater level)	
2.3	Метеорологические условия (изменение погодных условий, ветер, температура, осадки) Meteorological conditions (changes in weather conditions, wind, temperature, precipitation)	
2.4	Неблагоприятные условия и ограничения (наличие и расположение препятствий, над/подземных препятствий) Adverse conditions and restrictions (presence and location of obstacles, above/obstacles)	
2.5	Степень подготовки площадки (подготовительные работы, выемка, расчистка, насыпь) The degree of site preparation (preparatory work, excavation, clearing, embankment)	
2.6	Изменение состояния грунта в процессе выполнения работ Changing the condition of the soil during the work	

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер Number	Наименование фактора Name of the factor	Группа факторов A group of factors
3.1	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	3. Человеческие факторы Human factors
3.2	Количество работников (размер бригады, звена и продолжительность смены) Number of employees (team size, link, and shift duration)	
3.3	Рынок труда (наличие рабочих соответствующей квалификации) Labour market (availability of workers with appropriate qualifications)	
3.4	Разработка и использование технологий (новые методы и подходы) Development and use of technologies (new methods and approaches)	
4.1	Качество и доступность основных материалов (бетон, арматура, готовые ж/б сваи) Quality and availability of basic materials (concrete, rebar, ready-made railway piles)	4. Технические факторы Technical instructors
4.2	Механизация процессов Mechanization of processes	
4.3	Наличие необходимого количества техники Availability of the required amount of equipment	
4.4	Потребность в дополнительных исследованиях (геодезических, геотехнических, дополнительные разметка и измерения) The need for additional research (geodetic, geotechnical, additional marking and measurements)	
4.5	Уровень автоматизации процессов (использование современных машин, возможность модернизации) The level of automation of processes (the use of modern machines, the possibility of modernization)	
5.1	Уровень организационного обеспечения (координация работ) The level of organizational support (coordination of work)	5. Организационные факторы Organizational factors
5.2	Методы контроля качества (их количество, этапность) Quality control methods (their number, stages)	
5.3	Неблагоприятные воздействия и ограничения (шум и вибрация) Adverse effects and limitations (noise and vibration)	
5.4	Метод контроля за осадками и деформациями (необходимость в мониторинге) Precipitation and deformation control method (need for monitoring)	
5.5	Стесненность, степень загруженности площадки строительства (возможность выполнения смежных работ) Tightness, the degree of workload of the construction site (the possibility of performing related work)	
5.6	Требования проекта (сложность, вариативность, выбор метода) Project requirements (complexity, variability, choice of method)	
5.7	Наличие подземных коммуникаций и сетей (расположение и их близость) Availability of underground utilities and a set (location and their proximity)	
5.8	Экологические нормы и ограничения (поддержание охраны окружающей среды) Environmental standards and restrictions (maintaining environmental protection)	
5.9	Общие условия безопасности труда (требования охраны труда и здоровья) General occupational safety conditions (occupational health and safety requirements)	
5.10	Статистика и результаты аналогичных проектов (анализ ошибок, выводы) Statistics and results of similar projects (error analysis, conclusions)	
5.11	Логистический (доступность и доставка материалов на площадку) Logistics (availability and delivery of materials to the site)	

производства свайных работ, результаты приведены в табл. 1.

Оценку степени значимости параметров эксперты производят путем присвоения им рангового номера. Фактору, которому эксперт дает наивысшую оценку, присваивается значение 33, фактору наи-

меньшего влияния соответствует значение 1. Если эксперт признает несколько факторов равнозначными, то им присваивается одинаковый ранговый номер. На основе данных анкетного опроса составляется сводная таблица оценки факторов с определением веса и рангов (табл. 2).

Табл. 2. Оценка, определение веса и ранжирование факторов
Table 2. Assessment, weight determination and ranking of factors

Номер Number	Наименование факторов риска Name of risk factors	Эксперты Experts						Σ рангов Σ ranks	Вес фактора Factor weight	Ранжирование Ranking
		1	2	3	4	5	6			
1	Техническое обслуживание оборудования (ремонтотпригодность на объекте), аварийность Equipment maintenance (maintainability at the facility), accident rate	15	22	10	15	10	5	77	0,0230	12
2	Грунтовые условия (плотность, состав) X_1 Soil conditions (density, composition) X_1	32	27	33	33	30	32	187	0,0558	33
3	Сложность монтажа и демонтажа оборудования The complexity of installation and disassembly of equipment	8	14	3	14	2	4	45	0,0134	4
4	Сроки выполнения работ (жесткие или гибкие) Deadlines for work (rigid or flexible)	13	10	11	19	15	3	71	0,0212	10
5	Тип и параметры свай (заводского изготовления, буронабивные, длина, вес, сечение/диаметр свай, тип основной арматуры) X_2 Type and parameters of piles (factory type, boring, length, weight, cross-section/diameter of piles, type of main reinforcement) X_2	33	31	28	32	27	30	181	0,0540	32
6	Основные технологические машины (мощность, тип применяемых машин) Main technological machines (power, type of machines used)	29	21	24	16	19	7	116	0,0346	22
7	Гидрологические условия площадки строительства (уровень подземных вод) Hydrological conditions of the construction site (groundwater level)	5	4	22	24	25	21	101	0,0301	19
8	Квалификация рабочей силы X_3 Labour force qualifications X_3	30	28	32	29	31	29	179	0,0534	31
9	Метеорологические условия (изменение погодных условий в процессе работ, ветер, температура, осадки) Meteorological conditions (changes in weather conditions during work, wind, temperature, precipitation)	19	11	18	23	8	22	101	0,0301	19
10	Используемая технология (забивка свай, вдавливание, выполняемые на месте буронабивные) X_4 The technology used (pile driving, indentation, on-site drilling) X_4	26	33	30	31	29	28	177	0,0528	29
11	Рынок труда (наличие рабочих соответствующей квалификации) Labour market (availability of workers with appropriate qualifications)	10	7	15	13	3	6	54	0,0161	5
12	Разработка и использование технологий (новые методы и подходы) Development and use of technologies (new methods and approaches)	11	5	16	17	4	10	63	0,0188	9
13	Качество и доступность основных материалов (бетон, арматура, готовые ж/б сваи) Quality and availability of basic materials (concrete, rebar, ready-made railway piles)	18	1	1	10	9	17	56	0,0167	6

