

Степанов М.А., Джабраилова К.Р., Рыбак Г.И., Степанов Мих.А. Влияние вертикальной опрессовки грунта одно-
слойного и двухслойного оснований на несущую способность свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. –
2019. – Т. 10, № 1. – С. 5–16. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01

Stepanov M.A., Dzhabrailova K.R., Rybak G.I., Stepanov Mikh.A. The influence of single-layer and double-layer bases
vertical soil pressing on the bearing capacity of piles. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019. Vol. 10. No. 1.
Pp. 5-16. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 10, № 1, 2019
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.1.01
УДК 624.15

ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОПРЕССОВКИ ГРУНТА ОДНОСЛОЙНОГО И ДВУХСЛОЙНОГО ОСНОВАНИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ

М.А. Степанов, К.Р. Джабраилова, Г.И. Рыбак, Мих.А. Степанов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 июля 2018
Принята: 23 ноября 2018
Опубликована: 29 марта 2019

Ключевые слова:

свайные фундаменты, грунтовое основание, напряженно-деформированное состояние, несущая способность свай, вертикальная опрессовка, боковое давление.

АННОТАЦИЯ

Предложен способ повышения несущей способности свайных фундаментов. Рассмотрены проблемы количественной оценки остаточных деформаций и напряжений в преобразованном слое грунта в результате приложения дополнительного вертикального давления на основание до нагружения свайного фундамента. По результатам аналитических и численных расчетов установлены параметры роста несущей способности свай при действии вертикальной опрессовки на однослойное и двухслойное основание. Двухслойное основание является более сложной и более приближенной к реальности системой. Рассмотрено формирование напряженно-деформированного состояния и приращение несущей способности сваи при различной величине давления опрессовки в диапазоне основных строительных давлений от 50 до 150 кПа в плоской и пространственной постановке. Подробно изучен вопрос влияния свойств грунтового основания и его предварительной опрессовки на несущую способность сваи в различных инженерно-геологических условиях. Большее влияние на приращение несущей способности сваи оказывают деформационные характеристики основания. Выполнена оценка характера горизонтальных перемещений грунта при опрессовке и изменения напряженного состояния основания вдоль ствола сваи, оказывающего влияние на их взаимодействие. Приведено сравнение приращения несущей способности при опрессовке однослойного и двухслойного оснований. На примере строительства 12-этажного жилого дома установлено снижение общей сметной стоимости на возведение подземной части с использованием опрессовки основания до 21 % по сравнению с традиционным плитно-свайным фундаментом.

© ПНИПУ

© **Степанов Максим Андреевич** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: maxim_stepanov@inbox.ru.
Джабраилова Карина Руслановна – магистр, e-mail: karina.dzhabrailova.1994@mail.ru.
Рыбак Геннадий Игоревич – аспирант, e-mail: gennadii.rybak@yandex.ru.
Степанов Михаил Андреевич – магистрант, e-mail: mikhail_stepanov_95@inbox.ru.

Maxim A. Stepanov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: maxim_stepanov@inbox.ru.
Karina R. Dzhabrailova – Master, e-mail: karina.dzhabrailova.1994@mail.ru.
Gennadiy I. Rybak – Postgraduate Student, e-mail: gennadii.rybak@yandex.ru.
Mikhail A. Stepanov – Master Student, e-mail: mikhail_stepanov_95@inbox.ru.

THE INFLUENCE OF SINGLE-LAYER AND DOUBLE-LAYER BASES VERTICAL SOIL PRESSING ON THE BEARING CAPACITY OF PILES

M.A. Stepanov, K.R. Dzhabrailova, G.I. Rybak, Mikh.A. Stepanov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 July 2018
Accepted: 23 November 2018
Published: 29 March 2019

Keywords:

pile foundations, soil base, stress-strain state, piles bearing capacity, vertical crimping, lateral pressure.

ABSTRACT

The article is proposed the increasing of pile foundations load-bearing capacity. In that work authors deal with problems of quantitative estimation of the transformed soil layer residual deformations and stresses, which are the result of additional vertical pressure applying on the soil base, prior to loading the pile foundation. Based on the results of analytical and numerical calculations of the single-layer and two-layer soil base vertical crimping, parameters of the bearing capacity growth are established. Two-layered soil base is more complex and more close to reality system. The article considers the stress-strain state generation and piles bearing capacity increments at different pressures of crimping in the range of basic building pressures from 50 to 150 kPa. It was considered in plane strain and spatial model. Research presents the results of the mechanical soil properties influence its preliminary crimping influence on the pile bearing capacity in various engineering and geological conditions. Increasing of pile bearing capacity depends mainly on the deformation soil base characteristics. The article discusses about the character of horizontal soil movements during and after crimping process and changes in the soil base stressed state along the pile stem, which affects their interaction. The article presents the pile bearing capacity increment in single-layer and double-layer soil base crimping cases. On the example a 12-storey building construction was established that the soil base crimping of combined foundation using could reduction the subterranean building part erection cost by 21 % in comparison with the traditional slab-pile foundation.

© PNRPU

В современном фундаментастроении использование свай позволяет решать сложные геотехнические задачи, например: возведение зданий и сооружений с освоением подземного пространства на застроенных территориях в существующей инфраструктуре с большой этажностью [1]. Поэтому применение свайных фундаментов повышенной несущей способности находится в постоянной модернизации и остается актуальным в настоящее время [2–10].

Напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового массива является одной из важных составляющих, влияющих на несущую способность свай, и его регулирование может позволить повысить несущую способность свай. Одним из таких методов является опрессовка основания [11–21]. Задачей является подробное изучение и совершенствование теоретических основ преобразования слабых глинистых грунтов с помощью формирования остаточного напряженно-деформированного состояния при опрессовке.

С целью изучения взаимодействия сваи с опрессованным грунтовым массивом были проведены аналитические и численные расчеты при однослойном и двухслойном основании. Расчетная схема аналитического расчета при однослойном грунтовым основании представлена на рис. 1. Для определения дополнительного бокового давления было применено решение И.Х. Митчела [22].

Согласно выполненным расчетам установлено увеличение несущей способности сваи до 20 % при использовании опрессовки однослойного грунтового основания ($P_{опр}$) от 50 до 150 кПа (рис. 2).

В численном исследовании рассматривалась свая с аналогичными параметрами в пространственной постановке (солид – интерфейс – солид) с помощью ПК Midas GTS NX (рис. 3).

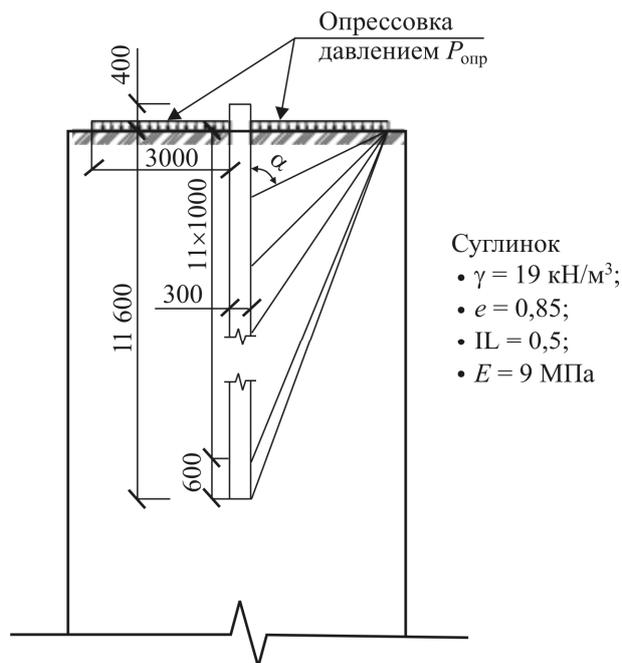


Рис. 1. Расчетная схема оценки влияния опрессовки и бокового давления на несущую способность сваи согласно решению Митчела
 Fig. 1. A design scheme of analysis of crimping and lateral pressure influence on the piles bearing capacity by Mitchel solution

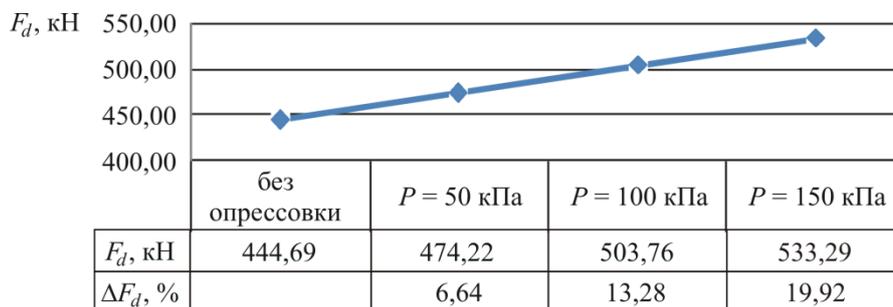


Рис. 2. График зависимости несущей способности сваи от давления опрессовки $P_{опр}$
 Fig. 2. The graph of dependence between pile bearing capacity and crimping pressure P_{cr}

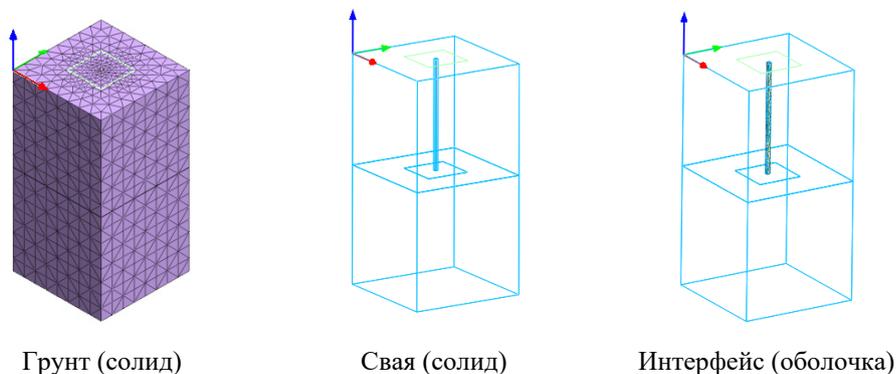


Рис. 3. Модель сваи в грунтовом массиве
 Fig. 3. Model of pile in the soil base

Расчет производился по следующим стадиям: формирование начального НДС; вертикальная опрессовка околосвайного пространства; нагружение сваи с шагом 20 кН. Оценивая влияние предварительной опрессовки однослойного грунтового основания, на первом этапе варьировали значение модуля деформации E от 3 до 18 МПа. Серии расчетов были проведены также на действие предварительного вертикального давления $P_{\text{опр}}$, равного 50, 100 и 150 кПа (табл. 1).

