

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С ГЛИНИСТЫМ ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ

INTERACTION OF INJECTION PILES WITH CLAY BASE SOIL

Рассматривается взаимодействие инъекционных свай с глинистым грунтом основания. Подготовлены модели (системы) свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона, а также модели (системы) фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, работа которых моделировалась при нагружении. Представлена методика численного моделирования работы одиночной инъекционной сваи и отдельно стоящего фундамента, усиливаемого такими сваями, в ПК Midas GTS. Обоснование методики расчета представленных систем выполнено путем сопоставления графиков зависимости осадок от прикладываемых вертикальных нагрузок, которые получены по результатам численного моделирования и испытаний (нагружения) натурных одиночных свай статической вдавливающей нагрузкой.

Ключевые слова: фундамент мелкого заложения, усиление фундаментов, инъекционная свая, реконструкция, глинистые грунты, численное моделирование.

This paper examines the interaction of injection piles with clay base soils. Models (systems) of piles installed by injecting fine-grained concrete, as well as models (systems) of bases reinforced with injection piles, are developed, and their performance under loading is simulated. A methodology for numerically modeling the performance of a single injection pile and a freestanding foundation reinforced with such piles is presented using the Midas GTS software package. The calculation methodology for these systems is substantiated by comparing graphs of settlement versus applied vertical loads, which are obtained from numerical modeling and testing (loading) of full-scale single piles under static compressive loading.

Keywords: shallow foundation, foundation reinforcement, injection pile, reconstruction, clay soils, numerical modeling.

Введение

Усиление фундаментов мелкого заложения реконструируемых зданий [1, 2] может быть выполнено при помощи устройства инъекционных свай, которые будут воспринимать дополнительную нагрузку и передавать их на грунты основания [2–3, 17]. Вопросы технологии изготовления и численных исследований работы свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона (инъекционные, буроинъекционные сваи), в том числе в составе усиливаемых фундаментов, рассматривались как отечественными, так и зарубежными учеными, такими как Х. А. Джантимиров [4], В. В. Конюш-

ков [5], Р. А. Мангушев [6], А. И. Осокин [4], А. А. Петухов и А. И. Полищук [2], М. А. Самохвалов [8, 9], Я. А. Пронозин и И. С. Сальников [7], В. М. Улицкий [5], А. А. Филиппович [11], Д. А. Чернявский [1], А. А. Тарасов и Р. В. Шалгинов [10] и др. Важным моментом при проектировании фундамента реконструируемого здания (существующий фундамент, усиливаемый инъекционными сваями) является учет частей нагрузки, которые будут приходиться отдельно на подошву существующего фундамента и на сваи [2, 12]. Величина осадки усиливаемого фундамента $S_{рек}$ в соответствии с предложением автора в [13] напрямую зависит от доли нагрузки

на инъекционные сваи. Задачи, связанные с исследованием перераспределения нагрузки между конструктивными элементами усиливаемого фундамента, могут быть решены путем компьютерного моделирования в программном комплексе *Midas GTS*.

Материалы и методы

Согласно проведенным ранее исследованиям [14], взаимным влиянием свай в кусте либо свай, используемых для усиления отдельно стоящих фундаментов, можно пренебречь в том случае, если расстояние между сваями будет составлять более 3–4 диаметров инъекционной сваи. В этом случае погрешность результатов расчета не превысит 5–10 %. Таким образом, работу инъекционных свай в составе усиливаемого фундамента с достаточной точностью можно оценить по характеру работы одиночной инъекционной сваи. Следовательно, первоочередной задачей исследований ставилась проверка результатов моделирования работы одиночной инъекционной сваи в программном комплексе на базе метода конечных элементов и обоснование возможности его применения для проведения дальнейших исследований.

Обоснование применения программного комплекса для моделирования работы усиливаемого отдельного фундамента в глинистых грунтах производилось на основе сравнения с данными натурных испытаний инъекционных свай в глинистых грунтах. Для этого использовались результаты исследований А. А. Петухова, выполненные в г. Томске и г. Кемерово в 2003–2005 гг. [2]. Полученные данные позволили сделать выводы о возможности применения программного комплекса для решения поставленных задач.

Грунтовые условия, в которых выполнялось моделирование инъекционных свай, а также исследования отдельных фундаментов, усиливаемых при помощи таких свай, представлены глинистыми грунтами с консистенцией от мягкопластичной до текучей.

Натурные испытания инъекционных свай в г. Томске и г. Кемерово [2] выполнялись в слабых водонасыщенных глинистых грунтах — суглинки мягкотекучепластичной консистенции, супеси текучепластичной консистенции.

В настоящее время существует более десятка критериев пластичности, которые реализованы в программном комплексе *Midas GTS*. Выбор модели грунта обусловлен, главным образом, имеющимися результатами натурных испытаний инъекционных свай, в рамках которых определялось ограниченное число параметров деформируемости грунта основания. В связи с этим в данной работе в качестве критерия пластичности (модели) грунта принимается критерий Кулона–Мора (упругопластическая модель Кулона–Мора).

Вокруг боковой поверхности сваи диаметром $d_{\text{св}}$ предусматривается дополнительный массив шириной $2d_{\text{св}}$ (от ствола), для которого с учетом данных натурных испытаний инъекционных свай (А. А. Петухов, А. А. Тарасов, 2004–2006 гг.) [2, 15], задаются скорректированные характеристики грунта:

$$c_{\text{упл}} = K_c c;$$

$$\varphi_{\text{упл}} = K_\varphi \varphi,$$

где c , φ — соответственно удельное сцепление (кПа) и угол внутреннего трения (град.) глинистого грунта естественного сложения; K_c , K_φ — безразмерные коэффициенты, принимаемые по [16, 17].

