



УДК 624.154.1

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

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ 1, 2 И 3-РЯДНЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ВДОЛЬ РЯДОВ СВАЙ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-19-57; эл. почта: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Ключевые слова: численные модели, грунтовый массив, свайные фундаменты, ряды и группы призматических свай, горизонтальные нагрузки и перемещения.

В статье приводятся результаты численных исследований: 1) особенностей взаимодействия с грунтовым основанием 1, 2 и 3-рядных свайных фундаментов, горизонтально нагруженных вдоль рядов свай; 2) влияния количества и схемы расположения свайных рядов в свайных фундаментах на их сопротивление горизонтальным нагрузкам. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании свайных фундаментов инженерных сооружений, испытывающих значительные горизонтальные нагрузки, действующие в одной плоскости.

Введение

Известны достаточно многочисленные исследования, в том числе и методом численного моделирования, работы как отдельных свай, так и свайных фундаментов под действием разнообразных нагрузок, однако работа свайных фундаментов горизонтально нагруженных вдоль рядов свай до настоящего времени не изучалась [1, 5–10]. В настоящей работе приведены результаты исследований работы 1, 2 и 3-рядных свайных фундаментов, горизонтально нагруженных вдоль рядов свай, являющихся частью целого комплекса исследований по численному моделированию работы свайных фундаментов, использующихся в качестве основания для зданий и сооружений, воспринимающих горизонтальные нагрузки.

Исходные данные для численного моделирования

В выполненных исследованиях использовались разработанные авторами верифицированные конечно-элементные модели геомеханических систем «свайный фундамент – грунтовое основание», в которых моделировалась совместная работа: 1) грунтового основания из суглинка естественного сложения, представленного в виде упругопластической модели Мора-Кулона, со следующими характеристиками: удельный вес $\gamma=16,8$ кН/м³; коэффициент пористости $e=0,846$; коэффициент Пуассона $\nu=0,37$; сцепление $c=20$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi=22^\circ$; модуль деформации $E=8$ МПа и 2) свайных фундаментов из жёстко соединённых с высокими ростверками забивных железобетонных свай С70.30 сечением $0,3 \times 0,3$ м, длиной 7 м, погруженных в грунтовый массив на глубину 6 м (рис. 1–6 цв. вклейки) [2–4].

Результаты численного моделирования

В результате выполненных исследований было установлено:



1. Горизонтальные нагрузки, передающиеся на фундаменты, действующие вдоль рядов свай, воспринимаются: 1) сваями, объединёнными ростверком в жёсткую железобетонную раму; 2) грунтом, защемлённым между сваями; 3) грунтовым массивом, оказывающим лобовое сопротивление горизонтальному перемещению фундамента, и 4) грунтовым массивом, взаимодействующим с наружными вертикальными («боковыми») поверхностями однорядных «свайно-грунтовых диафрагм» и крайних («боковых») рядов в «группах» свай (рис. 1–3, 7–8 и табл. 1 цв. вклейки).

2. Несущая способность горизонтально нагруженных фундаментов, с увеличением в них количества рядов свай с 1-го до 3-х, увеличивается непропорционально количеству рядов (табл. 1 и рис. 9–12 цв. вклейки):

- однорядная «диафрагма» «1/6» – 376,42 кН;
- группы «2/6» из 2-х рядов свай – 508,99 кН (+35,2%);
- группы «3/6» из 3-х рядов свай – 615,99 кН (+63,6%).

Таблица 1

Результаты численного моделирования работы «диафрагмы» и «групп» свай на горизонтальные нагрузки в программном комплексе «MIDAS GTS NX»

Расчётная модель	Количество свай в группе n	Горизонтальная нагрузка H , кН	Средняя несущая способность свай в группе $H_{ср}$, кН	Коэффициент кустового эффекта $K_{кэ}$, д. ед.
Одиночная свая	1	52,24	52,24	-
«1/6»	6	376,42	62,74	1,201
«2/6»	12	508,99	42,42	0,812
«3/6»	18	615,99	34,22	0,655

3. Коэффициент кустового эффекта $K_{кэ}$, определяемый по формуле (1), учитывающий взаимное влияние свай при жёсткой заделке их голов в ростверках фундаментов с однорядным расположением свай, больше единицы, однако по мере увеличения количества рядов свай в фундаменте, величина $K_{кэ}$ снижается до значений меньше единицы (табл. 1).

$$K_{кэ} = H / (n \cdot H_0) \quad (1)$$

где: H – сопротивление горизонтально нагруженного фундамента; H_0 – сопротивление горизонтальной нагрузке одиночной сваи со свободной головой при предельном горизонтальном перемещении свай в уровне поверхности грунта $\Delta_r = 10$ мм; n – количество свай в фундаменте [5].

