

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.154.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1383-1393

Моделирование статически нагруженной одиночной сваи с учетом нелинейности грунта оснований

Филипп Сергеевич Школяр, Дарья Владимировна Рогозинникова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование работы свайных фундаментов в современных программных комплексах (ПК) зачастую проводится в линейной постановке задачи и с применением коэффициентов, завышающих в несколько раз результаты осадок свайных фундаментов. Такой подход приводит к значительному перерасходу материалов и завышению сметной стоимости строящегося объекта. В современных реалиях проектировщики сталкиваются с проблемой моделирования расчетной ситуации, наиболее приближенной к реальной работе сваи в грунте, а поскольку грунт основания — неоднородная среда, расчет должен выполняться нелинейно, что трудоемко в ПК. Осуществляется численное сравнение натурных испытаний одиночной сваи под статической нагрузкой и расчет в ПК с учетом нелинейности грунтов основания.

Материалы и методы. Расчеты проводятся в конечно-элементном ПК ЛИРА-САПР при помощи моделирования расчетной схемы объемными конечными элементами. Анализируется изменение осадки свай в различных грунтах при ступенчатой нагрузке.

Результаты. Произведен численный эксперимент изменения осадки одиночной сваи с использованием объемной конечно-элементной модели с заданной физической нелинейностью грунта. Выполнено сравнение полученных результатов проведенного численного эксперимента с результатами натурного эксперимента.

Выводы. Результаты исследования показывают большое расхождение между осадками свай по натурным испытаниям и результатам расчетов по СП 24.13330.2021. При помощи современных ПК существует возможность проведения более точных расчетов. Однако введение поправочных коэффициентов может приблизить расчетную ситуацию в соответствии с нормативными документами к более реальным условиям деформирования грунтов оснований в процессе предварительного выбора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: одиночная свая, осадка, жесткость, основание, конечный элемент, характеристики грунта, напряженно-деформированное состояние

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Школяр Ф.С., Рогозинникова Д.В. Моделирование статически нагруженной одиночной сваи с учетом нелинейности грунта оснований // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 9. С. 1383–1393. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1383-1393

Автор, ответственный за переписку: Дарья Владимировна Рогозинникова, dar2504@yandex.ru.

Modelling of statically loaded single pile taking into account nonlinearity of foundation soil

Filipp S. Shkoliar, Darya V. Rogozinnikova

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

ABSTRACT

Introduction. Modelling of pile foundations in modern software packages (PC) is often carried out in a linear formulation of the problem and with the use of coefficients that overestimate the results of pile foundations by several times. This approach leads to significant overconsumption of materials and overestimation of the estimated cost of the object under construction. In modern realities, designers are faced with the problem of modelling the design situation, which is closest to the real operation of the pile in the ground, and since the foundation soil is a heterogeneous medium, the calculation must be carried out non-linearly, which is quite time-consuming in software packages. A numerical comparison of full-scale tests of a single pile under static load and calculation in a software package, taking into account the nonlinearity of the foundation soils, is carried out.

Materials and methods. The calculations are carried out in the finite element software package LIRA-CAD by modelling the design scheme with volumetric finite elements. The change in the settlement of piles in different soils under step load is analyzed.

Results. Numerical experiment of change in the settlement of a single pile using a volumetric finite element model with a given physical nonlinearity of the soil was performed. The obtained results of the numerical experiment are compared with the results of the full-scale experiment.

Conclusions. The results of the study show a large discrepancy between the settlements of piles according to field tests and the results of calculations according to SP 24.13330.2021. With the help of modern software packages, it is possible to

carry out more accurate calculations. However, the introduction of correction coefficients can bring the calculated situation according to regulatory documents closer to more real conditions of deformation of the foundation soils in the process of preliminary selection.

KEYWORDS: single pile, settlement, stiffness, foundation, finite element, soil characteristics, stress-strain state

FOR CITATION: Shkoliar F.S., Rogozinnikova D.V. Modelling of statically loaded single pile taking into account nonlinearity of foundation soil. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1383-1393. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1383-1393 (rus.).

Corresponding author: Darya V. Rogozinnikova, dar2504@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Перед строительной отраслью сегодня, как и во все времена, стоит задача реализовать тот или иной проект за минимально короткие сроки и вложенные средства. Процесс проектирования начинается с изыскательских работ, которые позволяют определить оптимальные конструктивные решения для реализации объекта капитального строительства.

Немаловажную роль в этой работе играет выбор конструкций фундаментов. На территории г. Санкт-Петербурга для нового строительства зачастую используются свайные фундаменты в связи с тем, что в геологическом строении участка присутствуют слабые грунты, на которых из-за их физико-механических характеристик не удастся реализовать устройство фундамента на естественном основании. Часто новые территории, разрабатываемые в Санкт-Петербурге, содержат в своем геологическом строении глинистые грунты с показателем текучести $I_L > 0,6$. По требованиям СП 24.13330.2021 не рекомендуется опирать нижний конец свай на данные грунты, что приводит к применению проектировщиками более длинных свай и соответственно перерасходу материалов. Проведение натурных испытаний дает возможность доказать обратное, так как несущая способность свай может воспринимать проектную нагрузку на глубине, гораздо меньшей, чем требуется конструктивно.

В процессе выбора свайного фундамента встает задача определения длины свай, исходя из расчета ее несущей способности по грунту и конструктивных требований. Как известно из нормативных документов, при расчете несущей способности свай большое значение имеет, каким способом она была определена, какие расчетные методики выбраны и приняты коэффициенты.

