

Исследование работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах при действии вертикальных статических нагрузок

О.Ю. Ещенко, Д.А. Чернявский

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Аннотация: В статье обсуждаются вопросы влияния геометрических параметров буроинъекционных конических свай на их осадку. Приведены результаты расчётов одиночных конических буроинъекционных свай методом конечных элементов при действии статических сжимающих нагрузок в глинистых грунтах основания. Приведена сравнительная оценка влияния длины и угла наклона боковой поверхности грани буроинъекционной конической сваи на ее осадку. На примере показано влияние угла наклона и длины свай на их осадку, а так же приведено сравнение с осадками цилиндрических свай схожей материалоемкости.

Ключевые слова: буроинъекционная коническая свая, несущая способность, осадка, метод конечных элементов.

В современной отечественной практике фундаментастроения все большее применение находят конструкции свай использующие буроинъекционные технологии. Данный тип свай обладает высокой удельной несущей способностью, низкой материалоемкостью и при этом малыми ударными воздействиями на грунт [1, 2, 3, 12, 15]. Повышенная несущая способность, в таких сваях, достигается за счет формирования, при их устройстве, развитой боковой поверхности и обжатия ствола скважины дополнительным давлением. Другим известным способом повышения несущей способности свай [4, 5, 13] является изменение их формы в сторону формирования ствола с сужением к острию (конические, клиновидные сваи). Повышение несущей способности в таких сваях достигается за счет действия дополнительного сопротивления грунта «отпора грунта» (расклинивающий эффект). Однако, материалы по исследованию работы одиночных буроинъекционных конических свай практически отсутствуют. Таким образом, отдельный интерес вызывают вопросы, связанные с поведением одиночных буроинъекционных конических свай.

Для проведения исследований за основу была принята технология устройства буроинъекционных конических свай, разработанная и запатентованная авторами в 2010 году. Основываясь на рассматриваемой технологии, была разработана численная расчётная модель в программном комплексе Midas GTS 2013 V1.2. Учитывая, что создаваемая модель симметрична относительно продольной оси буроинъекционной конической сваи, в исследованиях использовалась половина полноразмерной модели, при этом продольная ось сваи совмещалась с центром координат. Длины свай ($L_{св}$) назначались согласно существующим типоразмерам для полых конических свай [6] и приняты равными 3, 7 и 11 м. При назначении диаметра острия и оголовка сваи за основу были приняты диаметры буровых коронок выпускаемых фирмой «Ischebek». При этом, для учета такой технологической особенности, как увеличение диаметра буроинъекционной сваи в процессе ее устройства, расчетные диаметры приняты с учётом повышающего коэффициента (k), который для глинистых грунтов [8] равен 1,4. Таким образом, в рамках проводимых исследований диаметр острия ($D_{ост}$) для всех длин свай принят постоянным и равным 100 мм, как минимально возможный согласно технологии изготовления. Диаметры оголовка сваи ($D_{ог}$) принимали значения равные 130, 210, 300 и 390 мм. Расчётная схема одиночной буроинъекционной конической сваи представлена на рисунке (рис. 1)

При устройстве буроинъекционных свай в качестве материала сваи, как правило, используется мелкозернистый бетон на песчаном заполнителе марки не ниже М300 (класс В25). Сам по себе бетон является однородным сплошным материалом и при нагружении проявляет линейные свойства в достаточно большом диапазоне нагрузок, значительно превосходящем предельно допустимые значения для любых глинистых грунтов. Таким образом, для описания поведения такого материала в расчетах принята

изотропная линейно-упругая модель со следующими характеристиками: $E = 27,5 \times 10^9 \text{ Па}$; $\mu = 0,18$.

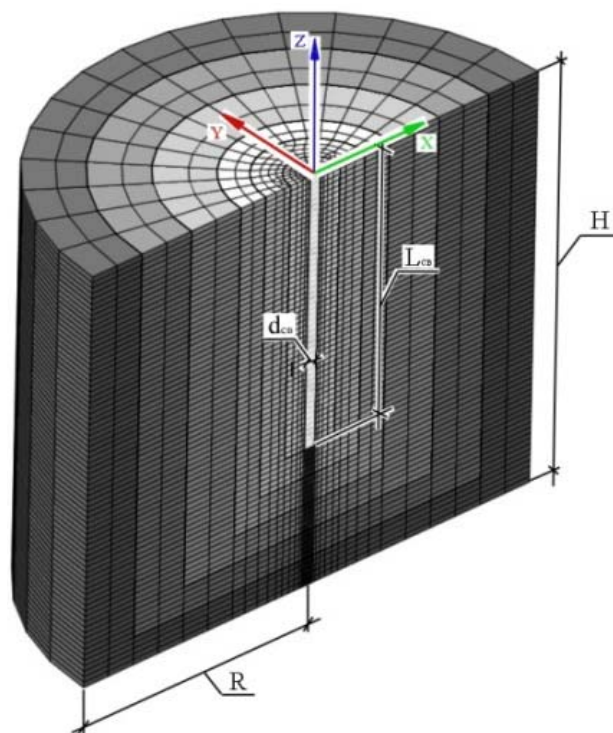


Рис. 1. Расчетная схема одиночной конической бурињекционной сваи

Для описания поведения материала грунта использована пятипараметрическая модель, использующая критерий текучести Друккера-Прагера [7, 14]. В данной модели закон течения может быть как ассоциированным, так и неассоциированным. Поверхность текучести не меняется с ростом деформаций, следовательно, отсутствует закон упрочнения, а материал является идеально упруго-пластичным. Эквивалентные напряжения для модели Друккера-Прагера определяются выражением:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \sqrt{\frac{1}{2} \{s\}^T [M] \{s\}},$$

где β - константа материала;

$\sigma_m = 1/3 (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ - среднее или гидростатическое напряжение;

$\{s\}$ - девиаторная часть напряжений;

$[M]$ – матрица жесткости.

