



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
№ 1, 2018
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01

УДК 624.154.1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ SCAD OFFICE

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: 05 августа 2017

Принята: 21 ноября 2017

Опубликована: 30 марта 2018

Ключевые слова:

свайно-плитный фундамент, линейно-деформируемое основание, модель Винклера и Пастернака, SCAD Office, SMath Studio

АННОТАЦИЯ

Приведен детальный обзор основных методов построения аналитических и численных моделей свайно-плитных фундаментов в соответствии с требованиями действующих норм в расчетном комплексе SCAD Office. Демонстрируются соотношения результатов аналитических методов с численными для двух случаев фундамента: с податливым ростверком и жестким ростверком, усиленным стенами подвального этажа. Анализ выполняется на однородном грунтовом основании, без учета обводнения грунта. На примере семи решенных задач авторами рассматриваются три аналитических метода моделирования свайного основания в соответствии с положениями СНиП 2.02.03–85 и СП 24.13330.2011, а также два численных метода моделирования упругого полупространства, основанных исключительно на использовании метода конечных элементов в линейной постановке.

Реализация аналитических моделей расчета, регламентированных нормативными документами, выполнена в математическом пакете SMath Studio в дополнение к стандартному функционалу расчетного комплекса SCAD Office. Полная технология расчета предполагает использование стандартного функционала математического пакета для импорта и экспорта данных в общие форматы обмена данными в структурированном виде, доступном для импорта и экспорта в расчетно-аналитический комплекс SCAD. В статье подробно описаны технологии выполнения расчета с указанием границ применимости рассматриваемых моделей и рекомендации по их использованию в статической постановке. Все рассмотренные примеры демонстрируют достаточную для практических целей сходимость результатов расчета, за исключением модели основания Пастернака.

Научно-прикладной характер исследования и его результаты могут представлять интерес для инженеров-проектировщиков, аспирантов и магистрантов.

© 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 Sciences, Professor, e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru.
Victor S. Mikhaylov – Postgraduate Student, e-mail: vsmikhailov@mail.ru.

NUMERICAL MODELING OF PILE FOUNDATIONS USING SCAD OFFICE STRUCTURAL ANALYSIS SOFTWARE

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: 05 August 2017
Accepted: 21 November 2017
Published: 30 March 2018

Keywords:

pile-and-slab foundation, linearly elastic foundation, Winkler and Pasternak ground base models, SCAD Office, SMath Studio

ABSTRACT

The article gives a comprehensive review of the main methods aimed at creating analytical and numerical models of slab-pile foundations in accordance with the present technical requirements using SCAD Office structural analysis software. Based on the example of a pile-and-slab foundation analysis, the authors compare the results which have been gained using analytical and numerical methods for two types of foundations, one of them has yield and the other one has rigid piling. Both foundations are ruggedized by basement walls. In order to determine the optimal analysis method for pile-and-slab foundation, three analytic methods of piling modeling are considered in accordance with SNiP 2.02.03-85 and SP 24.13330.2011. Besides, the authors have demonstrated the use of two numerical methods which are based only on the finite elements method for linear-elastic tasks solved using the widespread application software.

The analytical modeling, which is regulated by standards, is carried out using the mathematical package SMath Studio. It is supposed that the complete analysis technology will use a standard mathematical package for import and export to and from the common data interchange format (DIF) in a structured view, which is acceptable for import and export in the SCAD system. A detailed description of the calculation technology is presented by the authors, thus indicating the applicability limits of these methods and recommendations for their use in static conditions. The demonstrated example testifies a fine precision of the considered methods.

The research could be of great interest for designing engineers, university post-graduates and undergraduates.

© PNRPU

Актуальной проблемой при проектировании является выбор методики решения задачи, максимально близко отображающей поведение анализируемой конструкции фундамента. Современные расчетные комплексы в своем составе имеют множество численных инструментов для создания моделей основания как в линейной (упругой), так и в нелинейно-упругой или упругопластической постановке. Если учет физически-нелинейных свойств грунта представляет собой более сложную задачу, требующую проведения расширенных инженерно-геологических изысканий, то решение задачи расчета в упругой постановке в соответствии с требованиями норм является общепринятым в инженерной практике на основании стандартных изысканий. Это связано с тем, что в основе большинства современных нормативных документов лежат две модели основания: контактная модель Винклера с одним постоянным коэффициентом постели и линейно-деформируемого полупространства в аналитическом представлении, либо в виде контактной двухпараметрической модели Пастернака, либо в численном виде с объемными конечными элементами [1, 2].

Для столбчатых и ленточных фундаментов в нормативных методах расчета жесткость свайного основания описывается контактной однопараметрической клавишной моделью Винклера, не учитывающей распределительный эффект основания [3, 4]. В СНиП 2.02.03–85 модель Винклера с одним коэффициентом постели является основной и при расчете висячих свай в кусте как условного фундамента. Такой подход к расчету осадки свайных фун-

даментов исключает учет взаимного влияния свай. Деформации куста свай по модели Винклера обеспечиваются путем присвоения каждой отдельной свае одинаковой постоянной жесткости C_1 , кН/м³, в виде распределенного коэффициента по площади плитного ростверка либо введением в конечно-элементную модель в каждый нижний узел сваи одинаковых одноузловых связей конечной жесткости C_{z1} , кН/м, которая равна отношению нагрузки на одну сваю к общей осадке фундамента:

$$C_1 = \frac{P}{s}, \quad (1)$$

$$C_{z1} = \frac{N}{s}, \quad (2)$$

где P – суммарное среднее нормативно-длительное давление в основании плитного ростверка, кПа; s – средняя осадка свайно-плитного фундамента, как условного; N – нормативно-длительная нагрузка, передаваемая на одну сваю, кН.