Тело сваи выполняется из мелкозернистого бетона естественного твердения класса В20. Согласно [18], для моделирования поведения подобного искусственного строительного материала с высокой жесткостью рекомендуется применять линейно-упругую модель (модель *Elastic*). Физико-механические характеристики материала сваи (бетона) следующие: модуль упругости $E = 23\,500$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; удельный вес $\gamma = 25$ кН/м³.

Графически расчетная система «инъекционная свая–глинистый грунт» представляет собой правильную четырехугольную призму, внутри которой размещено тело инъекционной сваи в форме цилиндра (рис. 1). Размеры цилиндра сваи задаются его высотой L_{CB} и диаметром d_{CB} . Размеры призмы

массива грунта задаются половиной ширины основания r и высотой H .

Для того чтобы инъекционная свая и грунт работали раздельно, на боковой поверхности сваи создаются обычные интерфейсные конечные элементы, необходимые для реализации проскальзывания сваи от-

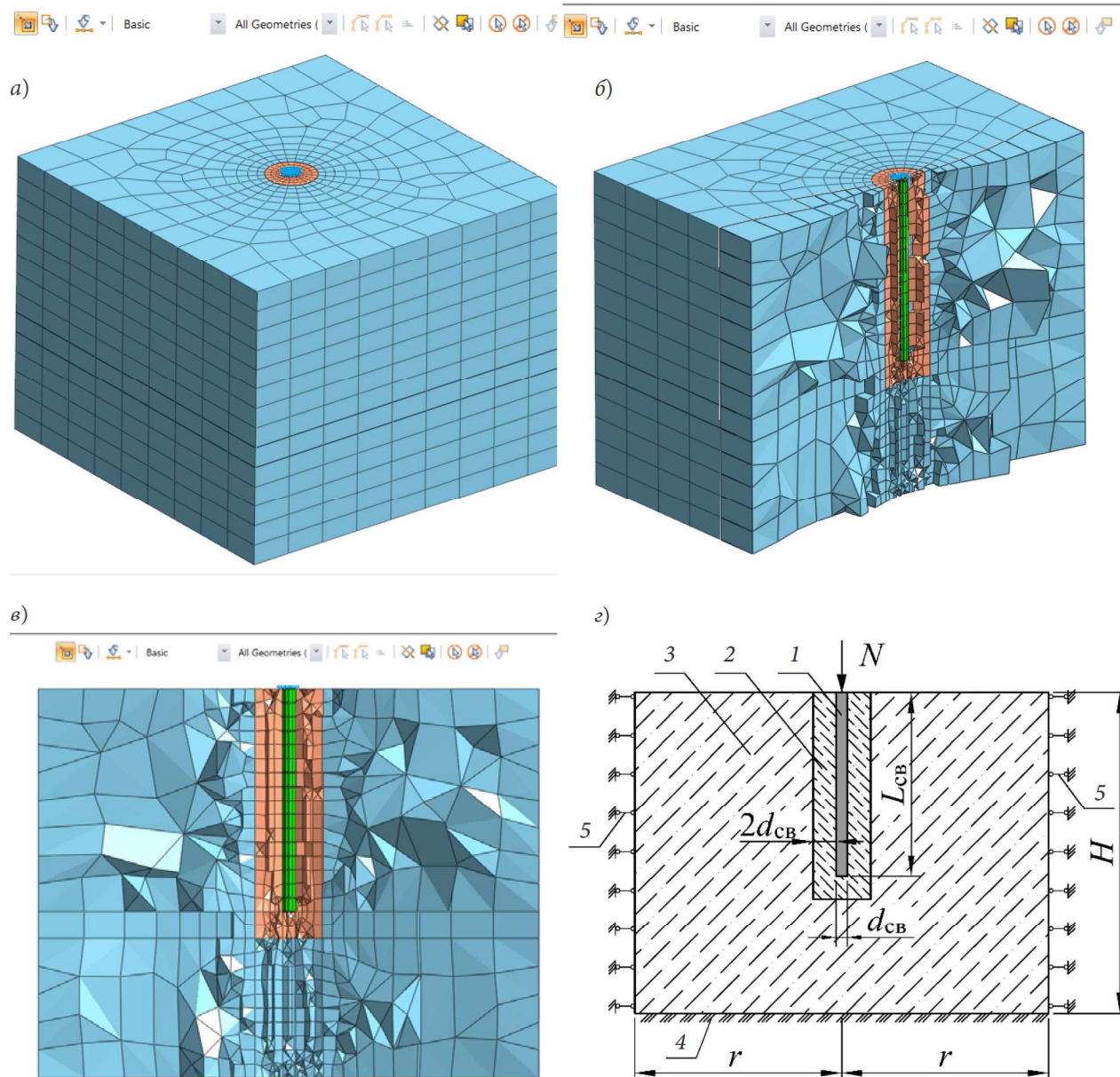


Рис. 1. Расчетная система «инъекционная свая–глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*: а — общий вид расчетной системы (изометрический вид); б — разрез расчетной системы (изометрический вид); в — то же (вид сбоку); г — расчетная схема с обозначениями: 1 — инъекционная свая; 2 — уплотненный грунт; 3 — массив грунта; 4 — жесткое закрепление; 5 — шарнирное сопряжение

