

Научная статья

УДК 531.0;624.131

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/15-26>

Особенности моделирования системы «свая – просадочный грунт»

Алексей Алексеевич Локтев¹, Лилия Алексеевна Илларионова^{1,✉},
Александр Юрьевич Параскан²

¹ Российский университет транспорта,
Москва, Российская Федерация

² ООО «ПАЛЬМИРА ГРУП», Москва, Российская Федерация

✉ illarionova.roat@mail.ru

Аннотация. Развитие городов, территорий населённых пунктов и транспортных магистралей между ними приводит к увеличению плотности застроенных площадей и необходимости строительства на различных грунтах, включая просадочные. Наличие просадочных грунтов заставляет исследователей и инженеров идти по пути уточнения и адаптации существующих аналитических моделей, в том числе реализованных в современных вычислительных комплексах. Часто используют технологические решения, связанные с заменой отдельных грунтовых слоёв или с усилением и модернизацией физико-механических свойств массива. В работе приведён воспроизводимый алгоритм построения конечно-элементной объёмной модели системы «свая – грунт», реализованной в вычислительном комплексе. Рассмотрены два расчётных сценария: (А) с учётом отрицательных сил трения и (Б) с формированием зазора, исключающего их влияние. По результатам численного расчёта оценена осадка оголовка сваи и проанализировано влияние отрицательного трения на вертикальные перемещения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве линий ВСМ и отдельных протяжённых объектов транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: свайные фундаменты, осадка фундамента, численное моделирование, пластические деформации, геометрическая нелинейность, граничные условия, моделирование грунтовых массивов

Для цитирования: Локтев А.А., Илларионова Л.А., Параскан А.Ю. Особенности моделирования системы «свая – просадочный грунт» // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 15–26.

MECHANICS OF DEFORMABLE SOLID BODY

Original article

Features of modeling the “pile – subsidence soil” system

Alexey A. Loktev¹, Liliya A. Illarionova^{1,✉}, Alexander Yu. Paraskan²

¹ Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

² Palmira Group LLC, Moscow, Russian Federation

✉ illarionova.roat@mail.ru

Abstract. The development of cities, inhabited areas, and transport corridors between them leads to an increase in the density of built-up areas and the need for construction on various types of soils, including collapsible soils. The presence of collapsible soils forces researchers and engineers to refine and adapt existing analytical models, including those implemented in modern computational systems. Technological solutions often involve replacing certain soil layers or strengthening and upgrading the physical and mechanical properties of the soil mass. This work presents a reproducible algorithm for constructing a finite element 3D model of the “pile – soil” system implemented in a computational complex. Two calculation scenarios are considered: (A) taking into account negative skin friction forces, and (B) the formation of a gap that eliminates their influence. Based

on the numerical calculations, the settlement of the pile head is assessed, and the effect of negative skin friction on vertical displacements is analyzed. The obtained results can be used in the design and construction of high-speed rail lines and separate extended transport infrastructure objects.

Keywords: pile foundations, foundation settlement, numerical modeling, plastic deformations, geometric non-linearity, boundary conditions, modeling of soil masses

For citation: Loktev A.A., Illarionova L.A., Paraskan A.Yu. Features of modeling the “pile – subsidence soil” system. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 15–26. (In Russ.).

Введение

В работе рассматривается проблема недостаточного описания поведения свайных фундаментов на просадочных грунтах со слабыми структурными связями с использованием конечно элементных моделей. Основное внимание уделено анализу влияния отрицательных сил трения на осадку фундамента при взаимодействии с просадочными грунтами. В работе представлены результаты численного моделирования в ПК ЛИРА 10.12, где использована модель Боткина для описания прочностных характеристик грунта.

При строительстве на просадочных грунтах, которые при увлажнении могут быть подвержены деформациям (просадке), необходимо учитывать и проводить анализ специфичных для такого вида грунтов свойств и характеристик. Просадка – резкое нелинейное уменьшение объёма грунта под действием внешних факторов, приводящее к потере устойчивости объектов строительства, неравномерным осадкам, вызывающим крены и перекосы, возникновение трещин в конструкциях (стенах, фундаментах, перекрытиях), что негативно влияет и на подземные коммуникации инфраструктуры городских поселений и может привести к авариям.

Многочисленные отечественные и зарубежные исследователи занимаются решением задач, связанных с численным моделированием изменения осадки свайных фундаментов с использованием объёмной конечной элементной модели с заданной физической нелинейностью грунта. Моделирование поведения просадочного грунта в различных его состояниях широко освещается в литературе [1, 2, 3, 4].

Существуют различные вариации свай по форме, размерам, материалу и способам установки. При моделировании свайного фундамента необходимо учитывать разнообразные характеристики. Каждая модель сваи имеет свои особенности, которые существенно влияют на расчётную несущую способность основания [5]. Также анализ сил трения по поверхности сваи показывает, что это значительно повышает несущую способность фундамента [6, 7].