Продолжение табл. 2 / Continuation of the Table 2

Номер Number	Наименование факторов риска Name of risk factors	Эксперты Experts						Σ рангов Σ ranks	Вес фактора Factor weight	Ранжи- рование Ranking
		1	2	3	4	5	6			
14	Механизация процессов Mechanization of processes	22	20	21	20	23	14	120	0,0358	24
15	Наличие необходимого количества техники Availability of the required amount of equipment	24	17	26	26	28	26	147	0,0439	26
16	Потребность в дополнительных исследованиях (геодезических, геотехнических, дополнительные разметка и измерения) The need for additional research (geodetic, geotechnical, additional marking and measurements)	12	6	8	9	7	15	57	0,0170	7
17	Количество работников (размер бригады, звена и продолжительность смены) Number of employees (team size, link, and shift duration)	23	18	5	28	22	12	108	0,0322	21
18	Уровень автоматизации процессов (использование современных машин, возможность модернизации) The level of automation of processes (the use of modern machines, the possibility of modernization)	20	15	7	18	13	16	89	0,0266	16
19	Стесненность, степень загруженности площадки строительства (возможность выполнения смежных работ) X_5 Tightness, the degree of workload of the construction site (the possibility of performing related work) X_5	27	30	29	27	33	31	177	0,0528	29
20	Уровень организационного обеспечения (координация работ) The level of organizational support (coordination of work)	25	26	25	22	14	24	136	0,0406	25
21	Методы контроля качества (их количество, этапность) Quality control methods (their number, stages)	2	16	12	6	20	18	74	0,0221	11
22	Метод контроля за осадками и деформациями (необходимость в мониторинге) Precipitation and deformation control method (need for monitoring)	14	25	20	8	16	11	94	0,0280	17
23	Параметры свайного поля (расстояние, количество и кучность расположения свай) X_6 Pile field parameters (distance, number and accuracy of piles) X_6	28	32	31	21	32	23	167	0,0498	28
24	Требования проекта (сложность, вариативность, выбор метода) Project requirements (complexity, variability, choice of method)	21	24	17	3	26	25	116	0,0346	22
25	Наличие подземных коммуникаций и сетей (расположение и их близость) Availability of underground utilities and networks (location and proximity)	17	7	19	4	24	27	98	0,0292	18
26	Экологические нормы и ограничения (поддержание охраны окружающей среды) Environmental standards and restrictions (maintaining environmental protection)	4	13	14	7	12	9	59	0,0176	8
27	Общие условия безопасности труда (требования охраны труда и здоровья) General occupational safety conditions (occupational health and safety requirements)	16	8	9	11	17	19	80	0,0239	13

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Номер Number	Наименование факторов риска Name of risk factors	Эксперты Experts						Σ рангов Σ ranks	Вес фактора Factor weight	Ранжи- рование Ranking
		1	2	3	4	5	6			
28	Неблагоприятные воздействия и ограничения (шум и вибрация) X_7 Adverse effects and limitations (noise and vibration) X_7	31	29	27	25	21	33	166	0,0495	27
29	Статистика и результаты аналогичных проектов (анализ ошибок, выводы) Statistics and results of similar projects (error analysis, conclusions)	3	2	4	1	8	1	19	0,0057	1
30	Логистический (доступность и доставка материалов на площадку) Logistics (availability and delivery of materials to the site)	7	3	2	5	11	13	41	0,0122	3
31	Наличие осложняющих факторов (наличие и расположение препятствий, над/подземных препятствий) Presence of complicating factors (presence and location of obstacles, above/underground obstacles)	6	19	23	30	5	2	85	0,0254	15
32	Степень подготовки площадки (подготовительные работы, выемка, расчистка, насыпь) The degree of site preparation (preparatory work, excavation, clearing, embankment)	9	12	13	12	18	20	84	0,0251	14
33	Изменение состояния грунта в процессе выполнения работ Changing the condition of the soil during the work	1	9	6	2	1	8	27	0,0081	2

Табл. 3. Значение X_i значимых факторов на трудоемкость свайных работ
Table 3. The significance of X_i significant factors on the complexity of pile work

Обозначение фактора Designation of the factor	Наименование значимых факторов (см. табл. 2) Naming of significant factors (see Table 2)
X_1	Грунтовые условия Ground conditions
X_2	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
X_3	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
X_4	Используемая технология The technology used
X_5	Стесненность Tightness
X_6	Параметры свайного поля Pile field parameters
X_7	Неблагоприятные воздействия и ограничения Adverse impacts and constraints

На основании оценок определен вес каждого фактора, произведено ранжирование, выделены 7 наиболее значимых факторов (X_1 – X_7), оказывающих наибольшее влияние на результирующий показатель Y_i (табл. 3).
Представленные в табл. 3 наиболее значимые факторы (грунтовые условия X_1 , тип и параметры

свай X_2 , квалификация рабочей силы X_3 , используемая технология X_4 , стесненность X_5 , параметры свайного поля X_6 , неблагоприятные воздействия и ограничения X_7) группируются в матрице (табл. 4) с учетом конкретных условий для каждого сочетания 1 и 2 групп.