Опираясь на практический опыт проектирования, оптимальную длину свай назначают с учетом натурных испытаний. Это позволяет в полной мере оценить все характеристики несущей способности и деформативности свайного фундамента. Перед проведением натурных испытаний свай статической нагрузкой необходимо предварительно оценить их несущую способность и грунтов основания, также задаться отметкой погружения нижнего конца. Этот этап определяется, как этап выдачи задания на проведение испытания. На данной стадии следует как можно более точно оценить несущую способность свай и приблизить расчетную ситуацию к натурно-

му испытанию для исключения возможности повторного проведения дорогостоящих испытаний.

Анализ сопоставимости натурных испытаний с численными и инженерными расчетами позволит выявить закономерности и сходимости результатов для дальнейшего определения поправочных коэффициентов, применяемых в инженерных расчетах, которые помогут приблизить результаты расчетов к реальной работе свай в грунте с учетом нелинейности. Все это сократит время на выдачу задания за счет исключения трудоемких численных расчетов.

Свайные фундаменты зданий и сооружений чаще всего представляют собой железобетонный монолитный стержень, жестко сопряженный с ростверком здания, острие свай может опираться как на скальные грунты, так и на менее прочные грунты, такие свай называются висячие. Висячие свай передают нагрузку на грунты основания путем сил трения по боковой поверхности свай и под ее острием [1]. В настоящем исследовании будет моделироваться расчетная ситуация — нагружение одиночной висячей свай статической нагрузкой с учетом нелинейности грунтов основания. Современные программные вычислительные комплексы в настоящее время позволяют пользователю установить напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «фундамент-грунт». Подобные расчеты проводят главным образом в специализированных конечно-элементных комплексах типа PLAXIS, MIDAS GTS NX или комплексах общего назначения типа SOFiSTiK, Abaqus [2]. В таких комплексах возможно решение линейных и нелинейных задач НДС. Рассмотрим наиболее распространенный программный расчетный комплекс среди проектировщиков для определения НДС каркаса здания ЛИРА-САПР, который дает возможность решить поставленную задачу благодаря системе «ГРУНТ» и встроенным расчетным механизмам, соответствующим актуальным нормативным документам. Указанная ранее система моделирует грунтовый массив при помощи объемных конечных элементов (КЭ).

Исследования в данном направлении проводили многие отечественные и зарубежные ученые, которые использовали в своих исследованиях различные расчетные методы и программные комплексы (ПК). Для решения сложных задач в современных ПК зачастую применяется метод конечных элементов. С его помощью можно определить НДС расчетной схемы, однако необходимо задать правильные

граничные условия, которые включают расчетную модель грунта основания.

Е.С. Егорова, А.В. Иоскевич проводили сравнение значений осадок сооружения, полученных по результатам расчетов, в ПК SCAD Office и PLAXIS 3D. В SCAD Office были реализованы модель Пастернака и модель с переменными по площади коэффициентами постели. В PLAXIS 3D — модель линейно деформируемого полупространства и модель упругопластической среды [3]. Оказалось, что расчеты в PLAXIS 3D наиболее приближены к результатам по СП 22.13330.2011.

К подобным выводам пришли и ученые, рассматривающие те же ПК [4]. Авторы сделали заключение, что SCAD Office позволяет моделировать надземные конструкции любой сложности при ограниченной возможности моделирования грунта основания, а PLAXIS 3D позволяет наиболее подробно описать инженерно-геологические условия и использовать большее количество расчетных моделей.

В.В. Белов, Ю.Я. Болдырев, С.В. Романов и А.С. Шанина рассматривали применение ПК ANSYS и PLAXIS 3D. В ПК ANSYS реализовывалась модель Друкера – Прагера упругая и упругопластическая, а в PLAXIS 3D модель Мора – Кулона. Результаты оказались схожие, однако в ANSYS производилась корректировка модели из-за расхождения в характеристиках бетона сооружения [5].

Упругопластическая грунтовая модель с упрочнением Hardening Soil (HS), реализованная в ПК PLAXIS 2D, исследована О.В. Соколовой [6]. Была подтверждена корректность осадки грунтов: для пылевато-глинистых грунтов, залегающих в верхней части геологической толщи, модель Мора – Кулона сработала корректно; для грунтов, залегающих на достаточно большой глубине, осадка оказалась значительно ниже, чем при инженерно-геологических изысканиях. Подробное описание расчетных моделей грунтовой среды, а также сравнение их погрешностей приведены в трудах [7, 8].

Работу свай, соединенных ростверком, при динамическом воздействии также усложняет влияние соседних свай друг на друга, точное теоретическое решение проблемы динамического взаимодействия свай и грунта осложняется нелинейностью процесса, поэтому используются приближенные методы [9]. Такие методы расчетов предложены в публикациях иностранных ученых [10–14].

Установлению НДС комбинированного свайного фундамента при заданных геотехнических условиях посвящены работы [15, 16].

Значительный вклад в исследование глинистых грунтов внесли зарубежные ученые, которые разрабатывали новые методики определения НДС глинистых грунтов [17–20].

Сравнительный анализ осадки свай по результатам испытания и расчетов в ПК проводил А.И. Ха-

ричкин [21]. Различные методы расчета осадок свай рассматривала П.А. Тяпкина [22].

Анализируя указанные работы, можно сделать вывод, что большинство ученых для расчетов выбирают иностранные ПК, наблюдается недостаток исследований отечественных ПК, поэтому в данном исследовании моделирование расчетной ситуации будет выполнено в ПК ЛИРА-САПР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование разделено на несколько этапов.

Первый этап включает сбор и обработку результатов испытания пяти свай, нагружаемых статической вертикальной нагрузкой. Натурный эксперимент проводился на строительной площадке в г. Санкт-Петербург, пос. Шушары, Колпинское шоссе. Выполнены испытания грунтов забивными сваями вертикальной статической вдавливающей нагрузкой на строительном объекте многоквартирного малоэтажного жилого дома.

