

УДК 624.154.1

Ю. С. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук, проф. кафедры архитектуры; В. В. ФАТЕЕВ, инженер, ст. преп. кафедры архитектуры

ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЗАБИВНОЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ СВАИ В МНОГОСЛОЙНОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-57; эл. почта: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Ключевые слова: математическая модель, призматическая свая, грунтовое основание, верификация.

Приводится методика разработки и верификации математической модели забивной призматической сваи, работающей в многослойном грунтовом основании, с использованием программного комплекса MIDAS GTS NX.

Использование программных комплексов *PLAXIS, ZSOIL, FEMmodels, MIDAS GTS NX* и им подобных позволяет существенно увеличить объем исследований по анализу эффективности различных типов фундаментов и выбору из них наиболее рационального варианта, особенно в случаях устройства фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях. Компьютерное моделирование позволяет значительно сократить объем натурных испытаний, которые могут быть выполнены лишь в объеме, необходимом для подтверждения правильности выбранных математических моделей. Вместе с тем ошибки в математических моделях фундаментов и грунтовых оснований, используемых для обоснования проектных решений, могут привести к деформациям построенных зданий и сооружений и даже к их разрушению, поэтому в такого рода исследованиях на первый план выходит необходимость всесторонней апробации разрабатываемых моделей.

В качестве основы для выполненных исследований авторами были использованы результаты инженерно-геологических изысканий, выполненных ООО «Нижегородстройизыскания» на одной из промплощадок ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез», расположенной в Нижегородской области.

В качестве критериев верификации разработанной авторами математической модели использовались (табл. 1):

- —результаты выполненных в соответствии с рекомендациями СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» расчетов несущей способности забивной железобетонной сваи, работающей на: 1) вдавливающую; 2) выдергивающую и 3) горизонтальную нагрузки.
- результаты полевых испытаний грунтов: 1) натурными сваями и 2) статическим зондированием (рис. 1).

Математическое моделирование взаимодействия забивной призматической висячей сваи с двухслойным грунтовым массивом в пространственной постановке было выполнено авторами с использованием программного комплекса MIDAS GTS NX. Расчетная область состояла из модели грунтового основания с размерами $20\times20\times32,6$ м и модели забивной железобетонной сваи сечением $0,35\times0,35$ м длиной 12 м, погруженной в грунт на 11 м (рис. 1,2 цв. вклейки).



Контактный весьма тонкий слой грунта, обладающий собственными физикомеханическими свойствами, обеспечивающий взаимодействие сваи с грунтовым массивом, моделировался интерфейсными элементами, разделяющими узлы между конечными элементами сваи и грунтового массива (рис. 2 цв. вклейки).

Таблица 1

Номер	Метод исследований	Несущая способность сваи	
		на выдергивающую нагрузку $F_{\scriptscriptstyle du}$, кН	на вдавливающую нагрузку $F_{\scriptscriptstyle d}$, кН
1	Расчеты с использованием формул СП 24.13330.2011	363,54	853,18
2	Полевые испытания грунтов статическим зондированием	382,70	850,16
3	Полевые испытания грунтов сваями	-	700

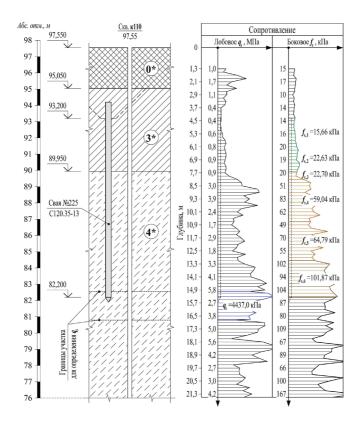


Рис. 1. Расчетные схемы к определению предельного сопротивления забивной призматической сваи по результатам испытания грунтов статическим зондированием: ИГЭ-0* — насыпной грунт ($tQ_{\rm IV}$); ИГЭ-3* — суглинок текучепластичный ($prQ_{\rm II-III}$); ИГЭ-4* — супесь пластичная ($prQ_{\rm II-III}$)

