

УДК 624.154.8

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Хабибулин С.Ю., Хабибулина Н.Н.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола,
e-mail: cerxabib85@mail.ru

В статье представлены результаты изучения закономерностей и оптимальных параметров работы, а также определения области применения комбинированного свайного фундамента. Было проведено численное моделирование данной конструкции в ПК Plaxis 2D, с учетом изменения таких факторов как: угол наклона вытрамбованной части и длины сваи. Расчет производился в условиях осесимметричной задачи при нормальных условиях нагружения. Описана технология изготовления комбинированного свайного фундамента. Проведены расчеты геометрических размеров фундаментов. Представлены результаты численных расчетов грунтового основания комбинированных свайных фундаментов. Проведен анализ несущей способности и напряженно-деформированного состояния активной зоны комбинированных свайных фундаментов. Представлены зависимости влияния угла наклона, равного 15°, 20°, 25°, 30° вытрамбованной части на несущую способность фундамента. Проведен анализ влияния длины сваи равной 0; 3; 6; 9 м на несущую способность фундамента при различных ступенях вертикальной нагрузки. Проведено комплексное сравнение напряженно-деформированного состояния оснований для комбинированных свайных фундаментов с различными параметрами угла наклона вытрамбованной части и длины сваи. Статья предназначена для специалистов в области промышленного и гражданского строительства, инженеров-геотехников, а также студентов строительных специальностей.

Ключевые слова: комбинированный свайный фундамент, метод конечных элементов, эффективные виды фундаментов, геотехнический расчет

NUMERICAL CALCULATION OF THE OPTIMAL SIZE OF COMBINED PILE FOUNDATIONS

Khabibulin S.Yu., Khabibulina N.N.

Federal State Educational Institution of Higher Education Volga State Technology University,
Yoshkar-Ola, e-mail: cerxabib85@mail.ru

The wide use of combined pile foundation is complicated because of the absence of technical rules and regulations on design of such structures. It is necessary to investigate the main parameters and regularities of such structures operation under loading. For this aim numerical study of the foundation was carried out. The numerical modeling of combined pile foundation was carried out in the Plaxis 2D for study of the basic laws and operating parameters and for determination of the application area of these structures. The geometrical dimensions are calculated of the foundations. Dependences of influence of an inclination angle equal to 150, 200, 250, 300 of the tamped part are presented. The influence of the pile length is analyzed: 0 m., 3 m., 6 m., 9 m. on the bearing capacity of the foundation at various stages of vertical load. A complex comparison of the stress – strain state of the bases for combined pile foundations with various parameters of the angle of inclination of the tamped part and the length of the pile has been carried out. The main goal of this study was to establish the optimal structures of combined pile foundation. This article seems to be interesting for those who work in the field of building construction and geotechnics engineering.

Keywords: combined pile foundation, finite element method, effective foundation types, geotechnical calculation

На строительных площадках при наличии слабых несущих слоев грунта традиционным решением являются свайные фундаменты большой длины. Вытрамбованные фундаменты, а также короткие пирамидальные сваи [1, 2], фундаменты оболочки [3] и плитно-свайные фундаменты [4, 5] являются наиболее рациональными конструкциями фундаментов при наличии сложных инженерно-геологических условий. В результате экспериментов было выявлено, что призматическая свая обладает несущей способностью в 2–2,5 раза меньше, чем вытрамбованные фундаменты. Столь значительное расхождение в несущей способности объясняется иным характером взаимодействия основания с вытрамбованным фундамен-

том, в сравнении с призматической сваем, и значительной областью уплотнения грунта вокруг вытрамбованного фундамента [6]. В связи с этим были произведены геометрические расчеты комбинированного свайного фундамента, которые представлены в табл. 1, для расчета были приняты размеры при значении $H = 1$ м и сторона сваи равна 0,3 м.