Это выражение представляет собой модифицированный критерий Мизеса и учитывает влияние среднего, или гидростатического, напряжения. Чем выше гидростатическое напряжение (всестороннее давление), тем выше предел текучести.

Параметр β - константа материала, определяемая выражением:

$$\beta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(2 - \sin \varphi)}},$$

где φ - угол внутреннего трения;

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Предел текучести материала определяется выражением:

$$\sigma_y = \frac{6cs \sin \varphi}{\sqrt{3(2 - \sin \varphi)}},$$

где c - величина удельного сцепления, кПа.

Таким образом, критерий текучести, принимает вид:

$$F = 3\beta\sigma_m + \frac{[\frac{1}{2}\{s\}^T[M]\{s\}]}{2} - \sigma_y = 0$$

В пространстве главных напряжений эта поверхность текучести представляет собой круговой конус с параметрами материала, выбранными таким образом, что поверхность является описанной по отношению к шестиграннику Мора-Кулона. Это позволяет несколько повысить точность нелинейных расчетов для 3D моделей.

Выбор типа грунтовых условий для проведения исследований осуществлен исходя из условий рациональной области применения

буроинъекционных свай. С одной стороны, согласно рекомендациям [9, 10], применение буроинъекционных свай в глинистых грунтах текучей и текуче-пластичной консистенции, а так же структурно неустойчивых грунтах с малыми прочностными и деформационными характеристиками мало эффективно. С другой стороны в грунтовых условиях обладающих относительно хорошими прочностными и деформационными свойствами ($E \geq 15\text{МПа}$) фундамент здания (сооружения) можно выполнить и без применения свай. Таким образом, для проведения расчетов принимались средние грунтовые условия со следующими физико-механическими характеристиками: $E = 12\text{МПа}$; $c = 22\text{кПа}$; $\varphi = 17^\circ$; $\mu = 0,35$.

Так как явление дилатансии не свойственно для глинистых грунтов рассматриваемого типа, то для всех расчетных грунтовых условий угол дилатансии (ψ) принимался равным 0.

В соответствии с рекомендациями [5] для дискретизации расчетной модели были выбраны объёмные четырёхугольные 8 узловые конечные элементы. Для повышения качества расчёта в околосвайном пространстве было выполнено сгущение сетки КЭ (рис. 1). Граничные условия заданы следующим образом: на нижней грани запрещены перемещения и повороты во всех направлениях ($U_x=U_y=U_z=0$, $R_x=R_y=R_z=0$), на боковых гранях разрешены перемещения вдоль вертикальной оси Z ($U_x=U_y=0$, $R_x=R_y=R_z=0$), в плоскости XZ запрещены перемещения в направлении оси Y ($U_y=0$) из условия симметрии.

Расчет выполнялся в несколько стадий. В первой стадии моделируется напряженно деформированное состояние грунта в естественном состоянии (обжатие грунта собственным весом). При этом всем объектам модели присвоены свойства грунта. Из нагрузок присутствует только собственный вес. Все перемещения после проведения расчета обнуляются, остаются только напряжения. На втором этапе в теле массива грунта задается область с

геометрией сваи и свойствами бетона. К оголовку сваи прикладывается равномерно распределенная нагрузка, действующая вдоль оси сваи и направленная вертикально вниз.

При назначении величины геометрических размеров расчетной модели системы «свая-грунт основания», выборе типа применяемых конечных элементов, количества узлов сетки МКЭ, критерия сходимости расчета и параметров контактного элемента использовались данные исследований, выполненных на кафедре «Основания и фундаменты» КубГАУ в период с 2009 по 2013 годы и опубликованных в научно-технической литературе [11].

За несущую способность буроинъекционной сваи в данной работе принято значение сжимающей нагрузки, при котором общие перемещения сваи составляют 40мм.

Влияние угла наклона грани буроинъекционной конической сваи на ее осадку

Для исследования влияния наклона боковой поверхности одиночной буроинъекционной конической сваи были выполнены серии расчётов для свай длиной ($L_{св}$) равной 7м. Диаметр острия был принят постоянным и равным 100мм. При этом диаметр оголовка сваи ($D_{ог}$) принимал значения 100, 130, 210, 300 и 390мм. Исходя из принятых значений диаметра оголовка, наклон боковой поверхности конической сваи принимал значения в интервале от 0 до 2,07%. Шаг по нагрузке, прикладываемой к оголовку конической буроинъекционной сваи, был принят равным 1т. По полученным данным построен график (рис. 2).

