

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ГЕОТЕХНИКА ТЕРРИТОРИЙ

DOI 10.15593/2409-5125/2016.01.09

УДК 624.154.51

С.В. Пискотин, Р.И. Шенкман, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВОЙ СВАИ В ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Представлено исследование технологии улучшения свойств слабых водонасыщенных глинистых грунтов с использованием грунтовых свай (колонн) в оболочке из геосинтетического материала. Данная технология хорошо зарекомендовала себя в европейских странах при строительстве различных объектов в условиях слабых водонасыщенных глинистых грунтов. Актуальность исследования данной технологии обусловлена геологическими условиями Пермского края, на территории которого широко распространены глинистые грунты аллювиального происхождения. В статье рассматриваются вопросы применения данной технологии для улучшения оснований фундаментов зданий и сооружений. В данном случае, в соответствии с действующими нормами, наиболее важной задачей является определение деформаций основания. Представлены данные анализа существующих методик расчета деформаций основания, улучшенного грунтовыми сваями в оболочке из геосинтетического материала. Разработана методика расчета осадки одиночной грунтовой сваи в геосинтетической оболочке, которая учитывает работу самой геосинтетической оболочки и действительное напряженное состояние грунтового массива. В статье также представлены подходы к определению вертикальных деформаций фундамента на улучшенном основании. По результатам выполненного исследования сделаны выводы о возможности использования представленных выражений для расчета вертикальных деформаций улучшенного грунтового основания.

Ключевые слова: грунтовая свая, осадка, геосинтетическая оболочка, радикальные перемещения, напряженно-деформированное состояние.

С каждым годом возрастает необходимость строительства на грунтах с низкими деформативными характеристиками. Данные обстоятельства увеличивают спрос на применение технологий,

которые позволили бы обеспечить необходимую осадку для конкретного сооружения в сложных геологических условиях. Перспективной с данной точки зрения является технология применения грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов, которая хорошо себя зарекомендовала на различных строительных площадках мира именно в условиях слабых водонасыщенных грунтов (было успешно реализовано более 30 проектов в Германии, Швеции, Голландии, Польше и Бразилии) [11].

Сущность технологии заключается в устройстве скважины проектной глубины с последующим заполнением и уплотнением песчаного или щебеночного наполнителя, окруженного нетканым геосинтетическим материалом или георешеткой (геосинтетической оболочкой). Геосинтетическая оболочка предотвращает диффузию наполнителя с окружающим грунтом и препятствует поперечным деформациям наполнителя, тем самым обеспечивает постоянство деформационных характеристик исследуемой сваи. Пример технологии устройства сваи представлен на рис. 1.

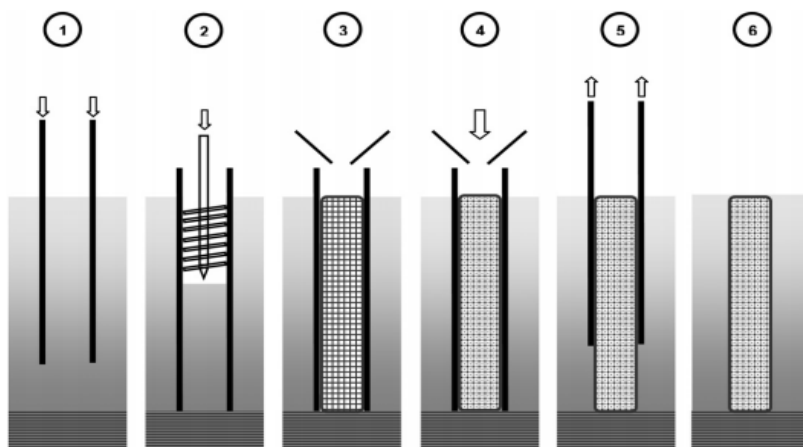


Рис. 1. Схема установки грунтовой сваи в оболочке из геосинтетического материала методом грунтозамещения: 1 – погружение обсадной трубы в грунт (возможно одновременно с бурением шнеком); 2 – выемка грунта из обсадной трубы шнеком; 3 – установка геосинтетической оболочки; 4 – заполнение оболочки щебнем; 5 – поднятие обсадной трубы с уплотнением материала заполнения; 6 – законченная свая

В большинстве случаев при исследованиях данной технологии рассматривается строительство различных земляных сооружений, насыпей, при этом грунтовыми сваями прорезается

вся толща слабых грунтов, т.е. концы свай опираются на прочные малосжимаемые грунты.