Цель статических испытаний — определение несущей способности забивных свай по грунту.

Вертикальная нагрузка в процессе испытания свай создавалась при помощи одного гидравлического домкрата грузоподъемностью 200 т. Упором для домкрата служила грузовая металлическая платформа с общим весом анкерного груза 72 или 220 т. При испытании анкерные сваи не использовались, так как установка оснащена грузовой платформой.

Измерение величины вертикального перемещения свай от нагрузки производилось двумя прогибомерами 6-ПАО-Ц-0,01 с точностью отсчета 0,01 мм. Прогибомеры неподвижно прикреплялись к реперной системе, установленной на свае.

После завершения испытаний были построены графики зависимости изменения осадки свай от вдавливающей нагрузки.

Второй этап исследования подразумевает установление несущей способности и осадки свай в соответствии СП 24.13330.2021 при заданной геологии.

Несущая способность висячих свай рассчитывается по формуле:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{R,R} \cdot R \cdot A + u \cdot \sum \gamma_{R,f} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (1)$$

где $\gamma_{R,R}$, $\gamma_{R,f}$ — коэффициент работы грунта под нижним концом сваи и по боковой поверхности; f_i — расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи послойно; h_i — толщина соприкасающегося со свайей грунта.

Далее от расчетной несущей способности определяем расчетную осадку сваи по СП 24.13330.2021 в соответствии с формулой:

$$s = \beta \cdot \frac{N}{G_1 \cdot l}, \quad (2)$$

где N — вертикальная нагрузка на сваю, т, принимаемая равной несущей способности.

Третий этап заключается в моделировании расчетной схемы статически нагруженной сваи в ПК ЛИРА-САПР, модель объемного грунта строится в системе «ГРУНТ» при заданной геологии. Тело сваи моделируется также объемными конечными элементами КЭ 36 — универсальный пространственный восьмиузловой КЭ, предназначенный для моделирования пространственных конструкций.

Массив грунта моделируется КЭ 271–276 с численным описанием жесткостных характеристик. Данные КЭ предназначены для моделирования физически нелинейных элементов различных конфигураций односторонней работы грунта на сжатие с учетом сдвига.

Четвертый этап включает расчет коэффициента приведения результатов расчета по СП 24.13330.2021 без учета нелинейной работы грунтов к результатам расчетов в ПК ЛИРА-САПР с учетом нелинейной работы грунтов основания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обработка результатов натурных испытаний

В качестве результатов испытания свай вдавливающей статической нагрузкой представлены графики зависимости осадки сваи от статической нагрузки в виде кривых $S-P$ (рис. 1).

Полученные результаты испытаний свай приведены в табл. 1.

Расчет осадки свай ручным методом

После обработки результатов натурных испытаний определяется несущая способность свай. Для этого при заданной геологии массив грунта разбивается на расчетные участки и устанавливается сопротивление

грунта по боковой поверхности сваи и сопротивление грунта под острием сваи в соответствии с формулой (1):

$$F_{d(1)} = 1(1 \cdot 100 \cdot 0,16 + 1 \cdot 1,6 \cdot 16,92) = 43,23 \text{ тс.}$$

Далее для полученной несущей способности сваи по грунту определяем расчетную осадку сваи по формуле (2).

Для сваи № 1 при известных прочностных характеристиках грунтов осредненный модуль сдвига по боковой поверхности равен:

$$G_1 = \frac{2,5 \cdot 2,41 + 0,5 \cdot 901,4 + 1,2 \cdot 452,9 + 4 \cdot 260,3 + 2,3 \cdot 223,1 + 1,2 \cdot 260,3 + 4 \cdot 223,1}{15} = 235 \text{ т/м}^2;$$

$$G_2 = 223,14 \text{ т/м}^2;$$

$$k_v = 2,82 - 3,78 \cdot 0,356 + 2,18 \cdot 0,356^2 = 1,748;$$

$$k_{v1} = 2,82 - 3,78 \cdot 0,29 + 2,18 \cdot 0,29^2 = 1,907.$$

Осредненный коэффициент Пуассона:

$$v_1 = \frac{0,27 \cdot 2,5 + 0,3 \cdot 0,5 + 0,35 \cdot 1,2 + 0,37 \cdot 4 + 0,37 \cdot 2,3 + 0,37 \cdot 1,2 + 0,37 \cdot 4}{15} = 0,343;$$