Исследованиями, ранее выполненными авторами, было установлено, что качественное совпадение характера работы свай в натурных условиях на вдавливающие, выдергивающие и горизонтальные нагрузки с результатами математического



моделирования обеспечиваются моделями, в которых взаимодействие сваи с грунтом моделируется контактными интерфейсными элементами, свойства которых описываются такими параметрами, как: модули нормальной и сдвиговой жесткости, удельное сцепление, угол внутреннего трения, угол дилатансии и прочность грунта при растяжении [1].

В численных расчетах, выполненных авторами, были приняты следующие граничные условия:

- 1 на верхней горизонтальной поверхности расчетной области свободное перемещение узлов по всем направлениям;
- 2 на вертикальных гранях свободное перемещение в вертикальном направлении вдоль оси Z и запрет на горизонтальные перемещения вдоль осей X и Y;
- 3 на нижней горизонтальной плоскости расчетной области запрет на перемещения по всем направлениям.

Для моделирования работы грунтового основания использовалась упругопластическая модель Мора-Кулона с характеристиками грунтов природного сложения, принятыми по материалам инженерно-геологических изысканий.

В первоначальных расчетах (этап исследований № 1) параметры интерфейсных элементов генерировались программным комплексом автоматически в зависимости от литологического строения грунтового основания и с учетом характеристик физико-механических свойств грунтов, определенных инженерно-геологическими изысканиями [2, 3]. Определенные в этом случае осадки сваи при действии вдавливающих нагрузок и вертикальные перемещения сваи при действии выдергивающих нагрузок даже отдаленно не напоминали результаты натурных испытаний и аналитических расчетов (рис. 6, 7 цв. вклейки). Такая геомеханическая модель не могла быть использована для проведения численных исследований работы свайных фундаментов. Причиной такого несовпадения явилось несоответствие первоначально принятой геомеханической модели действительной работе сваи в грунтовом массиве, главным образом из-за принятых в расчетах параметров интерфейсных элементов, не соответствующих характеристикам физико-механических свойств контактного слоя околосвайного грунта, образующего вокруг сваи тонкую оболочку, обеспечивающего взаимодействие сваи с грунтовым массивом.

На следующем этапе верификации модели (этап № 2) авторами исследовались модели с различными интерфейсными элементами, с параметрами, принятыми с учетом: 1) результатов испытаний грунтов вертикально нагруженными сваями; 2) результатов аналитических расчетов несущей способности свай, выполненных с использованием результатов испытаний грунтов статическим зондированием; 3) результатов расчетов несущей способности сваи на вдавливающую нагрузку, выполненных по формулам в соответствии с рекомендациями СП 24.13330.2011 (рис. 6, 7 цв. вклейки).

В результате исследований, выполненных с различными параметрами интерфейсных элементов, было выявлено лишь качественное, но не количественное совпадение результатов численных расчетов с результатами натурных испытаний и с результатами аналитических расчетов. При этом графики зависимости осадки сваи от вдавливающих нагрузок практически не отличались от графиков зависимости вертикальных перемещений сваи от выдергивающих нагрузок. Это означало, что в расчетах на вдавливающую нагрузку в компьютерной модели не учитывалось фактическое сопротивление и, соответственно, свойства грунта под нижним концом сваи.