Действительно, при увеличении жесткости ростверка, объединяющего сваи, до бесконечно больших значений, например в составе монолитного столбчатого фундамента на свайном основании под одиночной колонной, ростверк стремится к жесткому штампу с синхронными деформациями свай. Тем не менее несущая способность каждой сваи не остается одинаковой и уменьшается к центру ростверка в связи с включением общего около-свайного грунта по мере роста напряжений в грунте в месте большей концентрации свай. При расчете свайных оснований актуальный нормативный документ СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» по сравнению с исходной редакцией СНиП.02.03–85 предлагает два более точных метода учета взаимного влияния свай в группе. Первый аналитический метод учитывает отмеченный эффект снижения несущей способности свай в кусте в соответствии с моделью линейно-деформируемого основания и регламентирует выполнение расчета в пп. 7.4.4–7.4.5 по методике, которая впервые была представлена в работах В.Г. Федоровского, С.Н. Левачева, С.В. Курилло и Ю.М. Колесникова [5]. Реализация данного метода при расчете опор мостового перехода совместно с расчетным комплексом SCAD подробно рассмотрена Г.Э. Едигаровым [6]. Принципы построения дискретной модели свайного куста, учитывающие жесткость ростверка, рассмотрены в монографии Д.М. Шапиро [7].

Вторая аналитическая методика, реализованная в СП 24.13330.2011 в пп. 7.4.6–7.4.9, предназначена для расчета большого свайного поля методом ячейки с учетом податливости ростверка как условного фундамента на естественном основании, но в отличие от прежней редакции СНиП учитывает дополнительную осадку от продавливания свай в грунтовом массиве с учетом густоты свайного поля, а также осадку за счет деформирования ствола свай. Решение этой задачи предложено в монографии Р.А. Мангушева, А.Л. Готмана, В.В. Знаменского, А.Б. Пономарева, Н.З. Готман [8, 9]. Расчет рекомендуется выполнять по графикам «нагрузка – осадка» либо по упрощенным формулам в центре тяжести симметричных трапециевидных участков плиты [10].

В качестве методов исследования авторами было выбрано математическое моделирование на основании аналитических и численных решений задачи. В таблице представлено семь рассмотренных численных и численно-аналитических моделей, на основании которых проводился анализ осадок и напряженно-деформированного состояния свайного фундамента. Для всех реализованных моделей производится сравнение осадок гибкого плит-

ного ростверка (Индекс «1» в первой графе таблицы) и ростверка, усиленного стенами подвала (Индекс «2»). Введение ребер в виде монолитных стен увеличивает общую жесткость ростверка и сокращает разность осадок.

Первые пять рассматриваемых моделей являются численно-аналитическими за счет введения в конечно-элементную модель жесткости основания, определенной аналитическим расчетом в соответствии с действующими нормами. Модели № 1 и № 2 отличаются только способом задания жесткости и базируются на первой аналитической методике по СНиП 2.02.03–85, в которой свайно-плитный фундамент рассматривается как условный на естественном основании. Модель № 3 свайного куста основана на аналитической методике СП 24.13330.2011, в которой фундамент рассматривается как жесткий штамп с переменной несущей способностью группы свай в кусте [5, 6]. Модель № 4 описывает аналитическую методику СП 24.13330.2011 для расчета больших свайных полей. Модель № 5 является расширенной методикой свайного поля с введением переменной жесткости свайного основания [9]. Последние две модели – № 6 и № 7 – используют исключительно численные инструменты, реализованные в SCAD Office для линейно-деформируемого основания в виде контактной двухпараметрической модели и в виде модели упругого полупространства из объемных конечных элементов.

Сравнительный анализ результатов расчета моделей свайно-плитного фундамента
Comparative analysis of calculation results for models of pile-and-slab foundation

Номер модели	Тип основания и наименование модели	Макс. осадка s , см	Мин. осадка s , см	Средняя осадка s , см	Δs , %	M_{\max} , кН·м	Продольная арматура, т
1.1	Модель Винклера. Условный фундамент по СНиП 2.02.03–85	14,96	14,39	14,68	0,6	146	13,8
1.2	со связями конечной жесткости	14,77	14,64	14,71	0,1	61	13,8
2.1	Модель Винклера. Условный фундамент по СНиП 2.02.03–85	14,7	14,7	14,7	0	0	13,8
2.2	с коэффициентом постели по плите	14,7	14,7	14,7	0	0	13,8
3.1	ЛДО. Свайный куст по	17,90	7,02	12,46	11	3 557	148,7
3.2	СП 24.13330.2011 пп. 7.4.4–7.4.5	16,65	10,19	13,42	6,5	2 463	192,8
4.1	ЛДО. Свайное поле СП 24.13330.2011	11,93	11,93	11,93	0	0	13,8
4.2	п. 7.4.6–7.4.9 K_{const}	11,93	11,93	11,93	0	0	13,8
5.1	Модель Винклера. Свайно-плитный фундамент СП 24.13330 пп. 7.4.6–7.4.9	11,06	9,81	10,43	1,2	457	19,1
5.2	с K_{var}	10,73	10,35	10,538	0,4	153	14,2
6.1	Модель Пастернака. Условный фундамент на мнимой плите малой жесткости	6,53	4,51	5,52	1,1	538	36,1
6.2		6,06	5,66	5,26	0,8	287	17,7
7.1	ЛДО. Свайно-плитный фундамент	14,98	12,07	9,16	5,8	1 525	67,0
7.2	с основанием в виде ОКЭ	13,27	12,13	10,99	19	782	91,4

В первую очередь при расчете свайных фундаментов следует рассматривать сравнительно простой аналитический метод определения жесткости свай в составе фундамента путем оценки их осадки как условного фундамента в соответствии с требованиями ранее действующего СНиП 2.02.03–85. Данный расчет выполняется для моделей № 1 и № 2 путем определения осадки условного фундамента как абсолютно жесткого столбчатого фундамента на естественном основании в программе-сателлите «ЗАПРОС» с последующим

анализом деформаций в расчетном комплексе SCAD. Такой простой расчет следует выполнять всегда в качестве оценочного на предварительном этапе до перехода к более сложным аналитическим и численным моделям [11].

