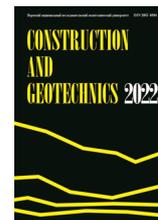




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.06

УДК 624.154.1

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ СВАЙНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Л.В. Нуждин^{1,2}, В.С. Михайлов¹

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 19 октября 2022
Одобрена: 12 декабря 2022
Принята к публикации:
6 февраля 2023

Ключевые слова:

осесимметричная модель вертикально нагруженной сваи, стержневая аналитическая модель изгибаемой сваи, модель большего размера свайного поля.

АННОТАЦИЯ

Авторами предлагается комбинированный подход для моделирования больших свайных полей, основанный на цилиндрической геомеханической модели сваи по определению численным методом сдвиговой жесткости прорезаемого сваей многослойного массива грунта – как по вертикали в виде решения осесимметричной задачи, так и в горизонтальном направлении, как для балки на упругом основании с последующим переходом к горизонтальной жесткости массива свайного поля в условиях динамических воздействий. Осесимметричное решение обладает наглядностью при анализе напряженно-деформированного состояния сваи и около-свайного грунта по сравнению с апробированными аналитическими методами. С целью ускорения вычислений на стадии основного сочетания постоянных и длительных воздействий вертикальная жесткость основания под пятой сваи может быть вычислена аналитически как для штампа на упругопластическом основании. Горизонтальная жесткость рассматривается как для дискретной одиночной изгибаемой сваи в среде упругого слоистого полупространства на стадии формирования напряженного-деформированного состояния системы при основном сочетании статических воздействий. Указанные методы численного моделирования деформаций одиночной сваи позволяют расширить алгоритм аналитического расчета большего размера свайного поля, который, в свою очередь, модифицирован авторами путем исключения деформаций ствола сваи за счет его естественного учета в конечно-элементной постановке, а также за счет введения параметра предельного радиуса влияния одиночной сваи на осадку соседних свай.

Рассмотренные численные подходы к расчету свайного поля применимы в комплексном расчете с учетом истории нагружения на этапе формирования основного сочетания постоянных и длительных воздействий. На этапах кратковременных или особых динамических воздействий предложен переход к интегральной жесткости свайных ячеек, что будет рассмотрено в следующей публикации авторов.

© ПНИПУ

© Нуждин Леонид Викторович – кандидат технических наук, профессор, e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru
Михайлов Виктор Сергеевич – аспирант, e-mail: vsmikhailov@mail.ru

Leonid V. Nuzhdin – Ph. D. in Technical Science, Professor, e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru
Victor S. Mikhailov – Postgraduate Student, e-mail: vsmikhailov@mail.ru

PILE FIELD NUMERICAL ANALYSIS AT THE STAGE OF LONG-TERM IMPACTS

L.V. Nuzhdin^{1,2}, V.S. Mikhaylov¹

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 19 October 2022
Approved: 12 December 2022
Accepted for publication:
06 February 2023

Keywords:

vertically loaded pile axisymmetric model, bended pile rod model, large pile field model.

ABSTRACT

The authors propose a combined approach for definition of the shear rigidity of the multilayered soil which is cut through by a pile. The solution for the vertical direction is presented in the view of an axisymmetric problem. As to the horizontal direction, the solution is presented in view of a beam on elastic subsoil with genetically non-linear transition to equivalent horizontal rigidity of the wide pile field in condition of dynamic forces action. The axisymmetric solution provides visual clarity in the analysis of the stress-strain state of the pile and near-pile soil in comparison with the approved analytical methods. To speed up calculations at the stage of the main combination of constant and long-term impacts, the vertical rigidity of the base under the foot of the pile can be calculated analytically as for a stamp on an elastic-plastic base. The horizontal rigidity is considered as for a discrete single bent pile in the medium of an elastic layered half-space at the stage of formation of the stress-strain state of the system under the main combination of static loads. These methods of numerical modeling of deformations of a single pile make it possible to expand the algorithm of analytical calculation of a large pile field, which in turn is modified by the authors by excluding deformations of the pile body due to its natural consideration in the finite element formulation, as well as by introducing the parameter of the limiting radius of the influence of a single pile on the settlement of neighboring piles.

The considered numerical approaches to the calculation of the pile field are applicable in a complex calculation taking into account the history of loading at the stage of the main combination of permanent and long-term impacts. At the stages of short-term or special dynamic impacts an integral rigidity of pile cells is proposed, which will be considered in the next publication of the authors.

© PNRPU

Введение

Расчет большого свайного поля в условиях динамических воздействий является одной из самых сложных задач в механике грунтов. С одной стороны, остается множество фрагментарно освещенных аспектов элементарной круглоцилиндрической ячейки одиночной сваи, жесткость которой вычисляется по двум принципиально разным математическим моделям для направлений вертикального и горизонтального воздействий. С другой стороны, практически отсутствуют методы учета истории нелинейного перехода системы «грунтовое основание – свайный фундамент» из напряженно-деформированного состояния при основном сочетании постоянных и длительных статических воздействий к новому сочетанию при динамическом воздействии, являющимся кратковременным или особым. В качестве кратковременных можно выделить пульсации ветра, техногенную сейсмику от рельсового транспорта или машин с динамическими нагрузками. В качестве особых воздействий возможно наступление сейсмических событий либо возникновение динамической реакции от выбытия несущих элементов при прогрессирующем обрушении несущей системы.

Аналитическая модель вертикально нагруженной сваи

Аналитическая сдвиговая двухслойная цилиндрическая модель для анализа осадки одиночной сваи (рис. 1, а) или группы до 25 свай была введена в 2010 г. в СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» взамен метода условного фундамента. Модель основана на значи-

тельном объеме экспериментальных данных, обобщенных в НИИОСП имени Н.М. Герсеванова [1–3].