Табл. 4. Матрица группировки факторов (X_1 – X_7) в зависимости от параметров 1 и 2 групп условий строительства
Table 4. Matrix of grouping factors (X_1 – X_7), depending on the parameters of groups 1 and 2 of construction conditions

1. Группа условий «По типу участка строительства» Group of conditions "By type of construction site"	Застройка исторического характера Historical buildings	1.3	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions
			–	–	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
			Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
			Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used
			Стесненность Tightness	Стесненность Tightness	Стесненность Tightness
			–	–	Параметры свайного поля Pile field Parameters
			Неблагоприятные воздействия Adverse impacts	–	Неблагоприятные воздействия Adverse impacts
	Новое строительство New construction	1.2	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions
			–	–	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
			Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
			Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used
			–	–	–
			–	–	Параметры свайного поля Pile field parameters
			Неблагоприятные воздействия Adverse impacts	–	–

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

1. Группа условий «По типу участка строительства» Group of conditions “By type of construction site”	Застроенный квартал Built-up area	1.1	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions	Грунтовые условия Ground conditions
			Тип и параметры свай Type and parameters of piles	—	Тип и параметры свай Type and parameters of piles
			Квалификация рабочей силы Labour force qualifications	Квалификация рабочей силы Labour force qualification	Квалификация рабочей силы Labour force qualifications
			Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used	Используемая технология The technology used
			Стесненность Tightness	—	Стесненность Tightness
			—	—	Параметры свайного поля Pile field parameters
			Неблагоприятные воздействия Adverse impacts	—	Неблагоприятные воздействия Adverse impacts
		2. Группа условий «По технологии устройства свайного фундамента» Group of conditions “According to the technology of pile foundation construction”			
		2.1	2.2	2.3	
		Забивкой By clogging	Вдавливанием By indentation	Выполняемые на месте (буронабивные) Performed on site (drilling)	

Оценка средней степени согласованности мнений всех экспертов, тесноты связи между ранжируемыми факторами производится с помощью коэффициента конкордации W Кендалла (1, 2).

Каждому фактору присваивается значение [19] по формуле:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n) - m \sum T_i^2}, \tag{1}$$

где S — общая сумма квадратов отклонений суммы рангов от средней арифметической суммы рангов:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2; \tag{2}$$
$$T_i = \frac{1}{12} \sum (t_i^3 - t_i),$$

где m — количество экспертов; n — количество ранжируемых факторов; μ — среднее арифметическое; t_i — количество повторяющихся элементов в оценках i -го эксперта (отсутствует, $T_i = 0$).

В результате расчетов коэффициент конкордации W равен 0,705. Значение коэффициента $W > 0,6-0,8$, что свидетельствует о хорошем качестве оценки, согласованность мнений экспертов сильная. Проверим значимость коэффициента конкордации с помощью критерия χ^2 Пирсона:

$$\chi^2 = Wm(n - 1). \tag{3}$$

Полученное значение $\chi^2 = 135,312$ сравним с критическим табличным значением критерия Пирсона $\chi^2_{кр}$ при уровне значимости $p = 0,05$ и числе степеней свободы 32 ($\chi^2_{кр} = 46,196$). Значение $\chi^2 > \chi^2_{кр}$

(135,312 > 46,194), следовательно, зависимость статистически значима, уровень значимости данной взаимосвязи соответствует значению $p < 0,05$.

Наличие числовых данных [21] и содержательных высказываний экспертов приводит к необходимости введения количественной оценки значимых факторов. Бальная шкала от 1 до 3, где 1 — низкая сложность; 2 — средняя сложность; 3 — высокая сложность; дает возможность сформировать общее представление, объединяя как качественные, так и количественные показатели.

Поведение отдельных переменных контролировать невозможно, так как не удастся обеспечить равенство всех прочих условий для оценки влияния одного исследуемого фактора. В этом случае следует выявить влияние других факторов, введя их в модель, т.е. построить уравнение множественной регрессии.

По десяти объектам, расположенным на различных участках строительства, и примененным методам устройства свайных оснований по шкале от 1 до 3 были оценены ключевые факторы. В результате использования простого с вычислительной точки зрения и теоретически обоснованного метода нахождения неизвестных параметров ($b_1, b_2, \dots, b_k$) методом наименьших квадратов (МНК) [22] будет построено множественное уравнение линейной регрессии:

$$Y = f(b, x) + \varepsilon, \tag{4}$$

где Y — зависимая (объясняемая) переменная; $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ — вектор независимых (объясняющих) переменных; ε — случайная величина (воз-

мушение или остаток), который отражает влияние случайных ошибок, особенностей измерений и действий, оказывающих влияние на результирующую переменную, других объясняющих переменных, которые не были включены в уравнение.

Наилучший результат регрессионного анализа по методу МНК возможно получить при обязательном выполнении определенных условий (условия Гаусса – Маркова).