В составе моделей № 3 и № 4 используемая авторами технология расчета свай в группе в соответствии с нормативными аналитическими методами построена на интегрированном применении расчетно-аналитической системы SCAD Office и свободно распространяемого математического пакета SMath Studio. Основной расчет выполняется на базе метода конечных элементов в расчетном комплексе SCAD. В математическом пакете SMath Studio производится дополнительный уточняющий расчет взаимного влияния свай в группе в соответствии с двумя регламентированными СП 24.13330.2011 методами на основании данных о геометрии и напряженно-деформируемом состоянии конструкций в SCAD Office. В модели № 3 результаты уточняющего расчета в математическом пакете экспортируются в виде простейшей расчетной подсистемы для расчетного комплекса SCAD с узлами по нижним концам свай и вычисленными в каждом узле дополнительными усилиями, позволяющими в линейно-деформируемой модели получить деформации в виде общей осадочной воронки свайного поля с учетом взаимного влияния соседних свай.

В математическом пакете в задаче № 4 реализована и аналитическая методика СП 24.13330.2011 на базе метода ячейки для свайного поля с податливым плитным ростверком. В SCAD стержневые конечные элементы свай со связями конечной жесткости по нижним концам заменяются распределенным коэффициентом постели, приложенным непосредственно к плитному ростверку. В модель № 5 вводится дополнительное отличие от модели № 4, при котором первый постоянный коэффициент постели K_0 прикладывается в центре плиты, а переменные коэффициенты K_x и K_y – по полосовым областям постоянного шага по периметру плитного ростверка [9].

Верификация осадок, полученных аналитическими расчетами по СП 24.13330.2011, с достаточной степенью корреляции выполняется численными методами на основании прочностных характеристик грунта при предположении о его линейной деформации. Первый численный метод для модели № 6 предполагает создание условного фундамента на упругом полупространстве Пастернака в виде мнимой плиты с двумя назначенными постоянными коэффициентами пропорциональности при сжатии C_1 и при сдвиге C_2 . Применение программы «КРОСС» с билинейной моделью Федоровского с переменными коэффициентами постели не рассматривалось, поскольку она предназначена для широких плит. Второй численный метод в SCAD в задаче № 7 – модель линейно-деформируемого основания (ЛДО) с использованием объемных конечных элементов.

Приведем примеры решения задач по ранее описанным аналитическим и численным методикам. Объектом исследования является свайно-плитный фундамент, с размером ростверка $26,6 \times 17,3$ м и глубиной заложения 2 м от поверхности планировки. Рассматриваются две группы моделей. В первой группе учитывается только жесткость податливого плитного ростверка толщиной 1000 мм из бетона марки В20, моделируемого пластинчатыми четырех- и трехузловыми конечными элементами типа 44 и 42. Во второй группе жесткость фундамента увеличивается за счет введения монолитных стен толщиной 400 мм из бетона марки В20. Свайное поле представлено сваями квадратного сечения со стороной 300 мм и длиной 10 м из бетона марки В20, моделируемыми универсальными стержневыми конечными элементами 5-го типа либо в модели № 7 изопараметрическими объемными конечными элементами 34-го типа. Шаг свай в обоих направлениях составляет 1,075 м при симметричном расположе-

нии. Условно однородное грунтовое основание сложено суглинками мягкопластичными со следующими характеристиками: $\gamma = 19,1 \text{ кН/м}^3$, $\varphi = 14^\circ$, $c = 0,012 \text{ МПа}$, $E = 10,0 \text{ МПа}$. Подземные воды отсутствуют. Среднее нормативное давление на фундамент и вес свай σ_{zp} составляют 294 кПа, бытовые давления от веса грунта $\sigma_{zg} = 229,2 \text{ кПа}$.

Рассмотрим решение первой задачи по методике СНиП 2.02.03–85. В программе «ЗАПРОС» в составе расчетного комплекса SCAD Office для этой задачи предназначен раздел «Осадка фундамента» при условном предположении работы свайного поля как фундамента на естественном основании. При вводе вышеуказанных параметров осадка фундамента s составляет 147 мм, глубина сжимаемой толщи – 11,6 м. Аналогичный расчет глубины сжимаемой толщи методом послойного суммирования по СП 24.13330.2011 дает близкий результат – 11,38 м. «ЗАПРОС» позволяет вычислить винклеровский коэффициент постели C_1 , равный 2001 кН/м^3 при приложении к плитному ростверку, либо C_{z1} , равный $2300,9 \text{ кН/м}$ при приложении к нижним узлам метровых фрагментов оголовков свай. Перенос вычисленных по первой методике параметров жесткости свайного основания в расчетную схему SCAD позволяет учесть работу надфундаментных конструкций с основанием в строгом соответствии со СНиП 2.02.03–85. В случае приложения к плитному ростверку равномерно распределенного по площади коэффициента постели $C_1 = 2001 \text{ кН/м}^3$ осадка всех точек ростверка почти равномерна и соответствует вычисленному в «ЗАПРОС» значению $s = 147 \text{ мм}$ (рис. 1, 1).

При приложении винклеровского коэффициента постели к нижним концам метровых фрагментов свай осадка становится неоднородной в связи с небольшим различием в грузовых площадях крайних свай и деформативностью самих оголовков стержневых элементов свай под воздействием изгибающих моментов, увеличивающихся от центра ростверка к его краям. Тем не менее различия осадок разных точек плиты не превышают $\pm 3 \text{ мм}$ от среднего значения, и ими можно пренебречь (рис. 1, 2).

Осадки усиленного ростверка, раскрепленного вертикальными монолитными стенами подвала, в случае постоянного коэффициента постели по площади также остаются однородными (рис. 1, 3). При приложении коэффициентов постели в нижние узлы свай осадки ростверка оказываются неоднородными, однако за счет повышения жесткости их вариативность снижается в шесть раз – до $\pm 0,5 \text{ мм}$ (рис. 1, 4). Модель с увеличенной жесткостью ростверка, путем введения вертикальных стен в качестве усиливающих ребер, наглядно демонстрирует, что податливость становится ничтожно малой в пределах $0,002 \%$ в направлении наибольшей протяженности фундамента и его меньшей жесткости. Из этого следует обоснованность выполнения расчета свайного фундамента по методике СП 24.13330.2011 (пп. 7.4.4–7.4.5) для свайного куста в предположении работы ростверка как абсолютно жесткого штампа.