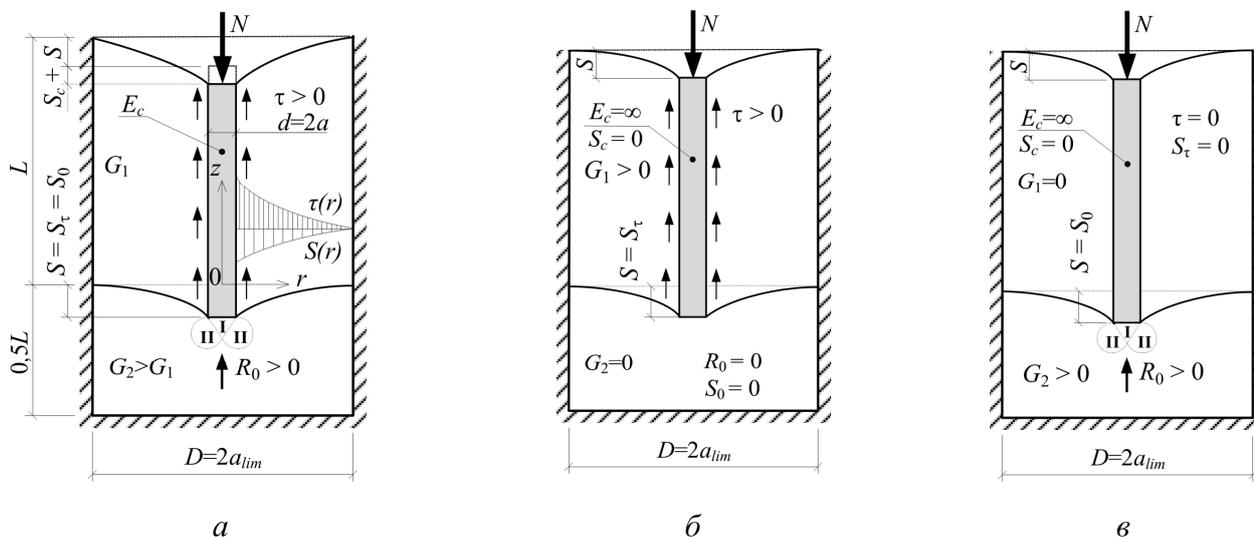


Рис. 1. Схема двухслойной цилиндрической геомеханической модели сваи:

a – напряженно-деформированное состояние околосвайного грунта; *б* – несжимаемая висячая свая при отсутствии отпора под пятой; *в* – несжимаемая свая-стойка с образованием уплотненного ядра (I) и зон предельного состояния (II) под пятой сваи, как под штампом

Fig. 1. Diagram of a two-layer cylindrical pile model: *a* – the stress-strain state of the near-pile soil; *б* – an incompressible tanton pile in the absence of a rebound under the foot of the pile; *в* – an incompressible pile-rack with the formation of a compacted core (I) and zones of limit state (II) under the foot of the pile

Двухслойная концепция была впервые предложена еще в 1953 г. [4], в которой за счет исключения сжимаемости тела сваи по сравнению с грунтом общая осадка сваи S разделялась на осадку основания по ее боковой поверхности S_τ (рис. 1, б) и на равную ей осадку подстилающего грунта S_0 от продавливания пятой сваи (рис. 1, в). На основе этого подхода было разработано несколько модифицированных аналитических моделей, основанных на решении Миндлина для упругого полупространства, которые позволяют учитывать пластические и реологические свойства грунтов [5–10].

Преимуществом аналитического описания сдвиговой модели одиночной сваи является простота её применения для автоматизации численных расчетов методом конечных элементов [11–13]. Однако математическое изложение с избыточным количеством коэффициентов существенно затрудняет восприятие физического смысла метода. С целью упрощения аналитической методики и привязки параметров к физическим процессам при вертикальном нагружении одиночной сваи предлагается использовать предельный радиус взаимного влияния соседних свай на осадку рассматриваемой сваи a_{lim} (1). Этот параметр является радиусом цилиндрической геомеханической модели, по высоте равной длине сваи L с подстилающим слоем $0,5L$ (см. рис. 1, а). Исключение из модели возможности продольных деформаций в бетонном теле сваи, что естественным образом учитывается при решении задачи методом конечных элементов, и введение радиуса влияния упрощают аналитическую модель осадки рассматриваемой одиночной сваи S_i (2) и осадку сваи в группе $S_{i,gr}$ (4) в составе j свай на двухслойном основании от вертикальной нагрузки N на голову сваи:

$$a_{lim} = k_v \frac{G_1 L}{2G_2} = (2,82 - 3,78v + 2,18v^2) \frac{G_1 L}{2G_2}; \quad (1)$$

$$S_i = 0,17 \ln \left(\frac{a_{lim}}{2d} \right) \frac{N_i}{G_1 L}; \quad (2)$$

$$S_{ad.ij} = 0,17 \ln \left(\frac{a_{lim}}{a_j} \right) \frac{N_j}{G_1 L}; \quad (3)$$

$$S_{i.gr} = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ad.ij}. \quad (4)$$

где G_1 – средневзвешенный модуль сдвига слоев грунта, прорезаемых сваяй; где G_2 – то же, в пределах глубины $0,5L$ или $10d$ приведенных диаметров свай; v – среднеарифметическое значение между коэффициентом Пуассона v_2 непосредственно под пятой и средневзвешенным значением v_1 для грунтов, прорезаемых сваяй.

Численная осесимметричная модель вертикально нагруженной сваи

Также предлагается дальнейшее развитие цилиндрической геомеханической модели одиночной сваи путем замены аналитического описания для области сдвиговых линейных деформаций по длине сваи на численное решение методом конечных элементов для многослойного осесимметричного объемного тела [14]. Метод верифицирован в Mathcad (рис. 2, а) с пространственной моделью из объемных конечных элементов (рис. 2, б) и с осесимметричной моделью в SCAD (рис. 2, в).

В качестве примера рассмотрен фрагмент ячейки высотой 0,4 и радиусом 0,57 м, когда свая-стойка на несжимаемом основании из бетона В20 диаметром 0,3 м прорезает суглинок с модулем деформации 10 МПа.

Максимальная погрешность реакции в узле № 2 в численном решении Mathcad составила 0,7 % (рис. 3) а для вертикальной деформации в узле № 7 – 0,3 % по сравнению с осесимметричным решением в SCAD (рис. 4, а и б). Максимальная осадка в верхнем краевом узле в пространственной задаче SCAD составила 6,28 мм или на 1,5 % больше, чем 6,19 мм – для осесимметричных решений в Mathcad и SCAD (рис. 4, в). Максимальная погрешность для вычисленных вертикальных напряжений σ_z составляет 8,8 % в элементе № 7 и резко убывает до 0,004 % к периферии ячейки по мере удаления от концентраторов напряжений вдоль оси вращения (рис. 4, б), что указывает на допустимость моделирования тела сваи двумя рядами конечных элементов (КЭ).

Осадка одиночной сваи длиной 12 м в суглинистом грунте в упругой осесимметричной постановке (рис. 5, а) с глубиной подстилающего слоя $0,5L$ на 24 % меньше значения, полученного при аналитическом решении (2). Увеличение толщины упругого подстилающего слоя до глубины сжимаемой толщи условного фундамента оказывается недостаточным (рис. 5, б). Соответствие численного и аналитического решения достигается при учете в осесимметричной модели двойной глубины сжимаемой толщи $2 \cdot H_c = 22,8$ м (рис. 5, в). Это связано с тем, что под пятой сваи образуются зоны уплотненного ядра I и предельного равновесия II (см. рис. 1, в). Полное исключение из численного решения подстилающего слоя оставляет только жесткость сдвига по боковой поверхности и приводит к $S_\tau = 6,41$ мм с превышением на 4,8 % по сравнению с аналитическим решением.