В своих работах мы рассматриваем применение данной технологии для строительства фундаментов зданий и сооружений. В данном случае оптимальным является внесение грунтовых свай в качестве жестких элементов в пределах сжимаемой толщи фундамента, т.е. по схеме «висячих» свай. В таком применении данная технология вполне может быть востребована, в малонагруженных зданиях, где применение бетонных свай экономически неэффективно [12, 13, 16, 17].

Анализ существующей научной литературы по данному направлению показал, что большинство исследований направлены на изучение усиления оснований насыпей с прорезкой всей толщи слабых грунтов (свай стойки) [6]. В. Pulko и В. Majes предложили аналитический метод для описания напряженно-деформированного состояния грунтового массива и грунтовой сваи-стойки в составе фундамента [4]. D. Alexiew и M. Raithel [5, 7] разработали метод расчета по определению изменения диаметра грунтовой сваи при ее нагружении.

Использование грунтовых колонн в геосинтетической оболочке в качестве «висячей сваи» может расширить спектр их применения. Но отсутствие методик расчета грунтовых колонн для таких условий затрудняет проектирование их и соответственно не способствует повышению интереса к ним.

У отечественных ученых необходимо выделить работы А.Н. Краева и Ю.А. Новикова [2, 8]. Данными учеными был представлен расчет висячей грунтовой сваи, но решение данной методики без натурных испытаний невозможно, что, конечно же, затрудняет ее применение. Другим важным недостатком является то, что большинство исследований направлены на рассмотрение одиночной сваи без учета их совместной работы в составе фундамента.

На первом этапе разработки методики расчета осадок грунтовой сваи необходимо рассмотреть деформацию одиночной висячей грунтовой сваи. Главной задачей является определение осадки грунтовой сваи под действием приложенной к ней нагрузки. Осадка исследуемой сваи будет состоять из двух составляющих:

$$S_{cv} = S_{cv1} + S_{cv2}, \quad (1)$$

где S_{cv1} – осадка, связанная с деформациями по боковой, торцевой поверхностям сваи, граничащим с грунтом, а также со сжимаемостью наполнителя грунтовой сваи; S_{cv2} – дополнительная осадка, связанная с особенностью грунтовой сваи, а именно с радиальными перемещениями геосинтетической оболочки, реализующимися при нагружении сваи.

Для определения осадки грунтовой сваи S_{cv1} за основу была взята методика определения напряженно-деформированного состояния свай глубокого заложения, разработанная З.Г. Тер-Мартиросяном, В.В. Сидоровым, П.В. Струниным [1]. Данная модель оценивает взаимодействия сваи с окружающим массивом грунта за счет определения усилий, реализующихся на боковой и торцевой поверхностях сваи, и определяет саму осадку сваи.

В данной модели рассматривается взаимодействие грунтовой сваи длиной L , диаметром $2R_{cv}$, расположенной внутри линейно-деформируемого массива грунта цилиндрической формы диаметром $2R_{gr}$. Величина передаваемого усилия на колонну равняется P . Расчетная модель представлена на рис. 2.

Для решения данной задачи необходимо рассмотреть элементарный слой и условие равновесия между нормальными напряжениями в стволе сваи и касательными напряжениями на ее боковой поверхности.

Оригинальное решение данной задачи дополняем функцией распределения касательных напряжений по боковой поверхности грунтовой сваи, которую мы получили путем аппроксимации экспериментальных данных, представленных в работах А.Н. Краева [2]:

$$\tau_{R_{cv}}(z) = \tau_0 \cdot e^{-\frac{z}{L}} + \tau_L \cdot \frac{z^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}} - \tau_0 \cdot \frac{z}{L} e^{-\frac{z}{L}}, \quad (2)$$

где τ_0 – касательное напряжение на боковой поверхности сваи в ее оголовке; τ_L – касательное напряжение на боковой поверхности сваи в уровне ее пяты.