Математическая модель № 4 в рамках аналитической методики СП 24.13330.2011 для свайного поля разработана в строгом соответствии с пп. 7.4.6–7.4.9. Эта методика, как и две первые модели – № 1 и № 2, основана на предположении поведения свайного фундамента как условного с подошвой в уровне нижних концов свай и использует модель основания Винклера с единым коэффициентом пропорциональности C_0 (рис. 1, 5, 7). Отличием этой методики от условного фундамента является учет дополнительных осредненных осадок свай от продавливания грунта и сжатия ствола свай. Большой интерес представляет модель № 5, в которой рассматривается также только один коэффициент постели C_i , но с переменным значением в зависимости от удаления свай от центра плиты. Коэффициент пропорциональности в центре плиты C_0 принимается таким же, как и в предыдущей модели № 4. Распределение вычисленных значений коэффициента пропорциональности и де-

формации для модели № 5 с гибким и усиленным стенами ростверком показано на рис. 1, 6 и рис. 1, 8 соответственно. В случае единого коэффициента постели модель получает только осредненную осадку. В случае переменного коэффициента постели появляется незначительный прогиб плиты.

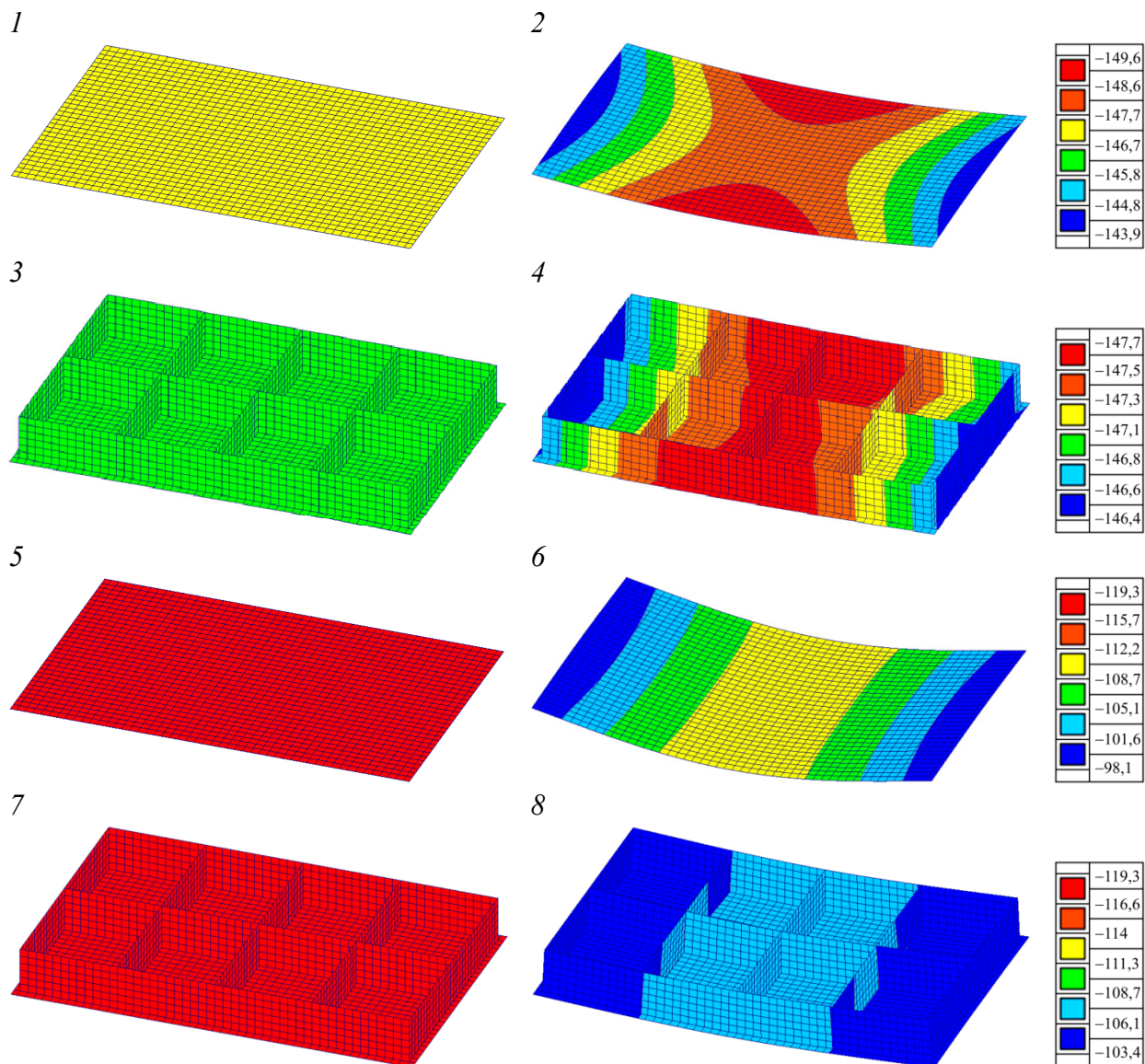


Рис. 1. Осадки плитного ростверка (мм) с приведенной жесткостью свайного основания к нижней поверхности плиты по модели Винклера: 1 – модель 1.1; 2 – модель 2.1; 3 – модель 1.2; 4 – модель 2.2; 5 – модель 4.1; 6 – модель 5.1; 7 – модель 4.2; 8 – модель 5.2

Fig. 1. Pile-slab settlement (mm) of Winkler subgrade model: 1 is model 1.1; 2 is model 2.1; 3 is model 1.2; 4 is model 2.2; 5 is model 4.1.; 6 is model 5.1.; 7 is model 4.2.; 8 is model 5.2

Перейдем к рассмотрению дискретных моделей свайных фундаментов (рис. 2). При построении таких конечно-элементных моделей первым шагом назначаются коэффициенты постели по боковой поверхности свай, с целью описания горизонтальной жесткости основания, увеличивающейся по глубине по мере возрастания степени обжатия свай грунтом. Учет влияния свай в группе по горизонтали основан на работах К.С. Завриева [12]. Расчет горизонтального отпора грунта по боковой поверхности свай в рамках исследова-

ния производится в SMath Studio. Сначала выполняется расчет понижающего коэффициента α по формуле В.5 СП 24.13330.2011. Затем вычисляются значения коэффициентов постели C_z на боковых гранях по приложению В.2.

