УДК 624.131.23

Ф.Г. Габибов

Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства
и архитектуры, Баку, Азербайджан

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ СИЛ НЕГАТИВНОГО ТРЕНИЯ ПРИ УСТРОЙСТВЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ

Рассмотрены новые технические решения для устранения сил негативного трения при устройстве свайных фундаментов на просадочных грунтах. В этих технических решениях используются: эффекты уменьшения сил трения путем придания поверхности сваи максимально возможной гладкости; вращательный срыв избыточного сцепления поверхности сваи с грунтом; эластичные перекатывающиеся элементы; прослойки из отходов (гумбрин).

Ключевые слова: фундамент, свая, негативное трение, просадка, поверхность, отход, гумбрин, перекатывание, прослойка, грунт, техническое решение.

F.G. Gabibov

Azerbaijan Scientific Research Institute of Building and Architecture,
Baku, Azerbaijan

WORKING OUT NEW TECHNICAL SOLUTIONS TO ELIMINATE FORCES OF NEGATIVE FRICTION WHILE SETTING PILE FON- DATIONS IN SUBSIDING SOILS

They considered new technical solutions to eliminate forces of negative friction while setting pile foundations in subsiding soils. In these technical solutions they used: effects of decreasing of forces of negative friction by giving the surface of pile extreme smoothness; revolving frustration of redundant cohesion between surface of a pile and the ground; using elastic rolling elements; layers of wastes (gumbrine).

Keywords: foundation, pile, negative, friction, subsiding, surface, waste, gumbrine, rolling, layer, soil, technical, solution.

Современные темпы строительства ставят перед инженерами проблемы освоения ранее не застроенных свободных территорий, которые часто бывают, сложены структурно-неустойчивыми грунтами. К таким грунтам относятся лессовые просадочные грунты, которые при обводнении неравномерно оседают. Строительство на этих грунтах создает

для строителей большие проблемы и любые инженерные разработки, связанные с предотвращением просадочных деформаций грунтов или безаварийным восприятием их являются актуальными.

Анализ имевших место случаев повышенных и неравномерных осадок свайных фундаментов показывает, что основной причиной является переоценка эффективности применения и несущей способности свай вследствие недостаточно полного учета особенностей их взаимодействия с просадочными грунтами при их замачивании. На грунтовых площадках II типа по просадочности в большинстве случаев недостаточно учитывались дополнительные нагрузки, которые передаются на сваи за счет сил негативного (отрицательного, нагружающего) трения, возникающие при просадках окружающих грунтов от их собственного веса.

Ужесточение требований по проектированию на просадочных грунтах свайных фундаментов способствует более широкому внедрению новых конструкций и технологий устройства свайных фундаментов взамен морально устаревших. Такими новыми разработками для лессовых просадочных грунтов II типа просадочности являются забивные составные сваи с антифрикционными обмазками и в эластичных оболочках; буронабивные сваи в эластичных оболочках и с уширениями, полученными встраиванием жесткого материала в дно скважины; набивные сваи в уплотненном грунтовыми сваями грунте; забивные сваи в грунте, уплотненном дозированным замачиванием и другими [1].

Условие равновесия сваи, нагруженной силами негативного трения, на конечной стадии развития деформации просадки сваи и окружающего грунта можно выразить по формулой [2]:

$$P = R_{\text{общ}} + u \int_{z_0}^{\ell} f_z dz - u \int_0^{z_0} f_{\text{нег.}z} dz, \quad (1)$$

где P – нагрузка на сваю; $R_{\text{общ}}$ – суммарное сопротивление грунта под нижним концом сваи; u – периметр поперечного сечения сваи; l – длина сваи; f_z – положительное трение; $f_{\text{нег.}z}$ – негативное трение; z_0 – глубина толщи, на которой негативное трение отсутствует.

Глубина z_0 в просадочной толще определяется в зависимости от внешних нагрузок и физико-механических характеристик просадочного грунта, в том числе от значения начального просадочного давления.

При известной глубине z_0 несущая способность Φ сваи-стойки, нагруженный проседающим грунтом, определяется по формуле:

$$\Phi = mRF - m_{\text{отр}} \text{ и } \sum_{z=0}^{z=\ell} m_f f_i \ell_i, \quad (2)$$

где m, m_f – коэффициенты условий работы согласно СНиП; R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи согласно СНиП; F – площадь поперечного сечения сваи; $m_{\text{отр}}$ – коэффициент условия работы в проседающем грунте; f_i – расчетное значение удельного бокового трения; ℓ_i – толщина i -го слоя.