Таким образом, исследование поведения свайных фундаментов на грунтах со слабыми структурными связями, с применением метода конечных элементов и учётом изотропной структуры материала, а также реализации процессов просадки грунта является актуальной целью настоящей статьи. В предлагаемой работе реализуется подход, основанный на объединении теоретических и практических аспектов численного моделирования, что позволит глубже понять механизмы взаимодействия свайных фундаментов с просадочными грунтами. Предлагаемый подход даёт возможность при проектировании зданий и сооружений совмещать методы расчёта грунтового массива с просадочными грунтами и без них. Разработанная математическая модель позволяет оценить влияние отдельных параметров подземной конструкции и грунта на итоговые величины просадки.

Методы и подходы

Современные направления развития подходов для расчёта характеристик просадочных грунтов, которые при увлажнении или под действием внешних воздействий значительно деформируются (дают осадку), во многом зависят от выбранной модели грунта, в свою очередь, определяющуюся набором физико-механических свойств, условий и характером внешних воздействий.

Эмпирически при лабораторных исследованиях разработана теория «плотности-влажности», где доказана прямая зависимость снижения показателя угла внутреннего трения от

значения влажности. Значения полученных характеристик для глинистых грунтов приведены в таблице 1 (согласно [8]).

Таблица 1 / Table 1

Характеристики глинистых грунтов Characteristics of clay soils

Образец \ характеристика	Влажность «W», %	Удельное сцепление «C», кПа	Угол внутреннего трения «φ», °
Образец 1	0	0,92	35,15
Образец 2	10	0,52	28,48
Образец 3	20	0,44	26,01

На основании закона трения Кулона и эмпирических данных о характере поведения глинистых грунтов можно изобразить следующие зависимости (рис. 1).

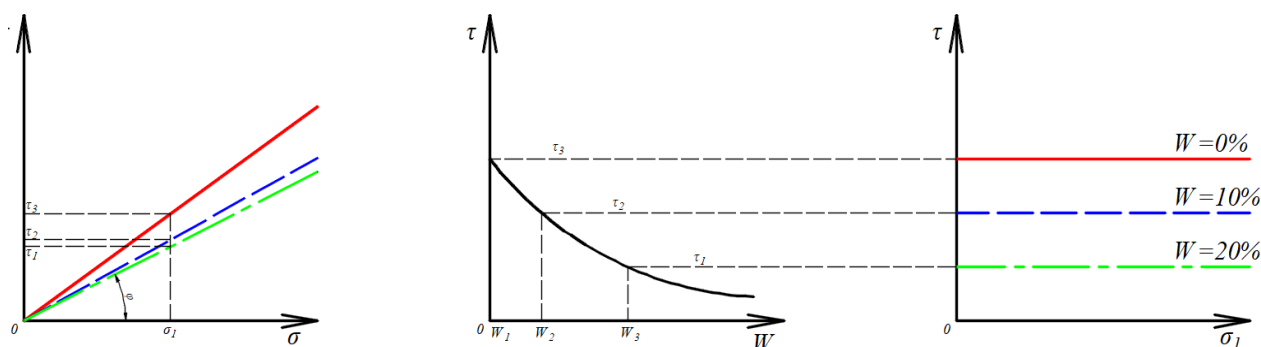


Рис. 1. Графики зависимости сопротивления сдвига грунта и влажности [8]

Fig. 1. Soil shear resistance and humidity dependence graphs [8]

Эмпирические зависимости угла внутреннего трения от влажности обычно не стандартизированы и приводятся в научной литературе, методических рекомендациях или определяются в ходе лабораторных испытаний. Для получения точных данных рекомендуется проводить лабораторные исследования с учётом конкретных условий и свойств грунта.

Рассматривая моделирование грунтового массива при помощи программного обеспечения ЛИРА 10.12, стоит упомянуть, что для реализации односторонней работы грунта с учётом сдвига применяются объёмные КЭ № 273, и в таком случае у пользователя появляется несколько возможностей выбора модели работы грунта: по Кулону – Мору, Друкеру – Прагеру или Боткину.

Для модели Кулона – Мора преимуществом является его общеизвестная идеально упруго-пластическая модель с предельной поверхностью, для которой нет трудности в отборе параметров из отчёта по инженерно-геологическим изысканиям. Условие прочности для этой модели приведено в формуле (1):

$$\sin(\varphi) \cdot \sigma_0 + \sigma_i \cdot (\sqrt{3} \cdot \cos(\psi) + \sin(\psi) - 3C \cos(\varphi)) \leq 0. \quad (1)$$

Особенности вышеописанной модели дополняются в модели Друкера – Прагера, в которой также применяются законы идеально упруго-пластического поведения грунтов основания, но при этом поверхность пластичности является правильным круговым конусом относительно гидростатической оси в пространственной системе главных напряжений. Условие прочности модели Друкера – Прагера приведено в формуле (2):

$$2\sin(\varphi) \cdot \sigma_0 + 3\sigma_i - 6C \cdot \cos(\varphi) \leq 0. \quad (2)$$

Согласно исследованиям, проведённым в работе [9], было проведено сравнение результатов применения различных методов, в качестве сравниваемых величин используется перемещение по оси «Z» характерных точек здания. Было установлено, что наибольшие значения

перемещений получились при использовании метода Боткина, в котором принимается во внимание связь интенсивности касательных напряжений и среднего давления.

