УДК 624.151.1

З.Г. Тер-Мартirosян, В.В. Сидоров, П.В. Струнин

Московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ - СВАЙ И БАРРЕТ

Количественная оценка взаимодействия фундамента глубокого заложения (ФГЗ) с окружающим грунтом в настоящее время недостаточно развита, так как в решениях не учитываются упруго-пластическое поведение грунта и сжимаемость самого тела ФГЗ, не реализована возможность определения и учета локальных участков предельного напряженного состояния, а также перераспределение касательных напряжений на поверхности элементов фундамента.

В настоящей работе предлагается решение задач о взаимодействии ФГЗ с окружающим грунтом с учетом указанных факторов на основе новой геомеханической модели грунтового массива ограниченных размеров в виде цилиндра (для свай) и призмы (для барреты) заданных размеров в зависимости от инженерно-геологических условий, размеров элементов ФГЗ и их шага.

Ключевые слова: жесткость фундамента, геомеханическая модель, баррета, зона предельного равновесия, касательные напряжения, массив ограниченных размеров.

Z.G. Ter-Martirosyan, V.V. Sidorov, P.V. Strunin

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

THEORETICAL BASES OF DEEP PILE AND BARRETTE FOUNDATIONS

Quantitative evaluation of influence between deep foundation and surrounding soil is not enough developed today because elastic-plastic behavior, compressibility of foundation material are not available for determination. And there are no answers in existing solutions how to determine and take into account a local zones of limit stress state along the deep foundation surface and redistribution of shear stress on it.

This paper propose a solution of influence between deep foundation and surrounding soil problem with all aforementioned factors based on new geomechanical model of limited dimensions soil massive in the form of cylinder (for pile) and prism (for barrette) depending on geological situation, dimensions of deep foundation elements and its pitch.

Keywords: foundation rigidity, geomechanical model, barrette, limit equilibrium zone, shear stress, limited dimension massive.

Известно, что взаимодействие ФГЗ с окружающим грунтом носит сложный пространственно-временной характер и связано с возникновением неоднородного напряженно-деформированного состояния (НДС) как в окружающем грунте, так и в ФГЗ.

При рассмотрении вопроса взаимодействия свай с окружающим грунтом традиционным решением такой задачи является использование решения Миндлина о силе, приложенной внутри полупространства. Этот подход имеет определенные недостатки, так как связан с интегрированием сложных функций по поверхности свай, что не всегда удается. Также он не всегда соответствует реальным условиям взаимодействия свай с окружающим грунтом, особенно в составе свайно-плитного фундамента. В предложенной расчетной геомеханической модели [3] рассматривается взаимодействие сваи с массивом ограниченных размеров (рис. 1) [1].

Рис. 1. Геомеханическая модель грунтового массива ограниченных размеров, взаимодействующего с ФГЗ

В этом случае при взаимодействии сваи с окружающим грунтом осуществляется телескопический механизм, в котором преобладают касательные напряжения. Перемещения окружающего грунта затухают на радиусе влияния, равном $(5 - 6)d$.

1. НДС длинной сваи, взаимодействующей с окружающим грунтом.

В данной модели рассматривается взаимодействие сваи длиной l , диаметром $2a$, расположенной внутри линейно-деформируемого массива грунта цилиндрической формы диаметром $2b$ и длиной $L > l$. (см. рис 1). Величина передаваемого усилия на сваю равняется N .

Решение рассматривается в условиях осевой симметрии, полагая, что свая обладает сжимаемостью ($E_{св} \approx E_{гр}$). Помещаем начало координат на уровне пяты сваи и направляем ось z вверх. Для определения усилий, возникающих в контактной зоне сваи, выделяем элементарный слой сваи и рассматриваем условие равновесия между нормальными напряжениями в стволе сваи и касательными напряжениями на ее боковой поверхности [2]:

$$\pi a^2 \sigma_z - \pi a^2 (\sigma_z - d\sigma_z) = 2\pi a \tau_a(z) dz. \quad (1)$$

Функция распределения касательных напряжений в грунте определяется следующей зависимостью:

$$\tau(z, r) = \frac{\tau_a(z)a}{r}, \quad (2)$$

где $\tau_a(z)$ – касательное напряжение боковой поверхности сваи, $a < r < b$.