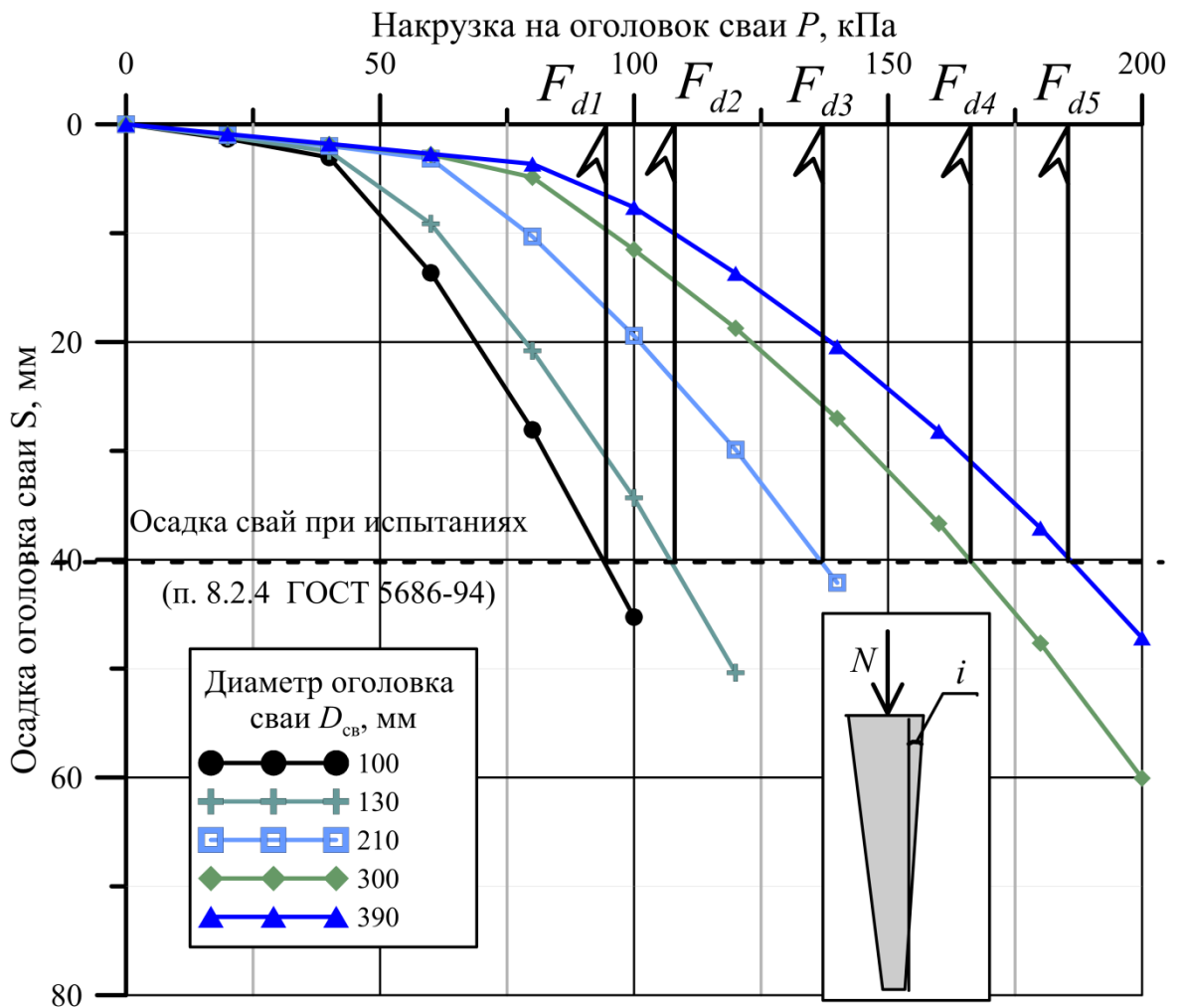


Рис. 2 График осадки буронагрекционных конических свай длиной 7м с различными углами наклона их боковой поверхности

Из графика (рис. 2) видно, что по своему виду кривые, описывающие поведение конических свай ($D_{ог} = 130...390\text{мм}$), схожи с поведением цилиндрической сваи. Для каждой кривой можно выделить зоны упругих деформаций (прямолинейных участков), а так же зоны пластических деформаций (криволинейный участок). Однако, явно видно, что с увеличением угла наклона боковой грани сваи при одних и тех же осадках увеличивается воспринимаемая сваем нагрузка. Так при осадке в 40мм (несущая способность согласно ГОСТ 5686-94) относительное приращение по нагрузке по сравнению с цилиндрической сваем, при той же материалоемкости, составляет до 94%, т.е. почти удваивается.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что при увеличении угла наклона боковой грани буроинъекционной конической сваи уменьшается ее осадка.

Для оценки влияния несущей способности буроинъекционных конических свай были отдельно выполнены серии расчётов для свай длинами 3 и 11м. Расчёты выполнялись в тех же грунтовых условиях и с теми же геометрическими параметрами острия и оголовка, как и в предыдущем эксперименте. По полученным данным построены графики. Так как графики для свай длинами 3 и 7 метров аналогичны графику для свай длиной 7м (рис. 2) то в работе они не представлены. На их основе были получены значения несущих способностей для свай с различным углом наклона их боковой поверхности. На основе полученных данных построен график зависимости несущей способности одиночных буроинъекционных конических свай от угла наклона их боковой поверхности (рис. 3).

Из рассмотрения графика (рис. 3) видно, что для всех кривых характерно возрастание, что свидетельствует об увеличении несущей способности с увеличением угла наклона для всех длин свай. Так же следует отметить, что для кривой, описывающей поведение сваи длиной 3м, приращение по несущей способности больше чем для кривой, характерной для сваи длиной 11м. Наглядно это показано на графике (рис. 4).