Когда выясняется, что действие сил негативного трения на сваи от просадочных деформаций окружающего грунта приводит к деформациям фундамента, возникает необходимость разработки конструктивных методов защиты свай от сил негативного трения.

Силы трения по закону Амонтона–Кулона, теоретически обоснованному Б.В. Дерягиным [3], могут быть представлены в виде

$$T = A + fN, \quad (3)$$

где A – постоянный член, зависящий от сцепления; f – коэффициент трения; N – нормальное давление.

Если допустить, что коэффициент трения грунта о поверхность сваи не зависит от глубины h и рассматривать только силы трения при установившемся движении массива относительно сваи, когда сцеплением можно пренебречь, уравнение (1) примет вид

$$T = fN(h), \quad (4)$$

где $N(h)$ – давление грунта на боковую поверхность сваи, меняющееся с глубиной по неизвестному закону.

Суммарные силы трения по боковой поверхности сваи при принятых допущениях определяются выражением

$$\Sigma T = fS \int_0^h N(h) dh, \quad (5)$$

где $S = \pi D$ – периметр поперечного сечения свай диаметром D .

Найдем некоторую функцию $F(h)$, аппроксимирующую ΣT .

Дифференцируя выражение (5), получим

$$N(h) = \frac{1}{fS} \cdot \frac{dF(h)}{dh}. \quad (6)$$

Надо отметить, что в натуре сила сцепления между поверхностью сваи и грунтом имеет большое значение. Кроме того, сваи, изготовленные по известным технологиям, имеют заметную шероховатость, которая имеет большое влияние на формирование величины силы негативного трения.

С учетом шероховатости бетонной сваи сдвиговая прочность определяется по формуле

$$\tau = c + P \operatorname{tg}(\varphi + i), \quad (7)$$

где τ – сдвиговая прочность при негативном трении; c – сила сцепления между грунтом и боковой поверхностью сваи; P – нормальное давление; φ – угол внутреннего трения между грунтом и поверхностью сваи; i – угол шероховатости поверхности сваи.

Для резкого уменьшения вклада шероховатости в развитие сил негативного трения в Азербайджанском НИИ строительства и архитектуры авторами разработана конструкция свайного фундамента, изготавливаемого из асбестоцементных труб [4]. Согласно нашим исследованиям в деформируемых просадочных грунтах силы негативного трения в сваях, изготовленных из асбестоцементных труб, достигают меньшего значения, чем в сваях идентичного типоразмера, изготовленных из железобетона в заводских условиях, так как боковая поверхность асбестоцементных труб выполнена значительно глаже.

В целях борьбы с силами негативного трения в некоторых случаях свайные фундаменты после забивки частично выдергивают, а затем снова забивают на проектную отметку. Так как предложенная нами свайная конструкция имеет круглое сечение, то для полного гарантийного устранения сил негативного трения достаточно при помощи специального вращательного устройства повернуть сваю на определенный угол вращательного сдвига между асбестоцементной поверхностью и грунтом основания, который определяется в лабораторных условиях на специально разработанном сдвиговом приборе. Нами теоретически было оценено напряженно-деформированное состояние указанной сваи, образующееся при кручении ее вокруг оси. Свая рассматривается

как составной элемент, состоящий из бетонного цилиндра и асбестоцементной трубы.

В первом приближении принимаем, что объемные силы отсутствуют, а бетонное ядро и асбестоцементная оболочка жестко сцеплены. Согласно принципу Сен-Венана можно считать, что для скручиваемого стержня на достаточно большом расстоянии от его концов напряжения зависят от крутящего момента M и не зависят от способа распределения по торцевым сечениям сил, дающих этот момент. Тот или иной закон распределения этих сил по торцевым сечениям стержня вызывает лишь местные напряжения в точках, расстояние до которых велико по сравнению с линейными размерами сечения стержня.

При кручении все сечения поворачиваются вокруг оси на некоторый угол ε . Считается, что пока не произошло полного разрыва сцепления между боковой поверхностью сваи с окружающим грунтом, нижняя пятка сваи остается неподвижной. В этом случае угол ε пропорционален расстоянию z рассматриваемого сечения до нижнего основания, т.е.

$$\varepsilon = \gamma \cdot z, \quad (8)$$

где γ – относительный угол закручивания.