При этом закон изменения касательных напряжений по глубине в первом приближении принят линейным, изменяющимся следующим образом:

$$\tau_a(z) = \tau_0 + \frac{\tau_l - \tau_0}{l} z, \quad (3)$$

где τ_0 – касательное напряжение на боковой поверхности сваи в уровне ее основания, τ_l – касательное напряжение на боковой поверхности сваи в уровне ее оголовка.

Согласно [3] для угловой деформации можно записать следующее выражение:

$$\gamma(z, r) = \frac{dS(z, r)}{dr} = -\frac{\tau(z, r)}{G}, \quad (4)$$

где G – модуль сдвига грунта.

Определим перемещение сваи от действия сил на ее боковой поверхности.

Проведя необходимые преобразования, можно получить выражение для осадки длинной сваи, радиусом a в грунтовом цилиндре радиусом b :

$$S(r, z) = -\frac{\tau_a(z) \cdot a}{G_{\text{гр}}} \ln(r) + C. \quad (5)$$

Постоянную интегрирования C , находим из граничного условия равенства нулю перемещений массива грунта на внешней границе.

Общий вид выражения осадки сваи в грунтовом цилиндре имеет вид

$$S(r, z) = \frac{\tau_a(z) \cdot a}{G_{\text{гр}}} \ln(b / r). \quad (6)$$

Тогда выражение для осадки сваи и распределения касательных напряжений на границе сваи ($r = a$) примет следующий вид:

$$S(a, z) = \frac{\tau_a(z) \cdot a}{G_{\text{гр}}} \ln(b / a), \quad (7)$$

$$\tau_a(z) = \frac{G_{\text{гр}}}{a} \frac{S(a, z)}{\ln(b / a)}. \quad (8)$$

При нахождении осадки сваи неизвестными остаются величины касательных напряжений на уровне оголовка – τ_0 и пяты сваи – τ_l , а также упругий отпор грунта R в основании сваи.

Учет сжимаемости ствола сваи можно учесть на основании закона Гука:

$$\sigma(z) = E_{\text{св}} \cdot \varepsilon_z = E_{\text{св}} \frac{dS_z}{dz}, \quad (9)$$

где $E_{\text{св}}$ – модуль деформации сваи.

Для нахождения неизвестных выражений усилий отпора на нижнем конце сваи R и касательных сил на боковой поверхности T используем уравнение равновесия, равенство осадок грунта и сваи в уровнях оголовка и ее основания:

$$\begin{cases} N = R + T, \\ S_{\text{св}}(0) = S_{\text{гр}}(0), \\ S_{\text{св}}(l) = S_{\text{гр}}(l). \end{cases} \quad (10)$$

При этом величину осадки сваи под нижним концом определяем из предположения, что поведение грунта в основании сваи схоже с поведением грунта под жестким круглым штампом на соответствующей глубине от нагрузки $R = \sigma_0 \cdot \pi a^2$. Решение такой задачи известно и имеет вид [4]:

$$S_{\text{св}}(0) = \frac{\sigma_0 \cdot \pi a (1 - \nu_{\text{гр}}) k_l \cdot \omega}{4G_{\text{гр}}} = \sigma_0 \cdot C_1, \quad (11)$$

где $k_l \leq 1$ – коэффициент, зависящий от глубины приложения нагрузки на штамп; σ_0 – напряжения в свае в уровне ее подошвы; a – радиус сваи, ω – коэффициент формы для круглого штампа.

При этом усилие на боковой поверхности сваи определяется следующим выражением:

$$T = 2\pi \cdot a \cdot l \left(\frac{\tau_l + \tau_0}{2} \right). \quad (12)$$

Подставив неизвестные величины, получаем систему уравнений для нахождения усилий, определяющих осадку сваи.