МНК позволяет получить такие оценки параметров, при которых сумма квадратов отклонений фактических значений результирующего признака y от расчетных y минимальна, выполняется по формуле:

$$\sum_i (y_i - y_{x_i}) \rightarrow \min. \tag{5}$$

Как известно из курса математического анализа [8, 9], для того чтобы найти экстремум функции нескольких переменных надо вычислить частные производные первого порядка по каждому из параметров и приравнять их к нулю. После элементарных преобразований приходим к системе линейных нормальных уравнений для нахождения параметров линейного уравнения множественной регрессии.

Также для расчета параметров уравнения регрессии и проверки его адекватности исследуемому процессу в ряде современных вычислительных программных продуктов реализована функция Регрессия (=ЛИНЕЙН;=МУМНОЖ(МОБР(массив 1);массив 2)) в пакете статистического анализа [23, 24]. Практическая значимость полученного результата оценена по показателям множественной корреляции и детерминации, частных коэффициентов эластичности. Полученные значения представлены ниже:

1. TSS = 0,861 (сумма квадратов относительно среднего $\bar{Y}$ (общая)).
2. RSS = 0,83 (сумма квадратов, обусловленная регрессией (объясненная)).
3. ESS = 0,028 (сумма квадратов относительно регрессии (необъясненная, остаток)).
4. $R^2 = 0,9762$ (коэффициент детерминации).
5. $R = 0,983$ (коэффициент множественной корреляции).
6. $F_{\text{стат}} = 249,45$ (критерий Фишера).
7. Θ_i — коэффициенты эластичности, значение по модулю (табл. 5).

Проведенное исследование методом экспертных оценок среди 33 факторов выявило 7 наиболее весомых и значимых. В результате ранжирования для 10 объектов, согласно количественной шкале, был присвоен оценочный балл, определяющий трудо-

емкость работ для определенного значимого фактора (табл. 6).

Аналитические оценки каждого фактора сведены в табличную форму, и в результате расчетов методом наименьших квадратов получены коэффициенты по каждому фактору для формирования окончательного уравнения множественной регрессии. Значения коэффициентов приведены в табл. 7.

Подставив значения, получаем уравнение множественной регрессии:

$$Y_x = 0,1085x_1 + 0,1214x_2 + 0,0053x_3 - 0,1662x_4 + 0,28x_5 + 0,17x_6 + 0,16x_7 - 0,9214. \tag{6}$$

Проверку полученных значений производим по выполнению равенства:

$$TSS = RSS + ESS = 0,83 + 0,028 = 0,861.$$

Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,9762$, а также сравнение $F_{\text{стат}}$ (критерий Фишера) = 249,45 > $F_{\text{крит}} = 19,35$ (нулевая гипотеза отклонена) указывают на то, что уравнение регрессии статистически значимо и может использоваться для прогнозирования трудоемкости устройства свайных оснований современными методами в зависимости от расположения участка строительства при уровне значимости $p = 0,05$.

Выборочный коэффициент множественной корреляции $R = 0,983$ находится в диапазоне $0,7 \leq |0,9834| \leq 1,0$, что свидетельствует о сильной тесноте линейной связи.

На основании стандартизованных коэффициентов и коэффициентов эластичности наименьший вклад (изменение фактора меньше влияет на изменение исследуемой переменной) в уравнение регрессии вносит переменная X_3 .

Рассмотренное исследование и его результаты относились в равной степени ко всем трем способам погружения свай: забивкой, буронабивным и вдавливанием. Проводя в последующем их сравнительную оценку, при прочих равных параметрах установлено, что несомненным преимуществом обладает способ вдавливанием (рис. 2, табл. 8).

К преимуществам этого способа относятся в том числе: экономия времени, высокая несущая способность свайного поля (за счет уплотнения грунта по граням свай), бесшумный процесс, экономия на материалах, долговечность, возможность применения на разных грунтах, возможность не повреждать структуру грунтов вблизи расположенных зданий.

Рассматривая данный метод в качестве эффективного варианта погружения свай, далее представлены параметры и характеристики оборудования и свай

Табл. 5. Коэффициенты эластичности Θ_i , значение по модулю

Table 5. Elasticity coefficients E_i , modulo

Θ_1 E_1	Θ_2 E_2	Θ_3 E_3	Θ_4 E_4	Θ_5 E_5	Θ_6 E_6	Θ_7 E_7
0,554251	0,593851	0,022715	0,707200	0,99886	0,769591	0,728250

Табл. 6. Ранжирование значимых факторов X_1-X_5 по количественной шкале
Table 6. Ranking of significant factors X_1-X_5 on a quantitative scale