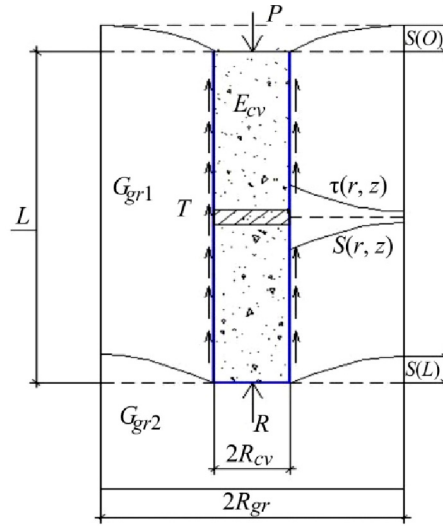


Рис. 2. Расчетная модель взаимодействия грунтовой сваи с окружающим грунтом

При нахождении осадки сваи неизвестными остаются величины касательных напряжений на оголовке τ_0 и в основании сваи τ_L , а также упругий отпор грунта R на нижнем конце сваи.

Учет сжимаемости ствола сваи выполняется на основании закона Гука:

$$\sigma(z) = E_{cv} \cdot \varepsilon_z = E_{cv} \cdot \frac{dS_z}{dz}, \quad (3)$$

где E_{cv} – модуль деформации наполнителя грунтовой сваи.

Для нахождения τ_0 , τ_L и R используем уравнение равновесия, равенство осадок грунта и сваи в уровнях оголовка и ее основания [1]:

$$\begin{cases} P = R + T, \\ S_{cv}(0) = S_{gr}(0), \\ S_{cv}(l) = S_{gr}(l). \end{cases} \quad (4)$$

Расчет осадки торца сваи рассчитывается из упругого решения задачи о внедрении круглого жесткого штампа в грунт с давлением σ_L на глубине, представленной в действующей нормативной литературе:

$$S_{cv}(L) = \frac{\sigma_L \cdot \pi \cdot R_{cv} \cdot (1 - v_{gr}) \cdot k_l \cdot \omega}{4 \cdot G_{gr}}, \quad (5)$$

где R_{cv} – радиус сваи; ω – коэффициент формы для круглого штамп.

Используя все представленные выше выражения, получаем систему уравнений для нахождения усилий, определяющих осадку грунтовой сваи:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_L &= \sigma_0 + \frac{2L}{5R_{cv}} \cdot [3\tau_L + 5\tau_0 \cdot e^{-1}], \\ \frac{\sigma_L \cdot (1 - v_{gr}) \cdot R_{cv} \cdot k_l \cdot \omega}{4 \cdot G_{gr}} &= \frac{\tau_L \cdot R_{cv}}{G_{gr}} \cdot \ln\left(\frac{R_{gr}}{R_{cv}}\right), \\ \frac{\sigma_0 \cdot (1 - v_{gr}) \cdot R_{cv} \cdot k_l \cdot \omega}{4G_{gr}} + \frac{L^2}{4R_{cv} \cdot E_{cv}} \times \\ &\times \left(3\tau_L + \tau_0 \cdot (24e^{-1} + 8) + \frac{4R_{cv} \cdot \sigma_L}{L} \right) = \frac{\tau_0 \cdot R_{cv}}{G_{gr}} \cdot \ln\left(\frac{R_{gr}}{R_{cv}}\right). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Решая систему уравнений, получим следующие выражения:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_L &= \frac{\tau_L \cdot \lambda_2}{\lambda_1}, \\ \tau_L &= \frac{10\sigma_0 \cdot (2L^2 \cdot (1 - 3e^{-1}) + \lambda_2 \cdot E_{cv} \cdot R_{cv})}{\frac{L^3}{R_{cv}} \cdot (24 - 57e^{-1}) + \frac{20L^2 \cdot \lambda_2}{\lambda_1} \cdot (1 - 2 \cdot e^{-1}) + 4L \cdot \lambda_2 \cdot E_{cv} \cdot (3 + 5 \cdot e^{-1}) + 10 \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1} \cdot E_{cv} \cdot R_{cv}}, \\ \tau_0 &= \frac{R_{cv} \cdot e}{2L} \cdot \left(-\sigma_0 + \tau_L \cdot \left(\frac{6L}{5R_{cv}} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \right), \\ S_{cv1} &= \sigma_L \cdot \lambda_1 + \frac{L^2}{4R_{cv} \cdot E_{cv}} \cdot \left(3\tau_L + \tau_0 \cdot (24e^{-1} + 8) + \frac{4R_{cv} \cdot \sigma_L}{L} \right), \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где E_{cv} – модуль деформации наполнителя грунтовой сваи; L – длина сваи; $\lambda_1 = \frac{\pi \cdot R_{cv} \cdot (1 - v_{gr}) \cdot k_l \cdot \omega}{4G_{gr}}$; $\lambda_2 = \frac{R_{cv}}{G_{gr}} \ln(R_{gr} / R_{cv})$.