После выполненных преобразований находим выражения для неизвестных величин:

$$\begin{cases} \sigma_0 = \frac{\tau_0 \cdot C_2}{C_1}, \\ \tau_0 = \frac{\sigma_l \cdot \left(\frac{a}{l} - \frac{a \cdot l}{3a \cdot E_{\text{св}}} \right)}{\frac{l^2}{a \cdot E_{\text{св}}} - \frac{l^2}{3a \cdot E_{\text{св}}} \left(\frac{a}{l} \frac{C_2}{C_1} + 2 \right) + \frac{l}{E_{\text{св}}} \frac{C_2}{C_1} + C_2 + \left(\frac{a}{l} \frac{C_2}{C_1} + 1 \right)}, \\ \tau_l = \sigma_l \cdot \frac{a}{l} - \tau_0 \frac{C_2}{C_1} \frac{l}{E_{\text{св}}}, \\ S_{\text{св}} = \sigma_0 \cdot C_1 + \frac{1}{E_{\text{св}}} \left(\frac{\tau_0 l^2}{a} + \frac{l^2}{3 \cdot a} \cdot \left(\frac{\tau_l - \tau_0}{\tau_l} \right) + \sigma_0 l \right), \end{cases} \quad (13)$$

где τ_0 – касательное напряжение на боковой поверхности сваи на уровне ее основания; τ_l – касательное напряжение на боковой поверхности сваи на уровне ее оголовка; σ_0 – напряжения в свае на

уровне ее основания; σ_l – напряжения в свае на уровне ее оголовка; $S_{св}$ – осадка сваи; $E_{св}$ – модуль деформации сваи; l – длина сваи; $C_1 = \frac{\pi \cdot a(1 - \nu_{гр})k_l \cdot \omega}{4G_{гр}}$; $C_2 = \frac{a}{G_{гр}} \ln(b/a)$, $k_l \leq 1$ – коэффициент, учитывающий глубину приложения нагрузки на штамп; $G_{гр}$ – модуль сдвига грунта; ω – коэффициент формы для круглого штампа.

Предложенное аналитическое решение позволяет учесть влияние жесткости сваи на ее деформирование под нагрузкой, а также на распределение усилий, возникающих в ней.

Полученные выше выражения для нахождения компонент НДС массива грунта и сваи при их взаимодействии могут быть распространены на более сложный случай неоднородного грунтового массива, соответствующий расчетной схеме на рис. 2.

Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия длинной сваи с неоднородным грунтовым массивом

В этом случае необходимо учитывать тот факт, что при взаимодействии с различными грунтами по боковой поверхности сваи будут иметь место различные касательные напряжения, как и различные модули сдвига G . В итоге задача осложняется наличием дополнительных неизвестных, которые также можно найти, используя предложенную систему уравнений

$$\begin{cases} N = R + T_1 + T_2, \\ S_{\text{св}}(0) = S_{\text{гр}}(0), \\ S_{\text{св}}(l_1) = S_{\text{гр}}(l_1), \\ S_{\text{св}}(l_2) = S_{\text{гр}}(l_2). \end{cases} \quad (14)$$

Представленная система уравнений состоит из уравнения равновесия, выражения равенства осадок грунта и сваи в уровнях оголовка, границы раздела слоев и в основании сваи.

2. НДС барреты, взаимодействующая с окружающим грунтом.

В настоящее время в связи со значительным увеличением передаваемых на основание нагрузок при строительстве высотных и уникальных зданий набирают популярность фундаменты глубокого заложения в виде баррет. Являясь разновидностью свай, они имеют прямоугольное поперечное сечение большой площади (размерами 0,8×1,8, 1,5×3 и др.), а следовательно, и огромную боковую поверхность, что позволяет одному элементу нести колоссальные нагрузки. Причем их форма позволяет располагать барреты в плане в наиболее выгодных направлениях (под несущие стены ядер жесткости, под сильнонагруженные колонны и пилоны).

Для решения задачи о взаимодействии грунтового массива с барретами большой длины по аналогии со сваями была предложена новая геомеханическая модель, включающая баррету и массив грунта ограниченного размера прямоугольного сечения. Эта модель учитывает, что в силу своей формы баррета при взаимодействии с грунтом будет вовлекать в работу различный объем грунта в двух направлениях (рис. 3) [7].