4. Последовательное увеличение количества рядов из 6 свай с 1-го до 2-х и 3-х рядов в рассмотренных моделях, приводит к последовательному снижению как среднего сопротивления горизонтальной нагрузке одной сваи, так и к снижению среднего сопротивления одного ряда свай в фундаменте (рис. 13–14 цв. вклейки). Так, увеличение в группе количества рядов, состоящих из 6 свай, с 1-го ряда до 2-х и 3-х рядов приводит:

**К СТАТЬЕ Ю. С. ГРИГОРЬЕВА, В. В. ФАТЕЕВА
«ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ 1, 2 И 3-РЯДНЫХ
СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ
ВДОЛЬ РЯДОВ СВАЙ»**

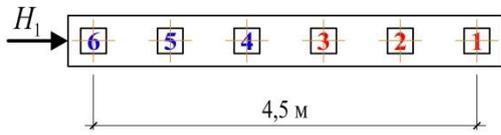


Рис. 1. 1-рядная «свайно-грунтовая диафрагма» из 6-ти свай «1/6»

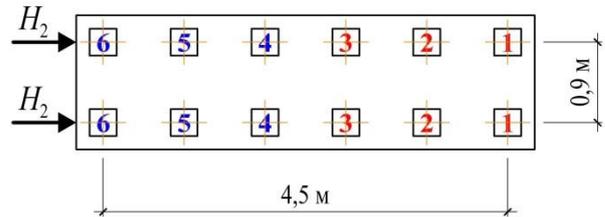


Рис. 2. 2-рядная «свайно-грунтовая диафрагма» из 12-ти свай «2/6»

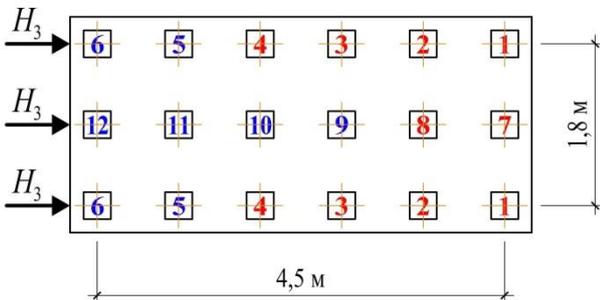


Рис. 3. 3-рядная «группа» из 18-ти свай «3/6». Красные цифры – сваи, работающие на вдавливание, синие – сваи, работающие на выдёргивание (см. табл. 1)

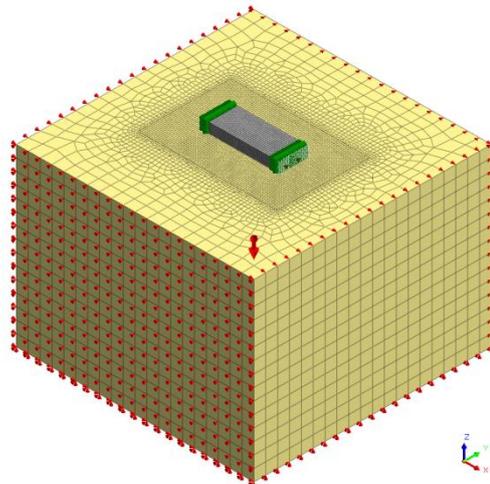


Рис. 4. 3-мерная конечно-элементная модель «3/6» системы «свайный фундамент – грунтовое основание»

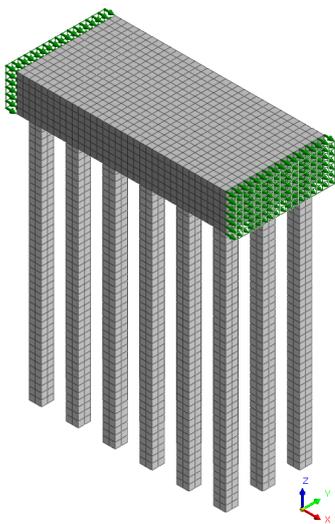


Рис 5. 3-мерная конечно-элементная модель «3/6». Группа из 18 свай, объединённая жёстким ростверком