Также была получена функция изменения вертикальных напряжений в грунтовой свае по ее длине:

$$\sigma_z = \sigma_L + \tau_L \cdot \frac{6}{5R_{cv}} \cdot \left(L - \frac{z^{\frac{5}{3}}}{\frac{2}{L^{\frac{5}{3}}}} \right) - \tau_0 \cdot \frac{2}{R_{cv}} \cdot \left(e^{-1} - e^{-\frac{z}{L}} \right). \quad (8)$$

Для определения дополнительной осадки грунтовой сваи S_{cv2} за основу была взята методика решения задачи Ляме о составных цилиндрах [10]. Основным отличием задачи Ляме от нашей постановки будет то, что внутренний полый цилиндр заменяется на геосинтетическую оболочку с жесткостью J_{geo} , которая подвержена воздействию внутреннего давления σ_{cv} . Для исследования был рассмотрен элементарный слой высотой dz . Расчетная схема задачи представлена на рис. 3.

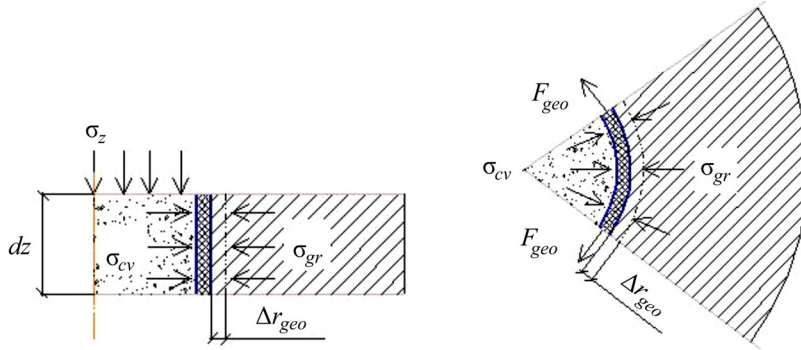


Рис. 3. Элементарный слой сваи толщиной dz

В данной модели предполагается, что после устройства грунтовой сваи в грунтовой массив радиальные напряжения в теле сваи от собственного веса наполнителя уравновешены радиальными напряжениями от собственного веса грунтового массива. Из данного допущения следует, что напряжения в геосинтетической оболочке при устройстве грунтовой сваи равны нулю. Радиальные перемещения геосинтетической оболочки возникают только тогда, когда к оголовку сваи прикладывают давление σ_z , которое провоцирует радиальное давление σ_{cv} , которое может быть получено из следующего соотношения:

$$\sigma_{cv} = \sigma_z \cdot \xi, \quad (9)$$

где ξ – коэффициент бокового давления $\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$.

Контактное давление p_k между оболочкой и грунтом запишем следующим образом:

$$p_k = \sigma_{cv} - \sigma_{geo}, \quad (10)$$

где σ_{geo} – горизонтальные напряжения в геосинтетической оболочке.

Величину горизонтальных напряжений на оболочку σ_{geo} можно определить из уравнения Лапласа для тонких цилиндрических оболочек:

$$\sigma_{geo} = \frac{F_{geo}}{r_{geo}}, \quad (11)$$

где r_{geo} – радиус геосинтетической оболочки; F_{geo} – растягивающие усилия в оболочке,

$$F_{geo} = J_{geo} \cdot \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}}. \quad (12)$$