В связи с этими особенностями выражения для расчета свай не могут быть использованы для баррет. При решении задачи о взаимодействии одиночной барреты с массивом грунта ограниченного размера можно получить выражение для осадки барреты, соответствующей уровню касательных напряжений на контакте «баррета-грунт»:

$$S_{\text{бок}}^{\text{общ}} = k_1 \frac{\tau \cdot a}{G \tan \alpha} \ln \left(\frac{a + (B - b) \tan \alpha}{a} \right) + k_2 \frac{\tau \cdot b}{G \tan \beta} \ln \left(\frac{b + (A - a) \tan \beta}{b} \right), \quad (15)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, равные суммарной доле (от единицы) в осадке меньших и больших сторон соответственно.

Рис. 3. Расчетная схема взаимодействия одиночной длинной барреты с однородным массивом грунта ограниченных размеров ($2A \times 2B$)

В то же время осадку барреты на каждом уровне по длине ствола можно выразить следующим образом:

$$S_6(z) = \int \frac{\sigma_z}{E} dz = \frac{\tau_0}{E} \left(\frac{a+b}{ab} \right) \frac{z^2}{2} + \frac{(a+b)(\tau_l - \tau_0)}{ab \cdot E \cdot l} \frac{z^3}{6} + \frac{\sigma_0 \cdot z}{E} + D. \quad (16)$$

Неизвестную константу D можно найти из граничного условия равенства перемещения ствола барреты и грунта на уровне нижнего конца:

$$S_6(z) = \frac{\tau_0}{E} \left(\frac{a+b}{ab} \right) \frac{z^2}{2} + \frac{(a+b)}{ab} \frac{(\tau_l - \tau_0)}{E \cdot l} \frac{z^3}{6} + \frac{\sigma_0 \cdot z}{E} + \frac{\omega \cdot a \cdot \sigma_0 (1 - \nu) k(l)}{G}, \quad (17)$$

где E – модуль упругости материала барреты.

Зная, что осадка по боковой поверхности и по пяте барреты равна на каждом уровне по глубине, а также имея уравнение равновесия, можно записать систему уравнений с тремя неизвестными σ_0, τ_0, τ_l :

$$\begin{cases} 4ab \cdot \sigma_l = 4ab \cdot \sigma_l + 4(a+b)l \left(\frac{\tau_l + \tau_0}{2} \right), \\ k1 \frac{\tau_0 \cdot a}{G \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left(\frac{a + (B-b) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{a} \right) + k2 \frac{\tau_0 \cdot b}{G \cdot \operatorname{tg} \beta} \ln \left(\frac{b + (A-a) \cdot \operatorname{tg} \beta}{b} \right) = \\ = \frac{\omega a \sigma_0 (1 - \nu) k(l)}{G}, \\ k1 \frac{\tau_l \cdot a}{G \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left(\frac{a + (B-b) \operatorname{tg} \alpha}{a} \right) + k2 \frac{\tau_l \cdot b}{G \operatorname{tg} \beta} \ln \left(\frac{b + (A-a) \operatorname{tg} \beta}{b} \right) = \\ = \frac{\tau_0}{E} \left(\frac{a+b}{ab} \right) \frac{l^2}{2} + \frac{(a+b)}{ab} \frac{(\tau_l - \tau_0)}{E \cdot l} \frac{l^3}{6} + \frac{\sigma_0 \cdot l}{E} + \frac{\omega \cdot a \cdot \sigma_0 (1 - \nu) k(l)}{G}, \end{cases} \quad (18)$$

где σ_0, τ_0, τ_l – нормальное напряжение на уровне пяты барреты, касательное напряжение по боковой поверхности на уровне пяты и оголовка барреты соответственно.

Так же, как и при рассмотрении свай, решение можно преобразовать для случая с неоднородным грунтовым массивом, что добавит задаче дополнительные неизвестные касательные напряжения в соответствующих слоях грунта. Используя выражение равенства перемещений массива грунта и ствола барреты на соответствующих уровнях по глубине от поверхности, можно составить необходимое количество уравнений для нахождения этих неизвестных.