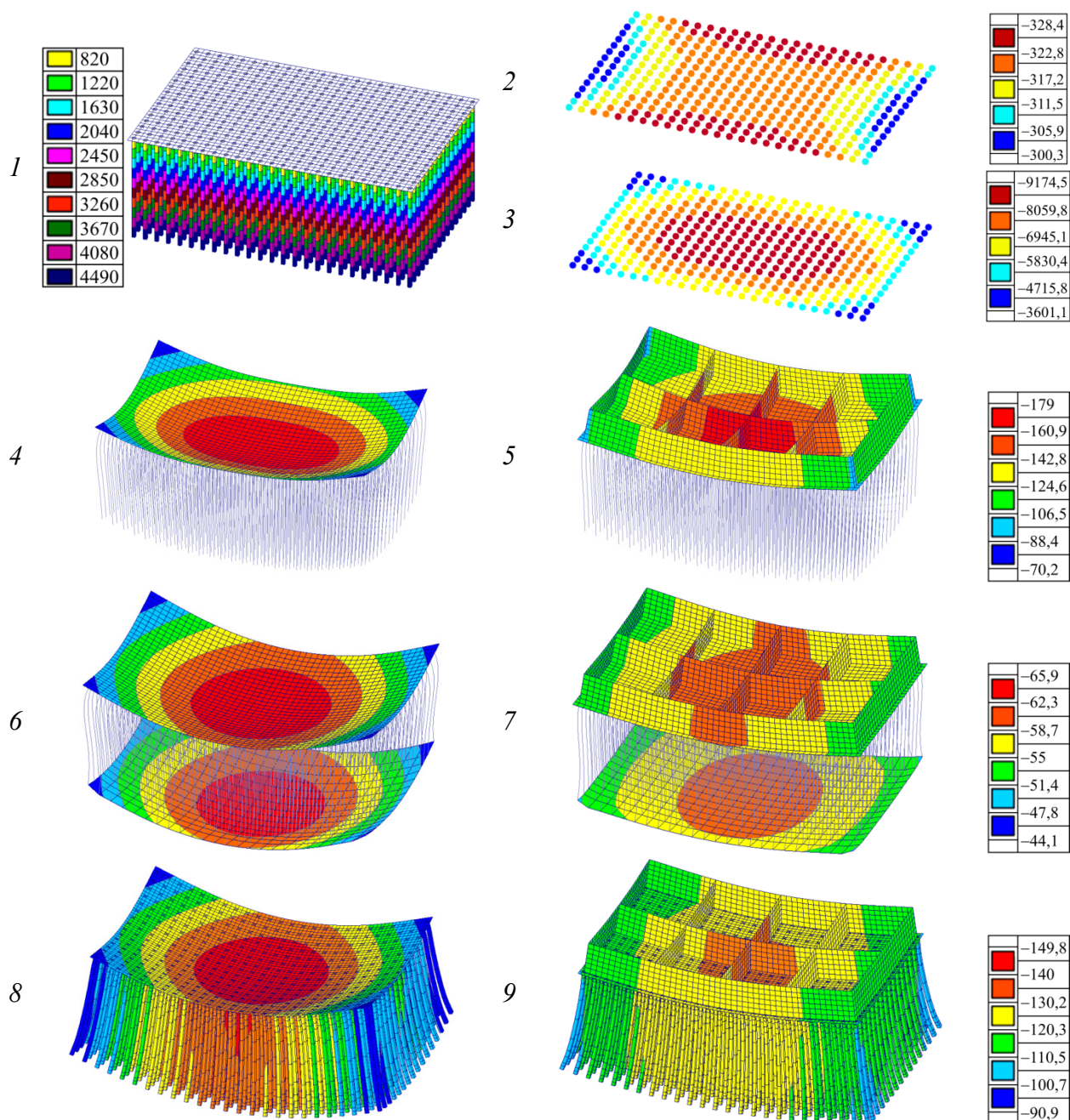


Рис. 2. Осадки плитного ростверка (мм) с дискретной моделью фундамента: 1 – коэффициент постели по боковой поверхности свай (kN/m^3); 2 – начальные вертикальные связи конечной жесткости по нижним узлам свай (кН); 3 – расчетное неоднородное снижение жесткости по остриям свай при взаимном влиянии по вертикали с приложением дополнительных узловых усилий (кН); 4 – модель 3.1; 5 – модель 3.2; 6 – модель 6.1; 7 – модель 6.2; 8 – модель 6.1; 9 – модель 6.2
 Fig. 2. Pile-slab settlement (mm) with a discrete subgrade model: 1 is the lateral surface coefficient of subgrade reaction on piles (kN/m^3); 2 are the vertical elastic constraints in lower pile nodes (kN); 3 is the estimated non-uniform reduction of stiffness along the edges of the piles under the mutual effect of vertically applied additional nodal efforts (kN); 4 is model 3.1.; 5 is model 3.2.; 6 is model 6.1.; 7 is model 6.2.; 8 is model 6.1.; 9 is model 6.2

Расчет понижающего коэффициента α производится по эмпирической формуле с уточненными коэффициентами, приведенной в приложении В.5 СП 24.13330.2011. Для рассматриваемого случая при симметричном удалении соседних свай на 1,075 м искомый коэффициент снижения несущей способности α при восприятии горизонтальных нагрузок за счет работы в группе равен 0,1. Коэффициенты постели вычислены для стержневых конечных элементов свай по направлениям местных осей Y_1 и Z_1 с указанием в поле «Ширина площадки опирания» значения ширины сваи (рис. 2, 1).