Таблица 1

Значения несущей способности сваи F_d в зависимости от величины опрессовки

Table 1

The values of pile bearing capacity F_d , depending on the crimping pressure value

Величина предварительного вертикального нагружения $P_{\text{опр}}$	Несущая способность сваи F_d , кН, при модуле деформации					
	$E = 3$ МПа	$E = 6$ МПа	$E = 9$ МПа	$E = 12$ МПа	$E = 15$ МПа	$E = 18$ МПа
Без опрессовки	102,47	231,48	346,14	447,99	509,68	559,38
50 кПа	139,74	268,79	363,51	470,16	534,37	585,42
100 кПа	136,7	257,08	375,16	475,62	538,72	591,03
150 кПа	136,7	251,65	376,25	484,46	567,81	601,51

Горизонтальные деформации грунта при опрессовке значительно возрастают (рис. 4, *a*), и перемещения концентрируются в основном в уровне оголовка сваи (рис. 4, *б-д*). В результате предварительной опрессовки происходит дополнительное обжатие верхней части сваи около поверхности грунтового основания, что увеличивает сопротивление грунта на боковой поверхности и ведет к общему повышению ее несущей способности.

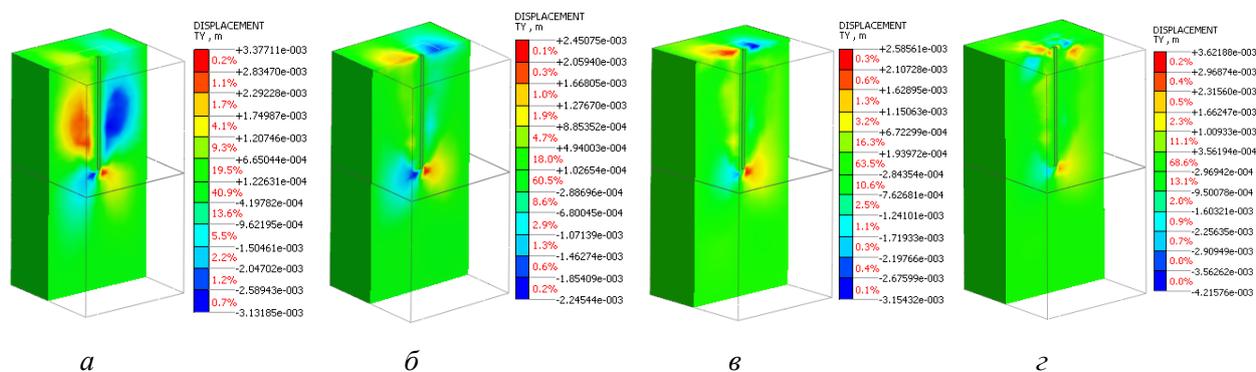


Рис. 4. Изолинии распространения горизонтальных перемещений в грунтовом основании: *a* – без опрессовки; *б* – предварительно опрессованном давлением $P_{\text{опр}} = 50$ кПа; *в* – $P_{\text{опр}} = 100$ кПа; *з* – $P_{\text{опр}} = 150$ кПа

Fig. 4. Isolines of soil horizontal displacement: *a* – without crimping; *b* – crimping by $P_{cr} = 50$ kPa; *c* – $P_{cr} = 100$ kPa; *d* – $P_{cr} = 150$ kPa

Данные о несущей способности сваи при изменении модуля деформации E представлены в табл. 1. Наибольшее приращение несущей способности сваи возникает в основании с модулем деформации $E = 3 \dots 6$ МПа. С повышением значений деформационных характеристик грунта влияние опрессовки снижается.

Для формирования нового измененного напряженно-деформированного состояния в менее сжимаемом грунте необходимо большее давление $P_{\text{опр}}$ на основание. При опрес-

совке однослойного основания с модулем деформации E от 9 до 18 МПа наибольшее значение приращения несущей способности сваи (ΔF_d) создается от давления $P_{\text{опр}} = 150$ кПа.

Для детального изучения влияния прочностных характеристик основания на величину приращения несущей способности свайного фундамента после опрессовки было проведено дополнительное исследование в пространственной постановке в программном комплексе Midas GTS NX. К расчетам был принят однородный грунтовый массив, переменными характеристиками являлись удельное сцепление c и угол внутреннего трения ϕ .

Расчеты были проведены с переменным значением угла внутреннего трения ϕ от 0 до 30°. На рис. 5 представлены изолинии распространения вертикальных перемещений в основании, сложенном идеально сыпучим грунтом, со значением угла внутреннего трения ϕ , равным 5 и 15°.