Подробная схема определения данной составляющей осадки одиночной грунтовой сваи представлена в других работах авторов. Конечное значение осадки S_{cv2} определяется следующим соотношением:

$$S_{cv2} = \frac{\xi \cdot \beta}{2(E_{gr} \cdot r_{geo} + \beta \cdot J_{geo})} \cdot (4r_{geo} \cdot \sigma_L + \tau_0 \cdot (24 \cdot L \cdot e^{-1} - 8L) + 3L \cdot \tau_L) + \left[\frac{\xi \cdot \beta}{(\beta \cdot J_{geo} + E_{gr} \cdot r_{geo})} \right]^2 \cdot \left[L^3 \cdot \left(\tau_0^2 \cdot (1 - 5e^{-2}) + \frac{108\tau_L^2}{325} \right) + \right. \quad (13)$$

$$\left. + L \cdot (\tau_0 \cdot 2L \cdot e^{-1} + \tau_L \cdot \frac{6L}{5} + \sigma_L \cdot r_{geo})^2 + \frac{0,126}{\left(\frac{1}{L}\right)^3} \right],$$

где $\beta = \left(\frac{b^2 + r_{geo}^2}{b^2 - r_{geo}^2} + v_{gr} \right)$.

Для нахождения осадки фундамента на улучшенном основании предполагается упрощенная схема, основанная на итерационном методе расчета, и при условии отдельного рассмотрения напряженно-деформированного состояния грунтового массива и самой грунтовой сваи.

Осадку фундамента на улучшенном основании предлагается определять на основе классического метода послойного суммирования, представленного в действующей нормативной литературе. При этом осадка фундамента определяется от давления, действующего в слабом грунте с учетом внедрения свай улучшения, т.е. учитывается конечное распределение сжимающих напряжений в грунтовом массиве, достигнутое в консолидированном состоянии.

Для определения осадок необходимо определить распределение напряжений между грунтовой сваей и межсвайным пространством. Для решения этого вопроса предлагается прибегнуть к итерационному методу решения, т.е. задаться начальным распределением, определить для него осадку грунтовой сваи и межсвайного пространства. Основным граничным условием решения задачи является то, что осадка слабого грунта и грунтовой сваи должна быть одинаковой, т.е. при выполнении итераций необходимо найти распределение давлений, при котором равны осадки. Расчетная схема методики представлена на рис. 4.

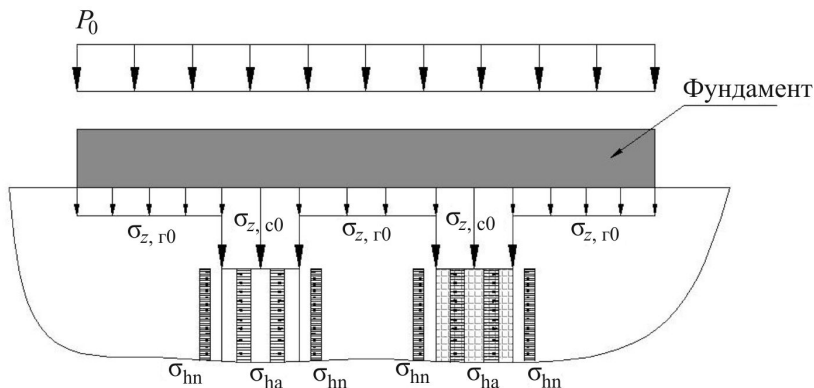


Рис. 4. Расчетная схема определения осадки столбчатого фундамента на улучшенном основании: $\sigma_{z,r0}$ – вертикальные сжимающие напряжения в слабом грунте межсвайного пространства в уровне подошвы фундамента; $\sigma_{z,c0}$ – вертикальные сжимающие напряжения в теле грунтовых свай в уровне подошвы фундамента; σ_{hn} – пассивное боковое давление окружающего грунта; σ_{ha} – активное давление грунта в теле свай

В первом приближении данное распределение принимается в соотношении $\sigma_{z,r0}/P_0 = 0,6$, где $\sigma_{z,r0}$ – вертикальные сжимающие напряжения в слабом грунте основания; P_0 – среднее давление по подошве фундамента. Данное соотношение принято на основе результатов экспериментальных исследований, результатов численного моделирования, а также рекомендаций, представленных в ЕВГЕО.

Расчет осадок слабого грунта выполняется по методу послойного суммирования, в соответствии с действующими нормами, из учета действия уплотняющего давления по подошве фундамента $\sigma_{z,r0}$. По результатам выполненных расчетов получается значение осадки фундамента S_r .