Решения

Динамическое поведение заглубленных элементов конструкций зданий и сооружений даже в квазистатической постановке описывается нелинейными моделями (рис. 2). Слои грунтового массива имеют физико-механические свойства, существенно изменяющиеся по глубине, в том числе из-за проникновения воды при нарушении сплошности массива и возможных вибраций конструкций с различным расположением свай. Это также связано с гигацикловой и высокочастотной нагрузкой, что характерно для транспортных сооружений [10].

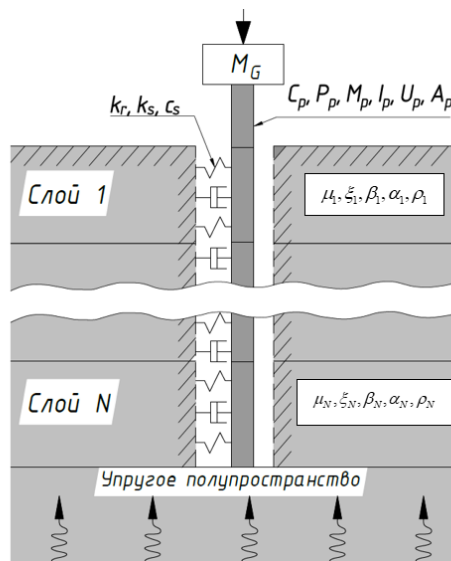


Рис. 2. Расчётная модель подземной части конструкции с учётом демпфирования грунта

Fig. 2. Underground design model of the structure, taking into account the soil damping

Для моделирования используется система «свая – грунт». Воспользуемся дифференциальным уравнением колебания балки Эйлера – Бернули с поправкой Релея, учитывающей влияние сил инерции, соответствующих повороту сечений:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - mr^2 \frac{\partial^4 u}{\partial z^2 \partial t^2} = p(z, t), \quad (3)$$

где u – перемещение горизонтальной сваи вдоль оси сооружения, m , E – погонная масса и модуль упругости при растяжении, I – момент инерции поперечного сечения сваи; $p(z, t)$ – функция внешней силы.

Фактически предлагается использовать модель балки на упругом основании, ориентированной вертикально, с вязкоупругими связями по боковым кромкам взаимодействия конструкции и грунтового массива.

Для составления действительной расчётной модели подземных элементов несущих конструкций предлагается рассмотреть элементарный объём сваи и прилегающего грунта, чтобы, путём агрегирования различных факторов, составить математическую модель деформирования элемента, которая, с одной стороны, достаточно полно описывает природу происходящих процессов с точки зрения учёта характерных свойств массива, а с другой стороны, может быть представлена в рамках конечного элементного подхода, реализуемого в современных программных вычислительных комплексах [11].

Для определения напряжённо-деформированного состояния сваи на упругом основании с использованием уравнений необходимо также учесть влияние демпфирования материала на осевую нагрузку. Процесс деформирования элементарного объёма сваи представлен на рис. 3.

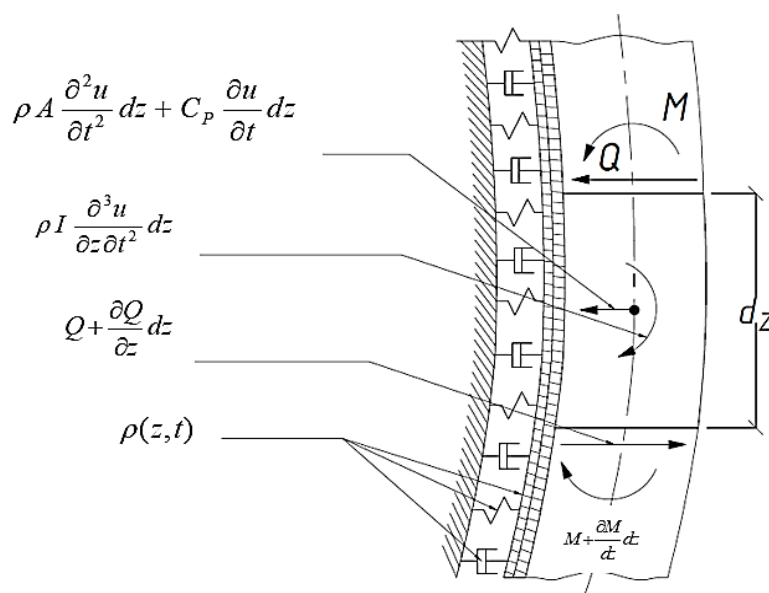


Рис. 3. Схема деформирования элементарного объёма сваи с учётом различных аспектов динамического поведения

Fig. 3. Scheme of deformation of the elementary volume of a pile, taking into account various aspects of dynamic behavior

Тогда дифференциальное уравнение принимает окончательный вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \left[EI \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\partial u}{\partial z} \left[p \frac{\partial u}{\partial z} \right] + pA \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_p \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial z} \left[pI \frac{\partial^3 u}{\partial z \partial t^2} \right] = p(z, t), \quad (4)$$

где $p(z, t)$ – внешняя распределённая нагрузка, P – осевая нагрузка; c_p – коэффициент вязкого демпфирования сваи, A – площадь поперечного сечения сваи.

