

УДК 624.131.2:711

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАЦИЯМ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ КОРОТКИХ ГОТОВЫХ (ЗАБИВНЫХ) СВАЙ МАЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ИХ ВДАВЛИВАНИИ И ВЫДЕРГИВАНИИ

канд. техн. наук, доц. В.Н. КРАВЦОВ
(РУП «Институт БелНИИС», Минск)

Представлены результаты и анализ экспериментальных лабораторных и натурных исследований несущей способности и деформаций глинистых оснований готовых (забивных) коротких железобетонных и металлических тензометрических свай малого поперечного сечения (100×100)–(200×200) мм, загруженных статической вдавливающей или выдергивающей нагрузками. В процессе исследований уточнены область рационального применения и представления об их работе в глинистых грунтах с учетом размеров поперечного сечения и глубины погружения опытных коротких свай. Установлено, что отклонения между значениями несущей способности, полученными по результатам испытаний и аналитическим расчетам по методам норм, составляют 30–50%, в связи с чем они требуют корректировки. Подтверждена эффективность разработанных в РУП «Институт БелНИИС» конструкций коротких свай малого поперечного сечения для малоэтажных (до 3-х этажей) зданий и сооружений. Результаты исследований положены в основу совершенствования конструкций и методов их расчета с учетом грунтовых условий белорусского региона, обеспечивающих снижение себестоимости трудоемкости изготовления фундаментов малоэтажных гражданских и производственных зданий и сооружений до 30%.

Ключевые слова: глинистые основания, сваи готовые (забивные) малого поперечного сечения, статические испытания, несущая способность, деформации основания, надежность, эффективность.

Введение. Объемы внедрения свайных фундаментов в Республике Беларусь с каждым годом интенсивно возрастают. При этом на долю фундаментов из готовых (забивных) свай стандартной номенклатуры по [1; 2] приходится до 80% от их общего количества, используемого в строительстве. Они универсальны, промышленны, всепогодны, применяются в любых грунтовых условиях для всех типов зданий и сооружений, передающих на основания как большие, так и незначительные усилия.

Вместе с тем номенклатура типоразмеров стандартных забивных свай по [1; 2] ограничена по минимальным размерам: длине $L = 3$ м и поперечному сечению $b \times h = 250 \times 250$ мм. В связи с этим они не экономичны для малоэтажного индивидуального жилищного строительства и временных сооружений с незначительными нагрузками на фундамент, получивших в последнее время широкое развитие в Республике Беларусь. В этом случае требуются сваи меньших размеров, чем имеются в типовых сериях. Использование для малонагруженных объектов стандартных свай с размерами больше, чем необходимо по расчету, как правило, приводит к их недопогружению, срубке оголовков, излишней материалоемкости и повышенной себестоимости фундаментов.

Для решения указанной проблемы тема по исследованию и внедрению коротких готовых (забивных) свай малого поперечного сечения от 100×100 до 200×200 мм (далее – сваи СМ) в качестве фундаментов малонагруженных объектов на основе существующего парка форм, оборудования и механизмов была включена, как одна из приоритетных задач стройкомплекса страны в республиканскую программу Минстройархитектуры Республики Беларусь по ресурсо- и материалосбережению в строительстве на 2008–2022 гг.

К преимуществам предлагаемых свай СМ можно отнести:

- возможность применения более «легких» молотов, уменьшающих энергоемкость процесса забивки, в результате снижения сопротивления грунта погружению в него конструкции меньшего размера, чем по [1; 2];
- возможность заглубления свай до проектной отметки (без срубки голов) даже в прочные грунты, что обеспечивает практически одинаковую несущую способность по грунту, материалу и снижению материалоемкости.

По указанной теме выполнен комплекс лабораторных и натурных исследований несущей способности и деформативности песчаных и глинистых оснований свай СМ Республики Беларусь, на базе которых уточнены методы их расчета и разработана требуемая техническая документация (рекомендации и регламент) по проектированию и изготовлению фундаментов из свай СМ в развитие действующих ТНПА.