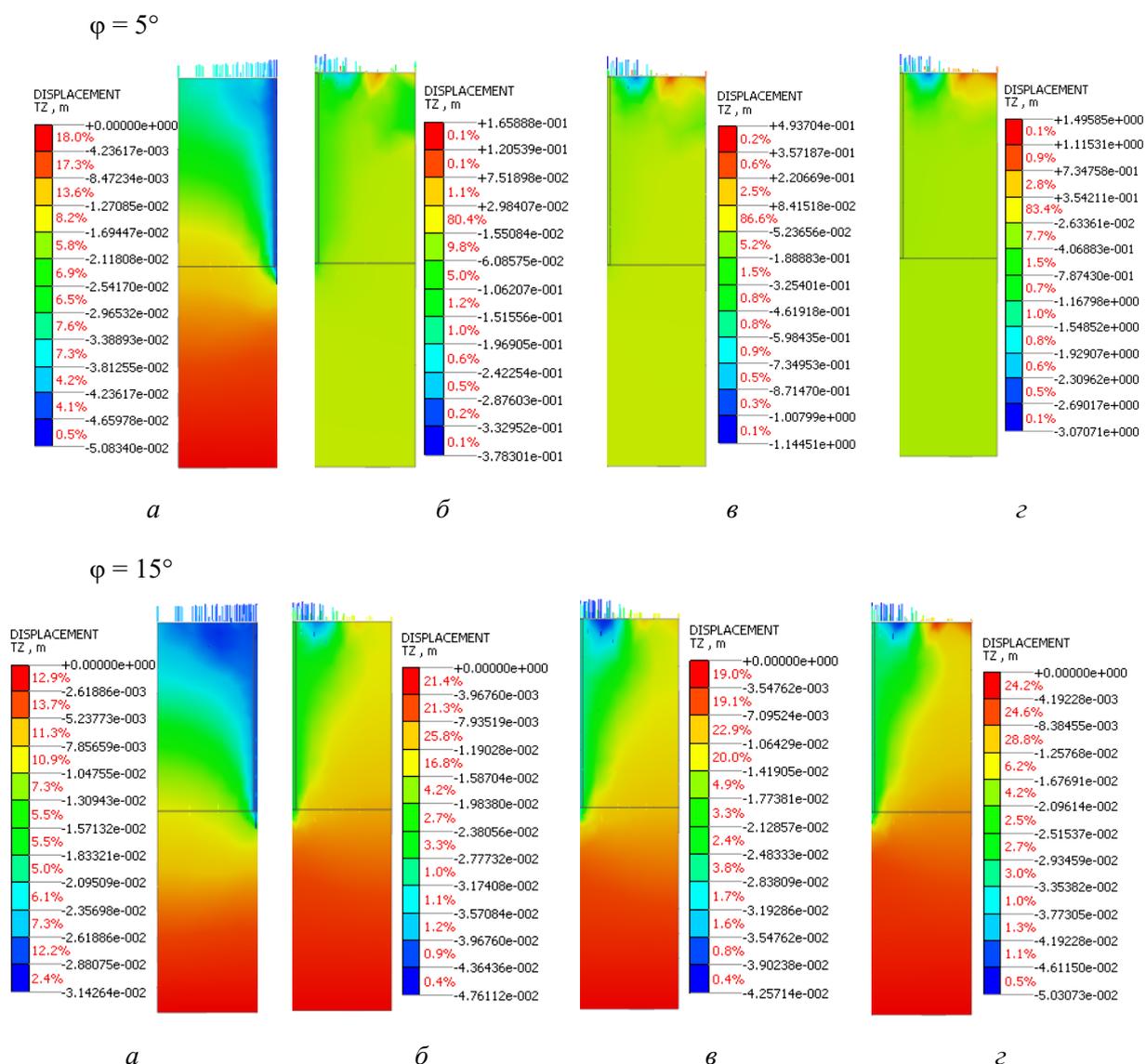


Рис. 5. Изолинии распространения вертикальных перемещений в грунтовом основании с $\phi = 5$ и 15° : a – без опрессовки; b – предварительно опрессованном давлением $P_{\text{опр}} = 50$ кПа; c – $P_{\text{опр}} = 100$ кПа; d – $P_{\text{опр}} = 150$ кПа

Fig. 5. Isolines of soil vertical displacements in base with $\phi = 5$ and 15° :
 a – without crimping; b – crimping by $P_{cr} = 50$ kPa; c – $P_{cr} = 100$ kPa; d – $P_{cr} = 150$ kPa

Исходя из полученных изолиний вертикальных напряжений можно сделать вывод о том, что с увеличением значения угла внутреннего трения до 30° возрастает приращение несущей способности при опрессовке с 9,7 до 14,5 %.

По результатам наблюдения за приращением несущей способности сваи при изменении значений удельного сцепления c отмечен незначительный рост – с 14,5 до 16 % – при опрессовке давлением $P_{\text{опр}} = 50$ кПа основания с удельным сцеплением от 0 до 10 МПа. В основании с удельным сцеплением в диапазоне от 18 до 30 МПа наблюдается увеличение несущей способности сваи с 8 до 12 %, при давлении опрессовки $P_{\text{опр}} = 150$ кПа (рис. 6).

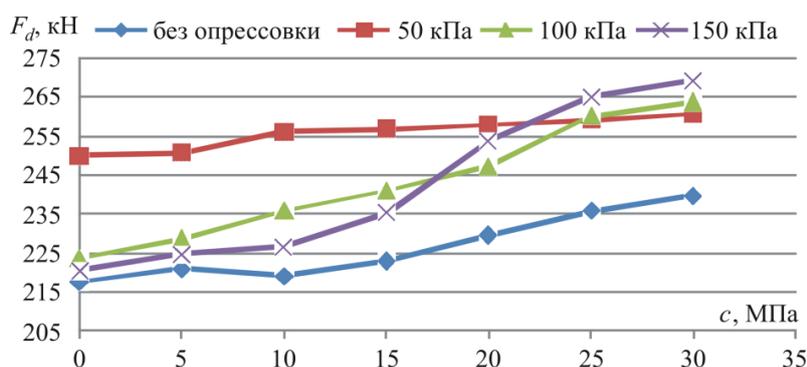


Рис. 6. График зависимости величины несущей способности одиночной сваи от величины c грунта и значения опрессовки

Fig. 6. The graph of dependence of the load-bearing capacity of a single pile on the value of c of the soil and the value of the pressing

Согласно полученным результатам установлено, что изменение прочностных характеристик грунтового основания оказывает меньшее влияние на приращение несущей способности сваи при опрессовке основания.