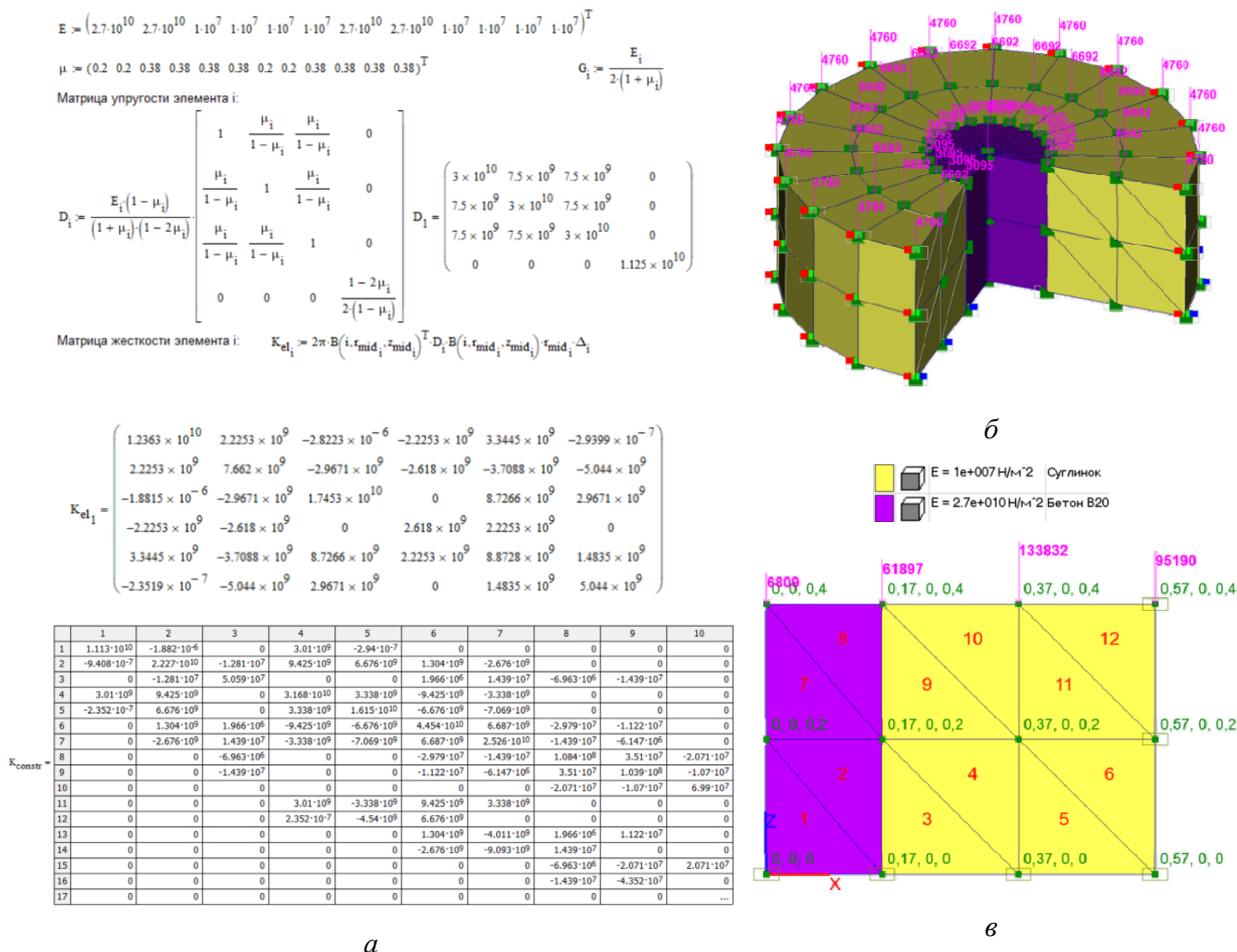


Рис. 2. Верифицируемые модели цилиндрической ячейки: а – Mathcad 2D; б – SCAD 3D; в – SCAD 2D
 Fig. 2. Verified cylindrical cell models: а – Mathcad 2D; б – SCAD 3D; в – SCAD 2D

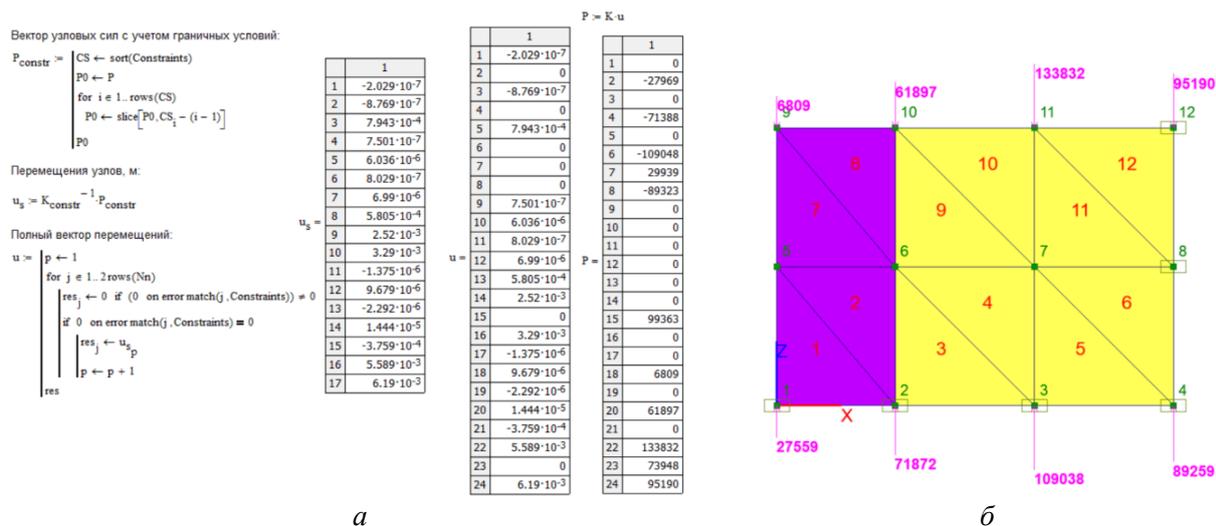


Рис. 3. Реакции в узлах осесимметричных моделей: а – Mathcad; б – SCAD
 Fig. 3. Reactions in nodes of axisymmetric models: а – Mathcad; б – SCAD

Разделение вектора перемещений на два вектора перемещений по соответствующим осям:

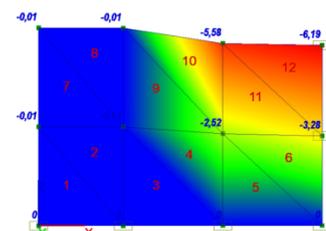
$$x := \begin{cases} p \leftarrow 1 \\ \text{for } j \in 1.. \text{floor} \left(\frac{\text{rows}(u)}{2} \right) \\ \begin{cases} x_p \leftarrow u_{2(j-1)+1} \\ p \leftarrow p + 1 \end{cases} \end{cases} \quad z := \begin{cases} p \leftarrow 1 \\ \text{for } j \in 1.. \text{floor} \left(\frac{\text{rows}(u)}{2} \right) \\ \begin{cases} z_p \leftarrow u_{2(j-1)+2} \\ p \leftarrow p + 1 \end{cases} \end{cases}$$

$$\text{stack}(-z^T \cdot 1000, -x^T \cdot 1000) = \begin{array}{c|cccccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.01 & -0.01 & -2.52 & -3.29 & -0.01 & -0.01 & -5.59 & -6.19 \\ \hline 2 & 0 & 0 & -0.79 & 0 & -0 & -0 & -0.58 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.38 & 0 \end{array}$$

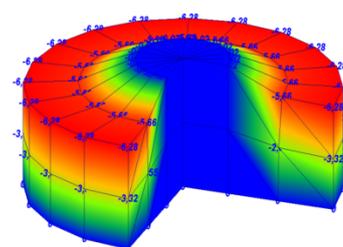
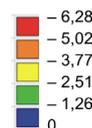
Средние напряжения в центре конечного элемента $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_y, \tau_{rz}$ $\sigma_i = D_i B(i, r_{mid}, z_{mid}) \cdot v_i$

$\sigma_7 = \begin{pmatrix} 556661 \\ 153799 \\ 170430 \\ -56404 \end{pmatrix}$	$\sigma_8 = \begin{pmatrix} 1013842 \\ 54379 \\ -13729 \\ 140956 \end{pmatrix}$	$\sigma_9 = \begin{pmatrix} 43309 \\ 64042 \\ 48949 \\ 45470 \end{pmatrix}$	$\sigma_{10} = \begin{pmatrix} 268395 \\ 143654 \\ 158801 \\ 83667 \end{pmatrix}$	$\sigma_{11} = \begin{pmatrix} 255768 \\ 123531 \\ 145695 \\ -3371 \end{pmatrix}$	$\sigma_{12} = \begin{pmatrix} 290111 \\ 198672 \\ 183248 \\ 10882 \end{pmatrix}$
$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 861106 \\ 92868 \\ 138434 \\ 53607 \end{pmatrix}$	$\sigma_2 = \begin{pmatrix} 1065667 \\ 286332 \\ 324090 \\ 157591 \end{pmatrix}$	$\sigma_3 = \begin{pmatrix} 59108 \\ 87667 \\ 66961 \\ 30 \end{pmatrix}$	$\sigma_4 = \begin{pmatrix} 286472 \\ 216170 \\ 206121 \\ 41652 \end{pmatrix}$	$\sigma_5 = \begin{pmatrix} 202346 \\ 82260 \\ 118645 \\ -3874 \end{pmatrix}$	$\sigma_6 = \begin{pmatrix} 279081 \\ 138834 \\ 162652 \\ 13955 \end{pmatrix}$

a



b



в

Рис. 4. Осадки в узлах и напряжения в центре КЭ моделей: а – Mathcad 2D; б – SCAD 2D; в – SCAD 3D
 Fig. 4. Nodal deformations and stresses in the finite elements: a – Mathcad 2D; б – SCAD 2D; в – SCAD 3D

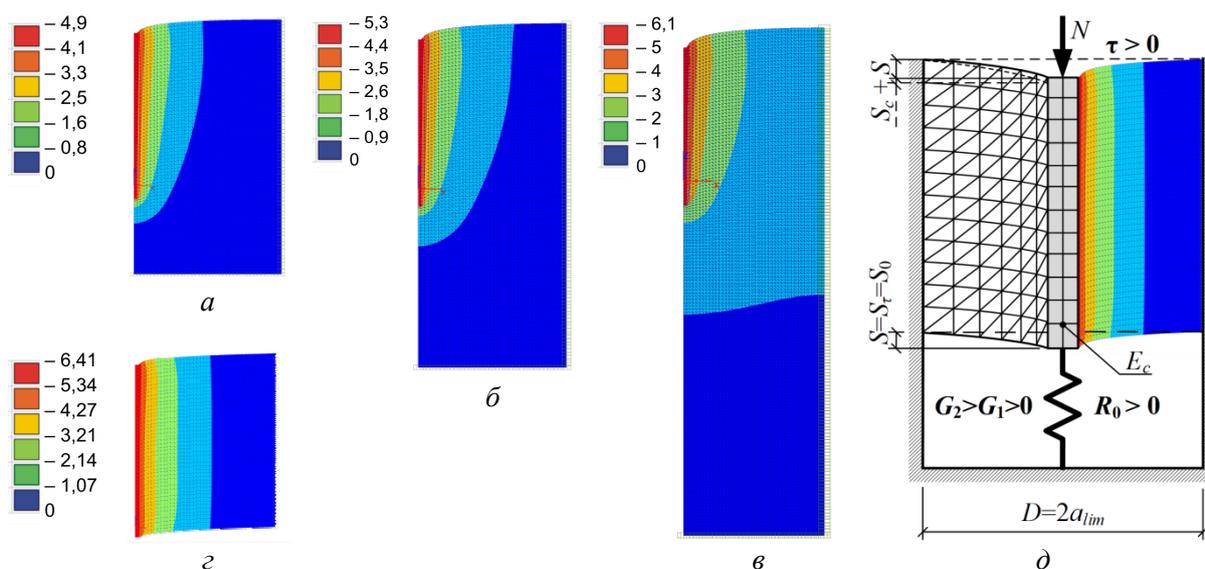


Рис. 5. Анализ осадок сваи длиной L и переменной глубиной подстилающего основания:
 а – глубина $0,5L$; б – L ; в – $2L$; г – исключение подстилающего основания;
 д – схема комбинированной осесимметричной модели сваи с аналитической жесткостью подстилающего основания по Шлейхеру
 Fig. 5. Analysis of pile settlement with length L and variable depth of the underlying foundation:
 а – depth $0,5L$; б – L ; в – $2L$; г – exclusion of the underlying subsoil; д – scheme of a combined axisymmetric pile model with analytical rigidity of the underlying subsoil according to Schleicher

Предлагаемый комбинированный подход позволяет достичь соответствия численного и аналитического решений задачи. В осесимметричной модели подстилающий слой заменен на эквивалентную жесткость основания под пятой сваи (рис. 5, д), соответствующей аналитическому решению для осадки круглого штампа [15]. Это позволило ускорить вы-

числения при расчете осадок свайных или комбинированных свайно-плитных фундаментов путем применения линейного численного решения для многослойной толщи грунтового основания, прорезаемого сваей, и эмпирического решения для упругопластических деформаций под пятой сваи.