Для строительства фундаментов предлагается использовать наиболее жесткий вариант конструкции – это грунтовая свая из щебня в оболочке из высокомодульной сетки, ввиду этого величина осадки каждого из рассматриваемых слоев грунтовой сваи определяется из предположения постоянства ее объема (ввиду малой сжимаемости заполнителя по сравнению со слабым грунтом):

$$S_{ci} = \left(1 - \frac{r_0^2}{(r_0 + \Delta r_{0i})^2} \right) \cdot h_i, \quad (14)$$

где S_{ci} – вертикальные осадки рассматриваемого слоя грунтовой сваи; r_0 – начальный радиус грунтовой сваи; Δr_{0i} – изменение радиуса грунтовой сваи; h_i – высота рассматриваемого слоя.

К данной осадке также можно добавить осадку, связанную с уплотнением материала сваи.

Для расчета осадки грунтовой сваи она разбивается на слои по аналогии с межсвайным пространством при расчете методом послойного суммирования.

Поскольку материал обертывания упругий, растягивающие усилия в оболочке F_i можно определить по следующему соотношению:

$$F_i = \frac{\Delta r_{0i}}{r_0} J, \quad (15)$$

где J – осевая жесткость материала оболочки, кН/м.

Величину горизонтальных напряжений, действующих на оболочку σ_{hi} , можно определить из уравнения Лапласа для тонких цилиндрических оболочек:

$$\sigma_{hi} = F_i / r_0. \quad (16)$$

В то же время величина горизонтального давления на оболочку каркаса численно равна разнице между горизонтальным давлением, действующим в грунтовой свае, и боковым давлением окружающего массива слабого грунта:

$$\sigma_{hi} = K_a \sigma_{zc.i} - K_{\pi} \sigma_{zr.i}, \quad (17)$$

где K_a – коэффициент активного давления грунта, $K_a = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$; K_{π} – коэффициент бокового давления грунта покоя (слабого грунта), $K_{\pi} = 1 - \sin\varphi$.

Из уравнений (2)–(4) можно выразить величину радиальной деформации грунтовой сваи:

$$\Delta r_s = \frac{(K_a \sigma_{zc.i} - K_{\pi} \sigma_{zr.i}) r_0^2}{J}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (14), можно определить осадку рассматриваемого слоя грунтовой сваи, также к ней нужно добавить осадку, обусловленную сжимаемостью материала заполнения, которая будет зависеть от его деформационных характеристик, а также технологии изготовления.

В заключение следует определить распределение вертикальных напряжений в теле грунтовой сваи, которое будет отличаться от данных, представленных в нормативной литературе. Для этого предлагается использовать выражение (8), полученное при рассмотрении напряженно-деформированного состояния одиночной грунтовой сваи.

Подробно каждый аспект данной методики рассмотрен в других научных работах авторов [9, 14, 15]. Представленные методики расчета имеют хорошую сходимость с данными численного моделирования тестовых задач в программных комплексах Plaxis 2d, 3d, а также имеющимися экспериментальными данными других авторов.

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. Приведенная методика улучшения слабых глинистых грунтов обладает значительной актуальностью для применения ее на территории Пермского края.

2. На данный момент нет апробированных и утвержденных методик расчета деформации улучшенного по данной методике основания фундаментов здания сооружений.

3. Представленные методики расчета и выражения позволяют описать напряженно-деформированное состояние одиночной грунтовой сваи, а также определить осадку фундамента на улучшенном основании.

Библиографический список

1. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В. Взаимодействие одиночной сваи с однородным слоем грунта ограниченного размера // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. тр. 15-й междунар. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, асп. и докторантов. – М., 2012. – С. 115–117.

2. Краев А.Н. Экспериментально-теоретическое обоснование использования песчаной армированной сваи в водонасыщенных глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук / Тюмен. гос. арх.-строит. ун-т. – Тюмень, 2009. – 182 с.

3. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 488 с.

4. Pulko B., Majes B. Analytical method for the analysis of stone-columns according to the Rowe dilatancy theory // Acta geotechnical Slovenica. – 2006. – № 1. – С. 37–45.