носителем грунта (рис. 2). В качестве критерия прочности грунта обычных интерфейсных конечных элементов принимается также модель Кулона–Мора. Параметры прочности интерфейсных элементов: коэффициент жесткости в нормальном направлении $K_n = 244\,444 \text{ кН/м}^3$; коэффициент жесткости в тангенциальном направлении $K_t = 22\,222 \text{ кН/м}^3$. При этом удельное сцепление $c = 25 \text{ кПа}$ и угол внутреннего трения $\varphi = 18,7^\circ$ приняты по характеристикам околосвайного грунта. Это связано с тем, что в отличие от других технологий изготовления свай (например, буронабивных) при устройстве инъекционных свай физико-механические параметры грунта на контакте со свайей за счет выполнения опрессовки не снижаются. Параметры прочности, указанные выше (K_n ; K_t), определены на основе калибровки по статическим испытаниям инъекционных свай до достижения сходимости графиков зависимости осадки от нагрузки.

В рассматриваемой расчетной системе задаются кинематические граничные условия, которые подразумевают жесткое закрепление нижней поверхности модели и возможность вертикальных перемещений (вдоль оси Z) по боковой поверхности [19]. После этого прикладываются нагрузки, действующие на модель.

При выполнении расчета учитывается этапность (стадийность) приложения нагрузки на сваю. На первой стадии производится расчет однородного массива грунта с заданным собственным весом и граничными условиями, в результате которого определяются собственные напряжения грунта без учета перемещений. На второй стадии цилиндру внутри массива грунта присваиваются свойства бетона, а околосвайному массиву грунта ($2d_{\text{св}}$ от ствола сваи) — свойства грунта со скорректированными прочностными характеристиками. Учитываются интерфейсные элементы на боковой по-

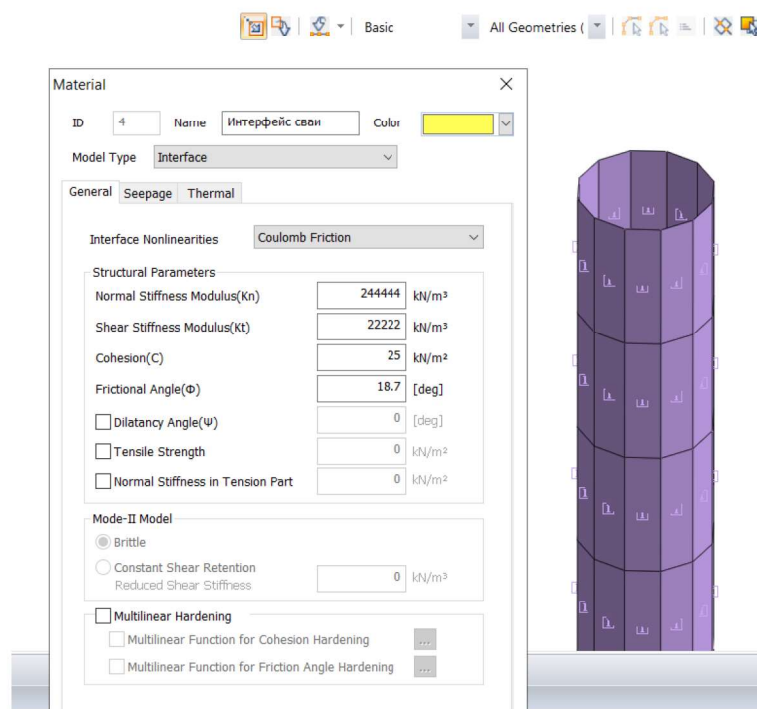


Рис. 2. Общий вид интерфейсных элементов на границе контакта инъекционной сваи с околосвайным грунтом

верхности свай, перемещения не учитываются. На третьей стадии прикладывается вертикальная нагрузка на оголовки свай с шагом нагружения 0,1 (10 % от заданной нагрузки).

Работа фундаментов мелкого заложения, усиленного инъекционными сваями, моделировалась аналогичным образом. Размеры призмы расчетной системы «фундамент–инъекционные сваи–глинистый грунт»

(рис. 3) определялись в соответствии с результатами выполненных тестовых расчетов и рекомендациями разработчиков программного комплекса *Midas GTS*. Графически инъекционные сваи задавались объемными элементами (цилиндрами) длиной L_{CB} (3,0; 6,0; 9,0 и 12,0 м) и диаметром $d_{CB} = 250$ мм. Глубина заложения фундамента d_f принималась равной 1 м, ширина подошвы отдельного фундамента b_ϕ — 1; 1,5 и 2 м.