Численная модель горизонтально нагруженной сваи

На практике расчет деформаций сваи в грунте не может быть обеспечен комбинированной осесимметричной моделью в связи с её ограничением только для анализа вертикальной жесткости сваи. В подавляющем большинстве случаев сваи испытывают сложное напряженно-деформированное состояние. Действие значительных поперечных сил и моментов имеет место в свайных кустах каркасных зданий и сооружений, а также в крайних сваях больших свайных полей. Тем не менее исследуемые авторами условия динамических воздействий на большое свайное поле соответствуют преимущественно горизонтальной силе на оголовки сваи. Поэтому при разработке универсального метода для всех стадий нагружения свайного основания предлагается рассматривать комплексную численную модель сваи. Под комплексностью подразумевается независимое вычисление вертикальной и горизонтальной жесткостей сваи. Результаты вычислений могут выдаваться как в промежуточных узлах рядовых стержневых конечных элементов железобетонных свай для статических расчетов, так и в уровне оголовка сваи или верха свайной ячейки для выполнения прямых динамических расчетов во временной области, требующих оптимизации размера модели.

Повышение точности и сокращение вычислительных требований к решению задачи изгиба сваи, погруженной в упругое полупространство, достигается путем численного решения дифференциального уравнения упругой балки на упругом основании [16]:

$$u^{IV} + \frac{(b_p \cdot K_0 \cdot z) \alpha}{EI} u = \frac{q}{EI}, \quad (5)$$

где u – неизвестные горизонтальные перемещения сваи; $EI = E(\pi d^4 / 64)$ – изгибная жесткость круглой сваи диаметром d или $EI = E(bh^3 / 12)$ – для прямоугольной сваи со сторонами b и h в плоскости деформации вдоль стороны h ; b_p и K_0 – ширина условного сечения сваи и линейно увеличивающийся по глубине z коэффициент упругого основания на боковой поверхности сваи в соответствии с [17]; α – коэффициент снижения жесткости грунта по боковой поверхности сваи в составе горизонтально нагруженной группы, равный единице для одиночной сваи [3]; q – распределенная горизонтальная нагрузка на малый участок оголовка a , заменяет сосредоточенную силу H , отсутствующую в правой части дифференциального уравнения (5).

Предложенный вариант аналитического решения для расчета горизонтальных деформаций сваи в уровне оголовка (рис. 6, а) целесообразен для условий широкого свайного поля с достаточно жестким ростверком, когда крайние сваи, испытывающие дополнительные изгибающие моменты, вносят малый вклад в суммарную сдвиговую жесткость. При необходимости детального анализа высокого гибкого ростверка свайного куста, в котором сваи могут испытывать значительные изгибающие моменты (рис. 6, б), не требуется наличие специализированных конечных суперэлементов, поскольку для небольшого количества

ва свай в кусте достаточно использовать классические стержневые конечные элементы с заданными коэффициентами постели по боковой поверхности свай.

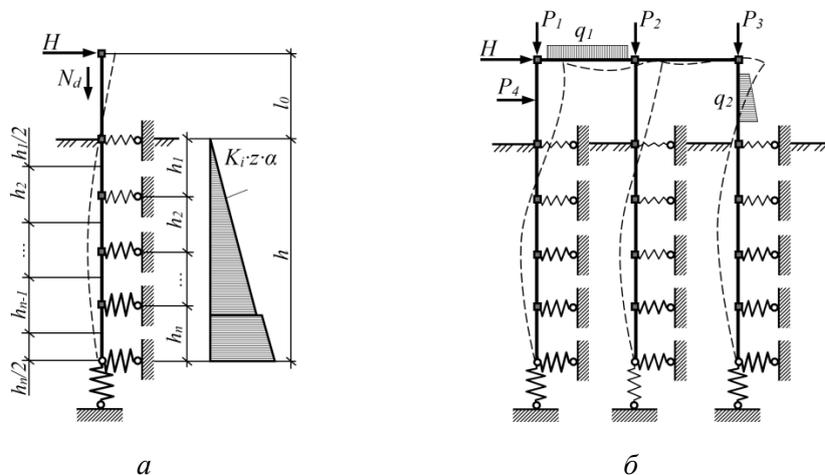


Рис. 6. Схема дискретной модели свай с горизонтальной нагрузкой:
 а – одиночная свая; б – куст с высоким гибким ростверком
 Fig. 6. Schema of the discrete pile model with horizontal load:
 а – single pile; б – pile with a high flexible spike

На рис. 7 представлен алгоритм решения в Mathcad для свай как балки на упругом основании в виде дифференциального уравнения четвертого порядка. Вследствие замены сосредоточенной горизонтальной нагрузки H , эквивалентной распределенной силе q на малом участке оголовка свай, в качестве четырех необходимых граничных условий приняты нулевые значения поперечных моментов и поперечных сил, соответствующих второй и третьей производной от прогиба. Горизонтальное усилие H в алгоритме рассматривается в качестве вектора, что позволяет учитывать на боковой грани свай переменное по глубине бытовое давление и от поверхностной нагрузки.

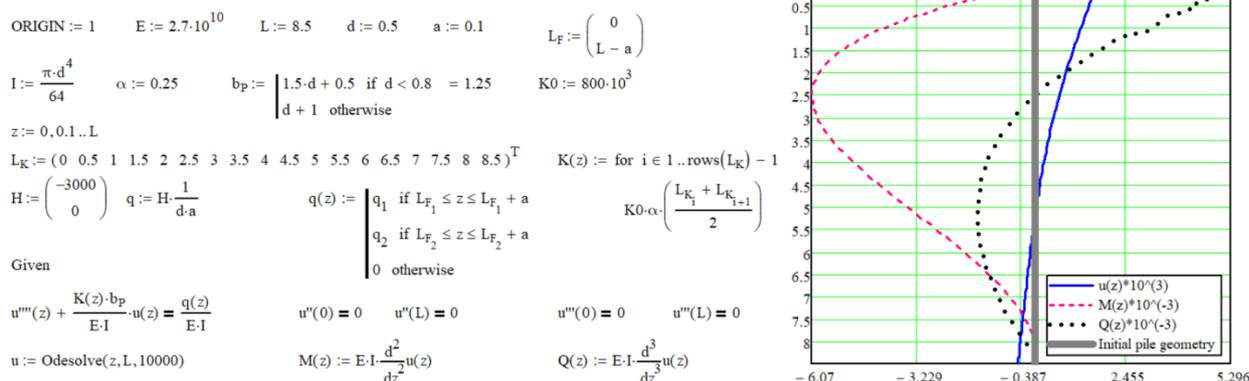


Рис. 7. Алгоритм численной модели горизонтально нагруженной одиночной свай
 Fig. 7. Algorithm of the numerical model of the horizontally loaded single pile

Представленная численная модель горизонтально нагруженной одиночной свай реализует классическое решение данной задачи и соответствует положениям методики приложения В СП 24.13330. Однако применительно к расчетам большого свайного поля данная модель может быть использована исключительно на начальных стадиях генетически нели-

нейного формирования напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание – свайный фундамент» при этапном возведении объекта и на стадии эксплуатации при действии основных нормативно-длительных сочетаний внешних воздействий. Анализ системы на последующих стадиях, на которых возникает динамическое кратковременное или особое воздействие, должен выполняться с принципиально иной моделью свайного основания.