Технология производства вытрамбованного фундамента следующая. Вытрамбованные фундаменты изготавливают при помощи копровой установки, оборудованной дизель-молотом или вибропогружателем. Рабочий орган состоит из направляющей, по которой происходит погружение, и конусообразного пробойника. Пробойник

представляет собой металлическую конусообразную форму, в верхней части которой крепится пружинный механизм, он необходим для извлечения пробойника из грунта. С помощью кронштейна конусообразный пробойник крепится к направляющей. Воздействие на пробойник от дизель-молота передается через наголовник. Пробойник погружается в грунт за счет многократного ударного воздействия дизель-молотом. При достижении грунта пружинный механизм многократно уплотняет основание вокруг пробойника. В результате чего не происходит выпор, разрыхление и разуплотнение грунта в непосредственной близости от котлована. Пробойник извлекают, когда сила сжатия опорных пружин превосходит силу

трения и сцепления поверхности рабочего органа о стенки котлована [7]. Затем сваебойный копер погружает сваю заданной длины на проектную отметку. Рабочую арматуру сваи оголяют, устанавливают металлический каркас и производят обетонирование для совместной работы забивной сваи и вытрамбованной части фундамента [8].

Целью настоящего исследования является изучение работы комбинированного фундамента, состоящего из забивной сваи длиной $L = 0; 3; 6; 9$ м и вытрамбованного элемента с углом $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ к вертикали относительно наклонной грани. Выявление зависимости от угла наклона вытрамбованного элемента и длины сваи к несущей способности фундамента.

Таблица 1

Размеры комбинированного фундамента

Сторона сваи (h), м	0,3	0,4	α°	H, м
R, м	0,30	0,35	15	0,5
R, м	0,36	0,41	20	0,5
R, м	0,43	0,48	25	0,5
R, м	0,50	0,55	30	0,5
R, м	0,33	0,38	15	0,6
R, м	0,40	0,45	20	0,6
R, м	0,48	0,53	25	0,6
R, м	0,57	0,62	30	0,6
R, м	0,36	0,41	15	0,7
R, м	0,45	0,50	20	0,7
R, м	0,54	0,59	25	0,7
R, м	0,64	0,69	30	0,7
R, м	0,39	0,44	15	0,8
R, м	0,49	0,54	20	0,8
R, м	0,60	0,65	25	0,8
R, м	0,72	0,77	30	0,8
R, м	0,42	0,47	15	0,9
R, м	0,53	0,58	20	0,9
R, м	0,65	0,70	25	0,9
R, м	0,79	0,84	30	0,9
R, м	0,45	0,50	15	1
R, м	0,57	0,62	20	1
R, м	0,71	0,76	25	1
R, м	0,86	0,91	30	1
R, м	0,60	0,65	15	1,5
R, м	0,78	0,83	20	1,5
R, м	0,99	1,04	25	1,5
R, м	1,21	1,26	30	1,5