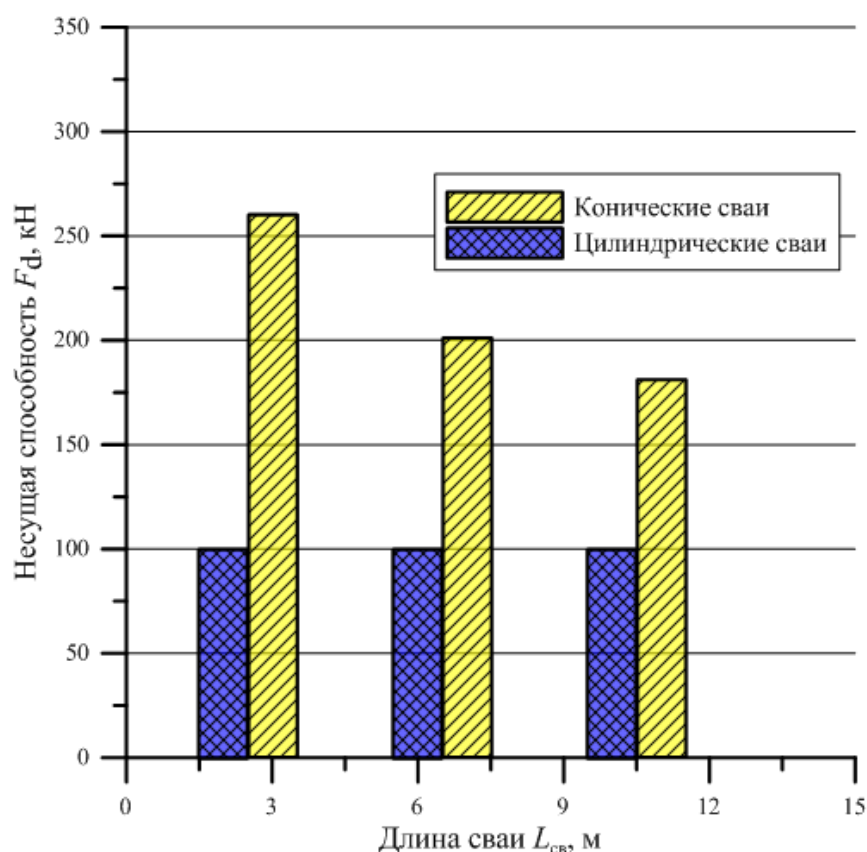


Рис. 4 Приращение по несущей способности для конических буроинъекционных свай

Из графика (рис. 4) видно, что для свай длиной 3м относительное приращение по несущей способности по сравнению с цилиндрической сваей может достигать до 162%, а для 11м сваи 94%. Это можно объяснить тем, что с увеличением длины сваи при одинаковых диаметрах оголовка и острия сваи меняется ее коничность.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимальный эффект увеличения несущей способности для буроинъекционных конических свай наблюдается на относительно коротких сваях (при фиксации диаметров) или сваях любой длины с высокой коничностью.

Так как с увеличением угла наклона боковой грани буроинъекционных конических свай увеличивается площадь их боковой поверхности, то отдельный интерес вызывал вопрос, связанный с оценкой влияния изменения

площади боковой поверхности на несущую способность конических свай. Таким образом, дополнительно, по полученным данным, был построен график (рис. 5) влияния несущей способности буринъекционных конических свай от величины площади их боковой поверхности без учёта площади острия сваи.