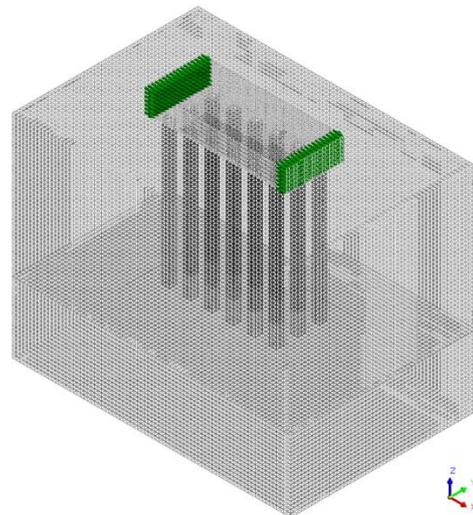
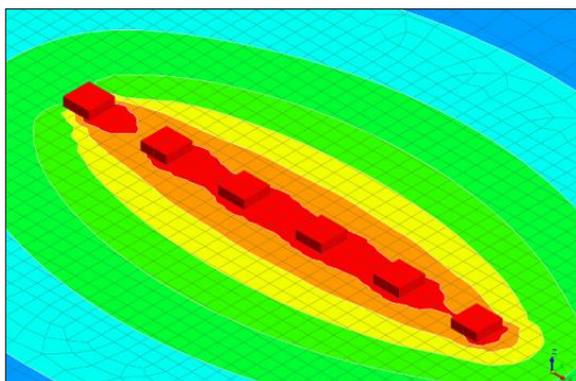
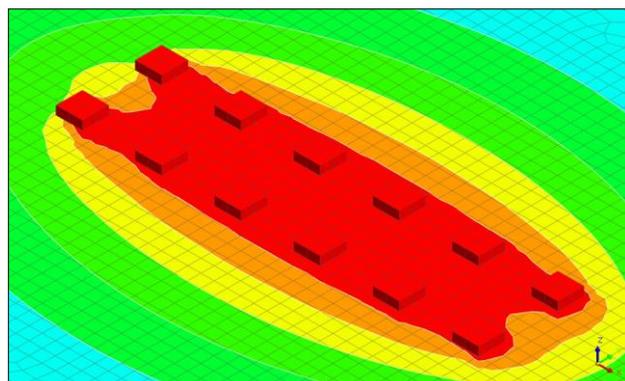


Рис. 6. 3-мерная конечно-элементная модель «3/6». Сгущение сетки конечных элементов окосвайного грунтового пространства

Расчётная модель «1/6»



Расчётная модель «2/6»



Расчётная модель «3/6»

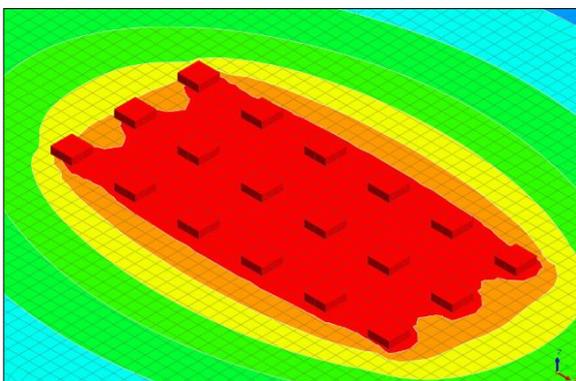


Рис. 7. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) свай и околосвайного грунта в уровне поверхности грунтового массива при действии горизонтальной нагрузки H , вызывающей горизонтальное перемещение свайных «групп» в уровне поверхности грунтового массива $\Delta_r=10$ мм

Таблица 1

Нагрузки, передающиеся на сваи в расчётных моделях свайных фундаментов «1/6», «2/6», «3/6»

Номер сваи	Вертикальная нагрузка N/V , кН			Горизонтальная нагрузка H , кН		
	Модель «1/6»	Модель «2/6»	Модель «3/6»	Модель «1/6»	Модель «2/6»	Модель «3/6»
1	116,44	88,67	91,32	85,74	66,81	62,64
7	-	-	57,59	-	-	49,22
2	45,15	26,55	30,23	60,80	38,53	35,38
8	-	-	5,62	-	-	19,88
3	13,57	11,80	16,18	53,65	31,81	28,72
9	-	-	-0,78	-	-	14,01
4	-3,72	-0,25	5,39	52,54	31,21	28,01
10	-	-0,25	-5,45	-	-	13,73
5	-24,49	-12,38	-4,79	56,09	35,64	32,10
11	-	-12,38	-10,69	-	-	18,31
6	-58,95	-33,45	-21,06	67,60	50,49	46,03
12	-	-33,45	-23,07	-	-	35,08

Примечания: 1. Вертикальные: N – вдавливающая и V – выдёргивающая нагрузка. 2. Знак «минус» – перед выдёргивающей нагрузкой; 3. Номера свай – см. на рис. 1 цв. вклейки; 4. Полужирным шрифтом выделена нагрузка на сваи внутреннего ряда в 3-рядной «группе».