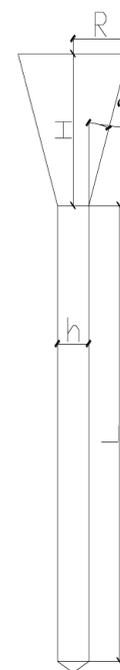
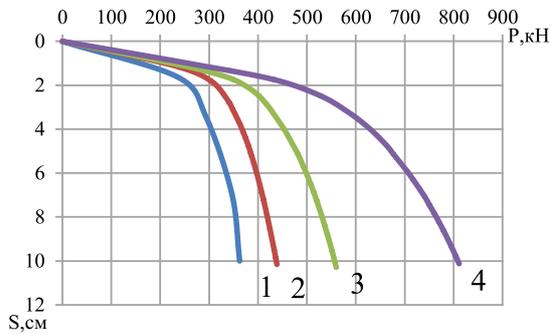
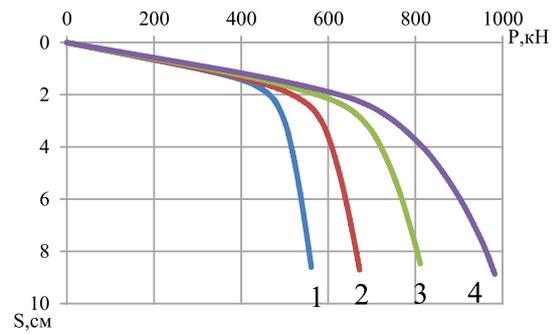
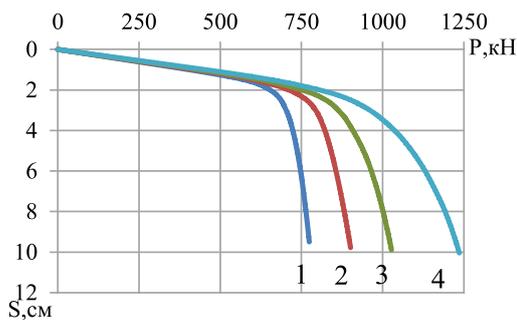
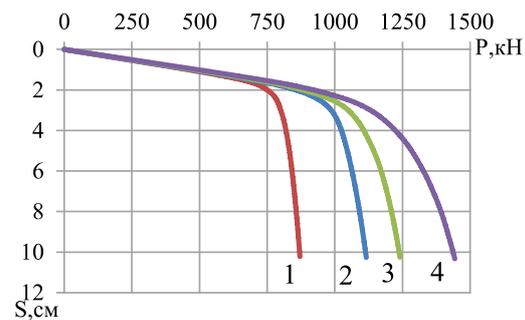


Таблица 2

Расчетные характеристики грунта

Наименование грунта	Мощность слоя	I_L , д. ед.	γ , кН/м ³	φ , град	c , МПа	E , МПа	ν	Ψ , град
Супесь пластичная	15 м	0,36	18,03	24,7	0,015	8,5	0,32	1

А) $L = 0$ м. 1 – $\alpha = 15^\circ$, 2 – $\alpha = 20^\circ$, 3 – $\alpha = 25^\circ$, 4 – $\alpha = 30^\circ$ Б) $L = 3$ м. 1 – $\alpha = 15^\circ$, 2 – $\alpha = 20^\circ$, 3 – $\alpha = 25^\circ$, 4 – $\alpha = 30^\circ$ В) $L = 6$ м. 1 – $\alpha = 15^\circ$, 2 – $\alpha = 20^\circ$, 3 – $\alpha = 25^\circ$, 4 – $\alpha = 30^\circ$ Г) $L = 9$ м. 1 – $\alpha = 15^\circ$, 2 – $\alpha = 20^\circ$, 3 – $\alpha = 25^\circ$, 4 – $\alpha = 30^\circ$ Рис. 1. Зависимость осадки фундамента от значений α и различной длины сваи L при различных ступенях нагрузки P кН

Численные исследования

Расчеты производились в условиях осесимметричной задачи в программном комплексе Plaxis 2D. На основании обзора литературных данных [9–11] была разработана расчетная схема фундамента, грунтового основания и уплотненной зоны. Расчетные характеристики основания приведены в табл. 2. Нагрузка на фундамент доводилась до предельных значений.

На рис. 1 приведены основные зависимости осадка – нагрузка при различных значениях α и длине сваи L . С увеличением нагрузки в активной зоне фундамента начинают развиваться области пластических деформаций, зависимость «осадка – нагрузка» на рис. 1, А–Г, приобретает нелинейный характер.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим основные результаты расчетов напряженно-деформированного состояния комбинированных свайных фундаментов. При анализе рис. 1, А, видно, что при длине сваи $L = 0$ изменение угла от 15° до 30° приводит к увеличению несущей способности вытрамбованного фундамента в 1,75 раз при осадке $S = 2$ см. На рис. 1, Б–Г, наблюдаем, что с увеличением длин сваи при $\alpha = 15^\circ$ несущая способность фундамента изменяется соответственно в 1,72; 2,21; 2,76 раз относительно фундамента при $L = 0$. Для фундаментов с $\alpha = 20^\circ$ при изменении длины сваи несущая способность изменяется в 1,6; 2,29; 2,77 раз соответственно, а при $\alpha = 25^\circ$ с увеличением

длины сваи несущая способность фундамента изменяется в 1,55; 1,94; 2,35 раз. При значениях $\alpha = 30^\circ$ увеличение несущей способности фундамента при изменении длины сваи составит 1,28; 1,7; 1,96 раз.