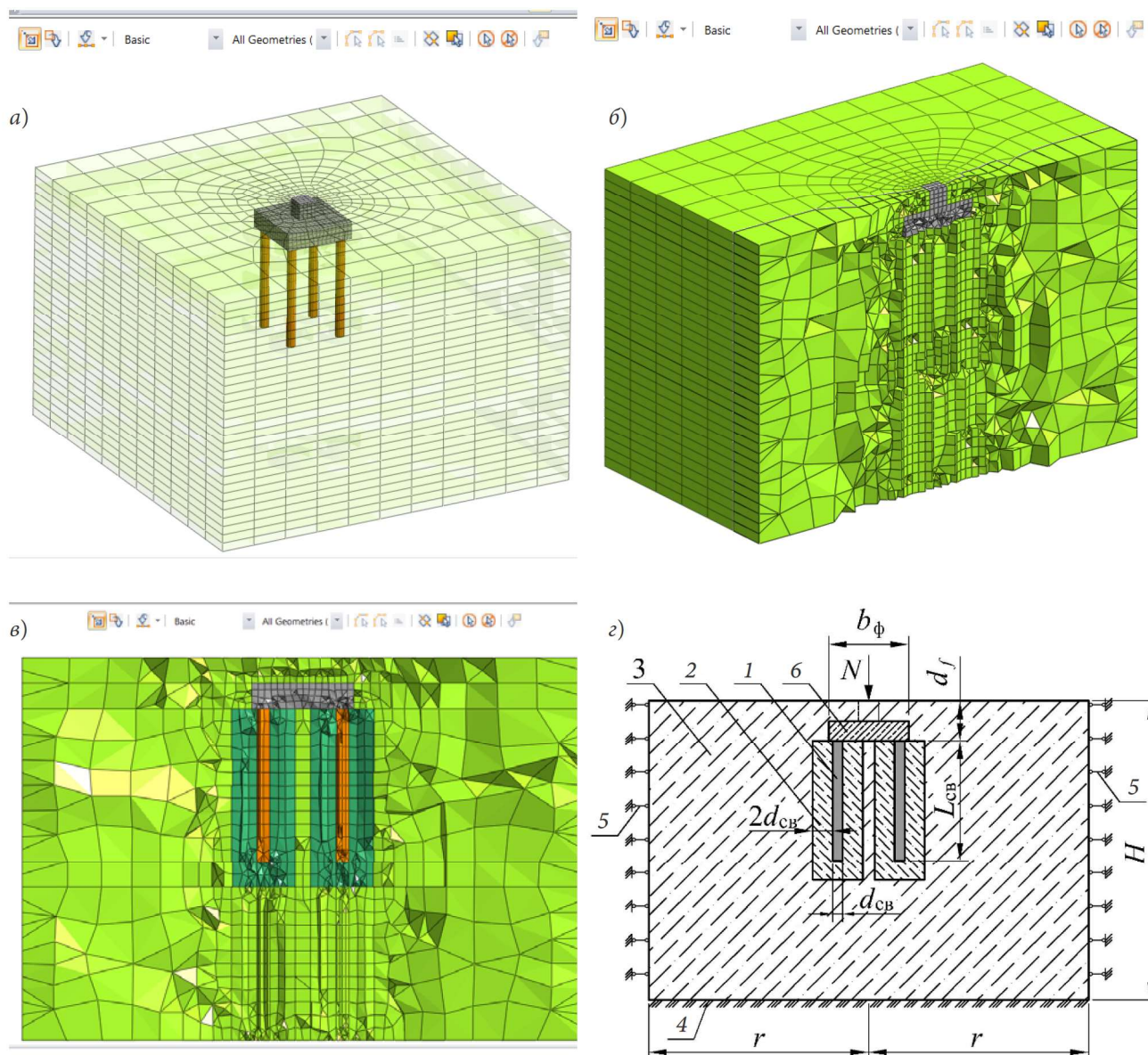


Рис. 3. Расчетная система «фундамент–инъекционные сваи–глинистый грунт» в ПК *Midas GTS*: а — общий вид расчетной системы (изометрический вид); б — центральный разрез расчетной системы (изометрический вид); в — разрез расчетной системы по сваям (вид сбоку); з — расчетная схема с обозначениями (1–5 — то же, что и на рис. 1; 6 — существующий фундамент)

Поскольку по мере выполнения строительно-монтажных работ нагрузка на фундамент передается не одновременно [20], расчет делится на четыре стадии.

Стадия 1. Расчет собственных напряжений однородного массива грунта (отдельный фундамент, инъекционные сваи и грунтовый массив обладают свойствами грунта) без учета перемещений.

Стадия 2. Расчет напряжений в грунте на этапе работы фундамента до реконструкции без учета перемещений. К верхней грани подколонника фундамента прикладывается вертикальная нагрузка $N_1 = R/A$ (R — расчетное сопротивление грунта основания фундамента мелкого заложения, кПа; A — площадь подошвы фундамента, m^2).

Стадия 3. Расчет напряжений в грунте на этапе усиления отдельного фундамента инъекционными сваями без учета перемещений. Цилиндрам внутри массива грунта присваиваются свойства бетона, околосвайному массиву грунта ($2d_{cb}$ от стволов свай) — свойства грунта со скорректированными прочностными характеристиками. Учитываются интерфейсные элементы на боковой поверхности свай.

Стадия 4. Расчет напряжений и перемещений (осадки) в грунте на этапе работы усиленного фундамента после реконструкции.

Результаты исследований и их обсуждение

Обоснование возможности применения ПК *Midas GTS* для моделирования работы инъекционных свай выполнено при помощи конечно-элементных систем «инъекционная свая–глинистый грунт». В качестве исходных данных использованы материалы натурных испытаний инъекционных свай, представленные в [2]. В соответствии с описанным выше алгоритмом произведены расчеты по определению вертикальных перемещений (осадок) свай. На рис. 4 приведено сопоставление результатов численных расчетов в ПК *Midas GTS* с данными наблюдений за натурными верти-

кально нагруженными одиночными инъекционными сваями.