Наименование фактора Name of the factor	Оценочный балл Estimated score		
	1	2	3
	Низкий Low	Средний Average	Высокий High
Грунтовые условия X_1 Ground conditions X_1	Требуются минимальные усилия и менее мощная техника для установки свай, грунты, обладающие низкой несущей способностью Minimal effort and less powerful machinery are required to install piles, soils with low bearing capacity	Требуется применение специализированной техники, не каждая технология без предварительных мероприятий (бурение скважин) применима. Грунты обладают средней водопроницаемостью и несущей способностью. Они могут обеспечивать хорошую поддержку The use of specialized equipment is required, not every technology is applicable without preliminary measures (drilling wells). Soils have medium water permeability and load-bearing capacity. They can provide good support for buildings and structures	Требуется применение специализированной техники высокой мощности, может возникнуть необходимость в предварительном бурении. Грунты имеют низкую водопроницаемость (подвержены значительным деформациям при изменении содержания влаги) и высокую несущую способность The use of specialized high-power equipment is required, and preliminary drilling may be necessary. Soils have low water permeability (subject to significant deformations when the moisture content changes) and high load-bearing capacity
Тип и параметры свай X_2 Type and parameters of piles X_2	Заводского изготовления, небольшого сечения, длины и массы Factory-made, small cross-section, length and weight	Заводского изготовления составные, имеющие длину, сравнимую со сваями, изготавливаемыми на месте Factory-made composite piles having a length comparable to piles manufactured on site	То же с увеличенным сечением/диаметром, длиной, требующими индивидуальных чертежей для заводского изготовления или специализированной техники Also, with an increased cross-section/ diameter, long, requiring individual drawings for factory manufacture or specialized equipment
Квалификация рабочих силы X_3 Labour force qualifications X_3	Отсутствует опыт работы или имеется не по профилю, нет образования по специальности There is no work experience or there is not a profile, there is no education in the specialty	Опыт работы имеется в сфере строительства от 1–3 лет, наличие высшего/среднего специального образования Work experience is available in the field of construction from 1–3 years, higher/secondary specialized education	Опыт работы имеется в специализированных работах от 3–5 лет, наличие высшего/среднего специального образования Work experience is available in specialized jobs from 3–5 years, higher/secondary specialized education
Используемая технология X_4 The technology used X_4	Ограниченно (крайне редко) применяется — специализированно Limited (extremely rare) use — specialized	Применяема при определенных несущественных условиях It is used under certain non-essential conditions	Активно (массово) применяется — практически универсальна Actively (massively) used — practically universal
Степень загруженности площадки X_5 Tightness, the degree of site congestion X_5	Отсутствуют ограничения в расположении и передвижении техники и оборудования. Нет соседствующих зданий и сооружений There are no restrictions on the location and movement of machinery and equipment. There are no adjacent buildings or structures	Имеются ограничения по площадке, учитывается влияние соседних зданий и сооружений (возможны компенсирующие мероприятия) There are restrictions on the site, the influence of neighboring buildings and structures is taken into account (compensatory measures are possible)	Плотная застройка, близость к зданиям и сооружениям (работа с сохранением фасадов зданий, открытых парковок и т.д.), невозможность переноса сооружений, необходимость компенсирующих мероприятий обязательна Dense buildings, proximity to buildings and structures (work with the preservation of building facades, open Parking lots, etc.), the impossibility of transferring structures, the need for compensatory measures is mandatory

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Наименование фактора Name of the factor	Оценочный балл Estimated score		
	1	2	3
	Низкий Low	Средний Average	Высокий High
Параметры свайного поля X_6 Parameters of the pile field X_6	Расположено в виде сплошного свайного поля, с сохранением порядка, предусмотренного нормативными документами It is located in the form of a continuous pile field, while maintaining the order provided for by regulatory documents	То же, включая расположения в виде лент свайных кустов или увеличенным количеством свай в определенных местах (кучности) Also, including arrangements in the form of ribbons and a small number of individual pile bushes or an increased number of piles in certain places (piles)	«Хаотичное» расположение свай в свайном поле/расположение свай в свайных кустах с существенным расстоянием между ними и/или кучном расположении свай “Chaotic” arrangement of piles in a pile field/arrangement of piles in pile bushes with a significant distance between them and or pile arrangement of piles
Неблагоприятные воздействия и ограничения X_7 Adverse impacts and constraints X_7	Полное и/или частичное отсутствие воздействия от техники и деятельности на строительной площадке Total and/or partial absence of impact from machinery and activities on the construction site	Незначительное воздействие на окружающие здания, сооружения, человека и окружающую среду. Нормализация по средствам компенсирующих мероприятий Total and/or partial absence of impact from machinery and activities on the construction site	Существенное воздействие машин, механизмов на окружающие здания, сооружения, человека и окружающую среду процессами производства строительных работ. Невозможность снизить/исключить влияние компенсирующими мероприятиями Significant impact of machines, mechanisms, and the environment the surrounding buildings, structures, humans, and the environment during construction work. It is not possible to reduce/eliminate the impact of compensatory measures

Табл. 7. Аналитические оценки факторов X_1-X_7
Table 7. Analytical estimates of factors X_1-X_7

a	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
-0,9214	0,1085	0,1214	0,0053	-0,1662	0,28	0,17	0,16

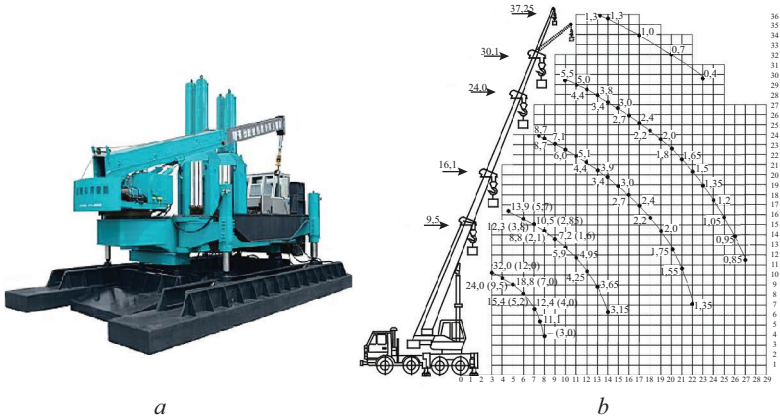


Рис. 2. Применяемое в процессе исследования оборудование [11]: а — сваевдавливающая установка SUNWARD (КНР), марка ZYJ360; габаритные размеры: длина — 12 000 мм; ширина — 6550 мм; б — автокран КС-55729-1; грузоподъемность — 25 т; длина стрелы — 9,5–30,1 м; длина гуська — 7,15 м; вес крана — 30 т; габариты машины 12 × 2,5 × 3,75