Результаты зависимостей осадки фундамента от длины свай и угла наклона боковой грани показаны на рис. 2. При $\alpha = 15^\circ$ и $P = 200$ кН соотношение осадки будет равно 0,48; 0,36; 0,31 для $L = 3; 6; 9$ м соответственно, с увеличением нагрузки $P = 400$ кН при $\alpha = 25^\circ$ несущая способность фундамента изменяется соответственно в 0,57; 0,37; 0,34 раз. С увеличением значения $\alpha = 30^\circ$ соотношение несущей способности при $P = 600$ кН соответственно длинам свай составит в 0,48; 0,34; 0,31 раз, а при $P = 800$ кН соотношения равны 0,39; 0,21; 0,17 раз.

Изополя вертикальных перемещений представлены на рис. 3. Они вытянуты вдоль комбинированного свайного фундамента. На глубине 2-3h (h – сторона сваи) ниже плоскости острия сваи и на расстоянии 2-4d в горизонтальном направлении вертикальные перемещения составляют не более 0,25 от общей осадки фундамента. Вертикальные перемещения грунта в уплотненной зоне достигают 0,45–0,75 от максимальной осадки комбинированного

свайного фундамента, то есть уплотненная зона деформируется вместе с фундаментом.

Зоны пластических деформаций по глубине на рис. 4 возникают в области уплотненной зоны по боковой поверхности фундамента. Горизонтальное распространение зависит от угла наклона вытрамбованного элемента, с увеличением угла зоны могут доходить до 5-7D (D – диаметр вытрамбованной части по верху).

Анализ изменения вертикальных напряжений σ_y на рис. 5 показывает, что максимальные значения сжимающих напряжений находятся в плоскости острия сваи и вдоль тела сваи.

Выводы

1. Увеличение угла наклона боковой поверхности при $S = 2$ см приводит к уменьшению влияния длины сваи на несущую способность фундамента ввиду того, что проявляется арочный эффект вытрамбованного фундамента.
2. При сравнении свай длиной L , равной 6 м, 9 м уменьшается эффективность применения длинных свай.
3. Получены картины напряженно-деформированного состояния комбинированных свайных фундаментов.