По состоянию на текущий момент в программном комплексе ЛИРА 10.12 реализована возможность импорта объёмных КЭ при помощи формата .msh, который является разработанным форматом программы «Gmsh», трёхмерного генератора сеток конечных элементов, в которой для импорта сплошных объектов (solid) с распознаванием их граней, поверхностей и вершин используется формат .STEP. Программой для моделирования solid-объектов выбран Autodesk AutoCAD, тогда цепь создания объёмных КЭ будет выглядеть так: AutoCAD (.dwg) → SolidWorks (.STEP) → Gmsh (.msh) → ПК ЛИРА 10.12.

Для корректного создания сетки объёмных конечных элементов в программе Gmsh при моделировании в AutoCAD необходимо создать отдельные solid-объекты с характеристикой «3D-тело», как для обоих слоёв грунта, чтобы гарантировать прямой горизонтальный участок в месте соприкосновения грунтов, а также удобства назначения материалов в ПК ЛИРА 10.12, так и для предполагаемой железобетонной сваи, причём в местах соприкосновения solid-объектов (сваи и грунтового массива) должно быть гарантировано наличие не общих граней, а для каждого объекта отдельно, в связи с чем необходимо выполнить вычитание объёма сваи из каждого грунтового массива. Модель, подготовленная к импорту в программу SolidWorks, представлена на рис. 4, где синим цветом обозначен грунтовой массив, а красным – железобетонные сваи.

В дереве проекта, а также включив режим отображения модели на «каркасное представление», необходимо убедиться в наличии всех смоделированных объектов, как «твёрдые тела», отмечено красной стрелкой на рис. 5. Выделив все твёрдые тела в дереве проекта, необходимо при помощи команды «Сохранить как» выполнить сохранение модели в формате STEP. Характерный размер конечного элемента грунтового массива вдоль сваи составляет 3 метра.

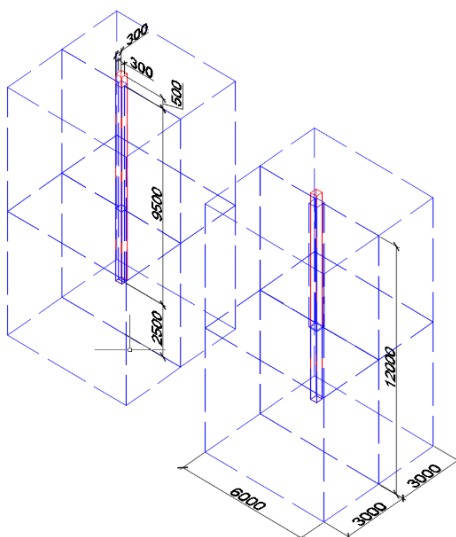
**Рис. 4. Модель генерации сетки AutoCad**

Fig. 4. AutoCad grid generation model

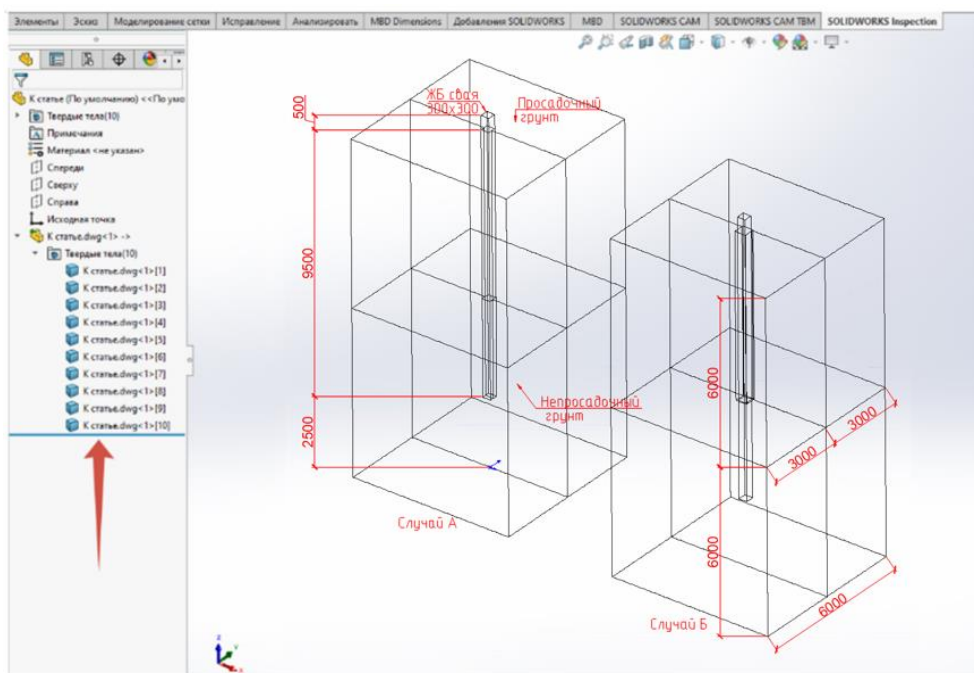
**Рис. 5. Импортированные расчётные схемы в SolidWorks**

Fig. 5. Imported calculation schemes in SolidWorks

Создание сетки объёмных конечных элементов в программе Gmsh выполняется на основе ранее заданных параметров с использованием команды Mesh → 3D на панели дерева проекта. Итоговая объёмная конечно-элементная сетка, подготовленная к экспорту в ПК ЛИРА 10.12, представлена на рис. 6.