Fig. 2. The equipment used in the research process is the SUNWARD pile crushing plant truck crane SUNWARD pile crushing plant (China); overall dimensions: length 12,000 mm; width 6,550 mm; KS-55729-1 truck crane; load capacity — 25 tons; the length of the boom is 9.5–30.1 m; the length of the track is 7.15 m; the crane’s weight is 30 tons; the dimensions of the machine are 12 × 2.5 × 3.75

(рис. 2, табл. 8), которые часто применяются при выполнении свайных работ в г. Санкт-Петербурге.

При погружении свай консолью максимальное усилие вдавливания составляет 120/150 т для сваевдавливающей установки (СВУ) 240/360. При этом минимальное расстояние от границы установки до существующих стен или иных преград должно составлять не менее 1,5 м.

Принцип работы сваевдавливающей установки заключается в том, что в процессе вдавливания сваи вес машины действует как противодействующая сила для баланса между сопротивлением трения вдавливаемой сваи и силой реакции хвостовика сваи, затем свая вдавливается в грунт.

Предлагаемая оптимизированная структурно-технологическая модель статического вдавливания свай включает следующие этапы:

1. Производится установка первой (нижней сваи) в вертикальном положении при помощи кра-

новой лебедки, установленной на сваевдавливающей машине. Далее через систему четырех зажимов в агрегате передается давление на сваю через систему блоков, за счет чего свая погружается в грунт.

2. Когда нижняя часть сваи достигает глубины на отметке 1,0 м от поверхности земли, погружение останавливается и при помощи кранового оборудования на агрегате устанавливают следующую часть составной сваи.

3. Верхняя и нижняя части составных свай стыкуются между собой накладками Н2 с проваркой по всему периметру (в круг) в рабочем положении сваи в соответствии с проектом электродами УОНИИ 13/55 3,0 (4,0) × 450.

4. Выполняется антикоррозийная обработка сварных соединений составных свай. Обработка производится цинконаполненной композицией на основе высокомолекулярного синтетического полимера или аналогом.

Табл. 8. Технические параметры свай [7]
Table 8. Technical parameters of piles [7]

Наименование Name	Марка Stamp	Количество Quantity	Масса ед., т Mass of units, tons	Применяемое оборудование Equipment used
Свая ж/б Reinforced concrete pile	C100.35-6	302	3,06	1. Сваевдавливающая установка SUNWARD ZYJ360 The SUNWARD ZYJ360 pile crushing plant. 2. Автокран КС-55729-1 Truck crane KS-55729-1
	C110.35-6	248	3,36	
	C120.35-6	5	3,67	
	C130.35-6	5	3,98	
	C120.35-5	560	3,68	

5. После устройства сварного стыка и антикоррозийной обработки составную сваю продолжают вдавливать в автоматическом режиме работы установки. Вдавливание сваи прекращают, когда оголовок сваи достигнет уровня поверхности земли. Затем при помощи агрегатного крана устанавливают короткую сваю (вспомогательную) и продолжают вдавливание, достигнув проектной отметки, погружение прекращают, агрегат переезжает на новую позицию.

Разбивка на местности свайного поля проводится в соответствии с координатами, нанесенными на проекте свайного поля. Перенос на местность свайного поля осуществляется при помощи тахеометра Leica FlexLine TS06 plus R500 5" с привязкой к местности через светоотражающие марки, расположенные на близлежащих зданиях. Независимо от метода разбивки свайного поля вначале переносятся и закрепляются на местности две основные точки оси. Выполнение разбивки свайного поля на строительном участке проводится на основании координат, заданных в проекте, а перенос на участок может производиться с использованием тахеометра Leica FlexLine TS06 plus R500 5" через привязку к территории с использованием светоотражающих маркеров, которые могут быть расположены на ближайших строениях. Вначале в независимости от способа разбивки свайного поля размещаются две крайние точки оси.

Они закрепляются в натуре путем вдавливания на 15–25 см деревянных колыев или стальных стержней длиной 30–40 см. По прибытии и сборке сваевдавливающей установки на объект производится обмер габаритов СВУ и калибровка спутниковых тарелок (GPS и ГЛОНАСС), расположенных на корпусе. Калибровка и позиционирование проходит по центру сваезажимного короба сваевдавливающей установки. Наличие двух систем спутниковой навигации минимизирует возможные отклонения при разбивке.

Геодезическая служба запишет ранее созданный файл (формат *.dxf) с нанесенными центрами свай по переданной рабочей документации свайного поля в планшетный компьютер системы Drill Control, установленный в кабине машиниста СВУ. При запуске планшетного компьютера машинист СВУ увидит свайное поле с нанесенными центрами свай и расстояние от откалиброванного центра сваезажимного короба до центра выбранной для погружения сваи с точностью до 1 см. Машинист перемещает сваевдавливающую установку к погружаемой

свае до полного совмещения центра сваезажимного короба с центром погружаемой сваи, размеченной на свайном поле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель (формула (6)) по оценке трудоемкости Y_i при устройстве свайных фундаментов позволяет выявить характер влияния значимых факторов на результирующий показатель Y_i . При этом наибольшее влияние будут оказывать показатели:

- $X_5 = 0,28$ — это показатель «Стесненность, степень загруженности площадки строительства, возможность выполнения смежных работ»;
- $X_6 = 0,17$ — показатель «Параметры свайного поля»: расстояние, количество и кучность расположения свай.