Цель работы – разработка ресурсосберегающих конструкций, технологий устройства железобетонных коротких свай малого поперечного сечения (100×100)–(200×200) мм для фундаментов малоэтажных зданий и временных сооружений с учетом грунтовых условий Республики Беларусь, обеспечивающих снижение стоимости, трудоемкости и материалоемкости по сравнению с их традиционными решениями (свайные, плитные) до 30%.

Задачи работы – комплексные исследования несущей способности и деформативности оснований коротких забивных железобетонных свай малого поперечного сечения, разработка эффективных методов их расчета и рекомендаций по проектированию и устройству, учитывающих особенности грунтов Республики Беларусь.

В данной статье приведены результаты одного из этапов исследования и анализа несущей способности и деформативности глинистых оснований коротких свай СМ, разработанных РУП «Институт БелНИИС», на вертикальные осевые статические вдавливающие или выдергивающие нагрузки.

Основная часть. *Программа, методы и задачи исследований.* При исследовании оснований свай СМ решались задачи и использовались следующие методы:

- лабораторные эксперименты (в грунтовых лотках) с моделями натуральных свай СМ – для изучения их работы (качественной картины) в основании (несущей способности и деформативности) с различными характеристиками свойств грунта (пески, глинистые) и размерами конструкций (длина, поперечное сечение) при вдавливающей и выдергивающей нагрузках;

- натурные полевые эксперименты – для изучения взаимодействия свай СМ, в т.ч. и тензометрических, с различными грунтами (оценка НДС основания, несущей способности и деформативности грунтов при вдавливании и выдергивании) и сопоставления полученных данных с результатами лабораторных исследований;

- теоретические методы строительной механики и механики грунтов; средства вычислительной техники и физико-математического аппарата – при разработке аналитических зависимостей, базирующихся на результатах лабораторных и натуральных исследований;

- апробация результатов работы на реальных объектах (техничко-экономический анализ, вариантное проектирование, оценка и выбор рациональных конструктивных решений и технологии устройства фундаментов, сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с теоретическими предпосылками).

Методы лабораторных исследований. В механике грунтов при лабораторных исследованиях оснований и фундаментов наиболее широкое распространение нашли методы маломасштабного лабораторного моделирования (далее – МЛМ) процессов их совместной работы с применением грунтовых лотков. Это один из видов физического моделирования в линейной постановке, осуществляемый с использованием моделей малого размера согласно теорий подобия и эксперимента [3–5 и др.]. Метод МЛМ позволяет при незначительных затратах средств и времени быстро моделировать поведение оснований фундамента от различных нагрузок и любых грунтовых условий, значительно сократив объем дорогостоящих натуральных экспериментов.

Основными измеряемыми параметрами в процессе изучения НДС нагруженных оснований модельных коротких свай СМ являются деформации (осадки) и перемещения грунта вокруг них. Учитывая то, что осадки оснований СМ достаточно малы и находятся в пределах пороговой чувствительности измерительных приборов, для целей МЛМ использовалась теория простого физического подобия, что позволило применять для изготовления их моделей подобные натурные материалы (дерево, металл), а в качестве основания – натуральный грунт (песок, глинистый) с соответствующими природным материалом, характеристиками и единицами измерений. При таком условии критерии оригинала и модели однозначно достаточны и равны (подобны), т.к. сохраняется физическая природа явления.

Согласно [4] материал, применяемый при изготовлении моделей коротких свай СМ, подбирался таким образом, чтобы удовлетворять следующим соотношениям механических и деформационных характеристик: для модуля упругости материала модели E_m , как правило, ниже натурального материала E_n , для плотности ρ_m – выше, с соблюдением граничных условий: необходимого – $1,0 \leq E_n/E_m \leq 10,0$ с $\rho_m \geq 0,8$ г/см³; оптимального – $1,0 \leq E_n/E_m \leq 5,0$ и $\rho_m \geq 1,2$ г/см³. Указанным критериям для моделей свай СМ удовлетворяют металл и частично дерево. При их изготовлении учитывались также следующие технические требования [3]:

- материал модели должен по характеристикам (деформативности, прочности) соответствовать натурному, в частности, вышеуказанным соотношениям E_n/E_m ;