Известно, что при погружении свай в грунтовый массив у боковой поверхно-

К СТАТЬЕ Ю. С. ГРИГОРЬЕВА, В. В. ФАТЕЕВА «ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЗАБИВНОЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ СВАИ В МНОГОСЛОЙНОМ ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ»

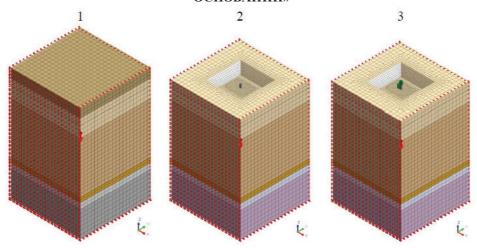


Рис. 1. Трехмерная компьютерная модель грунтового массива и забивной призматической сваи, разработанная в $MIDAS\ GTS\ NX$, на разных стадиях расчетов: 1 — начальное (природное) напряженно-деформированное состояние грунтового массива; 2 — грунтовый массив с погруженной в него сваей; 3 — стадия работы сваи под нагрузкой

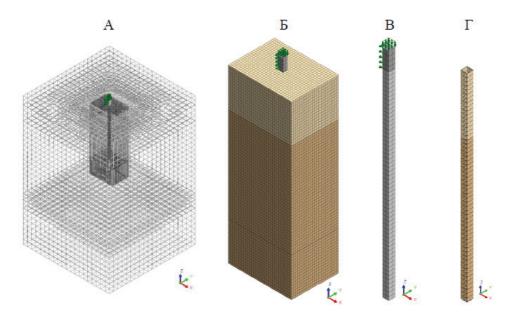


Рис. 2. Трехмерная компьютерная модель: A – грунтовый массив со сгущенной сеткой конечных элементов в области околосвайного пространства; B – околосвайный массив грунта; B – призматическая свая; Γ – интерфейсные элементы на контакте сваи с грунтом

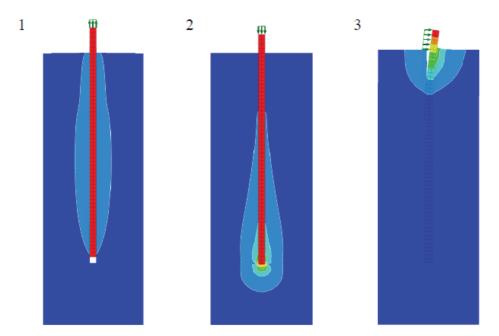


Рис. 3. Результаты расчетов верифицированной модели висячей призматической сваи и околосвайного грунта в $MIDAS\ GTS\ NX$: 1 – изополя вертикальных перемещений (по оси Z) при действии вертикальной выдергивающей нагрузки P в стадии срыва; 2 – изополя вертикальных перемещений (по оси Z) при действии вдавливающих нагрузок N; 3 – изополя горизонтальных перемещений сваи и окружающего сваю грунта при действии на сваю горизонтальных нагрузок H

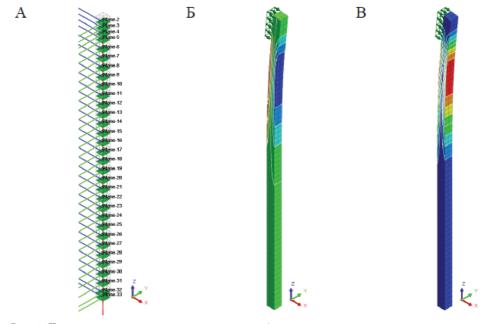
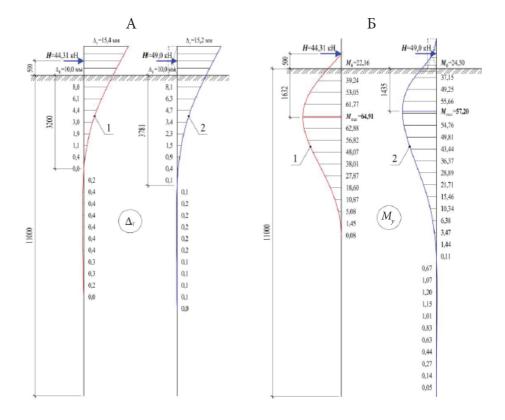