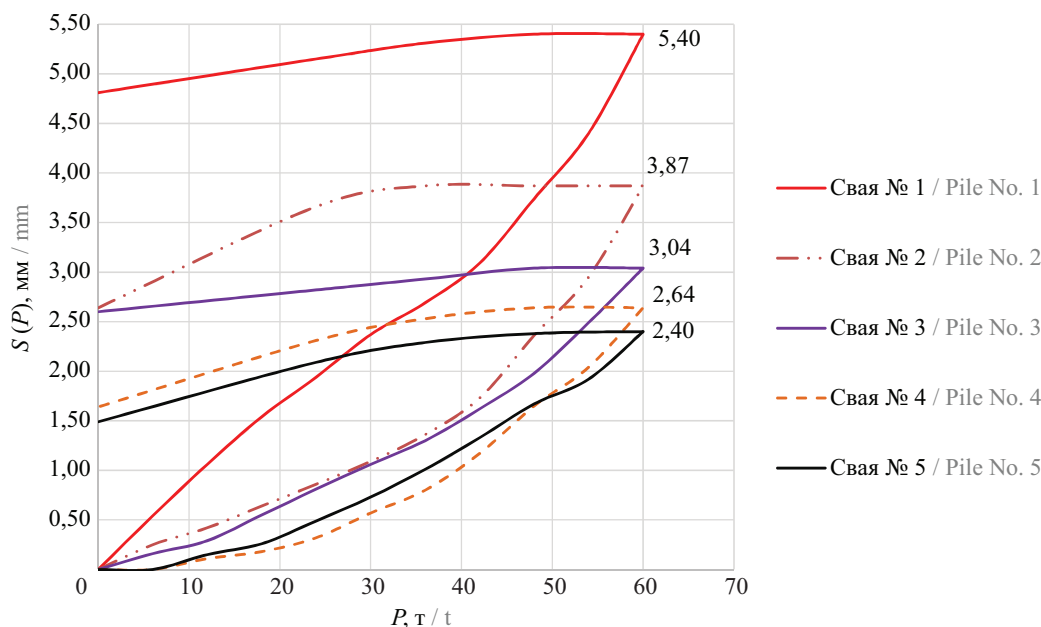


Рис. 1. Графики зависимости осадки свай S от статической вдавливающей нагрузки P

Fig. 1. Graphs of the dependence of the pile settlement S on the static pressure load P

Табл. 1. Сводные результаты испытания свай
Table 1. Summary results of pile testing

Номер сваи Pile number	Сечение, мм Cross section, mm	Длина сваи, м Pile length, m	Максимальная нагрузка, т Maximum load, t	Максимальная осадка, мм Maximum settlement, mm	Предел текучести грунта под острием сваи I_L Yield strength of the soil under the pile tip I_L	Модуль деформации грунта под острием сваи E , т/м ² Modulus of deformation of the soil under the pile tip E , t/m ²
1	400 × 400	15	60	5,40	1	600
2	400 × 400	15	60	3,87	1	600
3	400 × 400	15	60	3,04	1	600
4	400 × 400	15	60	2,64	0,89	800
5	400 × 400	15	60	2,40	1	600

$v_2 = 0,37;$

Тогда осадка сваи № 1 в соответствии с формулой (2) составит:

$$v = \frac{0,343 + 0,37}{2} = 0,357.$$

$$s = 0,779 \cdot \frac{43,23}{235 \cdot 15} = 8,94 \text{ мм}.$$

Относительная жесткость сваи равна:

$$\chi = \frac{3\,058\,103 \cdot 0,16}{267,09 \cdot 16^2} = 4,81;$$

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \cdot 4,81^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot 4,81^{3/4}} = 0,91;$$

$$\beta' = 0,17 \cdot \ln(1,748 \cdot 37,33) = 0,71;$$

$$\alpha' = 0,17 \cdot \ln(1,778 \cdot \frac{15}{0,45}) = 0,70;$$

$$\beta = \frac{0,71}{0,91} + 0,3 \cdot \frac{1 - (\frac{0,71}{0,70})}{4,81} = 0,779.$$

Расчеты проводятся для всех остальных четырех свай аналогично. Сводные результаты расчетов осадок свай представлены в табл. 2.

Анализ результатов расчета показал большую разницу в расхождении полученных результатов расчета по СП 24.13330.2021.

Расчет осадки свай в ПК ЛИРА с учетом нелинейности грунтов оснований

1. В ПК ЛИРА-САПР создана объемная конечно-элементная модель (КЭМ) сваи, КЭ представляют собой параллелепипеды размерами 200 × 200 × 500 мм (рис. 2) с жесткостными характеристиками бетона В25, далее эти элементы копируются вниз на длину сваи.
2. В системе «ГРУНТ» задаем все прочностные характеристики грунтов основания. Характеристики грунтов должны быть заданы без учета повышаю-

Табл. 2. Сводные результаты осадок свай расчетным методом
Table 2. Summary results of pile settlement by calculation method

Номер сваи Pile number	Осредненный модуль сдвига по боковой поверхности G_1 , т/м ² Averaged lateral shear modulus G_1 , t/m ²	Осредненный модуль сдвига под острием G_2 , т/м ² Averaged shear modulus under the tip G_2 , t/m ²	Относительная жесткость сваи χ Relative stiffness of the pile χ	Расчетная осадка сваи s , мм Estimated pile settlement s , mm	Осадка сваи по результатам испытаний, мм Pile settlement based on test results, mm	Δ_1 , %
1	235	223,14	4,81	8,94	5,40	39,5
2	263,6	223,14	4,78	8,71	3,87	55,5
3	269,7	223,14	4,71	7,29	3,04	58,3
4	212,3	297,52	5,78	9,59	2,64	72,4
5	265,2	223,14	4,98	6,21	2,40	61,4

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 9, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 9, 2023

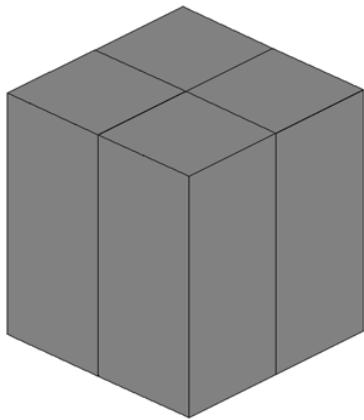


Рис. 2. Расположение конечных элементов, моделирующих сваю

Fig. 2. Location of the finite elements modelling the pile

щих коэффициентов, иначе полученные результаты будут значительно завышены.

3. Затем задаются параметры скважин для создания массива грунта и характеристики КЭМ грунта объемными элементами, а именно: область массива грунта в плане (данная область должна быть много больше периметра сваи, так как при натурном эксперименте напряжения в грунтах основания распределяются на бесконечно большой объем грунта), шаг триангуляции и шаг по глубине.

4. После проведения экстраполяции сетки сгенерированная сетка грунта перенесена обратно в ПК ЛИРА-САПР (рис. 3).