Начальные граничные условия по вертикали назначаются на втором шаге выполнения расчета и сначала без учета взаимного влияния свай в группе. Расчет предварительной жесткости свай по вертикали производится в соответствии с п. 7.4.2. СП 24.13330.2011. Поскольку в примере принят однородный грунт, расчеты осредненных характеристик упрощаются. Модуль сдвига G_1 слоев грунта, прорезаемых сваями, вычисляется на основании осредненного модуля деформации E_1 и коэффициента Пуассона ν_1 слоев, прорезаемых сваями. Аналогичным образом вычисляется модуль сдвига G_2 для слоев грунта, расположенных под нижними концами свай. Модуль деформации E_2 слоев грунта, расположенных под сваями, берется осредненным в пределах глубины, равной половине длины сваи $0,5L$, или равным $10d$ приведенных диаметров сваи от нижних торцов свай. Коэффициент Пуассона ν_2 задается непосредственно по слою ниже подошвы условного фундамента. В рассматриваемом случае однородного грунта мы имеем единые значения модулей деформации – $E_1 = E_2 = 10$ МПа, модулей сдвига – $G_1 = G_2 = 3620$ кН/м² и коэффициентов Пуассона – $\nu = \nu_1 = \nu_2 = 0,38$.

Начальная связь конечной жесткости k_z , кН/м, вводимая в нижний торец одиночных свай для учета взаимодействия с окружающим грунтом в методе конечных элементов без учета взаимного влияния соседних свай в группе по вертикали, определяется по формуле

$$k_z = \frac{G_1 \cdot L}{\beta'} = 52\,800 \text{ кН/м}, \quad (3)$$

где β' – коэффициент жесткой сваи, $\beta' = 0,17 \ln [(k_v \cdot G_1 \cdot L) / G_2 \cdot d] = 0,686$; k_v – промежуточный коэффициент для вычисления β' , $k_v = 2,82 - 3,78\nu + 2,18\nu^2$.

Многokратное превышение начального значения вертикальной жесткости по сравнению с методикой СНиПов по модели Винклера объясняется тем, что конечная жесткость будет снижаться в результате итерационного уточнения в процессе выполнения следующего этапа по расчету взаимного влияния свай в группе при совместных вертикальных деформациях с образованием общей осадочной воронки. Для этого расчета необходимы данные о координатах нижних узлов свай в свайном поле и значения действующих нагрузок. Данную информацию можно отобразить в постпроцессоре «Реакции в специальных элементах», для чего в момент запуска линейного расчета в расчетном комплексе SCAD в параметрах следует отметить опцию «Вычислять реакции в связях». В постпроцессоре «Реакции в специальных элементах» выполняется фрагментация схемы по нижним узлам свай и анализируются вертикальные реакции R_z от нормативных комбинаций постоянных и длительных загрузок для цветовой шкалы видимого фрагмента (рис. 2, 2).

При анализе небольших расчетных схем данные о координатах нижних узлов свай в горизонтальной плоскости и значения вычисленных реакций от нормативно-длительных воздействий могут быть внесены непосредственно в математический пакет SMATH Studio в форме матрицы или численного ряда. В случае больших свайных полей необходим прямой импорт

в математический пакет данных из расчетного комплекса SCAD. Наиболее простой способ передачи данных – в формате Excel. При видимом фрагменте схемы, содержащем только узлы нижних концов свай, на панели таблиц на вкладке «Узлы» следует нажать кнопку экспорта в отдельный файл Excel всех видимых в текущий момент узлов. Файл должен быть сохранен в заведомо созданный каталог на жестком диске по тому адресу, который в дальнейшем будет указан при выполнении команды импорта данных в формате Excel в математический пакет SMath Studio. Аналогичным образом в интерфейсе SCAD на панели таблиц выполняется переход на вкладку «Усилия в спец. элементах» и нажимается кнопка экспорта в отдельный файл Excel усилий в видимых в текущий момент связях конечной жесткости под торцами свай. В математическом пакете с использованием средств линейного программирования массив с импортированными координатами узлов свай преобразуется в два численных ряда с координатами X и Y . На основании координат нижних узлов свай следующим шагом формируется общая матрица « a » взаимного расположения свай в кусте в виде вычисленных расстояний между сваями. Размер квадратной матрицы соответствует количеству свай в фундаменте. На основании взаимного расположения свай вычисляется матрица « δ » вертикального взаимного влияния свай в кусте по теории упругого полупространства. Это обеспечивается выполнением множественного вычисления каждого члена матрицы в соответствии с формулами СП 24.13330.20111 (п. 7.4.4), в которых предусмотрено обнуление коэффициента взаимного влияния одной сваи на другую при превышении определенного расстояния между ними. В нашем случае такое расстояние составляет 8,5 м. Последним шагом выполняется расчет дополнительных усилий ΔN_h , являющихся суммой от вертикальных реакций N_h в близко расположенных сваях с учетом коэффициента взаимного влияния δ . Полученные усилия ΔN_h следует внести вручную в каждый соответствующий нижний узел сваи или в автоматизированном режиме сформировать соответствующую подсхему с узлами и усилиями, которая может быть вставлена в общую расчетную схему в SCAD. Указанные усилия необходимы для возникновения в расчетной схеме дополнительных деформаций в нижнем узле каждой сваи и формирования общей осадочной воронки (рис. 2, 3). Следовательно, в зоне, где находится наибольшее количество свай в пределах окружности 8,5 м, дополнительные осадки будут больше. В краевых областях ростверка (и особенно по его углам) концентрация свай в пределах этой окружности будет снижаться, что обеспечит меньшую глубину осадочной воронки. На рис. 2, 4 и рис. 2, 5 показаны осадки податливого и усиленного ребрами ростверков с учетом взаимного влияния свай в группе с перераспределением нагрузок и образованием воронки.