Предположим, что сечения не остаются плоскими, а искривляются все одинаково, тогда компоненты смещения можно выразить следующим образом:

$$u = -\gamma z y; \quad v = \gamma z x; \quad \omega = \gamma \varphi(x, y), \quad (9)$$

где $\varphi(x, y)$ – некоторая функция кручения от x и y , подлежащая определению.

Тогда в каждой области будем иметь напряжения:

$$\tau_{kxz} = \gamma G_k \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - y \right); \quad \tau_{kyz} = \gamma G_k \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + x \right), \quad (10)$$

где G_k – модуль сдвига, соответствующий данной области; k – порядковый индекс рассматриваемой области.

Функция φ должна быть гармонической функцией двух переменных x и y . Поскольку φ не зависит от z , достаточно рассмотреть какое-либо нормальное поперечное сечение элемента. Граничные условия выбираем в следующем виде:

1) боковая поверхность сваи свободна от внешних напряжений:

$$\tau_{xz} \cos(n, x) + \tau_{yz} \cos(n, y) = 0; \quad (11)$$

2) усилия, действующие на элементы поверхностей раздела бетона и асбестоцемента, равны по величине и противоположны по направлению:

$$[\tau_{xz} \cos(n, x) + \tau_{yz} \cos(n, y)]_N = [\tau_{xz} \cos(n, x) + \tau_{yz} \cos(n, y)]_K, \quad (12)$$

где n – нормаль к соответствующему контуру; N, K – индексы, указывающие на принадлежность к различным областям;

3) компоненты смещения u, v, ω остаются непрерывными при переходе через поверхности раздела (условия прочного сцепления), это условие сводится к требованию о том, чтобы функция кручения φ оставалась непрерывной при переходе из одной области в другую.

Главный момент внешних напряжений, приложенных к верхнему основанию можем определить из уравнения

$$M = \iint_S (x \tau_{yz} - y \tau_{xz}) dx dy = G \gamma \iint_S (x^2 + y^2 + x \frac{\partial \varphi}{\partial y} - y \frac{\partial \varphi}{\partial x}) dx dy, \quad (13)$$

то есть

$$M = \gamma D, \quad (14)$$

где жесткость при кручении

$$D = \sum_{k=1}^2 \iint_S G_k (x^2 + y^2 + x \frac{\partial \varphi}{\partial y} - y \frac{\partial \varphi}{\partial x}) dx dy. \quad (15)$$

Граничное условие (11) можно записать в виде

$$(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - y) \cos(n, x) + (\frac{\partial \varphi}{\partial y} + x) \cos(n, y) = 0, \quad (16)$$

откуда

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cos(n, y) = \frac{\partial \varphi}{\partial n} y \cos(n, x) - x \cos(n, y). \quad (17)$$

В данном случае, когда начало координат выбрано в центре окружностей, составленных внутренней поверхностью (радиус r_1) и внешней поверхностью (радиус r_2) асбестоцементной трубы, условие (11) примет вид:

$$y \cos(n, x) - x \cos(n, y) = 0, \quad (18)$$

поэтому на всей границе $\partial \varphi / \partial n = 0$, и можно взять $\varphi = \text{const} = 0$.

Смещения и напряжения будут выражены формулами

$$u = -\gamma z y; v = \gamma z x; \omega = 0; \tau_{kxz} = -\gamma G_k y; \tau_{kxy} = \gamma G_k x. \quad (19)$$

Жесткость при кручении составной сваи определяется из уравнения

$$D = \sum_{k=1}^2 \iint_S G_k (x^2 + y^2) dx dy = G_S I_{SC} + (G_C - G_S) I_C, \quad (20)$$

где I_{SC} – полярный момент инерции составной сваи относительно центра; I_C – полярный момент инерции бетонного ядра сваи относительно центра; G_C – модуль сдвига бетона; G_S – модуль сдвига асбестоцемента.

Полярные моменты инерции сваи и ее бетонного ядра относительно центра определяются из формул:

$$I_{SC} = \frac{\pi r_2^4}{2}; \quad (21)$$

$$I_C = \frac{\pi r_1^4}{2}. \quad (22)$$

Из основных уравнений теории упругости следует вывод, что в свае кругового сечения, ограниченной концентрически круглой оболочкой, при кручении поперечные сечения остаются плоскими.

Вышеуказанный вывод нас вполне удовлетворяет. В этом случае подтверждается, что предложенный метод борьбы с силами негативного трения, по сравнению с вышеупомянутым известным, менее энергоемок, так как в предлагаемом случае преодолеваются только силы сцепления между боковой поверхностью сваи и окружающим грунтом.