- материал модели должен сохранять стабильность физико-механических характеристик с отклонением не более 5% на протяжении всего периода исследований;

- характеристики материала не должны зависеть от температуры, с допуском не более 0,5% на 1 °С, в зоне температур от 15 до 25 °С;

- модели изготавливаются с учетом требования их простого геометрического подобия относительно натурной конструкции. При этом соотношение между масштабom и механическими характеристиками материала модельных и натуральных свай СМ устанавливается на основании двойного неравенства [5]:

$$0,24 \sqrt{\frac{E_m \rho_m}{E_n \rho_n}} \leq \frac{l_m}{l_n} \leq \sqrt{\frac{E_m \rho_m}{E_n \rho_n}}, \quad (1)$$

где E_m, ρ_m, l_m – характеристики модели свай СМ соответственно: модуль упругости (МПа), плотность (кг/м³) и характерный линейный размер (длина) модели (м);

E_n, ρ_n, l_n – то же, для натурной сваи.

Исходя из условия (1) вышеуказанных требований, размеров лотков (см. ниже), масштаб моделей принят М1:10, а в качестве их основного материала – металл и дерево с плотностью материала моделей $\rho_m = 7850$ кг/м³ (для металла), $\rho_m = 800$ кг/м³ (для дерева) длиной $l_m = 10$ –60 см, что соответствует плотности материала исследуемых натуральных свай СМ $\rho_n = 2500$ кг/м³ (для железобетона), 7850 кг/м³ (для металла) и их длине l_n от 1,0

до 6,0 м. В связи с этим конструкции моделей коротких натуральных свай СМ выполнены в виде деревянного или металлического стержня с поперечным сечением $b \times h = (1 \times 1) - (2 \times 2)$ см, отвечающим натурным сваям размером: $b \times h = (10 \times 10) - (20 \times 20)$ см, что обеспечивает геометрическое подобие и моделирование процесса работы натуральных коротких свай СМ в грунте (песок, глинистый) при их испытании в лотке. Механическое подобие регламентировалось свойствами дерева (металла) модельной сваи СМ (E , ρ , шероховатость и др.), а статическое подобие (деформативность) основания модели – сопоставимыми коэффициентами подобия жесткости натурального и моделируемого основания:

$$K = \frac{E_n}{E_c} \geq 1000 \leq \frac{E_m}{E_c}, \quad (2)$$

где E_c , E_n и E_m – модули упругости (деформации) соответственно грунта натурной и модельной сваи СМ, МПа.

Исследования глинистых оснований моделей коротких свай СМ проведены в плоском и объемном лотках (рисунок 1) с ограничением выпора грунта в перпендикулярной плоскости (плоская задача). Плоский лоток представляет собой деревянный ящик размером $25 \times 840 \times 700h$ мм, объемный лоток – металлический ящик размером $100 \times 100 \times 100h$ см, в которые укладывался исследуемый грунт. Лотки оборудованы светопрозрачными стенками, загрузочным устройством и индикаторами часового типа для измерения деформации грунта и осадок моделей.

Лабораторные испытания служили для качественной оценки несущей способности и деформативности глинистых (песчаных) оснований моделей коротких свай СМ при вдавливании и выдергивании с учетом различных глубин их погружения от поверхности грунта и размеров поперечные сечения. По результатам испытаний строились зависимости $s = f(P)$, $\Delta v = f(P_v)$, осадки (s) и выхода (Δv) моделей разных размеров (длина L , сторона квадратного или диаметр круглого поперечного сечения d_c) от вдавливающей (P) или выдергивающей (P_v) нагрузок.

В процессе лабораторных испытаний определялись также деформируемые зоны основания модельных коротких свай СМ вдоль их стволов, выше и ниже уровней нижних концов.

В качестве «моделей» грунтового основания использовались наиболее распространенные в Республике Беларусь пески [6] и глинистые грунты (супесь, суглинок), от слабого ($I_L \geq 0,75$) до средней прочности ($I_L \leq 0,5$) с характеристиками, наиболее распространенными в белорусском регионе:

- плотность ρ от 1,60 г/см³ до 2,0 г/см³;
- влажность $\omega = 8,0\%$;
- сцепление c от 0,011 МПа до 0,030 МПа;
- угол внутреннего трения ϕ от 15° до 23°.