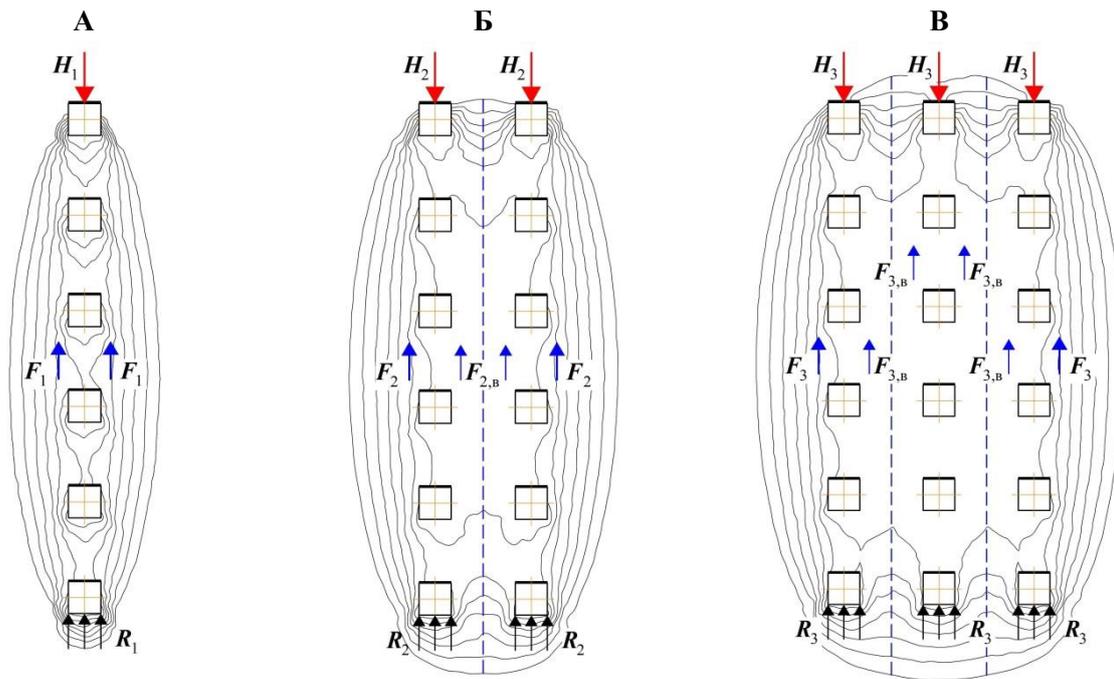


Рис. 8. Схемы напряжённо-деформированного состояния: **А** – 1-рядная «свайно-грунтовая диафрагма»: H_1 – горизонтальная нагрузка; F_1 – сопротивление грунтового массива горизонтальному перемещению по боковым поверхностям «диафрагмы»; R_1 – лобовое сопротивление грунтового массива. **Б** – 2-рядная «свайно-грунтовая диафрагма»: H_2 – горизонтальная нагрузка; F_1 – сопротивление грунта горизонтальному перемещению по боковым поверхностям «диафрагмы»; F_2 и $F_{2,в}$ – сопротивление грунта по наружным и внутренним боковым поверхностям «диафрагм»; R_2 – лобовое сопротивление грунта. **В** – 3-рядная «группа» свай: H_3 – горизонтальная нагрузка; F_3 и $F_{3,в}$ – сопротивление грунта по наружным и внутренним боковым поверхностям «диафрагм»; R_3 – лобовое сопротивление грунта

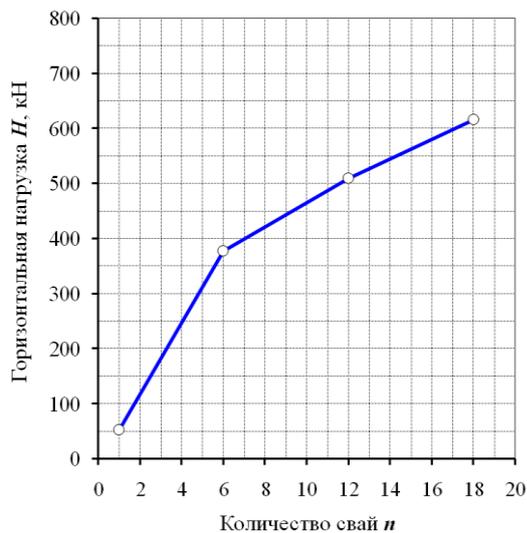


Рис. 9. Зависимость предельного сопротивления фундаментов горизонтальным нагрузкам H от количества свай n в «группе» (расчётные модели «1/6», «2/6», «3/6»)