Использование асбестоцементных труб для изготовления свай является интересным направлением свайного фундаментостроения. В работе [5] предложено использовать асбестоцементные трубы в качестве микросвай малоэтажных зданий.

Разработан свайный фундамент, возводимый на просадочных грунтах 1 (рис. 1), подстилаемых прочным грунтом 2, который включает ростверк, состоящий из верхней 3 и нижней 4 частей, между которыми располагается слой упругого материала 5. Нижняя часть 4 ростверка жестко соединена с цилиндрическими оболочками 6 свай 7, которые выполнены длиной, меньшей глубины активной зоны просадочного грунта 1. Стволы свай 7 жестко соединены с верхней частью ростверка. В зазорах между стволами свай 7 и внутренней поверхностью цилиндрических оболочек 6 располагаются резиновые длинные жгуты 8, которые навиты на поверхность свай в виде спирали. Эти резиновые жгуты имеют круглое поперечное сечение. Диаметр

поперечного сечения в пределах его упругости превышает расстояние между боковой поверхностью свай 7 и внутренней стенкой оболочки 6. Таким образом, если в пространстве между боковой поверхностью свай и внутренними стенками оболочки спирально – навитый жгут находится в упруго-сжатом состоянии, то он контактирует и с боковой поверхностью свай и с поверхностью внутренней стенки оболочки. Нижняя часть 4 ростверка снабжена выступающими вниз шлицевыми стенками 9 и 10, расположенными по оси оболочек 6 и их диагоналей.

Рис. 1. Свайный фундамент со спирально навитыми перекатывающимися элементами

При просадке грунта 1 цилиндрические оболочки 6 перемещаются вниз по перекатываемому спиральному жгуту вместе с нижней частью 4 ростверка. Упругосжатый слой 5 между верхней 3 и нижней 4 частями ростверка частично разжимается, сохраняя плотный контакт между частями ростверка. Упругонавитый жгут 8 в свайном фундаменте также играет роль упругого сейсмоизолятора.

Как уже упоминалось, одним из эффективных методов борьбы с силами негативного трения при просадке окружающей сваю грунта является использование технической смазки между боковой поверхностью сваи и контактирующим с нею просадочным грунтом. В качестве смазки используют различные технические масла, а также глинистые растворы.

Недостатком использования технических масел в качестве смазки между грунтом и боковой поверхностью сваи является технологическая сложность сохранения смазки на боковой поверхности сваи при ее устройстве или забивке на проектную глубину. Что же касается глинистых растворов, то они теряют свои смазочные характеристики при высыхании грунта перестают выполнять заложенную в них антифрикционную функцию.

В данной работе предлагается новый метод борьбы с силами негативного трения при просадке грунтов вокруг сваи. В качестве смазочного материала предлагается использовать гумбрин. Гумбрин является отходом технологии очистки технических масел. В качестве фильтра для очистки масел используется бентонитовая глина, которая при очистке технических масел отсорбирует на своей поверхности вредные для технического масла органические компоненты. После выполнения этих функций полученный гумбрин выбрасывается в отвалы. Этот отход в больших количествах накапливается в полигонах нефтеперерабатывающих предприятий.

Технологии применения гумбрина в качестве смазки свай для снятия сил негативного трения могут быть различными.

Так, путем бурения изготавливают лидерную скважину на всю глубину просадочной толщи, диаметр которой равен диаметру сваи (см. рис. 2) [6]. После этого лидерная скважина заполняется гумбрином путем его засыпки в скважину. Засыпка производится до полного заполнения скважины гумбрином. После этого свая 1 своим острием устанавливается по центру скважины на засыпанный гумбрин и произ-

водится забивка или задавливание сваи на глубину, превышающую просадочную толщу 3 до частичного ее внедрения в непросадочный грунт 4. В процессе забивки или задавливания сваи, от острия гумбрин 5 радиально отстраняется в стороны, сжимая стенки скважины, которые представлены макропористыми просадочными грунтами. В результате между боковой поверхностью сваи и стенками грунтовой скважины образуется смазочная прослойка из гумбрин. Для облегчения этой технологии при низкой природной влажности грунтов, перед засыпкой гумбрин в лидерную скважину, ее заполняют водой до придания прискважинной зоне грунта степени пластической консистенции.