Другие показатели влияют в меньшей степени, что возможно оценить по формуле (6):

$$Y_x = 0,1085x_1 + 0,1214x_2 + 0,0053x_3 - 0,1662x_4 + 0,28x_5 + 0,17x_6 + 0,16x_7 - 0,9214.$$

Сформированное уравнение регрессии позволяет сделать вывод, что на эффективность выполнения свайных работ будут влиять факторы из таких групп (табл. 1 и 2), как: технологические, организационные, природные и человеческие факторы (грунтовые условия — X_1 , тип и параметры свай — X_2 , квалификация рабочей силы — X_3 , используемая технология — X_4 , стесненность — X_5 , параметры свайного поля — X_6 , неблагоприятные воздействия и ограничения — X_7).

В качестве наиболее рационального и универсального по совокупности преимуществ в исследовании принят метод вдавливания свай с дополненной в данном исследовании технологией производства этого вида работ.

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- выявлении, исследовании и группировании наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность свайных работ;
- построении математической модели (уравнения регрессии), позволяющей комплексно учесть степень влияния каждого фактора на результирующий показатель Y_i (трудозатраты);
- возможности эффективного планирования технологии свайных работ с учетом значимых факторов и выполнения работ в различных локациях расположения участка строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барыкин А.Б., Барыкин Б.Ю., Зеленин Е.В. Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1494–1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504. EDN WZAJWJ.
2. Клюев В.Д., Щепанский С.Б., Панаева В.В., Зайцев Д.А. Производительность труда в строительной отрасли и методы ее измерения // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2022. № 1 (33). С. 89–94. EDN KYUABY.
3. Ланидус А.А., Щукин А.Ю. Применение функционально ориентированных систем моделирования при осуществлении строительного контроля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 10. С. 1666–1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675. EDN BUZMCQ.
4. Пиеничкина В.А., Иванов С.Ю., Рекунов С.С., Чураков А.А. Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 2. С. 231–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245. EDN JDNOYA.
5. Ланидус А.А. Метод повышения производительности труда в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 8. С. 1365–1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372. EDN FANXKA.
6. Пиеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI.
7. Пиеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Жиденко А.С., Чанчан М., Хамиси С. Сравнительный анализ результатов расчета системы «здание – основание», представленной в виде слоистой модели // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 43–53. EDN ELCFWD.
8. Ромаданова М.М., Вагер Б.Г. Методы обработки экспериментальных данных при моделировании геофизических процессов // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 70–75. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-70-75. EDN UYRVTC.
9. Сафарян Г.Б. Критический анализ обобщенной модели строительной системы // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. № 4. С. 41–47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN PFGTCK.
10. Верстов В.В., Гайдо А.Н., Иванов Я.В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий. СПб. : Лань, 2014. 365 с.
11. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. М. : Машиностроение, 2000. 415 с.
12. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction // Structures. 2023. Vol. 52. Pp. 348–369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186
13. Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J., Dong J., Peng Y. Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests : Literature Review and Personal Perspectives // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 782. DOI: 10.3390/app14020782
14. Kiseleva E.V., Dambiev T.B., Stepanets V.E., Valkova S.S. Building Functional Diagram of Cargo Delivery to Describe and Research Processes in Freight Forwarding Company based on the IDEFO Standard (SADT) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. Issue 2. P. 022060. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022060
15. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of soil heterogeneities on its seismic responses // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Pp. 221–232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19
16. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon // Structures. 2022. Vol. 38. Pp. 599–617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024
17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. Issue 17. DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z
18. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 19. P. e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680
19. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 8. P. 2992. DOI: 10.3390/ma16082992
20. Ланидус А.А. Организационно-технологическая платформа строительства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 516–524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX.
21. Саиян С.Г., Шелетина В.Б. Применение методов машинного обучения для прогнозирования аэродинамических коэффициентов давления на здания и сооружения прямоугольных форм // Вестник МГСУ.

2025. Т. 20. № 3. С. 381–393. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393. EDN OPWJDE.

22. Alanani M., Elshaer A. ANN-based optimization framework for the design of wind load resisting system of tall buildings // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 285. P. 116032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116032

23. Bapir B., Abrahamczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction: A state-of-

the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures // *Frontiers in Built Environment*. 2023. Vol. 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351

24. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra // *Indian Geotechnical Journal*. 2019. Vol. 49. Issue 2. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

Поступила в редакцию 19 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 7 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Алексеевич Руденко — кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры организации строительства; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 664021, Scopus: 57224505043, ResearcherID: ABA-8121-2021, ORCID: 0009-0008-2338-0102; rudenkoa.a@mail.ru;

Сергей Викторович Сазонов — аспирант кафедры организации строительства; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; sazonov_sv@inbox.ru.

Вклад авторов:

Руденко А.А. — идея, планирование исследований, уточнение и дополнение факторов исследования, научное руководство, итоговое редактирование, обоснование результатов, дополнение текста.