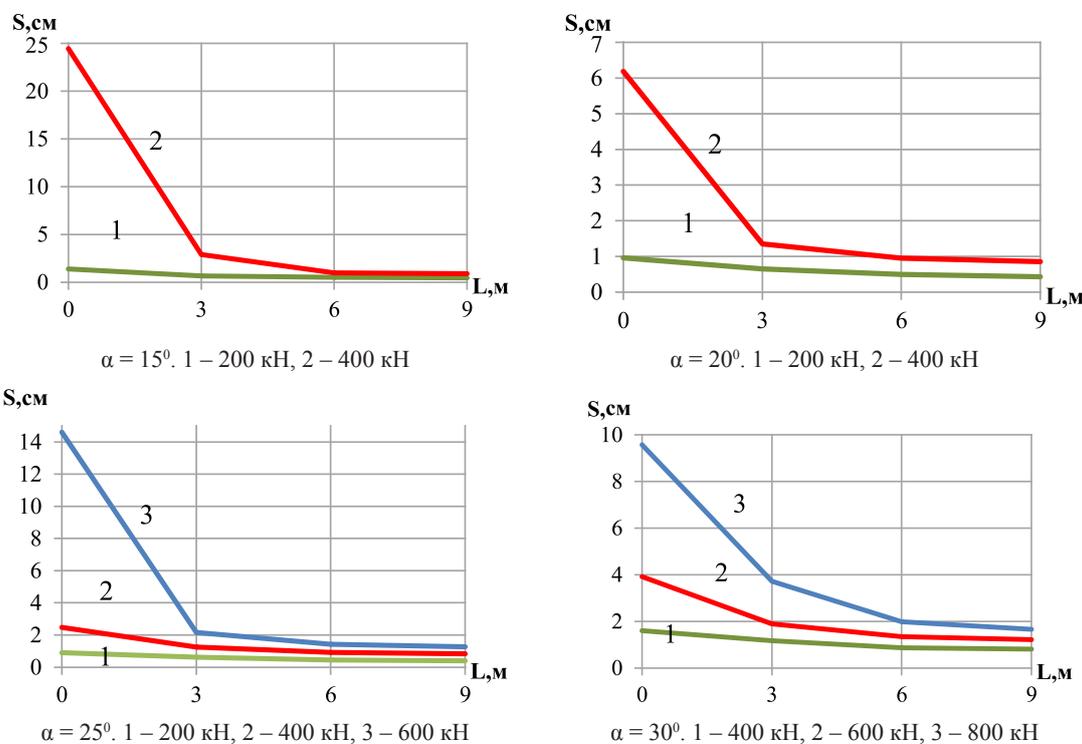
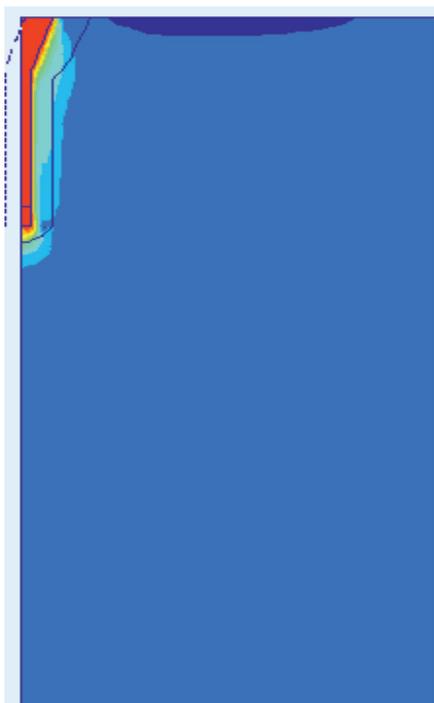
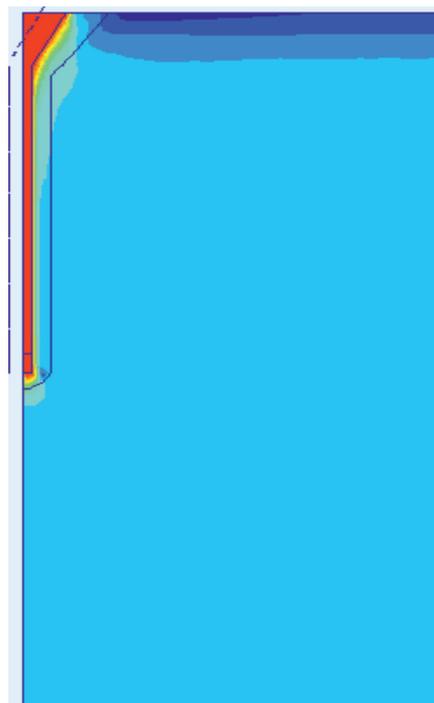