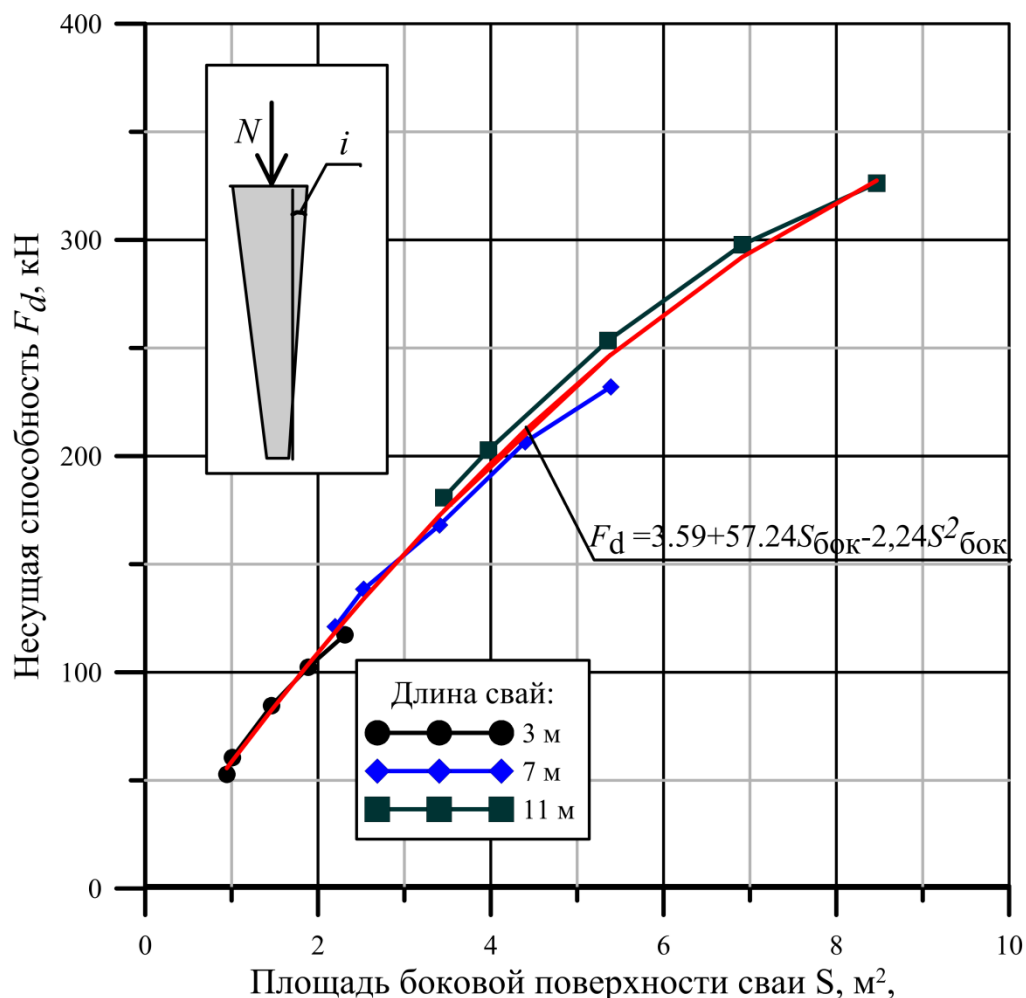


Рис. 5 График зависимости несущей способности одиночных буринъекционных конических свай от площади их боковой поверхности

Из рассмотрения графика (рис. 5) видно, что с увеличением площади боковой поверхности буринъекционных конических свай увеличивается и их несущая способность, что закономерно. Зависимость несущей способности конической сваи от площади ее боковой поверхности носит

слабо нелинейный характер. Так же на графике (рис. 5) видно, что при одинаковой площади боковой поверхности, для свай различной длины, их несущая способность различна. Причём чем длиннее свая, тем это различие больше. Это можно объяснить тем, что с увеличением длины сваи увеличивается вертикальная составляющая, возникающая вследствие действия обжатия от собственного веса грунта на наклонную поверхность грани сваи.

Из этого можно сделать вывод о том, что конические сваи различной длины, но обладающие одинаковой площадью боковой поверхности обладают различной несущей способностью. Это различие может достигать 8%.

Для удобства, зависимость несущей способности буринъекционных конических свай от площади боковой поверхности можно описать кривой полученной путём аппроксимации кривых представленных на графике (Рис. 5). Полученную кривую можно описать следующим выражением:

$$F_d = 3,59 + 57,24S_{бок} - 2,24 S_{бок}^2$$

где F_d – несущая способность конической буринъекционной сваи, кН;

$S_{бок}$ – площадь боковой поверхности буринъекционной конической сваи без учёта площади ее острия, м².

Помимо оценки влияния площади боковой поверхности, отдельно был рассмотрен вопрос, связанный с оценкой соотношения используемого объёма материала свай (материалоёмкость) и их несущей способности. Для этого, используя стандартные математические формулы, был вычислен объем конических буринъекционных свай различной длины и обладающих различным углом наклона боковой поверх и сопоставлен с ранее вычисленными несущими способностями свай с соответствующими

геометрическими параметрами. По полученным данным построен график (рис. 6).

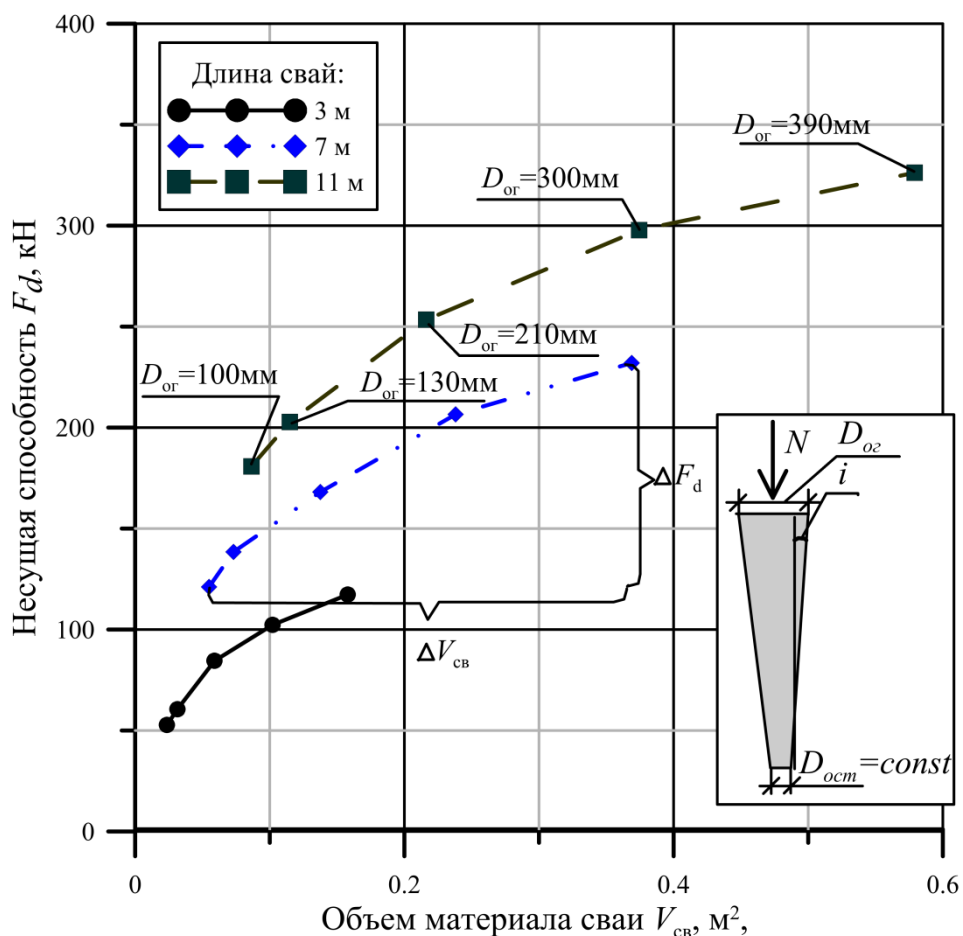


Рис. 6 График зависимости несущей способности одиночных буринъекционных конических свай от их материалоемкости