Для экспорта в ПК ЛИРА 10.12 и дальнейшего расчёта необходимо выполнить сохранение всех созданных элементов: поверхности, грани, узлы и объёмы (surfaces, points, volumes) – в формат .msh, выполняя его в version 1, и указать отметку в позиции «Save all elements», после чего можно переходить в ПК ЛИРА 10.12 для импорта готовой расчётной схемы и задания граничных условий расчёта.

Во время подготовки расчётной схемы к выполнению расчёта необходимо задать граничные условия, нагрузки и тип КЭ, также выполнить упаковку и согласовать локальные оси элементов.

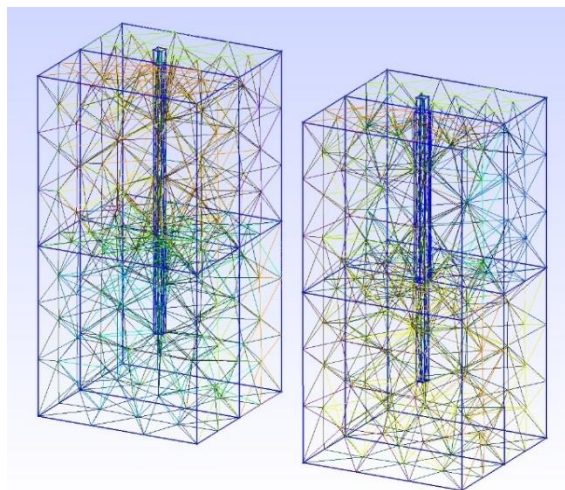


Рис. 6. Итоговая сеть конечных элементов

Fig. 6. Final finite-element grid

При создании задачи необходимо отметить, что в задаче будут присутствовать нелинейные элементы, что позволяет задать материалы согласно трёхлинейной зависимости напряжений и деформаций, а также использовать особый тип КЭ при расчёте.

Для грунта необходимо задать КЭ (272, 274, 275, 276) – Физически нелинейный пространственный КЭ «Грунт», а для элементов свай задать КЭ (232, 234, 235, 236) – Физически нелинейный пространственный КЭ.

Для корректной работы и моделирования отрицательных сил трения необходимо выбрать все узлы на поверхности железобетонной сваи и выполнить создание группы объединения перемещений по линейным и угловым степеням свободы. Для задания граничных условий были приняты следующие решения: узлы, расположенные на гранях, перпендикулярных оси X , закреплены по перемещениям вдоль оси X ; узлы, расположенные на гранях, перпендикулярных оси Y , закреплены по перемещениям вдоль оси Y ; вся нижняя грань закреплена по оси Z . Таким образом, получается, что крайние узлы нижней плоскости закреплены по 3-м направлениям, а угловые узлы вдоль тела грунта закреплены по направлениям X и Y , как показано на рис. 6.

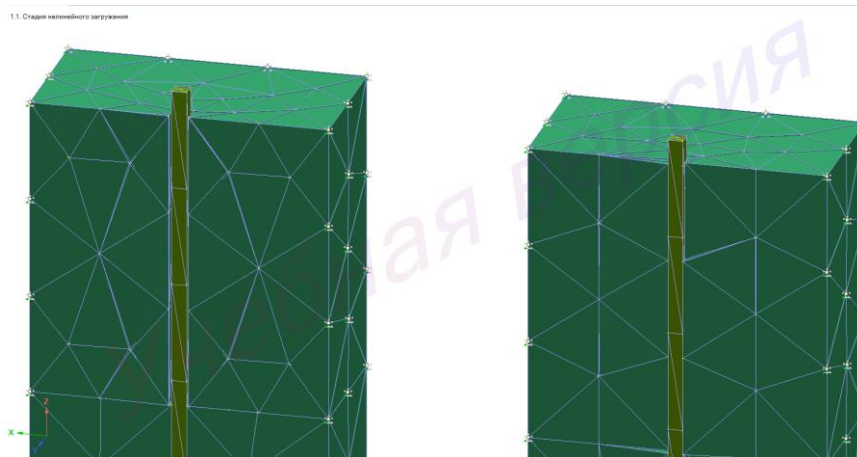


Рис. 6. Модель зазора между грунтом и свайей

Fig. 6. Gap between soil and pile model

Для расчёта заданы следующие материалы: просадочный грунт, непросадочный грунт и железобетон.

Просадочный грунт: Модуль упругости – 2200 тс/м^2 . Коэффициент Пуассона – 0.2. Сцепление – 0.5 тс/м^2 . Угол внутреннего трения – 22° . Условия прочности при сдвиге: Метод Боткина. Характеристики приняты для реализации просадки под собственным весом.