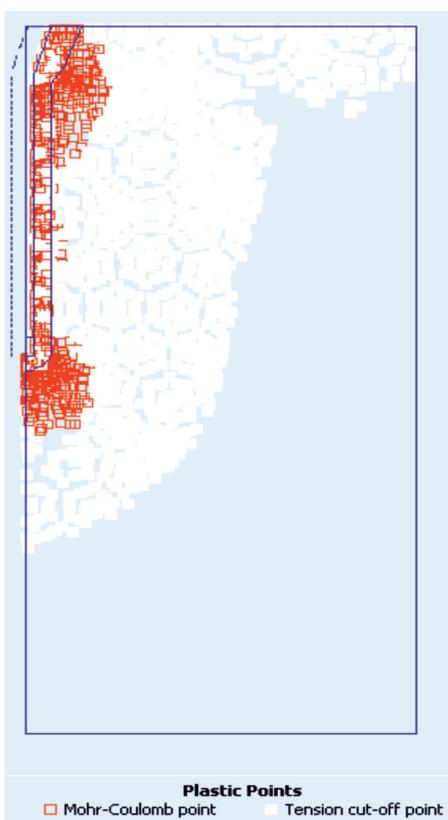
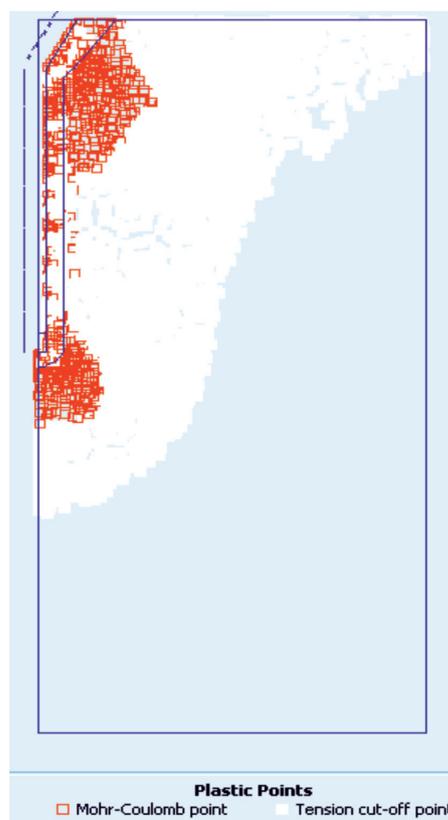