Анализируя графики на рис. 4, необходимо отметить их общую особенность — расположение значений осадки инъекционных свай, вычисленных в программном комплексе *Midas GTS*, ниже данных натурных наблюдений за сваями. В рассматриваемом диапазоне нагружения инъекционных свай 100–150 кН разность осадок не превышает 3–5 мм.

С учетом указанных выше данных инженерно-геологических изысканий площадок [2] и геометрических параметров натурных инъекционных свай выполнено моделирование усиленного при помощи них отдельно стоящего фундамента. Моделирование и расчет усиленного фундамента произведены в соответствии с алгоритмом, представленным в разделе «Материалы и методы» настоящей статьи. Геометрические параметры конструктивных элементов фундамента, усиливаемого инъекционными сваями, следующие: ширина плитной части фундамента $b_{\phi} = 2$ м; глубина заложения подошвы фундамента $d_f = 1$ м; длина инъекционных свай $L_{cb} = 4,5$ м; диаметр инъекционных свай $d_{cb} = 220$ мм.

На рис. 5 приведено сопоставление результатов расчета дополнительной осадки фундамента, усиленного инъекционными сваями (после увеличения нагрузок при реконструкции), в ПК *Midas GTS* с данными наблюдений за натурными вертикально нагруженными одиночными инъекционными сваями.

В результате анализа данных, представленных на графиках (см. рис. 5), установлено следующее. В среднем, сходимость между величинами осадок одиночной инъекционной сваи по результатам натурных наблюдений и дополнительных осадок отдельного фундамента после усиления инъекционными сваями по результатам расчета в ПК *Midas GTS* составляет 39 %. Причиной наличия запаса по результатам расчета осадок является использование для сопоставления натурных

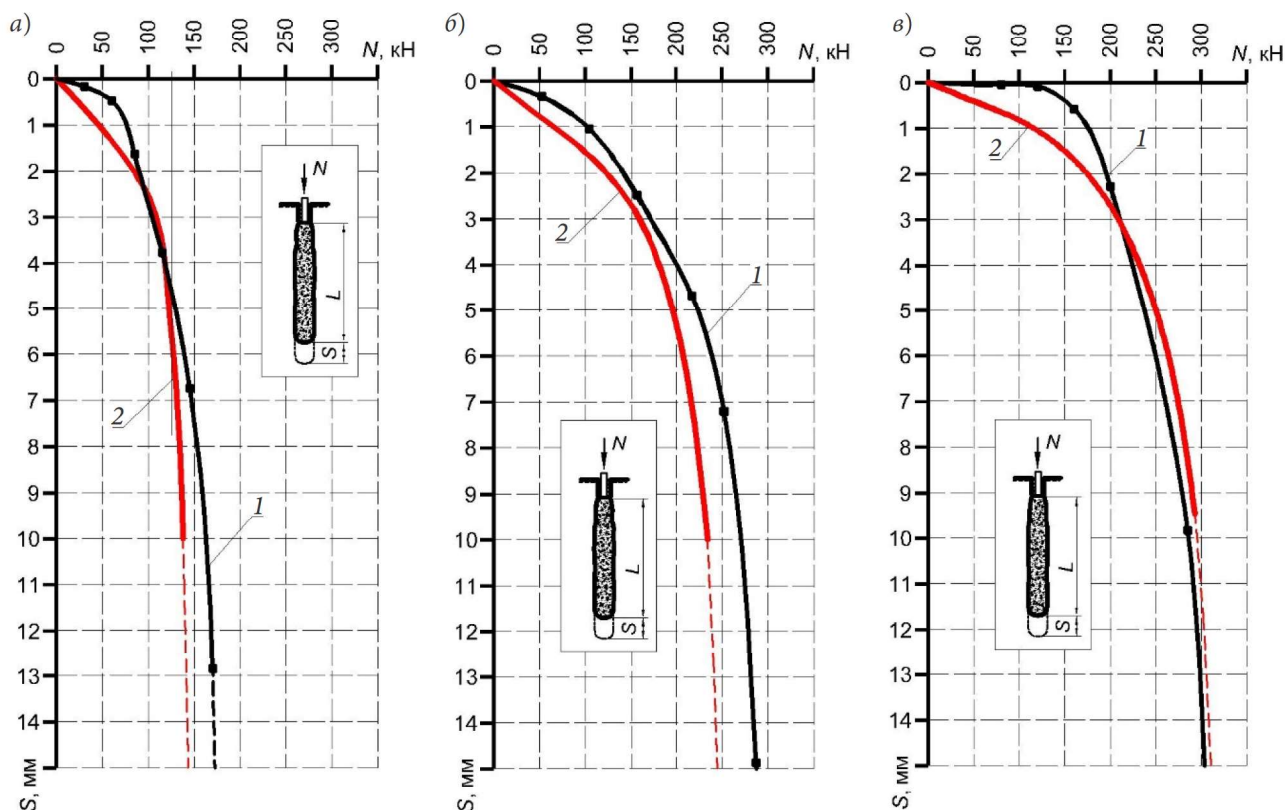


Рис. 4. Графики зависимости осадки одиночной инъекционной сваи S от приложенной нагрузки N в соответствии: с 1 — данными натурных наблюдений; 2 — результатами расчета при помощи ПК *Midas GTS*; а — инъекционная свая СИ-2 на площадке № 1 [2]; б — инъекционная свая СИ-19 на площадке № 2 [2]; в — инъекционная свая ИС-4 на площадке № 3 [2]

данных наблюдений не за осадками отдельного фундамента, усиленного инъекционными сваями, а за осадками одиночной инъекционной сваи. Необходимо отметить, что на этапе усиления существующего фундамента в связи с уменьшением его опорной площади (устройство отверстий в плитной части для инъекционных свай) происходят дополнительные перемещения (осадки) грунта.