Рис. 2. Свайный фундамент антифрикционным слоем из гумбрин:
а – продольный разрез; *б* – поперечный разрез; 1 – свая; 2 – поверхность
 просадочного грунта; 3 – просадочная толща;
 4 – непросадочный грунт; 5 – гумбрин

По другой технологии нижняя часть сваи имеет диаметр, чуть превышающий диаметр основной части сваи. Лидерную скважину изготавливают диаметром равным основной части сваи. После этого сваю забивают или задавливают в лидерную скважину. В результате после забивки или задавливания сваи грунт в стенках скважины перемещается

радиально по бокам и между боковой поверхностью основной части сваи и стенками расширенной скважины образуется свободное пространство, которое сверху заполняют жидким раствором гумбрина. Гумбрин обладает свойством, даже при полном высыхании, сохранять очень низкую силу сцепления. Таким образом, в любой ситуации, при просадке просадочной толщи образующиеся силы негативного трения устраняются за счет разрушения структуры гумбриновой прослойки. Кроме этого, гумбриновая прослойка также выполняет функции защитной прослойки для железобетонных свай при наличии в просадочной толще агрессивных солей.

Библиографический список

1. Руководство по проектированию свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1980. – 151 с.
2. Россихин Ю.В., Битанис А.Г. Осадки строящихся сооружений. Рига: Зинатне, 1980. – 339 с.
3. Дерягин Б.В. Что такое трение? – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 230 с.
4. Габибов Ф.Г., Амрахов А.Т., Халафов Н.М., Адыгезалов И.А. Исследование работы сваи с асбестоцементной оболочкой при внецентренном нагружении // The International Scientific-Practical Conference Devoted to Risk Management: сб. статей. Баку, 2011. – С. 3–6.
5. Пронозин Я.А., Баев М.А., Еренчинов С.А., Зазуля Ю.В. Использование асбестоцементных труб в качестве микросвай // Городские агломерации на оползневых территориях. Ч. II. Волгоград, 2005. – С. 23–26.
6. Габибов Ф.Г. Разработка эффективных методов проектирования свайных фундаментов на структурно-неустойчивых глинистых грунтах // Актуальные научно-технические проблемы современной геотехники: межвуз. темат. сб. тр. Т. 2. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 76–80.

References

1. Rukovodstvo po proektirovaniyu svajnykh fundamentov [Design Guide pile foundations]. Moscow: Strojizdat, 1980. 151 s.
2. Rossihin Y.V., Bitanis A.G. Osadki stroyashihsya sooruzhenij [Settlements built structures]. Riga: ZINATNE, 1980. 339 s.

3. Deryagin B.V. Chto takoe trenie? [What is friction?] Moscow: AN SSSR, 1963. 230 s.

4. Gabibov F.G., Amrahov A.T., Halafov N.M., Adigezalov I.A. Is-sledovanie raboty svaj s asbestosementnoj obolochkoj pri vnetsentrennom nagruzhении [Study of asbestos-cement piles with shell under eccentric loading]. *Sbornik statey "The International Scientific-Practical Conference Devoted to Risk Management"*, Baku, 2011, pp. 3-6.

5. Pronozin Y.A., Bayev M.A., Yerenchinov S.A., Zazulya Y.V. Ispolzovaniye asbestosementnih trub v kachestve mikrosvay [Use of asbestos cement pipes as micropiles]. *Gorodskie aglomeratsii na opolznevnykh territoriyakh*, vol. 2, Volgograd, 2005, pp. 23-26.

6. Gabibov F.G. Razrabotka effektivnykh metodov proektirovaniya svaynykh fundamentov na strukturno-neustojchivykh glinistykh gruntakh [Developing effective methods of designing pile foundations on structurally unstable clay soils]. *Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik trudov "Aktualnye nauchno-tehnicheskie problemy sovremennoj geotekhniki"*, Saint Petersburg, 2009, vol. 2, pp. 76-80.

Об авторе

Габибов Фахраддин Гасан оглы (Баку, Азербайджан) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией оснований, фундаментов и механики грунтов Азербайджанского научно-исследовательского института строительства и архитектуры; e-mail: farchad@yandex.ru

About the authors

Gabibov Fakhraddin Gasan oglu (Baku, Azerbaijan) – Ph.D. in Technical, Chief of laboratory of bases, foundation and soil mechanics, Azerbaijan Scientific Research Institute of Building and Architecture; e-mail: farchad@yandex.ru

Получено 01.04.2014