Из графика (рис. 6) видно, что все кривые возрастают. Это свидетельствует об увеличении несущей способности с увеличением размера свай. Так же следует отметить, что относительное приращение по несущей способности, т.е. отношение увеличения несущей способности и используемого материала для свай длиной 3м больше чем для свай длинами 7 и 11м. Отношение изменения несущей способности к объёму используемого материала для свай длиной 3м составляет 0,64, а для свай с динами 7 и 11м составляет 0,54 и 0,47, соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при фиксированных диаметрах забоя и устья скважины наиболее эффективное использование материала тела сваи происходит в буроинъекционных конических сваях, где коничность выше.

Так как предыдущий эксперимент выполнялся только для конических свай, то отдельный интерес вызывал вопрос, связанный со сравнением несущей способности конических свай и цилиндрических при одинаковой материалоемкости и соответственно и стоимости устройства.

Для решения данного вопроса на примере свай длиной 7м были выполнены серии расчётов для цилиндрических свай, при этом их диаметр был подобран таким образом, что их объем был равен соответствующей конической свае. Таким образом, расчёт выполнялся для цилиндрических свай диаметрами 116, 158, 208 и 242мм, что соответствует коническим сваям с диаметрами оголовка 130, 210, 300 и 390мм соответственно. По полученным данным построен график (рис. 7)

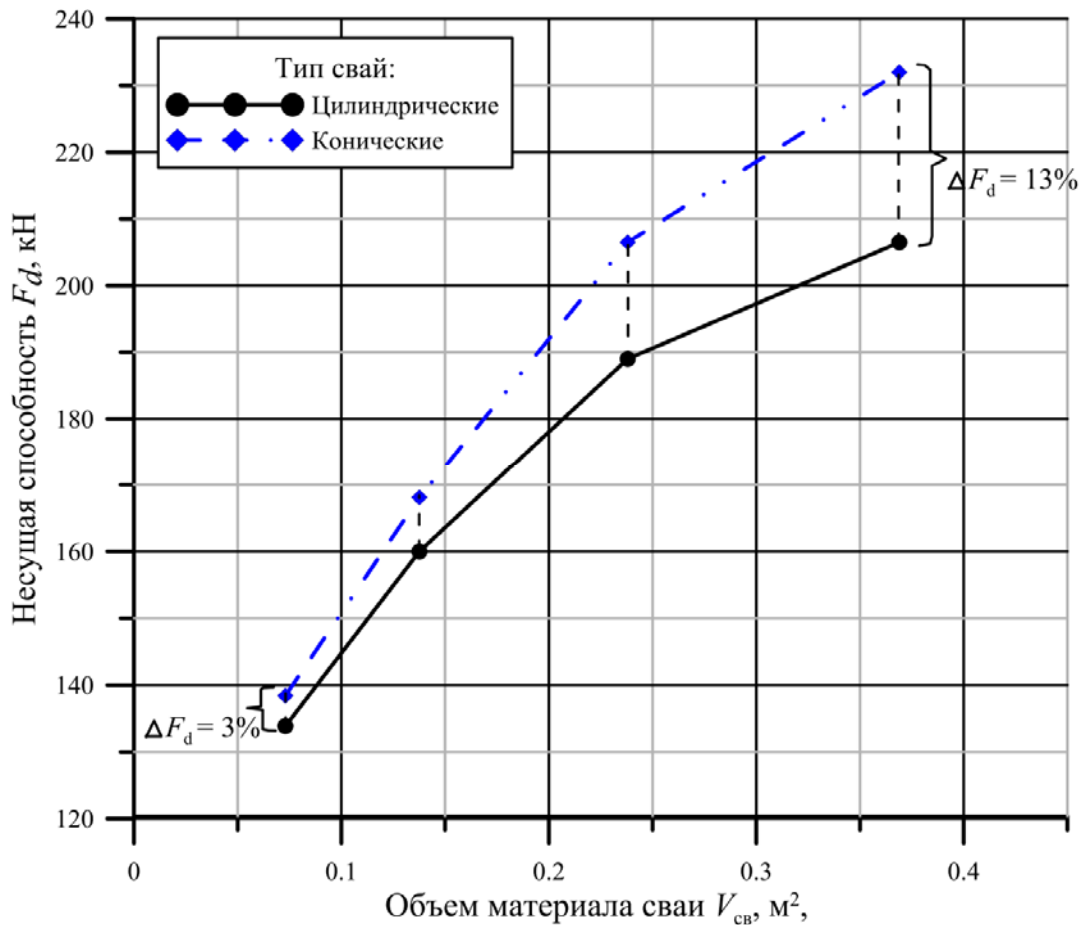


Рис. 7 График сравнения несущей способности одиночных буроинъекционных конических и цилиндрических свай с одинаковой материалоемкостью

Из графика (рис. 7) видно, что кривые описывающие поведение конических и цилиндрических свай не совпадают и имеют разную крутизну наклона. При этом с увеличением используемого объема материала свай разница в несущей способности на вертикальную нагрузку конических и цилиндрических свай возрастает с ростом длины свай. Увеличение несущей способности конических свай составляет от 3 до 13% по отношению к цилиндрическим сваям.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что конические сваи обладают большей несущей способностью на вдавливание по отношению к цилиндрическим при одинаковой материалоемкости.