Непросадочный грунт: Модуль упругости – 8000 тс/м^2 . Коэффициент Пуассона – 0.35. Сцепление – 1 тс/м^2 . Угол внутреннего трения – 28° . Условия прочности при сдвиге: Метод Боткина.

Железобетон, как в случае [12, 13]: В25 Модуль упругости – 3.06 тс/м^2 . Коэффициент Пуассона – 0.2. Предел прочности на растяжение – 163 тс/м^2 , предел относительной деформации – 0.0002. Предел прочности на сжатие – 1890 тс/м^2 , предел относительной деформации – 0.002.

Результатом расчёта в рамках данной работы является эпюра перемещений узлов вдоль оси Z, что также является осадкой свайного фундамента. Стоит упомянуть, что для расчёта осадки помимо собственного веса грунта и конструкции сваи была задана равномерно-распределённая нагрузка, действующая на оголовок сваи, интенсивностью в 10 тс/м^2 , указанная на рис. 7.



Рис. 7. Нагрузки расчётной схемы

Fig. 7. Calculation scheme loads

Полученные результаты отображены на рис. 8, на нём отображены общая эпюра перемещений узлов по оси Z, а также значение с мозаики перемещения узлов оголовка сваи в расчётных схемах.

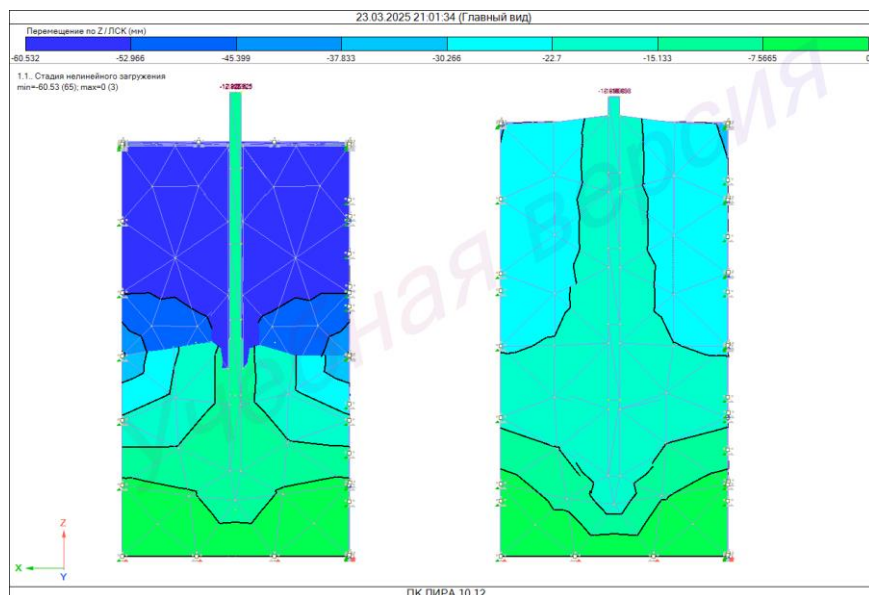


Рис. 8. Эпюра перемещений вдоль оси Z

Fig. 8. Movements diagram along axis Z

На эпюрах наблюдается, что в случае, когда свая взаимодействует с просадочным грунтом, максимальное значение осадки от заданного нагружения и влияния отрицательных сил трения грунта составляет 18.7 мм, в то время как в случае, когда свая не испытывает отрица-

тельных сил трения, осадка составила 12.9 мм. Что будет полезно при расчёте и проектировании свайных конструкций в виде свайного поля вокруг здания и сооружений для их защиты от сейсмических воздействий или для усиления грунтового основания железнодорожных или автомобильных магистралей. Просадка и осадка верхнего строения железнодорожного пути строго регламентируются нормативными документами, влияет на параметры эксплуатации транспортной магистрали (скорость, нагрузка на ось). Таким образом, полученные знания могут быть использованы при проектировании и строительстве транспортной инфраструктуры.

Обсуждение результатов

Проведя анализ работы свайного фундамента под действием нагрузки при реализации отрицательных сил трения (взаимодействия с просадочным грунтом со слабыми структурными связями) (случай А) и при формировании зазора, который позволяет игнорировать отрицательные силы трения (случай Б), значения осадки составили 18.7 и 12.9 мм. По данным таблицы 2 можно сказать, что случай Б более положительный и позволяет сократить значение осадки, и процентное соотношение к случаю А будет составлять 31.1%

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчёта
Calculation results

Расчётная схема	Осадка, мм	Соотношение, %
Случай А	18.7	100
Случай Б	12.9	68.9

Таким образом, анализ вертикальных перемещений показывает, что отрицательные силы трения при просадке грунтов со слабыми структурными связями увеличивают осадку свайного фундамента на 31.1%. Учёт детализированного описания поведения свайного элемента позволит более точно представить поведение грунта при необходимости спроектировать основания автомобильных и железных дорог при сопутствующих сооружениях инфраструктуры. Для оценки корректности результата имитационного моделирования проведены сравнения с аналитическим решением дифференциального уравнения сжато-изгибаемой сваи (4). Для аналитического решения используется вычислительная схема Тимошенко, в которой неизвестные величины считаются линейными в границах элементарных интервалов аргумента.