Численная модель свайного поля в условиях статических воздействий

Ниже (рис. 8) приведен пример расчета численно-аналитической модели большого свайного поля на действие вертикальных и горизонтальных нагрузок, который детально был рассмотрен в прошлых публикациях авторов [18–20].

Аналитическая методика по расчету свайных кустов с жестким плитным ростверком [3] удобна для математической реализации в расчетных комплексах, основанных на численном методе конечных элементов. При этом горизонтальная жесткость свай (рис. 8, *a*) принимается по эмпирической зависимости [17]. В отличие от расчета одиночной сваи для группы свай или для свайного поля необходим итерационный расчет с уточнением вертикальной жесткости по нижним концам свай или с уточнением дополнительных усилий ΔN_h . Оба подхода позволяют отразить деформации упругой модели основания в виде общей осадочной мульды с учетом взаимного влияния соседних свай.

В результате расчета определяются осадки куста или свайного поля с одноузловыми связями конечной жесткости и дополнительными нагрузками ΔN_h , формирующими общую осадочную воронку группы свай (рис. 8, *б*). Можно отметить, что при отображении деформаций и изгибающих моментов в сваях от постоянных воздействий на фундамент прослеживается эффект краевой сваи.

Данный расчет может быть реализован единым алгоритмом для фундаментов в виде одиночной сваи, группы свай или свайного поля с эквивалентными жесткостями на различных стадиях нагружения конструкций фундамента.

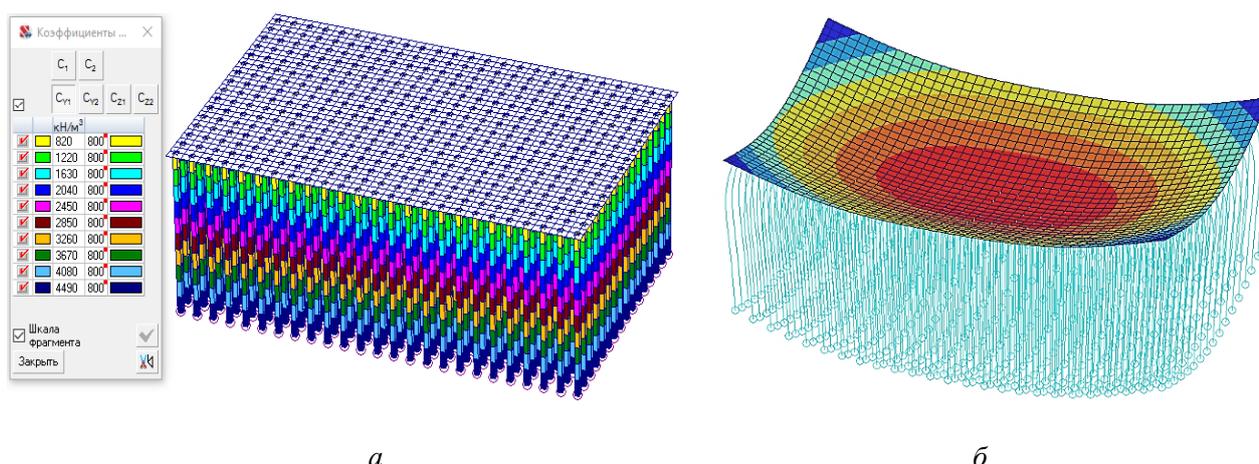


Рис. 8. Пример моделей свайного поля с гибким плитным ростверком в SCAD: *a* – коэффициенты пропорциональных деформаций по боковой поверхности; *б* – деформации свайного фундамента
Fig. 8. Example of models of a pile field with a flexible plate grid in SCAD: *a* – coefficients of proportional deformations along the side surface; *б* – deformations of the pile foundation

Начальным этапом расчета является назначение коэффициентов постели по боковой поверхности свай [3, 11, 12] для задания их горизонтальной жесткости, увеличивающейся с глубиной по мере возрастания степени обжатия грунтом (6). Вместе с этим определяется понижающий коэффициент учета снижения горизонтальной жесткости сваи в составе куста по сравнению с одиночной свайей [3]:

$$C_z = K \cdot z \cdot \frac{\alpha}{\gamma_c}, \quad (6)$$

где K – эмпирическое значение жесткости грунтов при горизонтальном отпоре по боковой поверхности свай [17]; z – глубина, от поверхности земли, на которой вычисляется боковое обжатие; γ_c – коэффициент условий работы, имеющий во всех случаях значение «3». Вычисленные коэффициенты постели C_z для стержневых конечных элементов свай назначаются по направлениям местных осей стержневого конечного элемента сваи Y_1 и Z_1 с учетом ширины условной площадки опирания сваи.

На втором этапе выполнения численного расчета в SCAD производится назначение начальных граничных условий по вертикали без учета взаимного влияния свай в группе (2). Модуль сдвига G_1 слоев грунта, прорезаемых свайей, вычисляется (7) с использованием осредненных значений модуля деформации E_1 (8) и безразмерного коэффициента Пуассона ν_1 (9) для i слоев грунта, прорезаемых свайей. Аналогично вычисляется модуль сдвига G_2 и коэффициент ν_2 для слоев грунта под нижними концами свай (10):

$$G_1 = \frac{E_1}{2 \cdot (1 + \nu_1)}, \quad (7)$$

$$E_1 = \frac{\sum_{i=1}^{rows(E)-1} E_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^{rows(E)-1} L_i}, \quad (8)$$

$$\nu_1 = \frac{\sum_{i=1}^{rows(E)-1} \nu_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^{rows(E)-1} L_i}, \quad (9)$$

$$\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2}{2}, \quad (10)$$

$$\beta' = 0,17 \ln \left[\frac{(2,82 - 3,78\nu + 2,18\nu^2) \cdot G_1 \cdot L}{G_2 \cdot d} \right], \quad (11)$$

$$k_z = \frac{G_1 \cdot L}{\beta'}, \quad (12)$$

где E_i и ν_i – модуль деформации и коэффициент Пуассона отдельных слоев грунта, прорезаемых свайей; L_i – толщины прорезаемых свайей слоев грунта; β' – коэффициент, соответствующий абсолютно жесткой свае.

Модуль деформации E_2 слоев грунта, расположенных под пятой сваи, принимается осредненным в пределах глубины от нижних торцов свай, равной половине длины сваи $0,5L$ или равным $10d$ приведенных диаметров сваи. Коэффициент Пуассона ν_2 задается не-

посредственно по слою ниже подошвы условного фундамента. Затем определяется среднее значение коэффициента Пуассона ν по формуле (10). В итоге по формуле (11) определяется жесткость одиночной сваи, которая используется к конечно-элементной модели до уточнения взаимного влияния свай в группе.