В задаче № 6 в связи с тем, что коэффициенты постели в модели Пастернака назначаются только пластинчатым элементам, под нижними концами свай необходимо построить мнимую плиту малой жесткости. Кроме этого, рекомендуется обеспечить как минимум один дополнительный ряд узлов вокруг внешнего периметра свайного поля. По данному внешнему ряду узлов будут построены двух- и одноузловые законтурные элементы. Мнимая плита малой жесткости не должна иметь промежуточных узлов, не принадлежащих концам свай в межсвайном пространстве, в противном случае эти узлы будут получать чрезмерно высокие деформации. По периметру условного свайного фундамента в виде мнимой плиты на основании Пастернака для корректного использования законтурных элементов не должно быть внутренних углов. Такие углы следует описывать диагональными участками, добавляя между соседними внешними узлами дополнительные узлы. После задания необходимых узлов по внешнему контуру производится генерация сетки конечных элементов на плоскости и создается сетка из оболочек с жесткостью подстилающего грунта только на заданных узлах толщиной 1 мм.

На полученной сетке из треугольных и четырехугольных пластинчатых конечных элементов назначаются коэффициенты постели C_1 и C_2 , равные в рассматриваемом примере 1560 кН/м^3 и 14500 кН/м^3 соответственно. Для завершения модели Пастернака по контуру мнимой плиты задаются двухузловые и одноузловые законтурные элементы с теми же коэффициентами постели. Горизонтальная жесткость по боковой поверхности свай принимается идентичной модели № 3. Для одноузловых законтурных элементов требуется задавать соответствующий угол сектора. В завершение следует удалить или уменьшить вертикальную жесткость связей конечной жесткости на шесть порядков, чтобы они выключились из работы и вертикальные деформации воспринимались по всей площади мнимой плиты на упругом полупространстве (рис. 2, 6 и рис. 2, 7).

Последний рассматриваемый метод расчета свайно-плитного фундамента в виде пространственной модели основания полезен в связи с возможностью наглядного визуального анализа совместной деформации грунтового массива и конструкций железобетонных свай, объединенных монолитным плитным ростверком. В данном численном методе рекомендуется моделировать сваи в виде шести- или восьмиузловых изопараметрических объемных элементов типа 32 или 36 с целью снижения концентраций напряжений. Размер грунтового основания принимается по высоте в соответствии с ранее определенной глубиной сжимаемой толщи. Ширина моделируемой области от границ плитного ростверка должна превышать глубину сжимаемой толщи как минимум в два раза. В качестве граничных условий приняты абсолютно жесткие связи по всем шести степеням свободы в основании грунтового массива и ограничение только горизонтальных поступательных деформаций по боковым граням (X , Y). Результаты расчета модели № 7 приведены на рис. 2, 8 и рис. 2, 9.

Из представленных в вышеприведенной таблице результатов сравнительного анализа видно, что модели основания, выполненные с использованием однопараметрической модели Винклера, позволяют с достаточно высокой точностью перенести в численную модель метода конечных элементов осредненные осадки, определяемые аналитическими методами. При этом перераспределение усилий в основании Винклера отсутствует, в результате чего не образуется характерная осадочная воронка и не возникают изгибающие моменты в плитном ростверке. Продольное армирование ростверка будет минимальным при распределенных нагрузках. При сосредоточенных нагрузках от колонн плита в пролетной части будет получать обратный выгиб, ориентированный выпуклостью вверх, что приведет к неоправданно завышенному верхнему армированию. Модели Винклера применимы только для контроля средних осадок, а также могут быть удобны при учете динамической жесткости грунта для анализа надфундаментных конструкций.

Результаты расчета деформаций ростверка по реализованной авторами в SMath Studio математической модели № 3 свайного куста на линейно-деформируемом основании в соответствии с аналитическим методом СП 24.13330.2011 по пп. 7.4.4–7.4.5 оказались близкими к расчету модели из объемных конечных элементов. При этом характер деформаций в форме осадочной воронки на поверхности основания также имеет большое сходство за счет использования в двух моделях единой теории упругого полупространства. В обоих случаях экстремальные значения напряжений наблюдаются в крайних сваях, при которых необходим учет «эффекта краевой сваи» [13] и перехода основания в упругопластическое состояние понижением модуля деформации грунта.

Модель свайно-плитного фундамента № 4, также реализованная в математическом пакете в соответствии с СП 24.13330.2011 пп. 7.4.6–7.4.9, имеет постоянную жесткость по

площади плиты и основана на модели Винклера. Эта модель может быть использована для оценки осредненных осадок сооружения. Следующая модель – № 5 – с переменными коэффициентами постели позволяет получить незначительные изгибающие моменты, но сравнительно малые по сравнению с моделями № 3 и № 7 на упругом полупространстве. Авторы рассматривают возможность дальнейшего уточнения этой модели путем учета не осредненных давлений в каждой свае свайно-плитного фундамента, а их фактических значений, вычисляемых в каждой свае в конечно-элементной модели.

Модель № 6 с мнимой плитой в двухпараметрической контактной модели Пастернака показала неоправданно заниженные осадки, что указывает на необходимость анализа прочих доступных методик с двумя коэффициентами постели. В отличие от контактных моделей Винклера или Пастернака модель № 7 линейно-деформируемого полупространства из объемных конечных элементов при совместном расчете сооружения с основанием позволяет выполнить более детальный анализ напряженно-деформируемого состояния грунта в толще основания. Однако следует отметить, что отсутствие учета пластических свойств грунтов основания позволяет провести только качественную оценку с целью выявления необходимости внесения изменений в конструктивные решения для исключения зон высоких концентраций напряжений. С другой стороны, модель ЛДО из объемных конечных элементов имеет завышенную распределительную способность, вследствие чего может потребоваться уточнение глубины сжимаемой толщи методом последовательных итераций по результатам других ранее описанных расчетов для достижения соответствия средних осадок [14, 15]. Таким образом, данный метод может рассматриваться только как дополнительный, полезный для повышения качества анализа напряженно-деформируемого состояния. Следует также отметить, что деформации узлов свай модели ЛДО происходят параллельно поверхности осадочной воронки, что не соответствует действительности и деформациям в модели № 3, при которых жесткость должна возрастать по мере увеличения глубины за счет обжатия сваи грунтом (см. рис. 2, 1). Устранение данной проблемы возможно при учете квазианизотропных свойств в объемных конечных элементах основания.