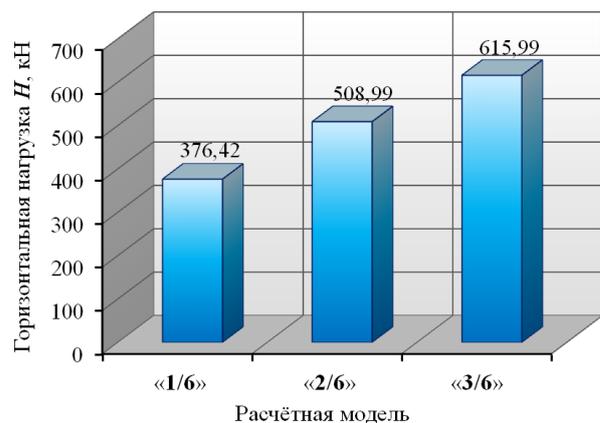


Рис. 10. Зависимость сопротивления фундаментов горизонтальным нагрузкам H от количества рядов свай $n_{ср}$ в «группах» (расчётные модели «1/6», «2/6», и «3/6»)

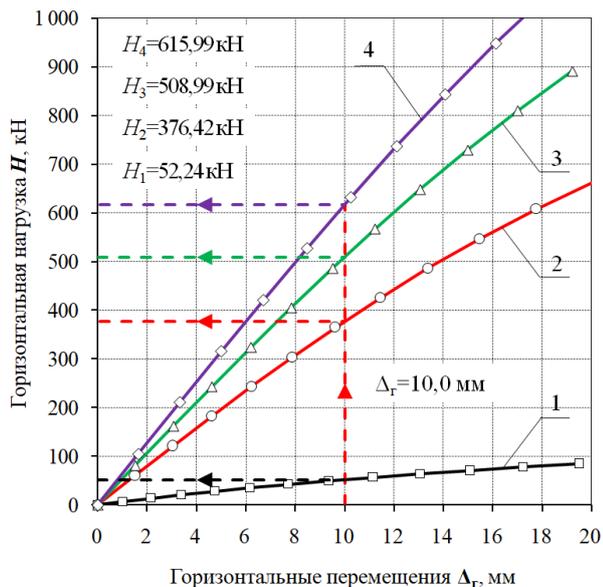


Рис. 11. Зависимость горизонтальных перемещений Δ_r от предельного значения горизонтальной нагрузки H : 1 – одиночная свая со свободной головой; 2...4 – расчётные модели «1/6», «2/6», «3/6»

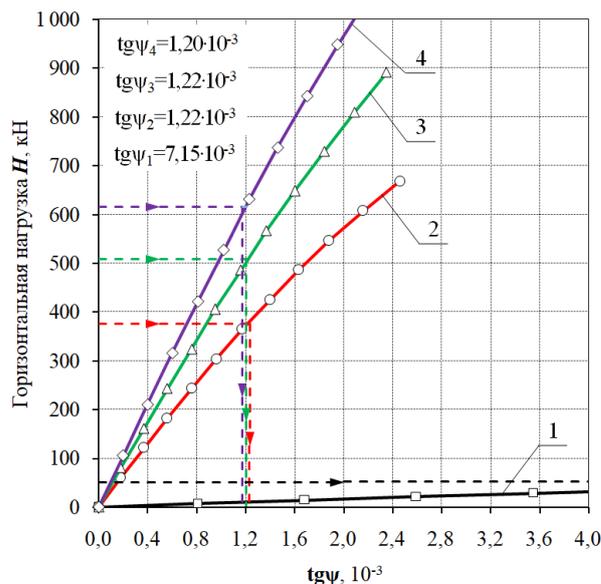


Рис. 12. Зависимость величины крена фундаментов $tg\psi$ от предельного значения горизонтальной нагрузки H : 1 – одиночная свая со свободной головой; 2...4 – расчётные модели «1/6», «2/6», «3/6»