Значительное превышение начального значения вертикальной жесткости k_z по сравнению со значениями коэффициентов постели C_1 в методе условного фундамента объясняется тем, что конечная жесткость свай будет снижаться в результате итерационного уточнения в процессе выполнения следующего этапа по расчету взаимного влияния свай в группе при совместных деформациях по вертикали с образованием общей осадочной мульды.

Алгоритм для учета взаимного влияния свай в группе (рис. 9) применяется на заключительном, четвертом, этапе расчета. Задача решается с использованием средств линейного программирования. Массив с координатами узлов свай преобразуется в два численных ряда с координатами X и Y (рис. 9, а). Следующим шагом формируется общая матрица $a2$ взаимного расположения свай в кусте в виде расстояний между сваями (рис. 9, б). Размер квадратной матрицы соответствует количеству свай в фундаменте. На основании матрицы коэффициентов взаимного влияния свай $\delta 2$ (рис. 9, в) вычисляется матрица дополнительных усилий $\Delta N h$ (рис. 9, з) для моделирования совместной осадки свай в группе либо матрица понижающих коэффициентов к исходной жесткости одиночных свай (12).

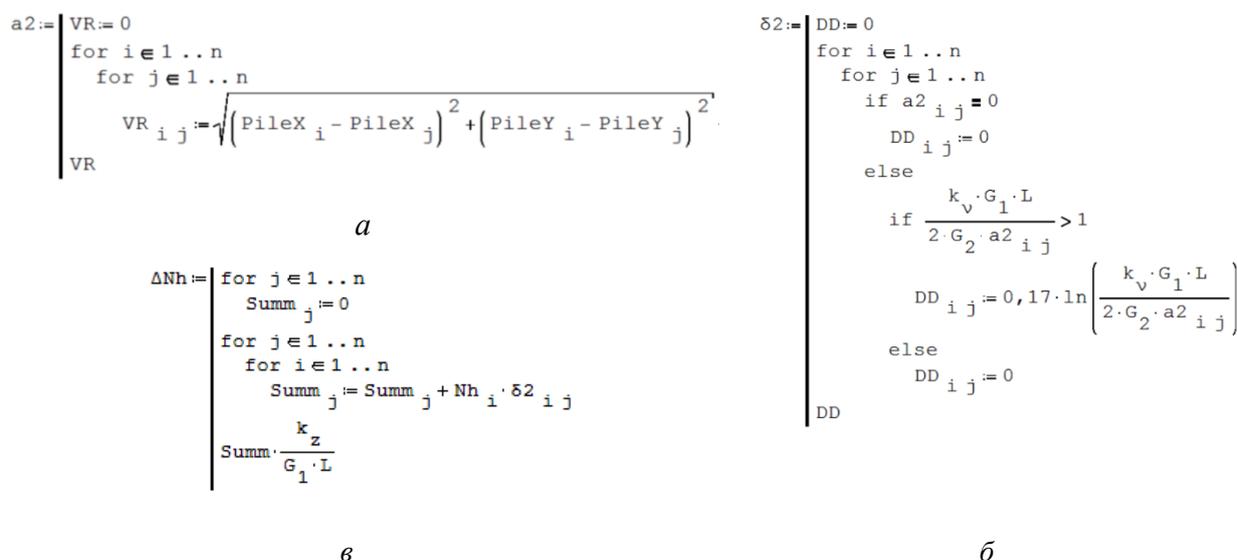


Рис. 9. Алгоритм взаимного влияния свай в группе: а – матрица взаимного расположения; б – матрица податливости; в – массив дополнительных усилий в уровне пяты свай, формирующий осадочную воронку

Fig. 9. The algorithm of mutual influence of piles in the group: а – the matrix of mutual location; б – the matrix of subsoil flexibility; в – an array of additional loads at the level of the foot of the pile, forming a settlement funnel

Заключение

В публикации изложены теоретические положения о методах численного моделирования большеразмерного свайного поля в условиях постоянных и длительных воздействий на начальной стадии расчета с учетом истории нагружения. Рассмотрение перехода от ста-

тической к динамической модели грунтового основания большого свайного поля на этапах кратковременных и особых воздействий будет представлено в последующей публикации. В качестве апробации теоретических положений авторами рассматривается численная верификация натурных испытаний свай [21–23].

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. Федоровский В.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния многослойного полупространства под действием сосредоточенной нагрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1972. – № 5. – С. 37 – 40.
2. Федоровский В.Г. Расчет осадок свай в однородных и многослойных основаниях: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1974. – 198 с.
3. Сваи в гидротехническом строительстве / В.Г. Федоровский, С.Н. Левачев, С.В. Курилло, Ю.М. Колесников. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 240 с.
4. Тер-Ованесов Г.С. Совместная работа ростверка, свай и грунта в висячих свайных фундаментах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1956. – 10 с.
5. Тер-Мартirosян З.Г., Чинь Туан Вьет. Взаимодействие одиночной сваи с двухслойным основанием с учетом сжимаемости ствола // Вестник МГСУ. – 2012. – № 4. – С. 28–34.
6. Динь Хоанг Нам. Взаимодействие длинных свай с грунтом в свайном фундаменте: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2006. – 163 с.
7. Нгуен Занг Нам. Взаимодействие буронабивных длинных свай с грунтовым основанием с учетом фактора времени: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 167 с.
8. Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2016. – 324 с.
9. Взаимодействие длинной сваи конечной жесткости и окружающего грунта с учетом упругопластических свойств грунта / А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Чинь Туан Вьет, В.С. Аванесов // Научное обозрение. – 2015. – № 18. – С. 84–89.
10. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью. – М.: Изд-во АСВ, 2020. – 946 с.
11. Шапиро Д.М. Теория и расчётные модели оснований и объектов геотехники. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 180 с.
12. Едигаров Г.Э. Опыт применения SCAD OFFICE в расчете промежуточной опоры моста с учетом взаимного влияния свай в кусте // CADMASTER. – 2015. – № 3. – С. 88–97.
13. Нуждин Л.В., Михайлов В.С. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01
14. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. – Запорожье: Світ геотехніки, 2009. – 400 с.
15. Schleicher F. Senkungsmittelwert und ahnlichkeitsbedingung fur platen und balken auf isotroper elastischer unterlage // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 1928. – В. 8. – S. 68–70.

16. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15. – СПб.: Питер, 2011. – 400 с.
17. Завриев К.С., Шпиро Г.С. Расчеты фундаментов мостовых опор глубокого заложения. – М.: Транспорт, 1970. – 215 с.
18. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Models and calculation methods of the pile foundation in SCAD Office // Proceedings of the XVI DECGE, 7-9 June. – Berlin, 2018. – P. 487–492. DOI: <https://doi.org/10.1002/сера.718>
19. Nuzhdin L., Mikhailov V., Rezyapkin V. Modeling and analysis of the pile cluster foundation in SCAD and SMath Studio // Proceedings of the ARC 2019, 14–18 October. – Taipei, 2020. – P. 1.
20. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Genetically nonlinear combined model of pile field under dynamic impacts // Journal of physics: Conference series. Proceedings of the DFGC 2021, 26–28 May. – Perm, 2021. – P. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012013
21. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Verification of the Results of Numerical and Analytical Estimates of the Settling of a Single Pile in Argillite-Like Clay // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2016. – № 53 (2). – P. 78–81. DOI: 10.1007/s11204-016-9368-6
22. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N. Effect of soil compaction around driven pile and prediction of pile settlement on claystones // Proceedings of the ECSMGE 2019, 1–7 September. – Reykjavik, 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0069
23. Ponomarev A.B., Akbulyakova E.N., Ofrichter Y.V. Prediction of Bearing Capacity of Driven Piles in Semi-Rocky Soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2020. – № 57 (2). – P. 133–138. DOI: 10.1007/s11204-020-09648-1

References

1. Fedorovskiy V.G. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya mnogosloynnogo poluprostranstva pod deystviyem sosredotochennoy nagruzki [Calculation of the stress-strain state of a multilayer half-space under the action of a concentrated load]. Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov, 1972, no. 5. pp. 37 – 40.
2. Fedorovskiy V.G. Raschet osadok svay v odnorodnykh i mnogosloynnykh osnovaniyakh [Calculation of pile settlement in homogeneous and multilayer subsoils]. Ph. D. thesis. Moscow, 1974, 198 p.
3. Fedorovskiy V.G., Levachev S.N., Kurillo S.V., Kolesnikov YU.M. Svai v gidrotekhnicheskom stroitel'stve [Piles in hydrotechnical construction.]. Moscow, ASV, 2003, 240 p.
4. Ter-Ovanesov G.S. Sovmestnaya rabota rostverka, svay i grunta v visyachikh svaynykh fundamenta [Joint work of foundation slab, piles and soil in hanging pile foundations]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 1956, 10 p.
5. Ter-Martirosyan Z.G., Chin' Tuan V'yet. Vzaimodeystviye odinochnoy svai s dvukhsloynnym osnovaniyem s uchetom szhimayemosti stvola [Interaction of a single pile with a two-layer base, taking into account the compressibility of the pile body]. Vestnik MGSU, 2012, no 4. pp. 28-34.
6. Din' Khoang Nam. Vzaimodeystviye dlinnykh svay s gruntom v svaynom fundamente [Interaction of long piles with soil in the pile foundation]. Ph. D. thesis. Moscow, 2006, 163 p.
7. Nguyen Zang Nam. Vzaimodeystviye buronabivnykh dlinnykh svay s gruntovym osnovaniyem s uchetom faktora vremeni [Interaction of bored long piles with a soil base taking into account the time factor]. Ph. D. thesis. Moscow, 2008, 167 p.
8. Ter-Martirosyan A.Z. Vzaimodeystviye fundamentov zdaniy i sooruzheniy s vodonasyshchennym osnovaniyem pri uchete nelineynykh i reologicheskikh svoystv gruntov [Interaction of foundations of buildings and structures with a water-saturated subsoil, taking into account the nonlinear and rheological properties of soils]. D.Sc. in engineering thesis, Moscow, 2016, 324 p.

9. Ter-Martirosyan A.Z., Ter-Martirosyan Z.G., Chin' Tuan V'yet, Avanesov V.S. Vzaimodeystviye dlinnoy svai konechnoy zhestkosti i okruzhayushchego grunta s uchetom uprugoplasticheskikh svoystv grunta [Interaction of a long pile of finite rigidity and the surrounding soil taking into account the elastic-plastic properties of the soil]. *Nauchnoye obozreniye*, 2015, no 18. pp. 84-89.
10. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. Mekhanika gruntov v vysotnom stroitel'stve s razvitoy podzemnoy chast'yu [Soil mechanics in high-rise construction with a developed underground part]. Moscow, ASV, 2020, 946 p.
11. Shapiro D.M. Teoriya i raschotnyye modeli osnovaniy i ob'yektov geotekhniki [Theory and computational models of foundations and objects of geotechnics]. Moscow, ASV, 2016, 180 p.
12. Edigarov G.E. Opyt primeneniya SCAD OFFICE v raschete promezhutochnoy opory mosta s uchetom vzaimnogo vliyaniya svay v kuste [The experience of using SCAD OFFICE in the calculation of the intermediate bridge support, taking into account the mutual influence of pile cluster]. *CADMASTER*, 2015, no 3. pp. 88-97.
13. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Chislennoye modelirovaniye svaynykh fundamentov v raschetno-analiticheskom komplekse SCAD Office [Numerical modeling of pile foundations using SCAD Office structural analysis software]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01
14. Klovanih S.F. Metod konechnykh elementov v nelineynykh zadachakh inzhenernoy mekhaniki [The finite element method in nonlinear problems of engineering mechanics]. Zaporozh'ye, Svit geotekhniki, 2009, 400 p.
15. Schleicher F. Senkungsmittelwert und ahnlichkeitsbedingung fur platen und balken auf isotroper elastischer unterlage // *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1928. B.8. – S. 68-70.
16. Makarov Ye.G. Inzhenernyye raschety v Mathcad 15 [Engineering calculations in Mathcad 15]. SPb, Piter, 2011, 400 p.
17. Zavriyev K.S., Shpiro G.S. Raschety fundamentov mostovykh opor glubokogo zalozheniya [Calculation of the bridge foundations with deep laying of supports]. Moscow, Transport, 1970, 215 p.
18. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Models and calculation methods of the pile foundation in SCAD Office // *Proceedings of the XVI DECGE, 7-9 June – Berlin, 2018.* – P. 487-492. – DOI: <https://doi.org/10.1002/cepa.718>
19. Nuzhdin L., Mikhailov V., Rezyapkin V. Modeling and analysis of the pile cluster foundation in SCAD and SMath Studio // *Proceedings of the ARC 2019, 14–18 October.* – Taipei, 2020. – P. 1.
20. Nuzhdin L.V., Mikhailov V.S. Genetically nonlinear combined model of pile field under dynamic impacts // *Journal of physics: Conference series. Proceedings of the DFGC 2021, 26–28 May.* – Perm, 2021. – P. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012013
21. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Verification of the results of numerical and analytical estimates of the settling of a single pile in argillite-like clay. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, no. 53 (2), pp. 78-81. DOI: 10.1007/s11204-016-9368-6
22. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N. Effect of soil compaction around driven pile and prediction of pile settlement on claystones. *Proceedings of the ECSMGE 2019, 1-7 September.* Reykjavik, 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0069
23. Ponomarev A.B., Akbulyakova E.N., Ofrichter Y.V. Prediction of bearing capacity of driven piles in semi-rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, no. 57 (2), pp. 133-138. DOI: 10.1007/s11204-020-09648-1