Сазонов С.В. — подбор исходных данные, подготовка исходного текста, расчет.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Barykin A.B., Barykin B.Yu., Zelenin E.V. Development of the calculation methodology of cross-beam foundation on the sloping base complicated by karst and sinkhole processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1494-1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504. EDN WZAJWJ. (rus.).

2. Klyuev V.D., Shchepansky S.B., Panayetova V.V., Zaitsev D.A. Analysis of the results of the implementation of the programs of the centers of competence of the national technology initiative for the first stage of its implementation. *Innovatics and Expert Examination*. 2022; 1(33):89-94. EDN KYUABY. (rus.).

3. Lapidus A.A., Shchukin A.Yu. Application of function-oriented modelling systems in construction control implementation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1666-1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675. EDN BUZMCQ. (rus.).

4. Pshenichkina V.A., Ivanov S.Yu., Rekunov S.S., Churakov A.A. Influence of the stiffness ratio of the building and the multilayer soil foundation on the seismic response of the system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):231-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.231-245. EDN JDNOYA. (rus.).

5. Lapidus A.A. A method of increasing labour productivity in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1365-1372. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1365-1372. EDN FAHXKA. (rus.).

6. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the “structure – layered foundation” system. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 8(788):32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. EDN XZEYVI. (rus.).

7. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Zhidenko A.S., Tchanchane M., Hamici S. Comparative analysis of the calculation results of the building-base system presented in the form of a layered model. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. The Construction and Architecture*. 2023; 1(90):43-53. EDN ELCFWD. (rus.).

8. Romadanova M.M., Vager B.G. Methods for processing experimental data in modeling geophysical processes. *Systems. Methods. Technologies*. 2018; 2(38):70-75. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-70-75. EDN UYRVTC. (rus.).

9. Safaryan G.B. A generalized model of a building system : a critical analysis. *Construction: Science*

and Education. 2021; 11(4):41-47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN PFGTCK. (rus.).

10. Verstov V.V., Gaido A.N., Ivanov Ya.V. *Technologies for the construction of pit fencing in urban areas and water areas*. St. Petersburg, Lan, 2014; 365. (rus.).

11. Ushakov L.S., Kotylev Yu.E., Kravchenko V.A. *Hydraulic impact machines*. Moscow, Mashinostroenie, 2000; 415. (rus.).

12. Abdulaziz M.A., Hamood M.J., Fattah M.Y. A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil — Structure interaction. *Structures*. 2023; 52:348-369. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.03.186

13. Cheng X.X., Zhao L., Ge Y.J., Dong J., Peng Y. Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Tests : Literature Review and Personal Perspectives. *Applied Sciences*. 2024; 14(2):782. DOI: 10.3390/app14020782

14. Kiseleva E.V., Dambiev T.B., Stepanets V.E., Valkova S.S. Building Functional Diagram of Cargo Delivery to Describe and Research Processes in Freight Forwarding Company based on the IDEFO Standard (SADT). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988(2):022060. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022060

15. Messaoudi A., Mezouar N., Hadid M., Laouami N. Effects of soil heterogeneities on its seismic responses. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 221-232. DOI: 10.1007/978-3-031-57357-6_19

16. Requena-Garcia-Cruz M.V., Bento R., Durand-Neyra P., Morales-Esteban A. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. *Structures*. 2022; 38:599-617. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.024

17. Sadek M., Hussein M., Chehade F.H., Arab A. Influence of soil–structure interaction on the fundamental frequency of shear wall structures. *Arabian*

Journal of Geosciences. 2020; 13(17). DOI: 10.1007/s12517-020-05872-z

18. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680

19. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism. *Materials*. 2023; 16(8):2992. DOI: 10.3390/ma16082992

20. Lapidus A.A. Organizational and technological platform of construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(4):516-524. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.516-524. EDN BMHWDX. (rus.).

21. Saiyan S.G., Shelepina V.B. Application of machine learning methods to predict aerodynamic pressure coefficients on rectangular buildings and structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(3):381-393. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.381-393. EDN OPWJDE. (rus.).

22. Alanani M., Elshaer A. ANN-based optimization framework for the design of wind load resisting system of tall buildings. *Engineering Structures*. 2023; 285:116032. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116032

23. Bapir B., Abrahameczyk L., Wichtmann T., Prada-Sarmiento L.F. Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1120351

24. Berkane H.D., Harichane Z., Guellil M.E., Sadouki A. Investigation of Soil Layers Stochasticity Effects on the Spatially Varying Seismic Response Spectra. *Indian Geotechnical Journal*. 2019; 49(2):151-160. DOI: 10.1007/s40098-018-0301-y

Received April 19, 2025.

Adopted in revised form on June 7, 2025.

Approved for publication on June 7, 2025.

B I O N O T E S: **Aleksandr A. Rudenko** — Candidate of Technical Sciences, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 190005, Saint Petersburg, Russian Federation; ID RSCI: 664021, Scopus: 57224505043, ResearcherID: ABA-8121-2021, ORCID: 0009-0008-2338-0102; rudenkoa.a@mail.ru;

Sergey V. Sazonov — postgraduate student of the Department of Construction Organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 190005, Saint Petersburg, Russian Federation; sazonov_sv@inbox.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr A. Rudenko — idea, research planning, refinement and addition of research factors, scientific management, final editing, substantiation of the results, addition of the text.

Sergey V. Sazonov — selection of initial data, preparation of the initial text, calculation.

The authors declare no conflict of interest.