3.Определение НДС свай и баррет с учетом возникновения зон предельного равновесия на боковой поверхности.

В соответствии с расчетной схемой (см. рис. 2) эпюра касательных напряжений имеет вид трапеции. Однако при больших нагрузках на ФГЗ возможен случай, когда на части ствола сваи или барреты возникают зоны предельного равновесия, что приводит к значительному перераспределению напряжений в фундаменте и массиве грунта. Величина этих зон и момент их появления в процессе нагружения зависят от прочностных параметров грунта, взаимодействующего с ФГЗ. В настоящее время решение данной задачи вызывает большие трудности среди геотехников, однако принимаются определенные допущения. Например, допущение о том, что напряжение на уровне пяты сваи равно нулю, что значительно упрощает решение, но применимо только для абсолютно жестких свай в условиях морского строительства [5]. Известно решение, основанное на заранее определенной величине перемещения сваи, при котором возникают предельные касательные напряжения до определенной глубины [6]. Допущение о том, что элемент ФГЗ работает упруго до полного исчерпания несущей способности по всей длине, а после вся нагрузка передается только на основание¹, не рассматривает случаи, когда не по всей длине сваи или барреты возникает предельное напряженное состояние, к тому же не учитывается жесткость ФГЗ.

Предлагаемый новый алгоритм решения задачи о взаимодействии одиночного элемента ФГЗ (сваи и барреты) с окружающим грунтом, обладающим прочностью, основан на рассмотрении нескольких типов расчетных схем, описывающих распределение внешней нагрузки между боковой поверхностью ФГЗ и его пятой [8].

С ростом внешней нагрузки в окружающем ФГЗ грунте происходят сдвиговые деформации, вызывающие рост касательных напряжений по его боковой поверхности – τ_{mob} . При этом касательные напряжения могут развиваться до определенного предельного значения – τ^* , вызывающего переход грунта из упругого состояния в пластическое. При этом дальнейший рост касательных напряжений сверх τ^* невозможен, поэтому нагрузка будет передаваться только на участки боковой поверхности ФГЗ, где предел прочности еще не достигнут, либо на пяту элемента.

¹ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. ОАО «НИЦ “Строительство”».

Процесс перераспределения напряжений между боковой поверхностью элемента ФГЗ и его пятой удобно представить в графическом виде (расчетной схемы). Для составления схемы необходимо решить задачу взаимодействия одиночного элемента с окружающим грунтом в линейной постановке (представлено выше), а затем привести ее результаты в соответствие с известным законом изменения прочности грунта по глубине массива грунта, в основе которого лежит известный закон Кулона:

$$\tau^* = \sigma(z) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (19)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта, град; c – сцепление грунта, кПа; τ^* – предельное касательное напряжение, кПа; $\sigma(z)$ – боковое напряжение в грунте на определенной глубине z , кПа.

Полученный из упругого решения закон распределения мобилизованного касательного напряжения (τ_{mob}) является линейным. Совместив эпюры τ_{mob} и τ^* , получим расчетную схему (рис. 4). При пересечении этих эпюр выделяются участки напряжений, которые способна выдерживать боковая поверхность ФГЗ (T_1 и T_2), участок напряжений, который не может воспринять верхняя часть элемента длиной $l1 - \Delta N$ и «резервную» часть нагрузки, которая не мобилизовалась на нижней части элемента длиной $l2 - T_2^{доп}$. При этом возникает реакция на уровне пяты ФГЗ – R .

Рис. 4. Расчетная схема взаимодействия одиночного элемента ФГЗ с грунтом, обладающим прочностью

В зависимости от прилагаемой внешней нагрузки P на элемент ФГЗ характер перераспределения нагрузок по боковой поверхности и пите меняется. Авторами предлагаются три варианта расчетных схем, представленных на рис. 5.

Рис. 5. Варианты расчетных схем при различных внешних нагрузках

При низком уровне внешней нагрузки вся боковая поверхность работает в упругом режиме, ни в одной точке не наблюдается достижения предельного касательного напряжения τ^* . В этом случае не выделяются нагрузки ΔN , $T_2^{\text{доп}}$, а сила по боковой поверхности элемента обозначается как T (рис. 5, а).