Из вышеуказанного следует вывод о том, что программный комплекс *Midas GTS* может быть использован для выполнения поставленных в работе задач, в том числе о перераспределении нагрузки между элементами усиленного инъекционными сваями отдельно стоящего фундамента в глинистых грунтах.

Выводы

1. Представлены алгоритмы моделирования систем «инъекционная свая–глинистый

грунт» и «фундамент–инъекционные сваи–глинистый грунт» в программном комплексе *Midas GTS*, а также результаты расчета указанных систем.

2. К особенностям методики моделирования одиночных инъекционных свай, представленной в настоящей статье, необходимо отнести предусматриваемый дополнительный массив шириной $2d_{\text{св}}$ (от ствола), для которого задаются скорректированные характеристики грунта с учетом технологии устройства инъекционных свай. Кроме того, на основе калибровки численных моделей по данным натурных испытаний инъекционных свай вдавливающей статической нагрузкой определены параметры интерфейсов, которые задаются в модели на контакте боковой поверхности сваи и околоствайного грунта.

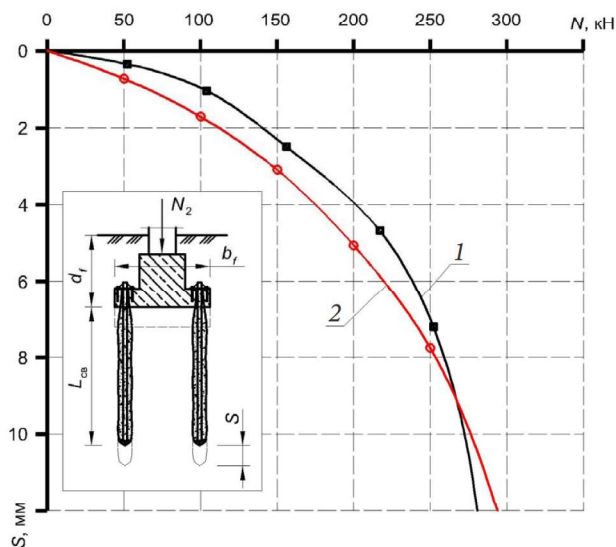


Рис. 5. Графики зависимости осадки S от приложенной нагрузки N : 1 — одиночной инъекционной сваи (по данным натурных наблюдений); 2 — отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями (по результатам расчета при помощи ПК *Midas GTS*)

3. В рамках поставленных задач проведено обоснование применимости программного комплекса *Midas GTS* в качестве инструмента исследования. Выполнено сопоставление результатов компьютерных расчетов с натурными испытаниями вертикально нагруженных одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах. Результаты моделирования показали, что качественный и количественный характер изменения осадок свай в зависимости от прикладываемой нагрузки, рассчитанных в *Midas GTS*, схож с данными, полученными при натурных наблюдениях за инъекционными сваями.

Сходимость результатов при расчете одиночных свай и усиливаемого отдельного фундамента составляет соответственно 20–30 и 39 %, что позволяет говорить о применимости разработанных расчетных систем для выполнения исследований перераспределения нагрузки между элементами отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями, в глинистых грунтах.

Библиографический список

1. Гнедаш К. А., Гапонова В. А., Чернявский Д. А. Способы усиления оснований и фундаментов при реконструкции зданий и сооружений // Молодежь и XXI век — 2025: сб. науч. ст. 14-й Междунар. молодежной науч. конф. Курск, 20–21 февраля 2025 г. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. С. 108–110. EDN RPGVRF.
2. Полищук А. И., Петухов А. А., Семёнов И. В. Усиление фундаментов инъекционными сваями при реконструкции зданий. 2-е изд., доп. / под ред. А. И. Полищука. М.: АСВ, 2023. 212 с. ISBN 978-5-4323-0490-2.
3. Готман А. Л. Сваи и свайные фундаменты: избранные труды. Уфа: Уфимский гос. нефтяной технический ун-т, Ин-т доп. проф. образования, 2015. 384 с.
4. Осокин А. И., Ноздра В. И., Джантимиров Х. А., Калач Ф. Н. Комплексный подход к усилению оснований и фундаментов аварийно-деформированных исторических зданий на основе инъекционных технологий // Геотехника. 2023. Т. 15, № 3. С. 72–85. DOI 10.25296/2221-5514-2023-15-3-72-85. EDN CZHXJO.
5. Конюшков В. В., Улицкий В. М. Оценка несущей способности буроинъекционных свай // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 2 (11). С. 52–56. EDN JWMTVB.
6. Мангушев Р. А. Усиление фундаментов зданий и сооружений — памятников архитектуры на примере Санкт-Петербурга // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 8. С. 77–86. DOI 10.33622/0869-7019.2023.08.77-86. EDN VGNSDE.
7. Пронозин Я. А., Соколов В. Г., Сальный И. С., Муслова Д. Д. Способ устройства и расчета буроинъекционных свай в сложных инженерно-геологических условиях // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 2. С. 52–59. DOI 10.33622/0869-7019.2025.02.52-59. EDN QKBHBO.
8. Самохвалов М. А., Паронко А. А., Гейдт А. В., Матюков А. А. Результаты численного моделирования взаимодействия буроинъекционной сваи, имеющей контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений: межвуз. темат. сб. тр. СПб.: СПбГАСУ, 2018. С. 73–78. EDN OSFVTR.
9. Паронко А. А., Самохвалов М. А. Несущая способность буроинъекционной сваи с уширенной пятой на вертикальную вдавливающую нагрузку // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2023: сб. докл. IV Нац. науч. конф. Москва, 15 декабря 2023 г. М.: НИУ МГСУ, 2024. С. 262–265. EDN RFJRW P.
10. Пат. 87718 U1, Российская Федерация, МПК E02D 5/34. Инъекционная свая / А. И. Полищук,