Отдельно также были проведены серии расчетов, в которых исследовалось НДС двухслойного основания при опрессовке и изменение несущей способности сваи. Двухслойное основание является более сложной и более приближенной к реальности системой. Вдоль ствола сваи располагался мягкопластичный суглинок. Опираение сваи осуществлялось на основание, сложенное суглинками и супесями с более высокими механическими характеристиками.

В результате включения более прочного основания под пятой сваи значение несущей способности сваи без опрессовки возросло до 535,77 кН. С учетом действия бокового давления, возникающего от вертикальной опрессовки давлением $P_{\text{опр}} = 50$ кПа, $P_{\text{опр}} = 100$ кПа, $P_{\text{опр}} = 150$ кПа, были определены значения несущей способности сваи и построен график (рис. 7).

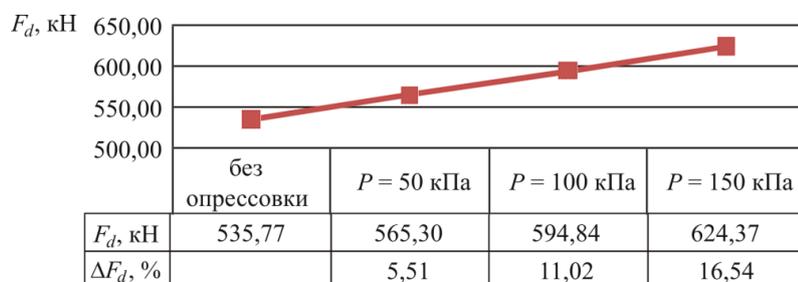


Рис. 7. График зависимости несущей способности сваи в двухслойном основании от давления опрессовки $P_{\text{опр}}$

Fig. 7. The graph of dependence between pile bearing capacity in two-layer soil base and crimping pressure P_{cr}

Согласно аналитическим расчетам изменение несущей способности свай в двухслойном основании достигает 17 %.

Моделирование данной задачи было также выполнено в плоской постановке с помощью численных методов (рис. 8).

Расчет проводился в два этапа с использованием упругопластической модели упрочняющегося грунта *Hardening Soil*. На первом этапе рассматривались горизонтальные перемещения, возникающие в грунтовом массиве от приложения вертикального давления с шагом $P_{\text{опр}} = 50$ кПа. На втором этапе рассчитывался массив грунта со свайей и приложенным к ее оголовку критичным перемещением, значение которого составило 6 см (рис. 8). За предельно допустимую осадку, которая является критерием определения несущей способности, взята осадка 30 мм согласно СП 22.13330.2011.

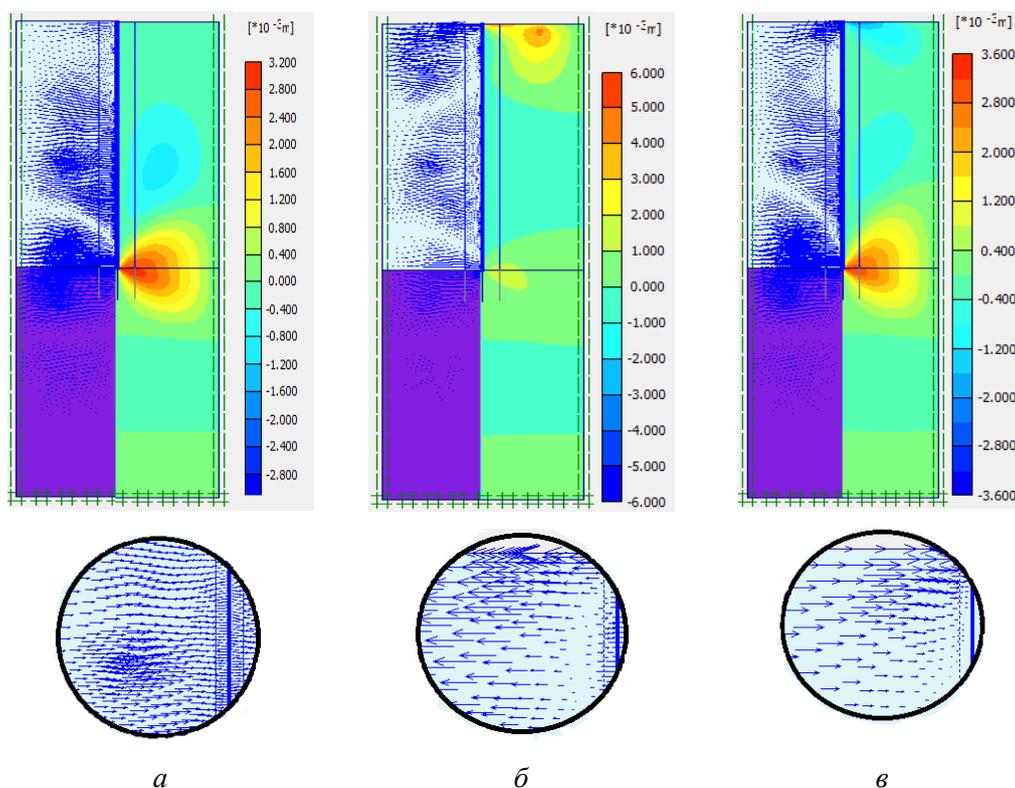


Рис. 8. Горизонтальные перемещения, возникающие в грунте: *a* – от действия максимальных вертикальных перемещений свай без опрессовки, *б* – на первом, *в* – втором этапе расчетов в модели *Hardening Soil* при опрессовке давлением $P_{\text{опр}} = 50$ кПа