Рис. 4. Трехмерная компьютерная модель сваи: A – расчетные сечения по длине сваи для определения внутренних усилий; Б – изополя вертикальных напряжений σ_z ; В – изополя максимальных напряжений сдвига τ_{max}



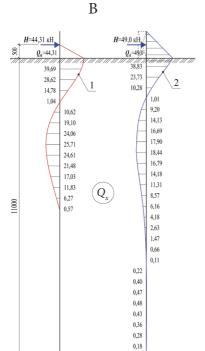
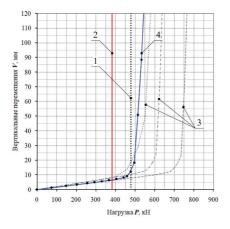


Рис. 5: А – горизонтальные перемещения сваи Δ г, мм; Б – эпюры изгибающих моментов M_{y} , кH·м и В – эпюры поперечных сил Q_{x} кH, полученные в результате проведения аналитических расчетов по методике СП 24.13330.2011 (график 1) и расчетов в $MIDAS\ GTS\ NX$ (график 2)



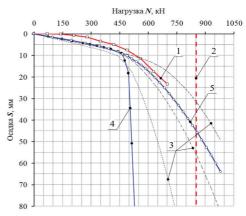


Рис. 6. Графики зависимости вертикальных перемещений V, мм от вертикальных выдергивающих нагрузок P, кH: 1 – предельное сопротивление F_u сваи по результатам испытания грунтов статическим зондированием; 2 – несущая способность сваи на выдергивающую нагрузку F_{du} ; 3 – графики, полученные в процессе верификации модели; 4 – график верифицированной модели сваи и грунтового основания

Рис. 7. Графики зависимости осадок S, мм от вертикальных вдавливающих нагрузок N, кН: 1 - график, полученный в результате проведения испытаний забивной статическими вдавливающими нагрузками; 2 – предельное сопротивление сваи F_{ij} по результатам испытания грунтов статическим зондированием; 3 - графики, полученные в процессе верификации модели; 4 - несущая способность выдергивающую сваи на нагрузку F_{du} без учета работы острия сваи; 5 - график верифицированной модели сваи и грунтового основания

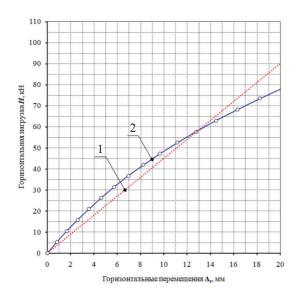


Рис. 8. Графики зависимости горизонтальных перемещений горизонтальных $\Delta \Gamma$, MM OT нагрузок H, кH: 1 – график, полученный результатам аналитических выполнения расчетов по методике СП 24.13330.2011; 2 - график, полученный по результатам верифицированной расчетов модели в MIDAS GTS NX



сти и под нижним концом свай образуются области уплотнения, в которых околосвайный грунт приобретает новую структуру с физико-механическими свойствами, отличными от свойств грунтов природного сложения [4, 5, 6].

Результаты исследований влияния характеристик грунта в зоне уплотнения под нижним концом сваи на ее несущую способность (этап исследований \mathbb{N}_2 3) позволили авторам получить хорошее совпадение результатов численных расчетов с результатами натурных испытаний грунтов сваями (рис. 3, 6, 7 цв. вклейки).

Верифицированная компьютерная модель была использована авторами в расчетах работы призматической сваи на горизонтальную нагрузку (этап исследований № 4). Сопоставлением результатов численных расчетов горизонтальных перемещений и внутренних усилий в свае с результатами аналитических расчетов, выполненных по методике СП 24.13330.2011, при допустимой величине горизонтального перемещения сваи в уровне поверхности грунта $\Delta_{\rm r} = 10$ мм, было установлено:

- 1. Качественное совпадение результатов аналитических расчетов с результатами моделирования в *MIDAS GTS NX*. Разница в величине предельных значений горизонтальной нагрузки H = 44,31 кH, определенной по рекомендациям СП 24.13330.2011, и H = 49,0 кH, определенной расчетами в *MIDAS*, составила 10,6 % (рис. 5, 8 цв. вклейки).
- 2. Эпюры изгибающих моментов M=f(H) и поперечных сил и Q=f(H) при горизонтальных нагрузках H=44,31 кН и H=49,0 кН имеют единообразный характер и отвечают теоретическим представлениям о напряженном состоянии горизонтально нагруженных свай. Наиболее опасное сечение сваи в рассматриваемых случаях расположено на глубине 1632 мм (расчеты по методике СП 24.13330.2011) и 1435 мм (расчеты в MIDAS). Разница в величине максимальных значений изгибающих моментов $M_{max}=64,91$ кН·м и $M_{max}=57,20$ кН·м составила 11,9 % (рис. 4,5 цв. вклейки).

В итоге результаты выполненных исследований послужили основанием для следующих выводов:

- 1. Компьютерные модели работы свай в грунтовом массиве удовлетворяют критериям верификации и валидации в том случае, если расчетные значения вертикальных перемещений свай от выдергивающих нагрузок, величины осадки свай от вдавливающих нагрузок и перемещения свай под действием горизонтальных нагрузок, полученные в результате численного моделирования, соответствуют результатам натурных испытаний грунтового основания сваями и результатам аналитических расчетов, выполненных по результатам испытаний грунтов статическим зондированием.
- 2. Качественное совпадение характера работы свай в натурных условиях на вдавливающие, выдергивающие и горизонтальные нагрузки в наибольшей степени соответствует модели, в которой взаимодействие сваи с грунтом моделируется контактными интерфейсными элементами с параметрами, соответствующими характеристикам физико-механических свойств контактного слоя грунтов, сформировавшегося у боковой поверхности сваи.
- 3. Количественное совпадение характера работы свай в натурных условиях на вдавливающие, выдергивающие и горизонтальные нагрузки обеспечивается математическими моделями, в которых используются характеристики физико-механических свойств грунта зоны уплотнения, сформировавшейся под нижним концом сваи.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Григорьев, Ю. С. Компьютерная модель работы висячей призматической сваи в массиве глинистого грунта / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. Текст: непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Нижний Новгород, 2022. № 1 (61). С. 36–41.
- 2. Пособие по расчетам в программном комплексе "MIDAS GTS NX". URL: http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65, свободный (дата обращения: 10.12.2021). Текст : электронный.
- 3. Верификационный отчет по программному комплексу MIDAS GTS. Том 1. Общие сведения. Матрица верификации. Москва: Подземпроект, 2012, 88 с.
- 4. Григорян, А. А. Определение несущей способности забивной висячей сваи в грунтовых условиях I типа по просадочности / А. А. Григорян, В. М. Мамонов // Основания, фундаменты и механика грунтов. − 1969. № 3. С. 27–30.
- 5. Чернов, В. К. О деформациях глинистых грунтов вокруг забивных свай / В. К. Чернов, В. В. Знаменский, Ю. П. Юрко // Строительство в районах Восточной Сибири и крайнего севера / Проектный и научно-исследовательский институт Красноярский ПромстройНИИПроект. Красноярск, 1971. Вып. 17. С. 59—66.
- 6. Бартоломей, А. А. Изменение модуля деформации, объемного веса и сил сцепления глинистых грунтов в активной зоне свайных фундаментов / А. А. Бартоломей // Вопросы совершенствования строительства / Пермский политехнический институт. Пермь, 1972. С. 8–15.

GRIGOREV Yury Semyonovich, candidate of technical sciences, professor of the chair of architecture; FATEEV Valery Valerevich, engineer, senior teacher of the chair of architecture

VERIFICATION OF A COMPUTER MODEL OF A DRIVEN PRISMATIC PILE IN A MULTIPLAYER SOIL BASE

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering 65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-19-57; e-mail: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru *Key words:* mathematical model, prismatic pile, foundation soil, verification.