5. Далее прикладывались нагрузки, включающие собственный вес сваи, собственный вес грунта основания, а также статическая вдавливающая нагрузка, действующая на сваю.

6. На массив грунта были наложены связи для предотвращения геометрической изменяемости, запрещаем перемещения сторон грунта в направлении пределов массива грунта.

7. Проводим расчет.

Представлены изополя совместных перемещений в вертикальной плоскости КЭ грунта и сваи (рис. 4).

Табл. 3. Сводные результаты осадок свай

Table 3. Summary results of pile settlement

Номер сваи Pile number	Осадка сваи по результатам испытаний, мм Pile settlement according to test results, mm	Осадка по расчету в ПК ЛИРА-САПР, мм Settlement calculated in the LIRA-CAD PC, mm	$\Delta_2, \%$
1	5,40	5,51	1,99
2	3,87	4,01	3,49
3	3,04	3,13	2,87
4	2,64	2,73	3,29
5	2,40	2,34	2,56

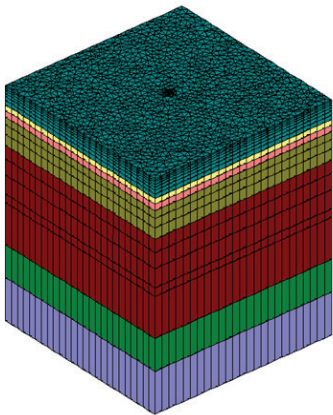


Рис. 3. Замоделированная и триангулированная конечно-элементная модель грунта в ПК ЛИРА-САПР

Fig. 3. Modelled and triangulated finite element model of soil in LIRA-CAD PC

В табл. 3 приведены результаты расчетов остальных свай в ПК ЛИРА-САПР, ручной расчет, а также результаты натурных испытаний свай.

Анализируя табл. 3, стоит отметить, что расхождения между полученными значениями осадок по итогам испытаний и результатам расчета КЭМ с нелинейной работой грунтов не превышают 3,49 %, следовательно, можно утверждать, что данная модель может быть применена для определения НДС висячей сваи.

Анализ полученных результатов

На рис. 5 представлены сводные графики определения осадки по трем вышеописанным методикам.

На графике (рис. 5) видно, что осадка сваи по результатам расчета в ПК ЛИРА-САПР и по итогам испытания изменяется нелинейно, что обуславливается нелинейной работой грунтов основания, этот фактор может негативно отразиться на работе конструкции, поэтому в качестве такого коэффициента предполагается коэффициент k_s .

Осадка свай по результатам испытаний и расчетам в ПК ЛИРА-САПР изменяется согласно закону $y = \sqrt{x}$. Таким образом, функция изменения осадки свай от нагрузки будет иметь вид: $S_k = k_s \cdot P$.

Расчетная осадка сваи с учетом поправочного коэффициента будет иметь вид:

$$S_k = 0,05 \cdot \sqrt{P} \cdot s, \tag{3}$$

где P — статическая нагрузка на сваю; s — расчетная осадка сваи по СП 24.13330.2021.

С учетом поправочного коэффициента построена откорректированная зависимость осадки сваи № 1 от статической нагрузки, которая представлена в табл. 4.

Расхождение итоговой осадки от максимальной нагрузки составляет не больше 1,53 %, что показывает эффективность применения данного поправочного коэффициента.