А. А. Тарасов, Р. В. Шалгинов. № 2009100371/22, заявл. 11.01.2009, опубл. 20.10.2009.

11. Филиппович А. А. Взаимодействие ленточных фундаментов реконструируемых зданий с глинистым грунтом основания при их усилении инъекционными сваями: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 179 с. EDN NCQZER.

12. Polishchuk A. I., Semyonov I. V., Demchenko V. A. Main reasons for strengthening foundations and base soil stabilizations of used buildings // Journal of Physics: Conference Series: 2. 2021. 012029. DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012029.

13. Полищук А. И., Семёнов И. В. Расчет осадки комбинированного фундамента для реконструируемого здания в глинистых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 6. С. 7–11.

14. Сернов В. А. Исследование напряженно-деформированного состояния грунта в межсвайном пространстве // Геотехника Беларуси: наука и практика: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 20–22 октября 2008 г. Минск: БНТУ, 2008. С. 239–246.

15. Тарасов А. А. Применение результатов статического зондирования для расчета несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5 (52). С. 101–104.

16. Полищук А. И., Фурсов В. В., Балюра М. В. Изменение свойств грунтов в основании фундаментов длительно эксплуатируемых зданий. Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство // Труды Междунар. конф. по геотехнике, посв. 300-летию Санкт-Петербурга. В 2 т. Т. 2 / под ред. В. А. Ильичева, В. М. Улицкого. СПб.; М.: АСВ, 2003. С. 179–183.

17. Полищук А. И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. 3-е изд., доп. Нортхэмптон: STT; Томск: STT, 2007. 476 с.

18. Строкова Л. А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 142 с.

19. Ещенко О. Ю., Чернявский Д. А. Исследование влияния краевых условий модели на перемещения буроинъекционной сваи при действии статических нагрузок // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 94 (10). С. 325–335.

20. Коновалов П. А., Коновалов В. П. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 5-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ, 2011. 384 с.

References

1. Gnedash K. A., Gaponova V. A., Chernyavskiy D. A. *Sposoby usileniya osnovaniy i fundamentov*

pri rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy [Methods for strengthening foundations and foundations during the reconstruction of buildings and structures]. *Molodezh' i XXI vek — 2025. Trudy 14-y Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf. Kursk, 20–21 fevralya 2025 g.* [Youth and the 21-st century – 2025. Proceedings of the 14-th International youth scientific. conf., Kursk, 20–21 February 2025. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2025, pp. 108–110.

2. Polishchuk A. I., Petukhov A. A., Semyonov I. V. *Usilenie fundamentov in"eksionnymi svayami pri rekonstruktsii zdaniy* [Reinforcement of foundations with injection piles during reconstruction of buildings]. 2-nd ed. revised. Ed. by Polishchuk A. I. Moscow, ASV Publ., 2023, 212 p. ISBN 978-5-4323-0490-2.

3. Gotman A. L. *Svai i svaynye fundamenty: izbrannye trudy* [Piles and pile foundations: selected works]. Ufa: Ufimskiy gos. neftyanoy tekhnicheskij un-t, In-t dop. prof. obrazovaniya Publ., 2015, 384 p.

4. Osokin A. I., Nozdrya V. I., Dzhantimirov Kh. A., Kalach F. N. *Kompleksniy podkhod k usileniyu osnovaniy i fundamentov avariynno-deformirovannykh istoricheskikh zdaniy na osnove in"eksionnykh tekhnologiy* [A comprehensive approach to strengthening the bases and foundations of emergency-deformed historical buildings based on injection technologies]. *Geotekhnika – Geoengineering*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 72–85. DOI 10.25296/2221-5514-2023-15-3-72-85.

5. Konyushkov V. V., Ulitskiy V. M. *Otsenka nesushchey sposobnosti buroin"eksionnykh svay* [Assessment of bearing capacity of drilling and injection piles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2007, no. 2 (11), pp. 52–56.

6. Mangushev R. A. *Usilenie fundamentov zdaniy i sooruzheniy — pamyatnikov arkhitektury na primere Sankt-Peterburga* [Reinforcement of the foundations of buildings and structures - architectural monuments on the example of St. Petersburg]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2023, no. 8, pp. 77–86. DOI 10.33622/0869-7019.2023.08.77-86.

7. Pronozin Ya. A., Sokolov V. G., Sal'niy I. S., Muslova D. D. *Sposob ustroystva i rascheta buroin"eksionnykh svay v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [Method of construction and calculation of drilling and injection piles in complex geotechnical conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2025, no. 2, pp. 52–59. DOI 10.33622/0869-7019.2025.02.52-59.