Для моделирования глинистого основания требуемых свойств и состава (с модулем деформации от 5–7 МПа до 15 МПа) использовался природный грунт, который высушивался до постоянного веса при комнатной температуре 25 °С в воздушно-сухой среде, увлажнялся перед укладкой до необходимой влажности и послонно засыпался в лоток слоями по 20–30 мм. Отсыпка производилась с уплотнением каждого слоя ударами ручного уплотнителя массой 100–150 г до достижения требуемой плотности по данным пенетрации. В промежутках между слоями песка устраивались горизонтальные полоски из мела для фиксации деформации грунта в процессе загрузки моделей коротких свай СМ. Такая технология подготовки грунтового массива позволяет моделировать основание моделей свай СМ с заданной плотностью и влажностью. Лоток заполнялся до верхнего уровня прозрачных стенок (рисунок 1).

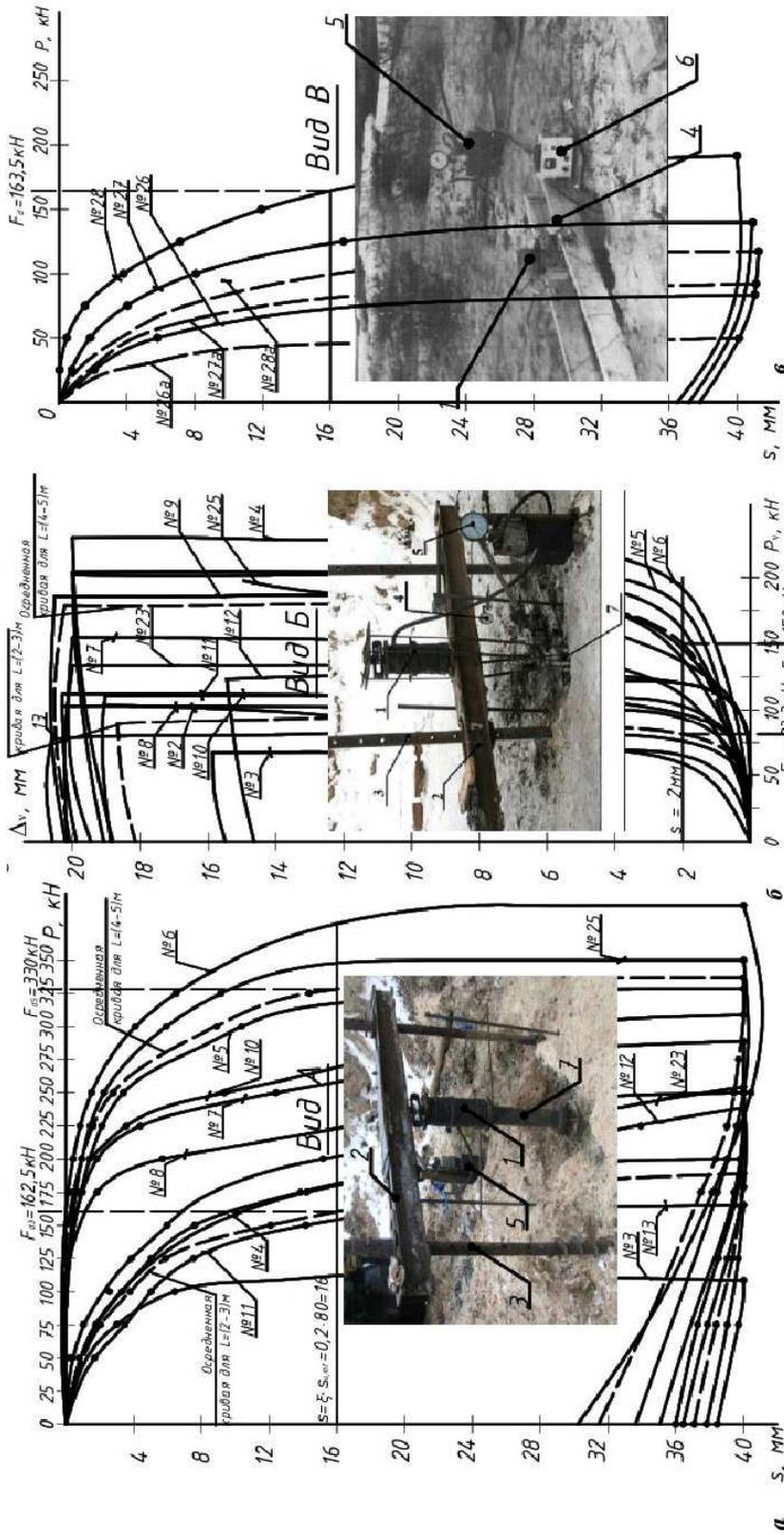
Общая конструкция грунтовых лотков, приборы и оборудование, использованные для их испытаний, даны на рисунке 1. Нагружение при испытании модели сваи СМ осуществлялось ступенями, посредством рычажного загрузочного устройства (рисунок 1), грузами с массой, равной 1/5–1/10 от максимальной реальной расчетной нагрузки $P(P_v)$. Грузы синхронно ступенями укладывались на подвесные секторные площадки: с правой (загрузочной) и левой (противовесной) сторон рычага. Каждое последующее нагружение, в соответствии со ступенью нагружения, производилось после стабилизации осадки модели короткой сваи СМ от предыдущего нагружения (0,1 мм за последние 15 мин).