5. Alexiew D., Raithel M. 15 years of experience with geotextile encased granular columns as foundation system // ISSMGE – TC 211. International Symposium on Ground Improvement IS-GI. – Brussels, 2012. – Vol. IV–3.

6. Kempfert H., Gebreselassie B. Excavations and Foundations in Soft Soil. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 591 с.

7. Raithel M., Alexiew D., Kuster V. Loading test on a group of geotextile encased columns and analysis of the bearing and deformation behaviour and global stability // Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control. – Wologong, 2012. – P. 703–708.

8. Новиков Ю.А., Набоков А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния водонасыщенного глинистого основания, усиленного песчаными армированными по контуру сваями под ленточным фундаментом // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3(44). – С. 133–137.

9. Пискотин С.В. Разработка аналитического решения по определению НДС грунтовой сваи в составе фундамента // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам VIII науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых с междунар. участием): в 2 т. / отв. ред. П.А. Белкин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2015. – Т. 2. – 432 с.

10. Практические расчеты на прочность конструктивных элементов: учеб. пособие / А.Г. Дибир, О.В. Макаров, Н.И. Пекельный, Г.И. Юдин; Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». – Харьков, 2007. – Ч. 1. – 102 с.

11. Пономарев А.Б., Кислов С.М. Исследование несущей способности грунтовой сваи в оболочке из геосинтетической решетки // Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Архангельск, 2003.

12. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Исследование эффективности применения грунтовых свай для улучшения слабых грунтов // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 89–94.

13. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Подбор геосинтетической оболочки для грунтовых свай и их эффективность применения в геологических условиях г. Перми // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 1 (36). – С. 82–89.

14. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Полунатурные экспериментальные исследования грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 1 (42). – С. 54–60.

15. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Планирование крупномасштабного моделирования фундаментов на основании, улучшенном грунтовыми сваями в оболочке из геосинтетических материалов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск, 2015. – С. 301–308.

16. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б. Применение грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов в геологических условиях г. Перми для возведения фундаментов зданий и сооружений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 2. – С. 28–36.

17. Татьянников Д.А., Клевекко В.И., Пономарев А.Б. Анализ работы армированного песчаного основания на основе штамповых модельных испытаний // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 4. – С. 92–103.

References

1. Ter-Martirosyan Z.G., Strunin P.V. Vzaimodejstvie odinochnoj svai s odnorodnym sloem grunta ogranichenogo razmera [Interaction of single pile with a uniform layer of soil of limited size]. *Sbornik trudov 15-j mezhdunarodnoj mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i doktorantov «Stroitel'stvo – formirovanie sredej zhiznedeyatel'nosti»*. Moscow, 2012, pp. 115–117.

2. Kraev A.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe obosnovanie ispol'zovaniya peschanoj armirovannoj svai v vodonasyschennykh glinistykh gruntakh [Experimentally-theoretical substantiation of sand reinforced piles in saturated clay soils]. Thesis of doctor's degree dissertation. Tyumen, 2009. 182 p.

3. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2005. 488 p.

4. Pulko B., Majes B. Analytical metod for the analysis of stone-columns according to the Rowe dilatancy theory. *Acta geotechnical Slovenica*, 2006, no. 1, pp. 37–45.

5. Alexiew D., Raithel M. 15 years of experience with geotextile encased granular columns as foundation system. *ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI*. Brussels, 2012. Vol. IV–3.

6. Kempfert H., Gebreselassie B. *Excavations and Foundations in Soft Soil*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 591 p.

7. Raithel M. Loading test on a group of geotextile encased columns and analysis of the bearing and deformation behaviour and global stability. *Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control*. Wologong, 2012, pp. 703–708.

8. Novikov A.U., Nabokov A.V. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vodonasyshchennogo glinistogo osnovaniya, usilennogo peschanyimi armirovannymi po konturu svayami pod lentochnym fundamentom [A study of stress-strain state of the water-saturated clay foundation reinforced sand reinforced along the contour of a strip foundation piles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2014, no. 3(44), pp. 133–137.

9. Piskotin S.V. Razrabotka analiticheskogo resheniya po opredeleniyu NDS gruntovoj svai v sostave fundamenta [Development of analytical solutions to determine the stress state of a soil pile as a part of the basement]. *Geologiya v razvivayushchemsya mire*, 2015. Vol. 2. 432 p.