При среднем уровне нагрузки на элемент ФГЗ, при условии $\Delta N \leq T_2^{\text{доп}}$, вся дополнительная нагрузка воспринимается оставшейся боковой поверхностью сваи, и на основание дополнительная нагрузка не передается (рис. 5, б).

При высоком уровне нагрузки на элемент ФГЗ, при условии $\Delta N \leq T_2^{\text{доп}}$, на всей боковой поверхности сваи возникает предельная несущая способность и вся дополнительная нагрузка передается на основание (рис. 5, в).

В условиях высотного строительства наиболее используемой схемой будет третья, т.е. с высоким уровнем внешней нагрузки на сваю или баррету.

Коротко рассмотрим процесс передачи нагрузки по элементу и алгоритм определения ее осадки (в соответствии с рис. 5, в).

1. Определяется осадка S_1 от боковых усилий T_1 и T_2 . Данная осадка возникает во время возникновения на боковой поверхности касательных напряжений, не выходящих за пределы прочности грунта (упругая часть осадки). Перемещение баретты (сваи) произойдет от суммы величин T_1 и T_2 . Эти нагрузки есть сумма касательных напряжений по длине элемента ФГЗ.

2. Осадка S_2 возникает при передаче нагрузки ΔN на нижележащую часть ствола. Ее можно найти, приложив нагрузку ΔN на нижнюю часть барретты длиной l_2 . Необходимо заметить, что во время передачи нагрузки ΔN на нижнюю часть элемента происходит не только увеличение значения τ от τ_{bot} до τ'_{bot} , но и увеличение давления по пяте элемента ФГЗ от R до R' .

3. Так как «резервная» часть нагрузки $T_2^{\text{доп}} < \Delta N$, то величина, соответствующая их разнице, будет передаваться только на уровень пяты ФГЗ. При этом касательное напряжение по всей боковой поверхности не будет увеличиваться, так как оно достигло своего предельного значения τ^* .

Осадку S_3 можно определить по формуле для жесткого штампа с учетом его формы и глубины заложения от поверхности.

4. Осадка S_4 определяется сжатием ствола сваи или барретты, которая может быть определена исходя из закона Гука по формуле

$$\Delta l = \frac{l \cdot \Delta \sigma}{E_{\text{мат}}}, \quad (20)$$

где l – длина сваи или барретты; $\Delta \sigma$ – разница напряжений на оголовке сваи(баретты) и пяте; $E_{\text{мат}}$ – модуль деформации материала сваи (баретты).

Таким образом, осадку элемента ФГЗ можно определить с помощью суммирования найденных осадок:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (21)$$

Пошаговое решение поставленной задачи для различных нагрузок по приведенному новому алгоритму позволяет получить криволинейную зависимость «нагрузка-осадка», обусловленную постепенным развитием зоны предельного равновесия от поверхности по стволу ФГЗ (рис.6). При этом окружающий баррету грунтовый массив остается линейно деформируемым.

Рис. 6. Сравнение графиков осадок одиночной барretty, взаимодействующей с массивом грунта, обладающим прочностью, полученных аналитическим и численным методами (PLAXIS) с указанием зон предельного равновесия по результатам численного моделирования

Выводы

1. Представленная новая геомеханическая модель ФГЗ, взаимодействующего с массивом грунта ограниченных размеров, позволяет находить все компоненты НДС системы «ФГЗ-грунтовый массив» с учетом жесткости ствола элементов фундамента, что значительно

влияет на перераспределение напряжений в грунте, а, следовательно, и на конечную осадку фундамента.

2. При рассмотрении работы баррета в массиве грунта необходимо учитывать вовлечение в работу различного количества грунта по сторонам элемента ФГЗ, что приводит к совершенно отличным от случая свай результатам.

3. Предложен новый алгоритм определения и учета зоны предельного равновесия на части боковой поверхности ФГЗ при рассмотрении его взаимодействия с массивом грунта, обладающим прочностью. Пошаговое решение задачи с учетом нахождения этих зон позволяет учитывать перераспределение напряжений по стволу ФГЗ в процессе нагружения и получать реалистичную кривую «нагрузка-осадка», используя линейно-деформируемую модель грунта.