Измерение вертикальных деформаций осадок модельных коротких свай СМ и грунта основания осуществлялось индикаторами часового типа (ИЧ), с точностью измерений 0,01 мм, устанавливаемыми на верхнем оголовке модели при помощи трубины, прикрепленной к корпусу лотков (рисунок 1). Подвижный штوك каждого из ИЧ приводился в соприкосновение с верхним торцом модельной сваи СМ, а при ее выдергивании дополнительно к поверхности грунта в пределах зоны его деформирования.

Методы натурных исследований. Экспериментальное исследование совместной работы глинистых оснований и опытных свай СМ проводилось на 3 основных опытных площадках (далее ОП 1–ОП 3). Характеристики опытных площадок, грунтов, их слагающих, и оборудования даны в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1. – Характеристика объекта, опытной площадки (оборудования), натурных свай СМ

| Номер опытной площадки (ОП) и ее месторасположение (адрес) | Номер опытной свай СМ на площадке и ее характеристика | Характеристика опытных свай СМ (бетон класса С16/20, арматура Ø10-12S500) | | | Оборудование для погружения и испытаний | Характеристика грунтов основания | |
|--|--|---|--|---|---|--|---|
| | | Диаметр (d_c) или размеры ($b \times h$) поперечного сечения, мм | Площадь (числитель) A , м ² ; периметр и (знаменатель), м | Глубина погружения свай СМ от поверхности грунта, м | | Тип и свойства грунтов (плотность, т/м ³ ; угол внутреннего трения φ , град; сцепление c , МПа; пористость e ; модуль деформации E , МПа) | Среднее значение сопротивления грунта под конусом зонда q_c , МПа |
| ОПЗ на объекте: Микрорайон «Заднепровский-5», г. Могилев, возле жилого дома № 63 | Готовая (забивная) квадратная железобетонная сплошная № (2, 3, 11, 12, 13, 23) | 200×200 | $\frac{0,04}{0,8}$ | 3 | Угловая балка, заанкеренная в грунте винтовыми металлическими сваями, гидравлический домкрат ДГ 50–ДГ 100 для передачи усилия на сваю (рисунок 2); установка для погружения свай СМ – дизельный молот С996 или С330 | Суглинок ($\rho = 2 \text{ т/м}^3$, $\varphi = 20^\circ$, $c = 0,025 \text{ МПа}$, $e = 0,7$, $E = 14 \text{ МПа}$, $I_L = 0,5$) | 1,5–2 МПа |
| | Готовая (забивная) квадратная железобетонная сплошная № (4–10, 25) | 200×200 | $\frac{0,04}{0,8}$ | 5 | | | |
| | Тензометрическая (забивная) круглая металлическая (кольцевого сечения) № (26, 26а) | 114 | $\frac{0,01}{0,358}$ | 4 | | | |
| | Тензометрическая (забивная) круглая металлическая (кольцевого сечения) № (27, 27а) | 160 | $\frac{0,02}{0,502}$ | 4 | | | |
| | Тензометрическая (забивная) круглая металлическая (кольцевого сечения) № (28, 28а) | 219 | $\frac{0,038}{0,69}$ | 4 | | | |