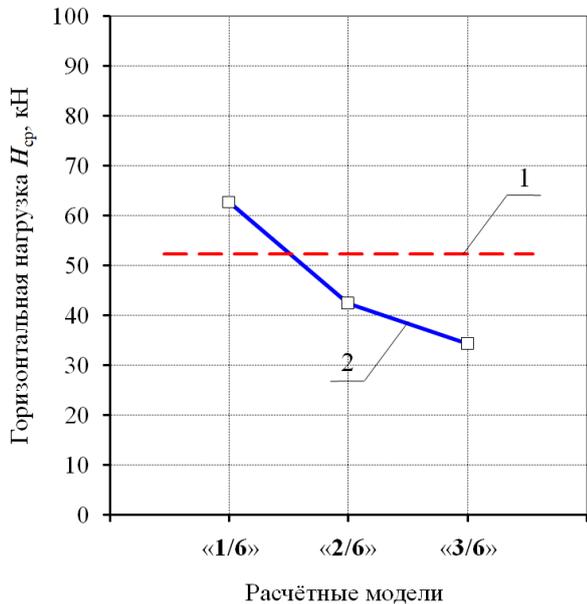


Рис. 13. Зависимость средней несущей способности одной сваи H_{cp} от количества свай n в фундаменте: 1 – одиночная свая со свободной головой; 2 – расчётные модели «1/6», «2/6», «3/6»

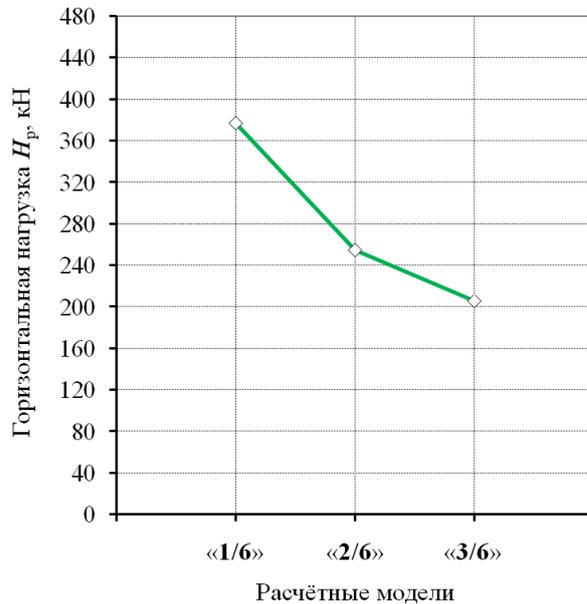


Рис. 14. Зависимость средней величины сопротивления горизонтальной нагрузке H_p одного ряда свай в расчётных моделях: «1/6», «2/6», и «3/6»



1) к снижению средней величины сопротивления горизонтальной нагрузке H_{cp} одной сваи, по сравнению с одной свайей в однорядной «диафрагме» «1/6» в которой $H_{cp}=62,74$ кН (табл. 1, рис. 11 цв. вклейки):

- в группе «2/6» из 2-х рядов свай – до 42,42 кН (-32,4%);
- в группе «3/6» из 3-х рядов свай – до 34,22 кН (-45,5%);

2) к снижению удельной величины сопротивления горизонтальной нагрузке H_p одного ряда свай, по сравнению с однорядной «диафрагмой» «1/6» в которой $H_p=376,42$ кН (табл. 1, рис. 12 цв. вклейки):

- в группе «2/6» из 2-х рядов свай – до 254,50 кН (-32,4%);
- в группе «3/6» из 3-х рядов свай – до 205,33 кН (-45,5%).

5. Сравнение результатов выполненных исследований показывает (табл. 1 и табл. 1 цв. вклейки), что горизонтальная нагрузка, передающаяся на свайные фундаменты, воспринимается ими в весьма значительной степени за счёт сопротивления грунтового массива, взаимодействующего с наружными поверхностями: 1) в однорядной «свайно-грунтовой диафрагме» и 2) крайних («боковых») рядов в «группах» свай. В этих условиях свайные фундаменты, опирающиеся на «группы» свай с горизонтальными нагрузками, действующими вдоль свайных рядов, целесообразно рассматривать как фундаментные конструкции, опирающиеся на «группы», состоящие из набора «свайно-грунтовых диафрагм» (рис. 8 цв. вклейки).

6. Работа как «свайно-грунтовых диафрагм», так и «групп» свай под действием горизонтальных нагрузок, действующих вдоль рядов свай, представляет собой весьма сложное взаимодействие свай с межсвайным грунтом и околосвайным грунтовым массивом, которое по мере увеличения в фундаменте количества «диафрагм», постепенно трансформируется из-за перераспределения сопротивления горизонтальной нагрузки между наружными («боковыми») и средними (внутренними) «диафрагмами». При этом:

1) наружные («боковые») «диафрагмы», образующие внешний контур свайной «группы», обладают более высокой несущей способностью, по сравнению с внутренними «диафрагмами», за счёт взаимодействия наружных рядов свай с массивом околосвайного грунта (табл. 1 и рис. 8-В цв. вклейки);

2) средняя величина сопротивления горизонтальной нагрузке, приходящаяся на одну сваю, снижается до величины меньше несущей способности одиночной сваи со свободной головой (рис. 13 цв. вклейки).