Библиографический список

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – 4-е изд. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
2. Гарагаш Б.А. Надежность пространственных регулируемых систем «основание – сооружение» при неравномерных деформациях основания: в 2 т. Т. 1. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 416 с.
3. Tsudik E. Analysis of structures on elastic foundations. – FL: J. Ross Publ., 2013. – 585 p.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов: Краткий курс: учебник. – 6-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 272 с.
5. Сваи в гидротехническом строительстве / В.Г. Федоровский, С.Н. Левачев, С.В. Курилло, Ю.М. Колесников. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 240 с.
6. 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.
7. Шапиро Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 180 с.
8. Сваи и свайные фундаменты / Р.А. Мангушев, А.Л. Готман, В.В. Знаменский, А.Б. Пономарев; под ред. Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 320 с.

9. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
10. Tomlinson M., Woodward J. Pile design and construction practice. – New York: Taylor&Francis, 2008. – 566 p.
11. Day R.W. Foundation engineering handbook: Design and construction with the 2009 International Building Code. – San Diego, California: McGrawHill, 2010. – 1006 p.
12. Рекомендации по расчету фундаментов глубокого заложения опор мостов / К.С. Завриев, Г.С. Шпиро, Н.М. Глотов [и др.]. – М.: Ротапринт ЦНИИС, 1970. – 95 с.
13. Эффект краевой сваи и его учет при расчете плитного ростверка / В.П. Петрухин, С.Г. Безволев, О.А. Шулятьев, А.И. Харичкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2007. – № 11. – С. 90–97.
14. Михайлов В.С., Бусыгина Г.М. Определение крена и совместных осадок плитных фундаментов // Ползуновский альманах. – 2016. – № 3. – С. 141–145.
15. Михайлов В.С., Теплых А.В. Учет характерных особенностей различных моделей основания при расчете взаимного влияния зданий на больших фундаментных плитах с использованием расчетно-аналитической системы SCAD Office // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: VI Междунар. симпоз. – Владивосток, 2016. – С. 133–134.

References

1. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza [Analytic model of structures and analysis capability of them. Fourth edition]. 4th ed. Moscow, SCADSOFT, 2011, 600 p.
2. Garagash B.A. Nadezhnost' prostranstvennykh reguliruemyykh sistem «osnovanie – sooruzhenie» pri neravnomernykh deformatsiyakh osnovaniia [Reliability of three-dimensional controllable systems “base-structure” with non-uniform deformation of the base]. Vol. 1. Moscow, ASV, 2012, 416 p.
3. Tsudik E. Analysis of structures on elastic foundations. FL,J.Ross Publ., 2013, 585 p.
4. Tsytoovich N.A. Mekhanika gruntov: Kratnyi kurs [Mechanics of soil: Short Course]. 6th ed. Moscow, LIBROKOM, 2011, 272 p.
5. Fedorovskiy V.G., Levachev S.N., Kurillo S.V., Kolesnikov. Svai v gidrotekhnicheskome stroitel'stve [Piling in hydraulic structures]. Moscow, ASV, 2003, 240 p.
6. Edigarov G.E. Opyt primeneniya SCAD OFFICE v raschete promezhutochnoy svaynoy dvukhryadnoy opory mosta s uchetom vzaimnogo vliyaniya svay v kuste [Experience in application of SCAD OFFICE in analysis of intermediate double-row pile pier with account of mutual interference of piles]. *CADMASTER*, 2015, no. 3, pp. 88-97.
7. Shapiro D.M. Teoriya i raschetnye modeli osnovaniy i ob»ektov geotekhniki [Theory and analytic models of bases and geotechnical systems]. Moscow, ASV, 2016, 180 p.
8. Mangushev R.A. Gotman A.L., Znamenckiy V.V., Ponomarev A.B. Svai i svaynye fundamenty. Konstruirovaniye, proektirovaniye, tekhnologii [Piles and pile slabs. Design, analysis, technologies]. Eds. R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2015, 320 p.
9. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniia, fundamenty i podzemnyye sooruzheniia. [Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. Second edition]. Eds. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. 2nd ed. Moscow, ASV, 2016, 1040 p.

10. Tomlinson M., Woodward J. *Pile Design and Construction Practice*. New York, Taylor&Francis, 2008, 566 p.
11. Day R.W. *Foundation Engineering Handbook: Design and Construction with the 2009 International Building Code*. San Diego, California, McGrawHill, 2010, 1006 p.
12. Zavriev K.S., Shpiro G.S. et al. *Rekomendatsii po raschetu fundamentov glubokogo zalozheniya opor mostov* [Guidelines for the calculation of the deep foundations of the bridges]. Moscow, Rotaprint TsNIIS, 1970, 95 p.
13. Petrukhin V.P., Bezvoley S.G., Shulyat'ev O.A., Kharichkin A.I. *Effekt kraevoy svai i ego uchet pri raschete plitnogo rostverka* [Pile-raft foundation analysis with consideration of perimeter pile effect]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2007, no. 11, pp. 90-97.
14. Mikhaylov V.S., Busygina G.M. *Opredelenie krena i sovместnykh osadok dvukh plitnykh fundamentov* [Inclination and combined settlement calculations for slab foundations]. *Polzunovskii almanac*, 2016, no. 3, Barnaul, Altaiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, pp. 141-145.
15. Mikhailov V.S., Teplykh A.V. *Uchet kharakternykh osobennostei razlichnykh modelei osnovaniia pri raschete vzaimnogo vliianiia zdaniia na bol'shikh fundamentnykh plitakh s ispol'zovaniem raschetno-analiticheskoi sistemy SCAD Office* [Adjustment for defining characteristics of various soil foundation models in the course of relative foundation settlement calculation for wide base slabs with the aid of computational and analytical system SCAD Office]. *VI Mezhdunarodnyi simpozium. Aktual'nye problemy komp'iuternogo modelirovaniia konstruksii i sooruzhenii*. Vladivostok, 2016, pp. 133-134.