№ 2–№ 25 – номера испытанных оснований квадратных свай СМ; № 26 (26а)– № 28 (28а) – то же, круглых тензометрических по таблице 1;

1 – домкрат; 2 – упорная металлическая балка; 3 – анкерная винтовая свая; 4 – прогибомер; 5 – насосная станция НСР 400 с манометром; 6 – измеритель деформаций в тензометрических сваях (мессолах); 7 – опытная свая СМ (№ 2–№ 28)

а – графики $s = f(P)$ осадки s , мм, от вертикальной статической вдавливающей нагрузки, P , кН для свай СМ № 2–№ 25, длиной 2–5 м;

б – то же, $\Delta v = f(P)$, выхода Δv , мм, от вертикальной статической вдавливающей нагрузки, P , кН;

6 – то же, общие графики, $s = f(P)$ для оснований вдавливаемых тензометрических свай СМ № 26–№ 28 и № 26а–№ 28а только для их нижних торцов с используемым оборудованием, вид В

Рисунок 2. – Результаты полевых испытаний глинистых оснований вдавливаемыми (вид А) и выдергиваемыми (вид Б) натурными опытными короткими сваями СМ на опытной площадке ОП 3

Использовались забивные железобетонные сваи СМ сечением (100×100)–(200×200) мм, разработанные в РУП «Институт БелНИИС», и контрольные сваи сплошного сечения стандартной номенклатуры 300×300 мм по [1; 2]. Применялись также круглые металлические тензометрические сваи кольцевого сечения с различной площадью поперечного сечения и длины, позволяющие отдельно фиксировать усилия: общее на сваю СМ и приходящееся на нижний торец (пяту) при их одновременном нагружении [6]. Технические характеристики опытных забивных железобетонных квадратных и круглых тензометрических свай СМ приведены в таблице 1.

Опытные сваи погружались в основание при помощи штангового дизельного молота марки С330 с массой ударной части 2500 кг и высотой ее падения 2600 мм или С996 с массой молота 1800 кг (см. таблицу 1).

Нагружение опытных свай СМ (в т.ч. тензометрических) осуществлялось гидравлическими домкратами ДГ50, ДГ100, ДГ200, упором для которых служила металлическая балка, заанкеренная в грунте винтовыми металлическими сваями (см. рисунок 2). Давление в домкратах поддерживалось при помощи насосной станции НСР 400 и контролировалось манометром на 400 атм с ценой деления 5 атм (см. рисунок 2).

Испытания опытных свай СМ (включая тензометрические) статическими осевыми вдавливающими и выдергивающими нагрузками проводились по стандартной методике СТБ 2242 [7] до их срыва (вертикальное смещение сваи без дополнительной нагрузки) или доведения осадок (выхода) не менее, чем до 20–40 мм. После этого они разгружались с замером упругого подъема. Критическая нагрузка на опытную сваю СМ, согласно [8], определялась при осадке $s = \xi s_{\text{lim}}$, где $\xi = 0,2$, $s_{\text{lim}} = 8$ см – предельная осадка для гражданских и производственных зданий.

В качестве аппаратуры, регистрирующей напряжения, приходящиеся от общей нагрузки на торец испытываемых тензометрических свай, использовалась портативная тензостанция (измеритель деформации) ИД-62 М или ИДЦ 1 (см. рисунок 2). Усилия в силоизмерительных месдозах фиксировались до начала испытаний (нулевые отсчеты) и далее на каждой ступени нагружения, начиная с приложения нагрузки, с тем же временным интервалом, что и для снятия показаний с прогибомеров, в соответствии с методикой [7], до полной стабилизации осадки на каждой ступени.