Рис. 2. Зависимость осадки фундамента S см, от длины свай L м и угла α° при различных ступенях вертикальной нагрузки

 $\alpha = 15^\circ$. L = 3 м $\alpha = 25^\circ$. L = 6 м*Рис. 3. Изолинии вертикальных перемещений* $\alpha = 15^\circ$. L = 6 м $\alpha = 25^\circ$. L = 6 м*Рис. 4. Распределение зон пластических деформаций*

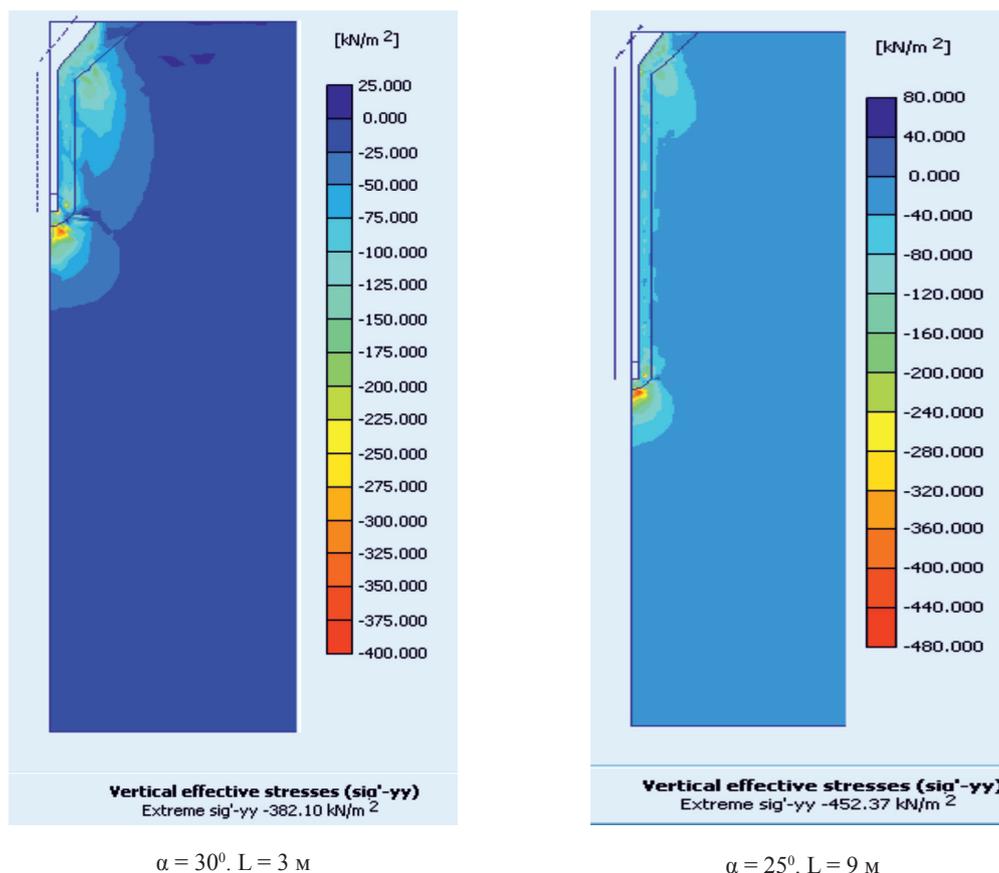


Рис. 5. Сжимающие напряжения для комбинированного фундамента

4. При небольших нагрузках до 300 кН можно использовать только вытрамбованную часть фундамента с углом выше 25° . При диапазоне нагрузок 300–700 кН рационально использовать комбинированный свайный фундамент с длиной центральной сваи 3 м и углом выше 25° , а для свай длиной 6 м и углом в диапазоне от 15° – 30° .

Список литературы

1. Бартоломей А.А., Глушков В.Е., Глушков И.В. Комбинированный фундамент // Брюссель – Эврика 2003: 52-й всемирный салон инноваций, научных разработок и новых технологий (Бельгия, Брюссель, 11–16 ноября 2003 г.). 2003. С. 112–116.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2014. 728 с.
3. Бартоломей Л.А., Тарасенко А.А., Пронозин Я.А., Мельников Р.В. Взаимодействие осесимметричных фундаментов-оболочек с грунтовым основанием при внецентренном нагружении // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 1 (20). URL: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BartolomeyTarasenko-2012_1_20_.pdf (дата обращения: 02.07.2018).
4. Тер-Мартиросян З.Г., ЧиньТуан Вьет. Взаимодействие свай большой длины с массивом грунта в составе плитно-свайного фундамента // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 74–78.
5. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник Пермского национального исследовательского политех-

нического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 203–245. DOI: 10.15593/2224-9826/2014.4.19.

6. Глушков И.В. Методика проектирования комбинированных свайных фундаментов // Актуальные проблемы проектирования и строительства в условиях городской застройки: тр. Междунар. науч.-практ. сем. Пермь, 2005. Т. II. С. 13–18.

7. Глушков В.Е., Глушков А.В. Вытрамбованные фундаменты в грунтах со слабым подстилающим слоем // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 19–26.

8. Пат. на полезную модель 12148 Российская Федерация, Е 02 Э 27/01. Вытрамбованный фундамент с центральной свайей / Глушков В.Е., Глушков И.В.; заявитель и патентообладатель Глушков Вячеслав Евгеньевич, Глушков Илья Вячеславович. – № 99100436/2; заявл. 05.01.1999; опубл. 16.12.1999.

9. Пронозин Я.А., Степанов М.А. Комбинированные фундаменты как синтез плитного и свайного фундаментов. Эволюция развития: сборник материалов XVI научно-образовательной конференции ТюмГАСУ. Тюмень, 2012. С. 122–125.

10. Пронозин Я.А., Степанов М.А. Экспериментальные исследования взаимодействия свайно-оболочечных фундаментов с предварительно уплотняемым грунтовым основанием: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении». Новочеркасск, 2012. С. 243–250.

11. Ponomaryov A.B., Sazonova S.A. The use of express method for determining the modulus of deformation of fill soil. Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference. 8AYGEC 2016 8th. 2016. P. 283–286.