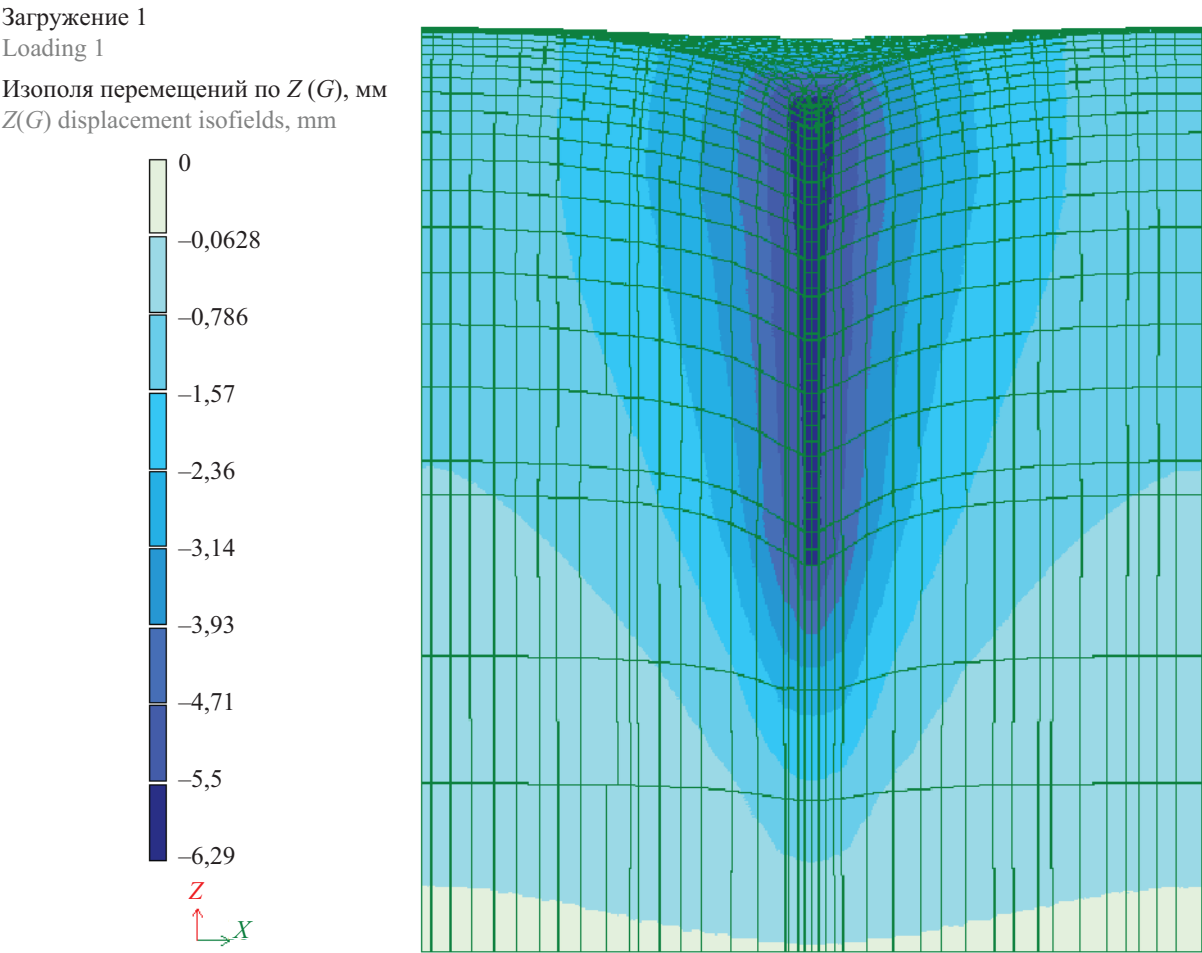


Рис. 4. Изополя перемещений сваи совместно с грунтом основания
Fig. 4. Displacement isopoles of the pile together with the foundation soil

Табл. 4. Расчетная осадка сваи № 1 с учетом корректировочного коэффициента
Table 4. Calculated settlement of pile No. 1 considering the correction factor

Степень нагрузки, т Load stage, t	Осадка сваи по результатам испытаний, мм Pile settlement according to test results, mm	Осадка по расчету с учетом корректировки S_k , мм Settlement calculated taking into account adjustments S_k , mm
0,0	0,00	0,00
6,0	0,54	0,17
12,0	1,06	0,49
18,0	1,54	0,90
24,0	1,94	1,39
30,0	2,37	1,94
36,0	2,69	2,55
42,0	3,09	3,21
48,0	3,74	3,92
54,0	4,40	4,68
60,0	5,40	5,48

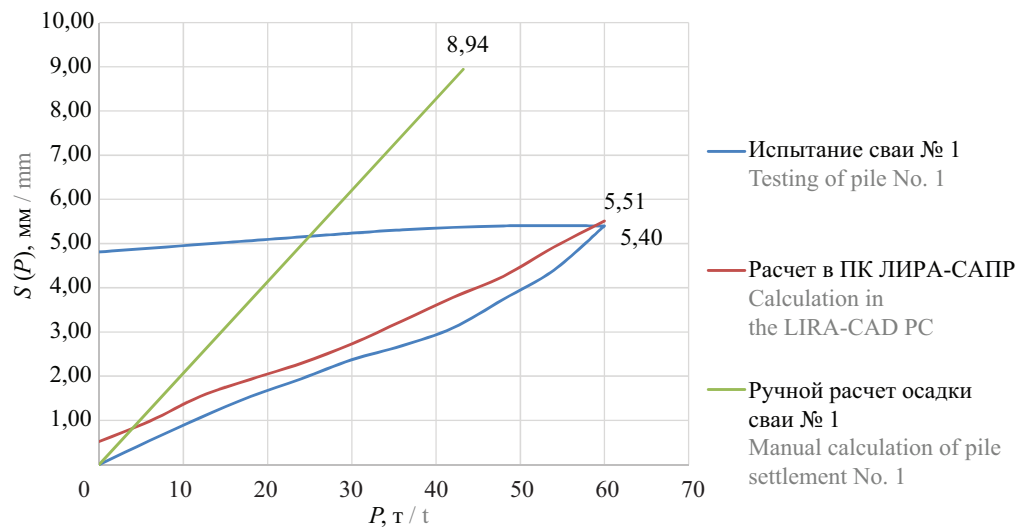


Рис. 5. Результаты расчета осадки сваи № 1
Fig. 5. Results of calculation of the settlement of pile No. 1

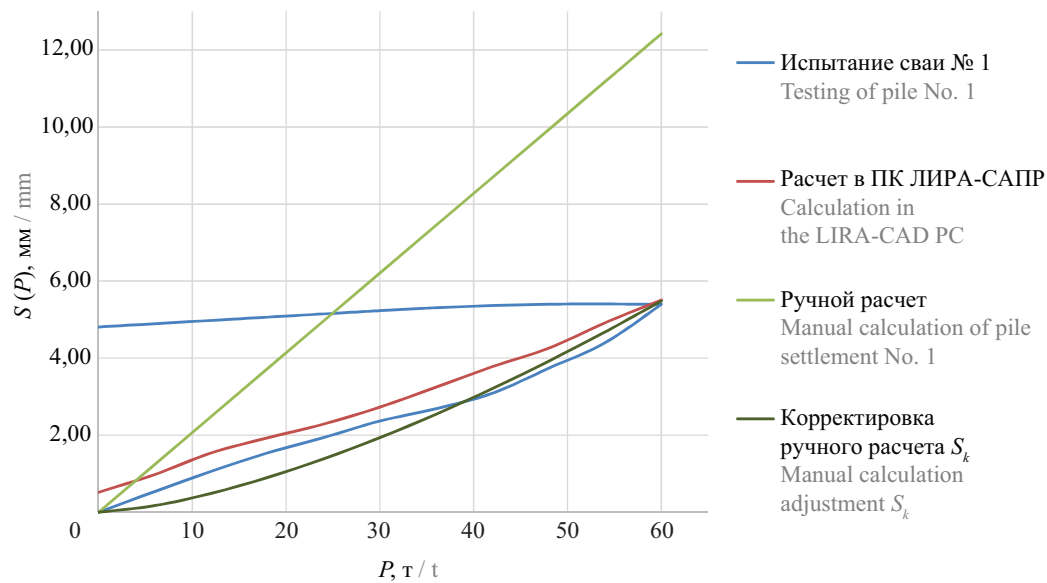


Рис. 6. Графики зависимости осадки сваи № 1 от нагрузки различными расчетными методами
Fig. 6. Graphs of the dependence of the settlement of pile No. 1 on the load by various calculation methods