Исследование влияния длины конических буринъекционных свай на их осадку

Для исследования влияния длины буринъекционной конической сваи на ее осадку в глинистых грунтах были выполнены серии расчётов для свай длинами ($L_{св}$) равными 3; 7 и 11м. Геометрические параметры диаметров конических свай, а так же физико-механические характеристики глинистых грунтов приняты по аналогии с ранее рассмотренными исследованиями. По полученным данным построен график. Для наглядности в работе представлен график для конических свай с диаметром оголовка($D_{ог}$) равным 390мм (рис. 8).

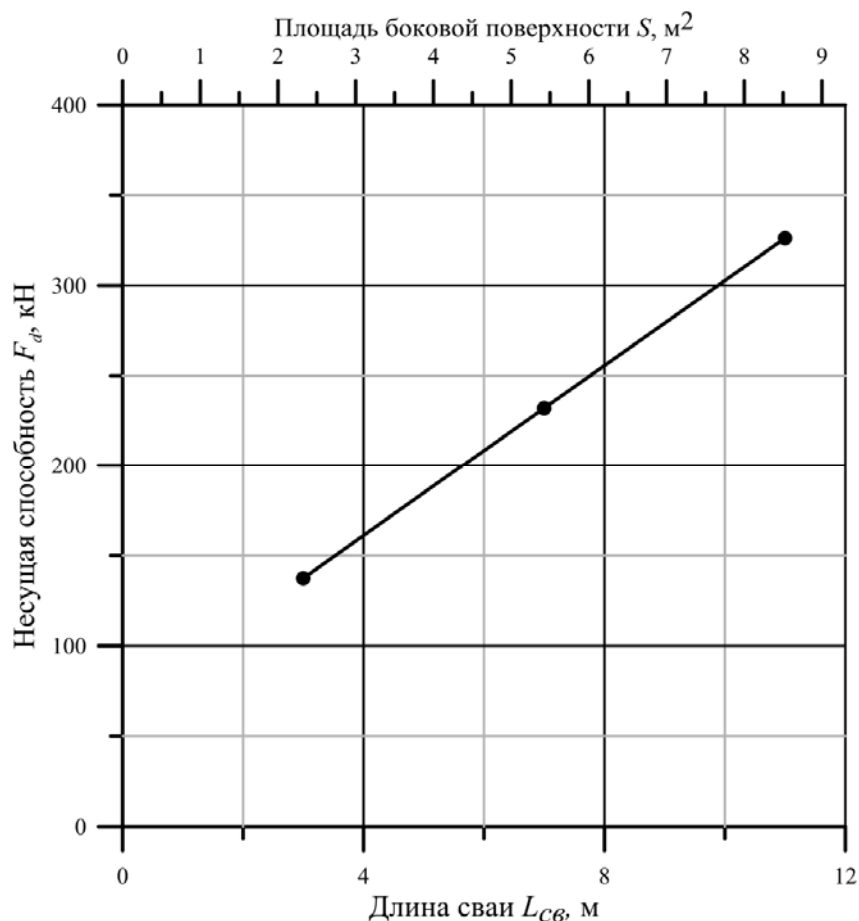


Рис. 8 График зависимости несущей способности буринъекционной конической сваи от ее длины

Из графика (рис. 8) видно, что зависимость несущей способности от длины сваи носит линейный характер. Прямая возрастает, что свидетельствует об увеличении несущей способности с увеличением длины сваи, что вполне закономерно.

Из этого можно сделать вывод о том, что зависимость несущей способности от длины сваи можно легко описать уравнением прямой, что в свою очередь способно значительно облегчить инженерный метод расчёта буроинъекционных конических свай.

Выводы и рекомендации

1. С увеличением угла наклона боковой грани буроинъекционных конических свай сваи при одних и тех же осадках увеличивается воспринимаемая сваей нагрузка. Относительное приращение по нагрузке по сравнению с цилиндрической сваей диаметром ($D_{св}$) составляет до 94%;
2. Максимальный эффект увеличения несущей способности для буроинъекционных конических свай наблюдается на относительно коротких сваях, имеющих высокую коничность. Относительное приращение по несущей способности может достигать до 162% по сравнению с цилиндрическими сваями при одинаковых величинах диаметров острия ($D_{ост}$);
3. Конические сваи различной длины, но обладающие одинаковой площадью боковой поверхности обладают различной несущей способностью. Это различие может достигать до 8% и растет с увеличением длины.
4. Конические буроинъекционные сваи обладают большей несущей способностью на вдавливание по отношению к цилиндрическим при одинаковой материалоемкости. Увеличение несущей способности

конических буроинъекционных свай составляет от 3 до 13% по отношению к цилиндрическим сваям и увеличивается с длиной сваи.