The article presents a methodology for the development and verification of a mathematical model of a driven prismatic pile operating in a multilayer soil base using the MIDAS GTS NX software package.

REFERENCES

- 1. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Computernaya model raboty visyachey prizmaticheskoy svai v massive glinistogo grunta [Computer model of the operation of a hanging prismatic pile in an array of clay soil]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2022. № 1 (61). P. 36–41.
- 2. Posobie po raschyotam v programmnom complekse "MIDAS GTS NX". URL: http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65, svobodny (data obrascheniya: 10.12.2021).
- 3. Verifikatsionny otchyot po programmnomu kompleksu MIDAS GTS. Tom 1. Obschie svedeniya. Matritsa verifikatsii [MIDAS GTS Software Complex Verification Report. Volume 1. General information. Verification matrix]. Moscow: Podzemproekt, 2012. 88 p.
- 4. Grigoryan A. A., Mamonov V. M. Opredelenie nesushey sposobnosti zabivnoy prizmaticheskoy svai v gruntovykh usloviyakh I tipa po prosadochnosti [Determination of the bearing capacity of a driven hanging pile in ground conditions of the first type by subsidence] /



Osnovaniya, fundamrnty i mekhanika gruntov [Soil Mechanics and Foundation Engeneering]. – 1969. – № 3. – P. 27–30.

- 5. Chernov V. K., Znamensky V. V., Yurko Yu. P. O deformatsiyakh glinistykh gruntov vokrug zabivnykh svay [About deformations of clay soils around driven piles] / Stroitelstvo v rayonakh Vostochnoy Sibiri i kraynego severa / Proektny i nauchno-issledovatelsky institute Krasnoyarsky PromstroyNIIProekt. Krasnoyarsk, 1971. Issue 17. P. 59–66.
- 6. Bartolomey A. A. Izmenenie modulya deformatsii, obyomnogo vesa i sil stsepleniya glinistykh gruntov v aktivnoy zone svaynykh fundamentov [Changes in the modulus of deformation, volumetric weight and adhesion forces of clay soils in the active zone of pile foundations] / Voprosy sovershenstvovaniya stroitelstva / Permsky politekhnichesky institut. Perm, 1972. P. 8–15.

© Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев, 2022

Получено: 14.03.2022 г.

УДК 624.131.55

О. Б. КОНДРАШКИН, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой технологии строительства; Д. Н. ХОХЛОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры гидротехнических и транспортных сооружений

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНОГО ПОГРУЖЕНИЯ СВАЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 433-45-35; факс: (831) 430-03-82; эл. почта: gs@nngasu.ru

Ключевые слова: влияние строительства на окружающую застройку, вибрация при погружении свай, виброскорость, моделирование.

Описан опыт и результаты компьютерного моделирования динамического воздействия, оказываемого на окружающую застройку ударным погружением свай копровой установкой.

При проектировании зданий и сооружений согласно [1] и др. нормативным документам следует выполнять оценку влияния строительства на окружающую застройку, в том числе с учетом динамических воздействий строительных работ. В ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» была выполнена оценка влияния ударного погружения свай при строительстве на окружающую застройку в городе Чебоксары. Объектом оценки являлось производственное здание ООО «Чебоксарский ликероводочный завод» 1899 г. постройки, являющееся объектом культурного наследия регионального значения. Вблизи него (на расстоянии 41 м) в 2017 г. выполнялось строительство административного здания со свайным фундаментом. Предметом оценки был уровень виброскорости, возникающей на несущих конструкциях производственного здания при ударном погружении свай.

Конструктивная схема производственного здания (объекта оценки) – неполный каркас с наружными и внутренними несущими кирпичными стенами. Каркас представляет собой кирпичные и металлические колонны (столбы, стойки) с опи-