На рис. 6 графически показана зависимость осадки сваи № 1 от нагрузки различными расчетными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование позволило установить возможность применения системы «ГРУНТ», входящей в ПК ЛИРА-САПР, для проведения нелинейных расчетов массива грунта объемными КЭ. Расхождение в значениях осадки по расчетам в ПК и натурным испытаниям не превышает 3,49 %, что является в рамках допустимого отклонения.

Отмечено существенное расхождение в результатах осадки между испытаниями и ручным расчетом по СП 24.13330.2021, оно составляет 39–72 %,

что указывает на большой запас по прочностным характеристикам грунтов, этот факт может привести к значительному перерасходу материалов фундамента, следовательно, имеется необходимость введения корректировок в полученные значения осадок свай.

В результате исследования предложен поправочный коэффициент k_s . Его применение на примере расчета сваи № 1 продемонстрировало расхождения при максимальной нагрузке 1,53 %. Как видно на рис. 6, отклонения при наибольших нагрузках уменьшаются, сближение графиков происходит после достижения нагрузки, которая соответствует расчетной несущей способности по СП 24.13330.2021.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Konyushkov V.V., Le V.T. Side friction of sandy and clay soils and their resistance under the toe of deep bored piles // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. Issue 1. Pp. 36–44. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-36-44
2. Купчикова Н.В., Алёхин В.С. Анализ деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с концевым уширением из щебня // *Перспективы развития строительного комплекса*. 2017. № 1. С. 158–162. EDN ZOFUHN.
3. Егорова Е.С., Иоскевич А.В., Агишев К.Н., Кожевников В.Ю. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 3 (42). С. 31–60. EDN VSYFHT.
4. Мангушев Р.А., Сахаров И.И., Конюшков В.В., Ланько С.В. Сравнительный анализ численного моделирования системы «здание-фундамент-основание» в программных комплексах SCAD и PLAXIS // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. № 3 (24). С. 96–101. EDN NDVKMZ.
5. Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Романов С.В., Шанина А.С. Опыт применения математического моделирования грунтовых оснований зданий и сооружений // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2010. № 5 (108). С. 103–109. EDN MVXAZD.
6. Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 4 (48). С. 10–16. DOI: 10.5862/MCE.48.2 EDN SFOUPH.
7. Ширяева М.П., Кривонос Е.А. Классификация моделей грунтового основания // *Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ»*. 2014. № 3. С. 18–25. EDN TGILJV.
8. Кургузов К.В., Фоменко И.К. Основополагающие математические модели грунтов в практике геотехнического моделирования. Обзор // *Естественные и технические науки*. 2019. № 5 (131). С. 240–247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04 EDN KGJTQF.
9. Колесников А.О., Попов В.Н., Костюк Т.Н. Оценка взаимного влияния свай при вертикальных колебаниях фундамента // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. Т. 16. № 3. С. 209–218. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-3-209-218
10. Das S.K., Manna B., Baidya D.K. Prediction of pile-separation length under vertical vibration using ANN // *14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2011.
11. Holeyman A., Whenham V. Axial non-linear dynamic soil-pile interaction // *Springer Proceedings in Physics*. 2015. Pp. 305–333. DOI: 10.1007/978-3-319-19851-4_15
12. Ishibashi I., Zhang X. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay // *Soils and Foundations*. 1993. Vol. 33. Issue 1. Pp. 182–191. DOI: 10.3208/SANDF1972.33.182
13. Katzenbach R., Choudhury D. ISSMGE Combined Pile-Raft Foundation Guideline. Germany : Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013. Pp. 1–23.
14. Bokov I.A., Fedorovsky I.A. Calculation of the settlement of pile foundations containing piles of various lengths and diameters by the interaction factors method // *Proceedings of The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019.
15. Van Impe W.F., De Clerq Y. A piled raft interaction model // *Proceedings of 5th International Conference on Piling and Deep Foundations*. Bruges, Balkema, Rotterdam.
16. Idriss I.M., Dobry R., Singh R.D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1978. Vol. 104. Issue 12. Pp. 1427–1447. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000727
17. Wang G., Sitar N. Numerical analysis of piles in elasto-plastic soils under axial loading // *17th ASCE Engineering Mechanics Conference*. 2004.
18. Geuse E.C.W.A., Tjong-Kie T. The mechanical behaviors of clays // *Proceedings of the International Congress on Rheology*. London, 1954. Pp. 247–259.
19. Henkel D.J. Investigation of two long-term failures in London clay slopes at Wood Green and Northolt // *Proceedings 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (London)*. 1957. Vol. 2. Pp. 315–320.
20. Higo Y., Oka F., Kodaka T., Kimoto S. Three-dimensional strain localization of water-saturated clay and numerical simulation using an elasto-viscoplastic model // *Philosophical Magazine*. 2006. Vol. 86. Issue 21–22. Pp. 3205–3240. DOI: 10.1080/14786430500321203
21. Харичкин А.И. Моделирование статического нагружения свайной группы с различными условиями расположения свай // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2019. № 1 (20). С. 113–119. EDN VTBFNK.
22. Школяр Ф.С., Тяпкина П.А. Сравнение методов расчета осадки свайного фундамента // *Неделя науки ИСИ : сб. мат. Всерос. конф.* 2022. С. 281–283. EDN IPJAFV.