Литература

1. Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : АСВ, 2010.-240 с.
2. Джантимиров Х.А., Рытов С.А., Юдович Б.Э. Новейшие геотехнические технологии, конструкции и материалы. НИИОСП- 70 лет. Труды института, 2001. с. 45-52.
3. Рытов С.А. Эффективные современные технологии устройства буроинъекционных свай и грунтовых инъекционных анкеров. Журнал государственного учреждения Московской области «Мособлгосэкспертиза» «Информационный вестник» № 1 (16). М., 2007 г. с. 17-24.
4. Бахолдин, Б.В., Игонькин Н.Т. Исследование несущей способности пирамидальных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов – 1978. - №3. – С. 13-16.
5. Вертынский, О. С. Определение несущей способности набивных конических свай // Вестник СГТУ. - Саратов : СГТУ, 2006. - № 4. Ч. I. - С.77-81.
6. Рекомендации по применению полых конических свай повышенной несущей способности. В развитие требований СНиП 2.02.03-85 "Свайные фундаменты"/ Сост.: А.А. Бартоломей, Б.В. Бахолдин, Б.С. Юдков, А.Б. Пономарев, Л.В. Сосновских; Перм. гос. техн. университет. Пермь, 1995. 27 с.
7. GTS 2012 Analysis Manual. Part 1 Analysis Case. 2011. 254 p .
8. СТБ EN 14199-2009. Проведение специальных геотехнических работ. Микросваи. Госстандарт республики Беларусь, 2010. 56 с.

9. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. М.: НИИОСП им. Герсеванова. - 2002. - 19с.
 10. Рекомендации по применению буроинъекционных свай МОСКВА-1984, 52 с.
 11. Ещенко О. Ю. Чернявский Д. А. Исследования влияния краевых условий модели на перемещения буроинъекционной сваи при действии статических нагрузок // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 94 (12). URL: ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/06.pdf.
 12. Мариничев, М. Б. Шадунц К.Ш., Маршалка А. Ю. Эффективные фундаментные конструкции в сложных грунтовых условиях // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. - №2. – С. 34 – 36.
 13. Маршалка О.Ю., Калугин В.А. Использование полной несущей способности свай СФА // Научное творчество молодежи – шаг в будущее : материалы II Межрегион. науч.- практ. Конф. Студентов, аспирантов и молодых ученых. – Анапа, 2012 – С. 212-213.
 14. Lade P.V. Overview and evaluation of constitutive models // Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection and Calibration. Ed. J.A. Yamamoto, V.N. Kalyakin. – American Society of Civil Engineers, 2005. – Vol.128. –98 P.
 15. Б.Н. Исаев и др. Опыт возведения свайных фундаментов из буроинъекционных свай на неоднородном основании при строительстве 17 этажного жилого дома в Ростове-на-Дону // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2145.
 16. Чмшкян А.В. Взаимодействие конического штампа с неоднородным основанием // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1391.
-

References

1. Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I. Sovremennye svajnye tehnologii: ucheb. Posobie [Modern pile technology: training manual]. R.A. Mangushev, 2-e izd. pererab. i dop. M.: ASV, 2010. 240 p.
2. Dzhanimirov H.A., Rytov S.A., Judovich B.Je. Novejshie geotekhnicheskie tehnologii, konstrukcii i materialy [Latest geotechnical technologies, structures and materials]. NIIOSP. 70 let. Trudy instituta, 2001. pp. 45-52.
3. Rytov S.A. Jeffektivnye sovremennye tehnologii ustrojstva buroinekcionnyh svaj i gruntovyh inekcionnyh ankerov. Zhurnal gosudarstvennogo uchrezhdenija Moskovskoj oblasti «Mosoblgosjeksperitiza» «Informacionnyj vestnik» № 1 (16). M., 2007 g. pp. 17-24.
4. Baholdin B.V., Igon'kin N.T. Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov. 1978. - №3. pp. 13-16.
5. Vertynskij O. S.. Vestnik SGTU. Saratov: SGTU, 2006. № 4. Ch. I. pp.77-81.
6. Rekomendacii po primeneniju polyh konicheskikh svaj povyshennoj nesushhej sposobnosti. V razvitie trebovanij SNIp 2.02.03-85 "Svajnye fundamenty". Sost. A.A. Bartolomej, B.V. Baholdin, B.S. Judkov, A.B. Ponomarev, L.V. Sosnovskih; Perm. gos. tehn. universitet. Perm', 1995. 27 p.
7. GTS 2012 Analysis Manual. Part 1 Analysis Case. 2011. 254 p.
8. STB EN 14199-2009. Provedenie special'nyh geotekhnicheskikh rabot. Mikrosvai. Gosstandart respubliky Belarus', 2010. 56 p.
9. Rekomendacii po primeneniju buroinekcionnyh svaj [Recommendations for the use of CFA piles]. M.: NIIOSP im. Gersevanova. 2002. 19 p.
10. Rekomendacii po primeneniju buroinekcionnyh svaj [Recommendations for the use of CFA piles]. MOSKVA. 1984, 52 p.



11. Eshhenko O. Ju. Chernjavskij D. A. Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. № 94 (12). URL: ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/06.pdf.

12. Marinichev M.B., Shadunc K.Sh., Marshalka A. Ju.. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2013. №2. pp. 34 – 36.

13. Marshalka A. Ju., Kalugin V. A.. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi, shag v budushhee: materialy II Mezhrefion. nauch. prakt. Konf. Studentov, aspirantov i molodyh uchennyh. Anapa, 2012. pp. 212-213.

14. Lade P.V. Yamamuro Ed. J.A, Kalyakin V.N.. American Society of Civil Engineers, 2005. Vol.128. 98 P.

15. Isaev B.N. i dr. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4.URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2145.

16. Chmshkjan A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (part 2) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1391.