Библиографический список

1. Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Занг Нам. Взаимодействие свай большой длины с неоднородным массивом грунта // Вестник МГСУ. – М., 2008. – №2. – С. 3–14.
2. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В. Взаимодействие одиночной сваи с однородным слоем грунта ограниченного размера // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. тр. 15-й Международ. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и докторантов. – М., 2012. – С. 115–117.
3. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: АСВ, 2009. – 550 с.
4. Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения // Вестник МГСУ. – 2006. – №1. – С. 119–132.
5. Verruijt A. Offshore soil mechanics // Delft University of Technology. – Delft, 2006. – P. 68–81.
6. Yi-Chuan Chou, Yun-Mei Hsiung. A normalized equation of axially loaded piles in elasto-plastic soil // Journal of GeoEngineering. – 2009. – Vol. 4. – No.1. – P. 1–7.
7. Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В. Расчет осадок фундамента глубокого заложения с учетом его жесткости // Жилищное строительство. – 2010. – №5. – С. 36–38.

8. Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В., Струнин П.В. Расчет напряженно-деформированного состояния одиночной сжимаемой барреты и сваи при взаимодействии с массивом грунта // Жилищное строительство. – 2013. – №9. – С. 18–22.

References

1. Ter-Martirosyan Z.G., Nguen Z.N. Vzaimodejstvie svai bol'shoj dliny s neodnorodnym massivom grunta [Interaction of long piles with heterogeneous massiv of soil]. *Vestnik MGSU*. 2008, no. 2. pp.3-14.

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

3. Ter-Martirosyan Z.G. Mekhanika gruntov [Soil Mechanics]. Moscow: ASV, 2009. 550 s.

4. Doroshkevich N.M., Znamenskij V.V., Kudinov V.I. Inzhenernye metody rascheta svajnykh fundamentov pri razlichnykh skhemakh ikh nagruzeniya [Engineering methods of calculating pile foundations for different schemes of loading]. *Vestnik MGSU*, 2006, no. 1. pp.119-132.

5. Verruijt A. Verruijt A. Offshore soil mechanics. *Delft University of Technology*. Delft, 2006. pp. 68-81.

6. Yi-Chuan Chou, Yun-Mei Hsiung. A normalized equation of axially loaded piles in elasto-plastic soil. *Journal of GeoEngineering*, 2009, vol. 4, no. 1. pp. 1-7.

7. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V. Raschet osadok fundamenta glubokogo zalozheniya s uchetom ego zhestkosti [Calculation of settlement deep foundation on its stiffness]. *Zhilishhnoe Stroitel'stvo*, 2010, no. 5. pp. 36-38.

8. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Strunin P.V. Raschet naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya odinochnoj szhimaemoj barrety i svai pri vzaimodejstvii s massivom grunta [Calculation of the stress-strain state of a single compressible Barrett piles when interacting with an massiv of soil]. *Zhilishhnoe Stroitel'stvo*, 2013, no. 9. pp.18-22.

Об авторах

Тер-Мартirosян Завен Григорьевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Механика грунтов и

геотехника» Московского государственного строительного университета; e-mail: mgroif@mail.ru

Сидоров Виталий Валентинович (Москва, Россия) – старший преподаватель кафедры «Механика грунтов и геотехника» Московского государственного строительного университета; e-mail: vitsid@mail.ru

Струнин Павел Владимирович (Москва, Россия) – ассистент кафедры «Механика грунтов и геотехника» Московского государственного строительного университета; e-mail: spv-dpm03@mail.ru

About the authors

Ter-Martirosjan Zaven Grigorievich (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Science, Chair of Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering; e-mail: mgroif@mail.ru

Sidorov Vitalii Valentinovich (Moscow, Russian Federation) – Assistant+Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering; e-mail: vitsid@mail.ru

Strunin Pavel Vladimirovich (Moscow, Russian Federation) – Assistant Lecturer, Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering; e-mail: spv-dpm03@mail.ru

Получено 01.04.2014