Заключение

Таким образом, несущая способность свайного фундамента в целом не будет равна простому произведению несущей способности одиночной сваи со свободной головой (определённой экспериментально или расчётом) на количество свай в «ряду» или в «группе», т.к. отличие работы свай в «группе» свай или в однорядной «свайно-грунтовой диафрагме» от работы одиночной сваи со свободной головой обусловлено сложным взаимодействием свай (в «группе» или в «диафрагме») с грунтовым основанием, формированию которого способствуют такие факторы, как: 1) развитие горизонтальных перемещений свай с отрывом тыльной (задней) стенки боковой поверхности каждой сваи (в «группе» или в «диафрагме») от грунта; 2) развитие крена фундамента из-за вертикальных перемещений при вдавливании лидирующих свай в рядах и выдёргивании свай, замыкающих ряды; 3) различием в условиях работы как отдельных свай, так и отдельных рядов свай, расположенных с минимальным шагом в «группах» или в



«диафрагме»); 4) вовлечение в совместную работу массива околосвайного и межсвайного грунта по всей глубине погружения свай в грунтовое основание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бахолдин, Б. В. Обобщение результатов экспериментальных исследований и предложения по расчету свай на горизонтальные нагрузки с учетом их гибкости / Б. В. Бахолдин, Е. В. Труфанова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – Волгоград, 2013. – № 31 (50). – С. 227–232.

2. Григорьев, Ю. С. Компьютерная модель работы висячей призматической сваи в массиве глинистого грунта / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 1 (61). – С. 36–41.

3. Григорьев, Ю. С. Верификация компьютерной модели забивной призматической сваи в многослойном грунтовом основании / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 2 (62). – С. 79–84.

4. Григорьев, Ю. С. Численное моделирование работы горизонтально нагруженных свайных фундаментов / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2024. – 108 с. – ISBN 978-5-528-00590-4.

5. Дорошкевич, Н. М. Инженерные методы расчёта свайных фундаментов при различных схемах их нагружения / Н. М. Дорошкевич, В. В. Знаменский, В. И. Кудинов // Вестник МГСУ / Московский государственный строительный университет. – Москва, 2006. – № 1. – С. 119–132.

6. К вопросу об оценке несущей способности забивных железобетонных свай стандартных сечений на горизонтальную нагрузку / В. В. Знаменский, Е. П. Знаменская, Д. Ю. Чунюк, Д. Р. Халиуллина // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2018. – Том 9, № 1. – С. 60–69. – DOI 10.15593/2224-9826/2018.1.06. – Текст : электронный.

7. Кургузов, К. В. Piles and lateral loads: comparison of calculation methods / К. В. Кургузов, И. К. Фоменко // Вестник МГСУ / Московский государственный строительный университет. – Москва, 2019. – Том 14, вып. 10. – С. 1280-1291. – DOI 10.22227/1997-0935.2019.10.1280-1291. – Текст : электронный.

8. Купчикова, Н. В. Результаты численного анализа системы «здание-свайный фундамент-грунтовое основание» с помощью «MIDAS GTS NX» / Н. В. Купчикова, А. Н. Сычков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. – Астрахань. – 2021. – № 1 (35). – С. 19–24.

9. Нуждин, Л. В. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office / Л. В. Нуждин, В. С. Михайлов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2018. – Том 9. – № 1. – С. 5–18.

10. Полищук, А. И. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью ПК PLAXIS 3D Foundation / А. И. Полищук, Д. Г. Самарин, А. А. Филиппович // Вестник ТГАСУ / Томский государственный архитектурно-строительный университет. – Томск, 2013. – № 3 (40). – С. 351–359.



GRIGOREV Yuriy Semyonovich, candidate of technical sciences, professor of the chair of architecture; FATEEV Valeriy Valerevich, senior teacher of the chair of architecture

NUMERICAL ANALYSIS OF THE OPERATION OF 1, 2, AND 3-ROW PILE FOUNDATIONS HORIZONTALLY LOADED ALONG ROWS OF PILES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-19-57; e-mail: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Key words: numerical models, soil array, pile foundations, rows and groups of prismatic piles, horizontal loads and displacements.