Поступила в редакцию 17 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 13 июня 2023 г.

О Б А В Т О Р А Х : **Филипп Сергеевич Школяр** — кандидат технических наук, доцент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; office@spbstu.ru, shkolyar.fs@gmail.com;

Дарья Владимировна Rogozinnikova — студентка; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 5065-9350; office@spbstu.ru, dar2504@yandex.ru.

Вклад авторов:

Школяр Ф.С. — идея, предоставление исходных данных, научное руководство, научное редактирование текста, доработка текста.

Rogozinnikova Д.В. — сбор и обработка материала, проведение расчетов, составление исходного текста и итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Konyushkov V.V., Le V.T. Side friction of sandy and clay soils and their resistance under the toe of deep bored piles. *Architecture and Engineering*. 2020; 5(1):36-44. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-36-44
2. Kupchikova N.V., Alyokhin V.S. Analysis of the deformation and strength characteristics of bored micro-piles with terminal expansion of crushed stone. *Prospects for the Development of the Construction Complex*. 2017; 1:158-162. EDN ZOFUHN. (rus.).
3. Egorova E.S., Ioskevich A.V., Ioskevich V.V., Agishev K.N., Kozhevnikov K.V. Soil model implemented in the software packages SCAD Office and Plaxis 3D. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 3(42):31-60. EDN VSYFHT. (rus.).
4. Mangushev R.A., Sakharov I.I., Konyushkov V.V., Lan'ko S.V. Comparative analysis of computational modeling of the system "building-foundation-base" in the software packages SCAD and PLAXIS. *Bulletin of Civil Engineers*. 2013; 3(24):96-101. EDN NDVKMZ. (rus.).
5. Belov V.V., Boldyrev Yu.Ya., Romanov S.V., Shanina A.S. Experience in applying mathematical modeling of ground foundations of buildings and structures. *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2010; 5(108):103-109. EDN MVXAZD. (rus.).
6. Sokolova O.V. The selection of soil models parameters in Plaxis 2D. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 4(48):10-16. DOI: 10.5862/MCE.48.2. EDN SFOUPH. (rus.).
7. Shiryayeva M.P., Krivonos E.A. Classification of soil foundation models. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KUBSTU"*. 2014; 3:18-25. EDN TGILJV.
8. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Constitutive mathematical soil models in geotechnical practice. Review. *Natural and Technical Sciences*. 2019; 5(131):240-247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04. EDN KGJTQF. (rus.).
9. Kolesnikov A.O., Popov V.N., Kostiuik T.N. Evaluation of the pile interaction at vertical vibrations of foundation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(3):209-218. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-3-209-218 (rus.).
10. Das S.K., Manna B., Baidya D.K. Prediction of pile-separation length under vertical vibration using ANN. *14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2011.
11. Holeyman A., Whenham V. Axial non-linear dynamic soil-pile interaction. *Springer Proceedings in Physics*. 2015; 305-333. DOI: 10.1007/978-3-319-19851-4_15
12. Ishibashi I., Zhang X. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*. 1993; 33(1):182-191. DOI: 10.3208/SANDEF1972.33.182
13. Katzenbach R., Choudhury D. *ISSMGE Combined Pile-Raft Foundation Guideline*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2013; 1-23.
14. Bokov I.A., Fedorovsky I.A. Calculation of the settlement of pile foundations containing piles of various lengths and diameters by the interaction factors method. *Proceedings of The XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019.
15. Van Impe W.F., De Clerq Y. A piled raft interaction model. *Proc. 5th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations*. Bruges, Balkema, Rotterdam.
16. Idriss I.M., Dobry R., Singh R.D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1978; 104(12):1427-1447. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000727
17. Wang G., Sitar N. Numerical analysis of piles in elasto-plastic soils under axial loading. *17th ASCE Engineering Mechanics Conference*. 2004.
18. Geuse E.C.W.A., Tjong-Kie T. The mechanical behaviors of clays. *Proceedings of the International Congress on Rheology*. London, 1954; 247-259.
19. Henkel D.J. Investigation of two long-term failures in London clay slopes at Wood Green and Northolt. *Proceedings 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (London)*. 1957; 2:315-320.

20. Higo Y., Oka F., Kodaka T., Kimoto S. Three-dimensional strain localization of water-saturated clay and numerical simulation using an elasto-viscoplastic model. *Philosophical Magazine*. 2006; 86(21-22):3205-3240. DOI: 10.1080/14786430500321203
21. Kharichkin A. Numerical analysis of static loading pile groups with different conditions of pile location in group. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019; 1(20):113-119. EDN VTBFNK. (rus.).
22. Shkolyar F.S., Tyapkina P.A. Comparison of methods for calculating the precipitation of a pile foundation. *Week of Science ISI: collection of materials of the All-Russian Conference*. 2022; 281-283. EDN IPJAFV. (rus.).

Received April 17, 2023.

Adopted in revised form on June 13, 2023.

Approved for publication on June 13, 2023.

B I O N O T E S: **Filipp S. Shkoliar** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; office@spbstu.ru, shkolyar.fs@gmail.com;

Darya V. Rogozinnikova — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 5065-9350; office@spbstu.ru, dar2504@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Filipp S. Shkoliar — idea, provision of source data, scientific guidance, scientific text editing, text revision.

Darya V. Rogozinnikova — collecting the material, processing the material, making calculations, compiling the source text and final conclusions.

Authors report about the absence of conflict of interests.