Fig. 8. Soil horizontal displacements: *a* – from the maximum vertical displacement of the pile (without crimping), *b* – in first calculation step; *c* – in second *Hardening Soil* model calculation step with crimping pressure $P_{cr} = 50$ kPa

Построены графики зависимости осадки свай от напряжений, возникающих в грунтовом массиве до и после опрессовки. Установлено, что изменение величины опрессовки $P_{\text{опр}}$ основания в рассмотренном диапазоне (50–150 кПа) приводит к увеличению несущей способности свай до 3 раз (табл. 2).

При исследовании влияния опрессовки двухслойного грунтового основания в пространственной постановке замечены изменения в формировании НДС, подобные тем, что происходят в однослойном грунтовом массиве. Значения горизонтальных перемещений

возрастают. Большая концентрация напряжений возникает в уровне оголовка сваи, происходит большее обжатие сваи по боковой поверхности и защемление оголовка.

Таблица 2

Значения горизонтальных перемещений и несущей способности сваи на первом и втором этапах расчетов в модели Hardening Soil

Table 2

Values of horizontal displacements and bearing capacity of the pile at the first and second stages of calculations in the Hardening Soil model

№ п/п	Значение $P_{опр}$, кПа	Несущая способность сваи F_d , кН		F_{d2}/F_{d1}
		без опрессовки	с опрессовкой	
1	50	279,23	406,15	1,45
2	100		530,77	1,90
3	150		666,92	2,39

Результаты расчета в пространственной постановке при различных значениях модуля деформации грунта вдоль сваи представлены на рис. 9.

Прослеживается установленная ранее закономерность большей эффективности применения опрессовки основания с меньшими деформационными характеристиками давлением 50 кПа и с большими значениями модуля деформации давлением 150 кПа.

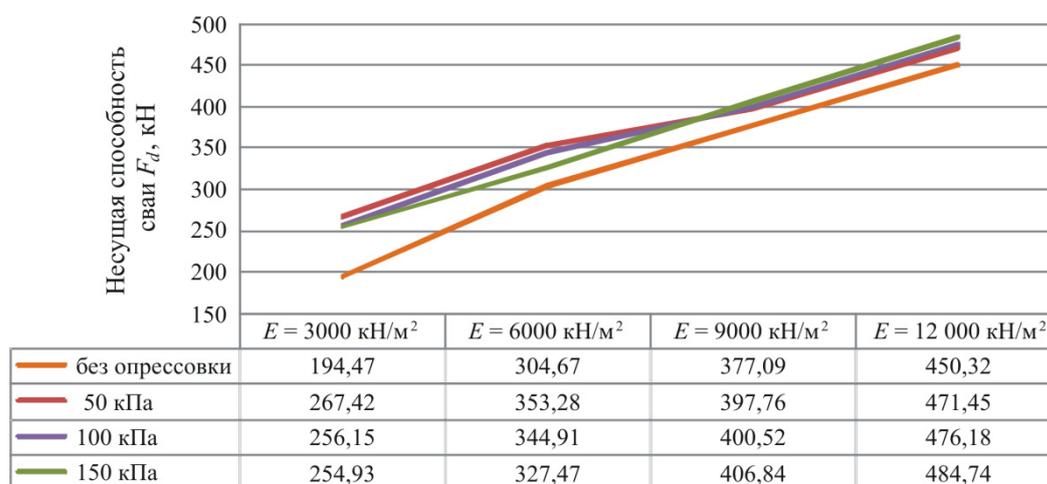


Рис. 9. Изменение несущей способности сваи в зависимости от величины опрессовки грунтового основания

Fig. 9. Change of bearing capacity of the pile, depending on the value of the ground base pressing

Полученные результаты исследования были использованы при проектировании подземной части трехсекционного монолитно-каркасного 12-этажного жилого дома. Размеры секции в плане 24×32 м. Выявлена экономическая эффективность применения опрессовки основания комбинированного ленточно-свайного фундамента (КЛСФ) по отношению к традиционному свайно-плитному фундаменту со следующей конфигурацией:

- свайно-плитный фундамент: сваи, шаг свай – 900 мм, толщина плиты 0,8 м;
- КЛСФ: сваи сечением 300×300 мм, длиной 12 м, шаг свай – 1100 мм.

Основание сложено глинистым грунтом от мягкопластичной до полутвердой консистенции.

Сметные расчеты на общестроительные работы по возведению фундаментов были составлены в ценах 4-го квартала 2017 г. Использование данной технологии при возведении фундаментов позволило снизить стоимость строительства подземной части каждой секции на 2 609,6 тыс. руб. Величина трудозатрат рабочих повышается, но трудозатраты машин и механизмов уменьшаются. Стоимость материалов на возведение традиционного плитно-свайного фундамента на 2 413,41 тыс. руб. выше затрат на материалы, необходимые для устройства КЛСФ, за счет регулирования НДС основания опрессовкой грунта.