The article presents the results of numerical studies: 1) the features of interaction with the ground base of 1, 2 and 3-row pile foundations horizontally loaded along rows of piles; 2) the influence of the number and layout of pile rows in pile foundations on their resistance to horizontal loads. The research results can be used in the design of pile foundations of engineering structures that are subjected to significant horizontal loads acting in one plane.

REFERENCES

1. Bakholdin B. V., Trufanova E. V. Obobshchenie rezultatov ehksperimentalnykh issledovaniy i predlozheniya po raschetu svay na gorizontálne nagruzki s uchetom ikh gibkosti [Generalization of experimental research results and proposals for calculating piles under horizontal loads taking into account their flexibility]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]. Volgograd, 2013, № 31 (50), P. 227–232.

2. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Kompyuternaya model raboty visyachey prizmaticheskoy svai v massive glinistogo grunta [Computer model of the behavior of a hanging prismatic pile in a clay soil mass]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorodskiy gosudarstvenny arkhitekturno-stroitel'ny universitet. Nizhny Novgorod, 2022, № 1 (61), P. 36–41.

3. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Verifikatsiya kompyuternoy modeli zabivnoy prizmaticheskoy svai v mnogosloinom gruntovom osnovanii [Verification of a computer model of a driven prismatic pile in a multilayer soil foundation]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorodskiy gosudarstvenny arkhitekturno-stroitel'ny universitet. Nizhny Novgorod, 2022, № 2 (62), P. 79–84.

4. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Chislennoe modelirovanie raboty gorizontально nagruzhenykh svaynykh fundamentov [Numerical modeling of horizontally loaded pile foundations]. Nizhegorodskiy gosudarstvenny arkhitekturno-stroitel'ny universitet. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2024, 108 p. ISBN 978-5-528-00590-4.

5. Doroshkevich N. M., Znamenskiy V. V., Kudinov V. I. Inzhenernye metody rascheta svaynykh fundamentov pri razlichnykh skhemakh ikh nagruzheniya [Engineering methods for calculating pile foundations under various loading schemes]. Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. Moskovskiy gosudarstvenny stroitel'ny universitet. Moscow, 2006, № 1, P. 119–132.

6. Znamenskiy V. V., Znamenskaya E. P., Chunyaev D. Yu., Khaliullina D. R. K voprosu ob otsenke nesushchey sposobnosti zabivnykh zhelezobetonnykh svay standartnykh secheniy na gorizontálnuyu nagruzku [On the issue of assessing the bearing capacity of driven reinforced concrete piles of standard cross-sections under horizontal load]. Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture]. Permskiy natsionalny



issledovatel'skiy politekhnicheskiy universitet. Perm, 2018, Vol. 9, № 1, P. 60–69. DOI 10.15593/2224-9826/2018.1.06.

7. Kurguzov K. V., Fomenko I. K. Piles and lateral loads: comparison of calculation methods. Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. Moskovskiy gosudarstvennyy stroitelnyy universitet. Moscow, 2019, Vol. 14, Issue 10, P. 1280–1291. DOI 10.22227/1997-0935.2019.10.1280-1291.

8. Kupchikova N. V., Sychkov A. N. Rezultaty chislennogo analiza sistemy «zdanie-svainy fundament-gruntovoe osnovanie» s pomoshchyu «MIDAS GTS NX» [Results of numerical analysis of the "building-pile foundation-soil foundation" system using "MIDAS GTS NX"]. Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. Astrakhanskiy gos. arkh.-str. un-t. Astrakhan, 2021, № 1 (35), P. 19–24.

9. Nezhdin L. V., Mikhailov V. S. Chislennoye modelirovaniye svainykh fundamentov v raschetno-analiticheskom komplekse SCAD Office [Numerical modeling of pile foundations in the SCAD Office calculation and analysis complex]. Vestnik PNIPIU. Stroitelstvo i arkhitektura [Bulletin of PNIPIU. Construction and Architecture]. Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskiy universitet. Perm, 2018, Vol. 9, № 1, P. 5–18.

10. Polishchuk A. I., Samarin D. G., Filippovich A. A. Otsenka nesushchey sposobnosti svay v glinistykh gruntakh s pomoshchyu PK PLAXIS 3D Foundation [Assessment of the bearing capacity of piles in clay soils using the PLAXIS 3D Foundation software]. Vestnik TGASU [Journal of Construction and Architecture (TSUAB)]. Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet. Tomsk, 2013, № 3 (40), P. 351–359.

© Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев, 2025

Получено: 21.03.2025 г.