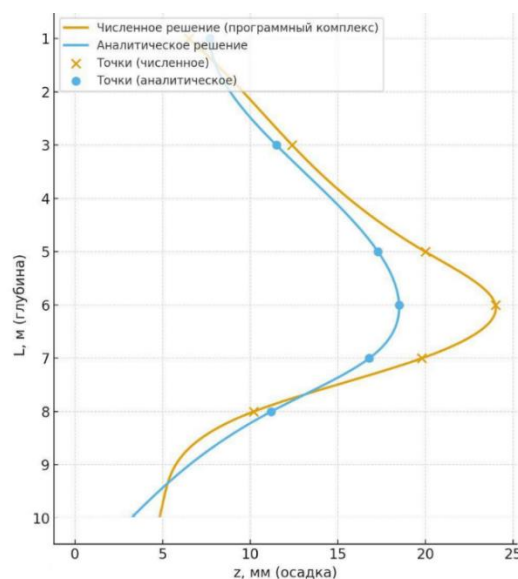


Рис. 9. Зависимость перемещений точек грунта вблизи свай (на расстоянии 5 см) от глубины погружения для величины определённых численных (x) и аналитических (•)

Fig. 9. Dependence of soil point displacements near piles (at a distance of 5 cm) on the embedding depth for values determined numerically (x) and analytically (•)

Анализируя графики, представленные на рис. 9, заметно совпадение участков типов нелинейных зависимостей по глубине расположения точек свай, расхождение в числовых значениях составляет 4–15%, что является хорошим результатом для инженерных расчётов.

Заключение

Предложенный подход, основанный на применении объёмных конечных элементов, собранных в единую имитационную модель в программном комплексе, доказал свою эффективность для моделирования сложных геотехнических задач, таких как анализ осадки фундаментов на просадочных грунтах. Использование модели Боткина для описания прочностных характеристик грунта позволило более точно учесть влияние всех главных напряжений на поведение грунтового массива. Сравнение графических зависимостей, полученных для различных методов решения исходной задачи, позволяет говорить о возможности применения предложенного подхода для решения прикладных задач на уровне инженеров-проектировщиков и других пользователей вычислительной техники без необходимости глубоких специализированных знаний в области фундаментальной механики.

Полученные результаты подчёркивают необходимость учёта отрицательных сил трения при проектировании свайных фундаментов на просадочных грунтах. Для дальнейшего повышения точности прогнозирования осадки и оптимизации проектных решений рекомендуется продолжить исследования с применением различных типов свайных фундаментов (винтовые сваи, сваи с уширением и др.) и более детального анализа влияния просадочных свойств грунта на их поведение.

Таким образом, проведённое исследование вносит вклад в развитие методов проектирования фундаментов на сложных грунтах и может быть использовано для повышения надёжности и безопасности строительства на просадочных грунтах.

Предложенный подход позволяет рассчитывать напряжённо-деформированное состояние грунтовых массивов, пригодных для строительства железных и автомобильных дорог, особенно перед искусственными сооружениями.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.А. Локтев – разработка концепции и алгоритма исследования; Л.А. Илларионова – доработка математических моделей с учётом граничных условий взаимодействия несущей конструкции грунта; А.Ю. Параскан – адаптация моделей для программного комплекса и апробирование предложенного подхода в нём.

A.A. Loktev – development of the research concept and algorithm; L.A. Illarionova – refinement of mathematical models taking into account the boundary conditions of interaction of the load-bearing structure of the soil; A.Yu. Paraskan – adaptation of models for the software package and testing of the proposed approach in it.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нгуен Ф.З., Школяр Ф.С., Рогозинникова Д.В. Исследование зависимости прочностных свойств грунта от его физического состояния // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9(35). С. 23–28. EDN: PQNQEZ
2. Платонова С.В. Моделирование статически нагруженной одиночной сваи с учётом нелинейности грунта оснований // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 9. С. 1383–1393. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1383-1393>
3. Платонова С.В., Александрова Е.А. Моделирование системы «здание – основание» в расчётном программном комплексе ЛИРА-САПР с применением системы «грунт» // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Кемерово, 24–25 ноября 2020 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. С. 267–274. EDN: LKKVVX