8. Samokhvalov M. A., Paronko A. A., Geydt A. V., Matyukov A. A. *Rezultaty chislennogo modelirovaniya vzaimodeystviya buroin"eksionnoy svai, imeyushchey kontroliruemoe ushirenie, s pylevato-glinistym gruntovym osnovaniem* [Results of numerical modeling of interaction of a auger injection pile with controlled widening with a

silty-clay soil base]. *Voprosy proektirovaniya i ustroystva nadzemnykh i podzemnykh konstruktivnykh zdaniy i sooruzheniy. Trudy mezhvuz.temat. sb. tr. SPb.* [Design and arrangement of aboveground and underground structures of buildings and structures. Proceedings of the inter-college thematic conf., St. Petersburg]. SPbGASU Publ., 2018, pp. 73–78.

9. Paronko A. A., Samokhvalov M. A. *Nesushchaya sposobnost' buroin'ekstionnoy svai s ushirennoy pyatoy na vertikal'nyuyu vdavlivayushchuyu nagruzku* [Bearing capacity of a bored injection pile with a widened heel on a vertical pressing load]. *Aktual'nye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya — 2023. Trudy IV Nats. nauch.konf. Moskva, 15 dekabrya 2023 g.* [Actual problems of the construction industry and education - 2023. Proceedings of the IV Domestic scientific conf., Moscow, December 15, 2023]. Moscow, NIU MGSU Publ., 2024, pp. 262–265.

10. Polishchuk A. I., Tarasov A. A., Shalginov R. V. *In'ekstionnaya svaya* [Injection pile]. Patent RF, no. 87718 U1, 2009.

11. Filippovich A. A. *Vzaimodeystvie lentochnykh fundamentov rekonstruirovannykh zdaniy s glinistym gruntom osnovaniya pri ikh usilenii in'ekstionnymi svayami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Interaction of strip foundations of reconstructed buildings with clay soil of the base when they are reinforced with injection piles. PhD in Sci. Tech. diss.]. Tomsk, 2014, 179 p.

12. Polishchuk A. I., Semyonov I. V., Demchenko V. A. Main reasons for strengthening foundations and base soil stabilizations of used buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, 2, 2021, 012029. DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012029.

13. Polishchuk A. I., Semyonov I. V. *Raschet osadki kombinirovannogo fundamenta dlya rekonstruirovannogo zdaniya v glinistyykh gruntakh* [Calculation of settlement of the combined foundation for the reconstructed building in clay soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and mechanics of soil*, 2022, no. 6, pp. 7–11.

14. Sernov V. A. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya grunta v mezhsvaynom prostranstve* [Study of the stress-strain state of the soil in the interstitial space]. *Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika. Trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Minsk,*

20–22 oktyabrya 2008 [Geotechnics of Belarus: science and practice. Proceedings of the International scientific and technical conf. Minsk, October 20–22, 2008]. Minsk, BNTU Publ., 2008, pp. 239–246.

15. Tarasov A. A. *Primenenie rezul'tatov staticheskogo zondirovaniya dlya rascheta nesushchey sposobnosti in'ekstionnykh svay v slabyykh glinistyykh gruntakh* [Application of static sounding results for calculation of bearing capacity of injection piles in weak clay soils]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 5 (52), pp. 101–104.

16. Polishchuk A. I., Fursov V. V., Balyura M. V. *Izmenenie svoystv gruntov v osnovanii fundamentov dlitel'no ekspluatiruemyykh zdaniy. Rekonstruktsiya istoricheskikh gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Change of soil properties in foundations of long-term operated buildings. Reconstruction of historical cities and geotechnical construction]. *Trudy Mezhdunar. konf. po geotekhnike, posvyashchennoy 300-letiyu Sankt-Peterburga* [Proceedings of the International Conference on geotechnics dedicated to the 300-th anniversary of St. Petersburg]. In 2 vols. Vol. 2. Ed. by Il'ichev V. A., Ulitskiy V. M. St. Petersburg, Moscow, ASV Publ., 2003, pp. 179–183.

17. Polishchuk A. I. *Osnovy proektirovaniya i ustroystva fundamentov rekonstruirovannykh zdaniy* [Fundamentals of design and arrangement of foundations of reconstructed buildings]. 3rd ed., revised. Northampton, STT Publ.; Tomsk, STT Publ., 2007, 476 p.

18. Polishchuk A. I., Strokova L. A. *Primenenie metoda konechnykh elementov v mekhanike gruntov* [Application of finite element method in soil mechanics]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhn. un-ta Publ., 2010, 142 p.

19. Eshchenko O. Yu., Chernyavskiy D. A. *Issledovanie vliyaniya kraevykh usloviy modeli na peremeshcheniya buroin'ekstionnoy svai pri deystvii staticheskikh nagruzok* [Study of the influence of model boundary conditions on the displacement of the auger injection pile under static loads]. *Nauchniy zhurnal KubGAU – Scientific journal KubGAU*, 2013, no. 94 (10), pp. 325–335.

20. Kononov P. A., Kononov V. P. *Osnovaniya i fundamenty rekonstruirovannykh zdaniy* [Bases and foundations of reconstructed buildings]. 5-rd ed., revised. Moscow, ASV, 2011, 384 p.