10. Dibir A.G., Makarov O.V., Pekelnij N.I., Yudin G.I. Prakticheskiye raschety na prochnost' konstruktivnykh elementov [Practical calculations on the strength of structural elements]. Kharkov, 2007. 102 p.

11. Ponomarev A.B., Kislov S.M. Issledovanie nesushchej sposobnosti gruntovoj svai v obolochke iz geosinteticheskoy reshetki [Research the carrying capacity of a dirt pile in the shell of geosynthetic]. *Proceedings of the international scientific-practical conference "Opyt stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy i sooruzhenij na slabykh gruntakh"*. Arkhangelsk, 2003.

12. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. Issledovanie effektivnosti primeneniya gruntovykh svaj dlya uluchsheniya slabykh gruntov [Study the effectiveness of geotextile encased soil piles for improving soft ground]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 89–94.

13. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. Podbor geosinteticheskoy obolochki dlya gruntovykh svaj i ikh effektivnost' primeneniya v geologicheskikh usloviyakh g. Permi [Selection of geosynthetic membranes for road driving and effectiveness of the geological conditions in the city of Perm]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2013, no. 1 (36), pp. 82–89.

14. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. Polunaturnye eksperimental'nye issledovaniya gruntovykh svaj v obolochke iz geosinteticheskikh materialov [Experimental studies of geotextile encased soil piles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2014, no. 1, pp. 54–60.

15. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. Planirovanie krupnomasshtabnogo modelirovaniya fundamentov na osnovanii, uluchshennom gruntovymi svayami v obolochke iz geosinteticheskikh materialov [Planning of large-scale experiments on the ground, improved by geotextile encased stone columns]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii»*. Novocherkassk, 2015, pp. 301–308.

16. Shankman R.I., Ponomarev A.B. Primenenie gruntovykh svaj v obolochke iz geosinteticheskikh materialov v geologicheskikh usloviyakh g. Permi dlya vozvedeniya fundamentov zdaniy i sooruzhenij [Application of soil piles in the shell of geosynthetics in Perm geological conditions for the construction of the foundations of buildings and structures]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 2, pp. 28–36.

17. Tatyannikov D.A., Klimenko V.I., Ponomarev A.B. Analiz raboty armirovanogo peschanogo osnovaniya na osnove shtampovykh model'nykh ispytaniy [Analysis of the reinforced sand foundation on the basis of die model tests]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 4, pp. 92–103.

Получено 4.11.15

S. Piskotin, R. Shenkman, A. Ponomarev

METHOD OF DEFORMATION CALCULATION IN GEOTEXTILE ENCASED SOIL COLUMN

The paper presents the study of technology which improves weak clay soils with geotextile encased stone piles (columns). This technology is well proven in European countries in the construction of various facilities in a weak water-saturated clay soils. The relevance of studying this technology is caused by the geological conditions of Perm region, where clay soils of alluvial origin are widespread. The paper addresses the application of this technology for improving foundations of buildings and structures. In this case the most important task is to determine the deformation of a base in accordance with regulations. The paper presents the analysis of the existing calculation methods of stress-strain state for the improved basements of foundations. Also, it presents the developed calculation method of deformations in single geotextile encased soil column, which encompasses the work of the geosynthetic membrane. The paper also presents the approaches to determining vertical deformation of the foundation on an improved basis. The authors made conclusions about the possibility of using the expressions presented for calculating the vertical deformation of the improved subgrade.

Keywords: soil column, deformations, geosynthetic membrane, radial displacement, stress-strain state.

Пискотин Сергей Викторович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: psvdpm-03@mail.ru).

Шенкман Роман Игоревич (Пермь, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: rshen@list.ru).

Пономарев Андрей Будимирович (Пермь, Россия) – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: spstf@pstu.ru).

Piskotin Sergej (Perm, Russian Federation) – Master student of the Department “Building production and geotechnics”, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: psvdpm-03@mail.ru).

Shenkman Roman (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Assistant of the Department “Building production and geotechnics”, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: rshen@list.ru).

Ponomarev Andrej (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technics, Professor, Head of Department “Building production and geotechnics”, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: spstf@pstu.ru).