Таким образом, метод опрессовки, позволяя регулировать напряженно-деформированное состояние грунтового основания, эффективно сказывается на росте несущей способности фундаментов.

Эффективность применения опрессовки свайного фундамента обоснована аналитическими и численными методами. Численные расчеты, проведенные в пространственной постановке, позволяют зафиксировать остаточные напряжения в грунтовом массиве от опрессовки, что приводит к росту касательных сил трения по боковой поверхности, напрямую влияющих на несущую способность свай.

В результате применения КЛСФ с опрессовкой основания при устройстве подземной части трехсекционного 12-этажного здания удалось снизить стоимость работ на 21 % по сравнению с использованием традиционного свайно-плитного фундамента.

Библиографический список

1. Алфимов А.В. Экономическое обоснование строительства высотного здания // Экономические науки. – 2012. – № 87. – С. 95–99.
2. Степанов М.А. Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2015. – 189 с.
3. Пронозин Я.А., Степанов М.А. Экспериментальное обоснование использования ленточных свайных фундаментов с предварительно напряженным грунтовым основанием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 180–189. DOI: 10.15593/2224-9826/2014.2.13
4. Наумкина Ю.В. Усиление ленточных фундаментов с переустройством в сплошную плиту переменной жесткости с предварительным напряжением грунтового основания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2013. – 24 с.
5. Пронозин Я.А., Степанов М.А., Волосюк Д.В. Регулирование напряженно-деформированного состояния основания комбинированных ленточно-свайных фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 3. – С. 16–20.
6. Моторный А.Н. Современные представления несущей способности забивных свай: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2014. – 10 с.
7. Расчетно-экспериментальное обоснование использования свайно-оболочечных фундаментов в высотном строительстве [Электронный ресурс] / В.М. Чикишев, Я.А. Пронозин, Л.Е. Мальцев, Ю.В. Зазуля, М.А. Степанов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. – 2012. – Вып. 1 (20). – URL: www.vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=798 (дата обращения: 20.06.2018).
8. Гусев Г.Н., Ташкинов А.А. Численное моделирование силового взаимодействия плитно-свайного фундамента с грунтовым массивом // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 359–363.

9. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 203–245. DOI: 10.15593/2224-9826/2014.4.19
10. Опыт устройства фундаментов зданий повышенной этажности в условиях юга Тюменской области / Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, Д.В. Волосюк, А.Н. Шуваев, Г.И. Рыбак // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, вып. 3 (114). – С. 282–292.
11. Повышение несущей способности буровой сваи при радиальном обжатию стенок скважины по технологии «Песконасос» / В.В. Знаменский, А.Л. Крыжановский, М.Р. Негахдар, О.И. Рубцов // Вестник МГСУ. – 2008. – № 2. – С. 55–62.
12. Тер-Мартirosян З.Г. Напряженно-деформированное состояние анизотропного водонасыщенного основания // Вестник МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 28–37.
13. Плитно-свайные фундаменты как способ решения сложных геотехнических проблем / В.В. Лушников [и др.] // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2013. – № 4. – С. 83–86.
14. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / Р.А. Мангушев, В.В. Знаменский, А.Л. Готман, А.Б. Пономарев. – 2-е изд. – М.: Изд-во АСВ, 2018. – 320 с.
15. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Новые способы геотехнического проектирования и строительства. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 217 с.
16. Hanisch J., Katzenbach R., Konig G. Kombinierte Pfahl-Plattengriindung // In Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis «Pfahle» der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT). – Ernst & Sohn, 2002.
17. Poulos H.G. Piled-raft foundations – design and application // Geotechnique. – 2001. – Vol. 50, № 2. – P. 95–113.
18. Lutz B., Morauf D., Scheffler J. Kombinierte Pfahl-Plattengründungen Modellversuche und Berechnungen // FgeoBAU. – Berlin. – 2010. – Bd. 1. – P. 107–115.
19. Abdel-Rahman M. Geotechnical behavior of shell foundations: philosophy doctor thesis. – Concordia University, Montreal, Canada, 1996.
20. El-Mossallamy Y. Economic Design of Piled Raft Foundations for high-rise buildings and bridge foundations // International Conference on Geotechnical Engineering, 19–22 May, 2004. – Beirut, 2004.
21. Katzenbach R., Arslan U., Moormann Chr. Piled raft foundation projects in Germany // Design Applications of Raft Foundations / Ed. by J.A. Hemsley. – Thomas Telford Ltd, 2000. – P. 323–391.
22. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 480 с.

References

1. Alfimov A.V. Ekonomicheskoe obosnovanie stroitel'stva vysohnogo zdaniia [The economic rationale for the construction of high-rise buildings]. *Economic science*, 2012, no. 87, pp. 95–99.
2. Stepanov M.A. Vzaimodeistvie kombinirovannykh lentochnykh svainykh fundamentov s predvaritel'no opressovannym gruntovym osnovaniem [The Interaction of the combined band of pile foundations pre-pressed soil base]. Ph. D. thesis. Tyumen, 2015, 189 p.
3. Pronozin Ya. A., Stepanov M.A. Eksperimental'noe obosnovanie ispol'zovaniia lentochnykh svainykh fundamentov s predvaritel'no napryazhennym gruntovym osnovaniem [Experi-

mental justification of application strip pile foundation with prestressed ground basement]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 2, pp. 180–189. DOI: 10.15593/2224-9826/2014.2.13

4. Naumkina Yu.V. Usilenie lentochnykh fundamentov s pereustroystvom v sploshnuiu plitu peremennoi zhestkosti s predvaritel'nym napryazheniem gruntovogo osnovaniia [Reinforcement of strip foundations with transformation into a continuous plate of variable hardness with prestressed of the ground base]. Abstract of Ph. D. thesis. Tyumen, 2013, 24 p.