4. Кулебякин И.Н. Моделирование свайного основания при статическом расчёте зданий // *Advanced Science*. 2017. № 2(6). С. 25. EDN: ZJRWFB
5. Медакова Д.С., Кокунько И.Н. Особенности моделирования различных типов свайных фундаментов в программном комплексе ЛИРА-САПР // *Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 15–18 апреля 2024 года*. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2024. С. 336–340. EDN: DVZWRD
6. Акопян А.Ф., Акопян В.Ф., Шишкина Е.А. Особенности проектирования фундаментов на просадочных грунтах // *Строительство и архитектура – 2023: материалы Международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2023 года*. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2023. С. 168–169. EDN: TQXBSB
7. Акопян В.Ф., Кондрик И.В., Самсонов О.В. Моделирование отрицательных сил трения при реализации просадочных свойств грунта // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1(48). С. 111. EDN: XSMPXF
8. Нгуен Ф.З. Исследование зависимости прочностных свойств грунта от его физического состояния // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 9(35). С. 23–28. EDN: PQNQEZ
9. Башинская О.Ю. Методы численного моделирования и расчёта осадки здания // *Справочный центр LIRALAND – 2022*. URL: <https://www.liraland.ru> (дата обращения: 18.03.2025).
10. Попов А.О., Сабитов Л.С., Языев Б.М., Айменов Ж.Т. Моделирование дополнительной осадки зданий и сооружений при утрате оголовков свай // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2023. Т. 15, № 4(60). С. 21–33. EDN: SVVDSI
11. Абед А. Математическое моделирование деформации основания реконструируемого фундамента из грунтоглиноцементных свай в просадочных грунтах // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2014. № 4(108). С. 46–48. EDN: VDXRHP
12. Дьяков С.Ф., Трофин К.А. Физическая нелинейность железобетонных конструкций в расчётных программных комплексах // *Инженерные исследования*. 2024. № 4(19). С. 3–11. EDN: DGIVTS
13. Дьяков С.Ф., Мустафина Л.В. Физическая нелинейность железобетона в изгибаемых элементах с учётом длительности действия нагрузки // *Инженерные исследования*. 2024. № 1(16). С. 13–22. EDN: BXYYBY

REFERENCES

1. Nguyen F.Z., Shkolyar F.S., Rogozinnikova D.V. Study of the dependence of soil strength properties on its physical state. *Engineering and Construction Journal*, 2012, no. 9(35), pp. 23–28. (In Russ.).
2. Platonova S.V. Modeling a statically loaded single pile considering the nonlinearity of foundation soil. *Bulletin of MGSU*, 2023, vol. 18, no. 9, pp. 1383–1393. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1383-1393>
3. Platonova S.V., Aleksandrova E.A. Modeling the "building-foundation" system in the LIRA-SAPR software with the application of the soil system. *Problems of Construction Production and Real Estate Management: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*, Kemerovo, November 24–25, 2020. Kemerovo, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2020. Pp. 267–274. (In Russ.).
4. Kulebyakin I.N. Modeling a pile foundation in the static analysis of buildings. *Advanced Science*, 2017, no. 2(6), p. 25. (In Russ.).
5. Medakova D.S., Kokunko I.N. Features of modeling different types of pile foundations in the LIRA-SAPR software. *Modern Technologies: Problems and Prospects: Collection of articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference for graduate students, students, and young scientists*, Sevastopol, April 15–18, 2024. Sevastopol, Sevastopol State University, 2024. Pp. 336–340. (In Russ.).
6. Akopyan A.F., Akopyan V.F., Shishkina E.A. Features of designing foundations on collapsible soils. *Construction and Architecture – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Industrial and Civil Engineering*, Rostov-on-Don, April 19–21, 2023. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2023, pp. 168–169. (In Russ.).
7. Akopyan V.F., Kondrik I.V., Samsonov O.V. Modeling negative friction forces during the realization of collapsible soil properties. *Engineering Bulletin of the Don*, 2018, no. 1(48), p. 111. (In Russ.).

8. Nguyen F.Z. Study of the dependence of soil strength properties on its physical state. *Engineering and Construction Journal*, 2012, no. 9(35), pp. 23–28. (In Russ.).
9. Bashinskaya O.Yu. Methods of numerical modeling and calculation of building settlement. *LIRALAND Reference Center* – 2022. (In Russ.). URL: <https://www.liraland.ru> (accessed: 18.03.2025).
10. Popov A.O., Sabitov L.S., Yazyev B.M., Aimenov Zh.T. Modeling additional settlement of buildings and structures due to pile head loss. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, 2023, vol. 15, no. 4(60), pp. 21–33. (In Russ.).
11. Abed A. Mathematical modeling of the deformation of a reconstructed foundation base made of soil-cement-clay piles in collapsible soils. *Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2014, no. 4(108), pp. 46–48. (In Russ.).
12. Dyakov S.F., Trofin K.A. Physical nonlinearity of reinforced concrete structures in computational software systems. *Engineering Research*, 2024, no. 4(19), pp. 3–11. (In Russ.).
13. Dyakov S.F., Mustafina L.V. Physical nonlinearity of reinforced concrete in bending elements considering the duration of load action. *Engineering Research*, 2024, no. 1(16), pp. 13–22. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Локтев Алексей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство», Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация),
✉ aaloktev@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-5978-2219>

Alexey A. Loktev, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Construction, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation) University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Илларионова Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство», Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация),
✉ illarionova.roat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3432-8982>

Lilia A. Illarionova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Transport Construction, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation).

Параскан Александр Юрьевич – главный инженер проекта ООО «ПАЛЬМИРА ГРУП» (Москва, Российская Федерация),

✉ aleksandrparaskan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-8210-7159>

Aleksandr Yu. Paraskan, Project Chief Engineer, LLC “PALMIRA GROUP” (Moscow, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 18.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 16.09.2025.

Принята к публикации / Accepted: 24.09.2025.