5. Pronozin Ya. A., Stepanov M.A., Volosyuk D.V. Regulirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniya kombinirovannykh lentochno-svajnykh fundamentov [Regulation of stress-strain state of the Foundation of the combined band of pile foundations]. *Bases, foundations and soil mechanics*, 2016, no. 3, pp. 16–20.

6. Motornyi A.N. Sovremennye predstavleniia nesushchei sposobnosti zabivnykh svai [Modern understanding of the bearing capacity of driven piles]. Abstract of Ph. D. thesis. Kiev, 2014, 10 p.

7. Chikishev V.M., Pronozin Ya.A., Maltsev L.E., Zazulya Yu.V., Stepanov M.A. Raschetno-eksperimentalnoye obosnovaniye ispolzovaniia svaino-obolocheknykh fundamentov v vysotnom stroitel'stve [Calculation and experimental justification of the use of pile-shell foundations in high-rise construction]. *Internet-vestnik VolgGASU. Politematicheskaya*, 2012, iss. 1 (20), available at: www.vestnik.vgasu.ru/?source=4&articulo=798 (accessed 20 Yuni 2018).

8. Gusev G.N., Tashkinov A.A. Chislennoe modelirovanie silovogo vzaimodeistviia plitno-svainogo fundamenta s gruntovym massivom [Numerical simulation of the power interaction of plate-pile Foundation with the soil mass]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 359–363.

9. Shulyat'ev O.A. Fundamenty vysotnykh zdaniy [Foundations of high-rise buildings]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 203–245. DOI: 10.15593/2224-9826/2014.4.19

10. Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Volosyuk D.V., Shuvayev A.N., Rybak G.I. Opyt ustroystva fundamentov zdaniy povyshennoy etazhnosti v usloviyakh yuga Tyumenskoy oblasti [Experience of construction of high-rise building foundation in the conditions of the south of Tyumen region]. *Vestnik MGSU*, 2018, vol. 13, iss. 3 (114), pp. 282–292.

11. Znamenskiy V.V., Kryzhanovskiy A.L., Negahdar M.R., Rubtsov O.I. Povyshenie nesushchei sposobnosti burovoj svai pri radial'nom obzhatii stenok skvazhiny po tekhnologii «Peskonasos» [Increasing the carrying capacity of the drilling piles with a radial compression of the walls of the borehole technology "Peskiness"]. *Vestnik Moscow state University of civil engineering*, 2008, no. 2, pp. 55–62.

12. Ter-Martirosyan Z.G. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie anizotropnogo vodonasyshchennogo osnovaniya [Stress-strain state of an anisotropic water-saturated base]. *Vestnik Moscow state University of civil engineering*, 2006, no. 1, pp. 28–37.

13. Lushnikov V.V. et al. Plitno-svajnye fundamenty kak sposob resheniya slozhnykh geotekhnicheskikh problem [Plate-pile foundations as a way to solve complex geotechnical problems]. *Academic Vestnik UralNIIproekt RAASN*, 2013, no. 4, pp. 83–86.

14. Mangushev R.A., Znamenskiy V.V., Gotman A.L., Ponomarev A.B. Svai i svajnye fundamenty. Konstrukcii, proektirovanie i tekhnologii [Piles and pile foundations. Constructions, design and technology]. 2nd ed. Moscow, ASV, 2018, 320 p.

15. Petruhin V.P., SHulyat'ev O.A., Mozgacheva O.A. Noveye sposoby geotekhnicheskogo proektirovaniya i stroitel'stva [New methods of geotechnical design and construction]. Moscow, ASV, 2015, 217 p.

16. Hanisch J., Katzenbach R., König G. Kombinierte Pfahl-Plattengründung. *In Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis «Pfahle» der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)*. Ernst & Sohn, 2002.
17. Poulos H.G. Piled-raft foundations – design and application. *Geotechnique*, 2001, vol. 50, no. 2, pp. 95–113.
18. Lutz B., Morauf D., Scheffler J. Kombinierte Pfahl-Plattengründungen Modellversuche und Berechnungen. *FgeoBAU*, 2010, Bd. 1, pp. 107–115.
19. Abdel-Rahman M. Geotechnical behavior of shell foundations. Ph. D. thesis. Concordia University, Montreal, Canada, 1996.
20. El-Mossallamy Y. Economic Design of Piled Raft Foundations for high-rise buildings and bridge foundations. *International Conference on Geotechnical Engineering*, 19–22 May, Beirut, 2004.
21. Katzenbach R., Arslan U., Moormann Chr. Piled raft foundation projects in Germany. *Design Applications of Raft Foundations*. Thomas Telford Ltd, 2000, pp. 323–391.
22. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov [Soil Mechanics]*. Moscow, ASV, 2005, 480 p.