С целью определения деформируемой (активной) зоны оснований опытных свай СМ, возле некоторых из них производилась послойная отрывка шурфов на всю глубину их погружения с испытанием грунта в каждом уровне с интервалами по глубине, равными 0,5 м, плотномером и отбором проб и монолитов для определения его характеристик лабораторными методами. До отрывки шурфа основания свай СМ испытывались методом статического и динамического зондирования с использованием установки С-832 согласно ГОСТ 19912-2001 [9], или динамического зонда, а в процессе его отрывки плотномером согласно [10].

По изменению свойств грунта относительно его природного состояния вдоль стволов и под пятой опытных свай СМ до их погружения и испытания устанавливалась граница деформируемой (активной) зоны основания, размеры которой практически совпали с полученными в лабораторных исследованиях (см. рисунок 1, в).

Результаты исследований и их анализ. Лабораторные и полевые исследования в объеме указанных выше задач включали:

- изготовление комплекса натуральных свай СМ на заводах ЖБК по рабочим чертежам РУП «Институт БелНИИС» размером $b \times h$ от 100×100 до 200×200 мм длиной от 1,5 до 5 м, а также маломасштабных их аналогов для лотковых исследований (см. выше);

- исследование напряженно-деформационного состояния (НДС) глинистых (песчаных) оснований, натуральных свай СМ (см. таблицу 1) в лабораторных и полевых условиях с определением их активной (деформируемой) зоны;

- испытание моделей и натуральных свай СМ на вдавливающие и выдергивающие нагрузки с определением нагрузки, приходящейся на ствол, пяту, и их апробация в производственных условиях.

Экспериментальные исследования свай СМ выполнены лабораторными и полевыми натурными методами с использованием отечественных механизмов, оборудования, маломасштабных моделей и лабораторных лотков.

Лабораторные исследования по испытанию однородных глинистых оснований (см. выше) маломасштабными моделями свай СМ дали качественную картину их взаимодействия с грунтом. Оценки пределов их несущей способности, активной (деформированной) зоны и характера развития в ней пластических деформаций в зависимости от размеров, глубины заложения опытных свай в грунт z и плотности грунтов ρ – см. рисунок 1. Результаты лабораторных опытов послужили основой для разработки программы натуральных исследований опытных коротких свай СМ.

За критерий предельного характеристического сопротивления грунта вдавливаю/выдергиванию (несущей способности) модели короткой сваи СМ принята величина нагрузки, на одну ступень меньше предельных вдавливающей P или выдергивающей P_v вертикальных нагрузок, приходящихся на нее, и не менее ее осадки s выхода из грунта Δv , равных $0,1d_c$ (где d_c – диаметр или большая сторона модели сваи СМ).

Лабораторные исследования выполнены методом лабораторного моделирования в грунтовом лотке (см. рисунок 1) в плоской постановке.

Каждая серия опытов в грунтовом лотке проводилась с 2–3-кратной повторяемостью для каждого типа грунта (супесь, суглинок слабый средней прочности, см. выше) и модели свай СМ (при разных: глубине зало-

жения их нижних концов $z = 150\text{--}600$ мм и размерах поперечного сечения $d_c = 10\text{--}20$ мм диаметр круглых или большая сторона квадратных моделей. Всего проведено 12 серий опытов по 6 испытаний в каждой серии с использованием плоского лотка и 3 серии – в объемном лотке.

Обобщенные результаты одной из серий модельных испытаний глинистых оснований свай СМ средней прочности на выдергивающие и вдавливающие нагрузки приведены на рисунке 1 в виде графиков $\Delta v = f(P)$, $s = f(P)$ выхода Δv (мм), осадки s (мм) от вертикальных нагрузок соответственно выдергивающей P_v (Н) и вдавливающей P (Н), прикладываемым к ним.

В процессе лабораторных исследований установлено, что в основании модельной короткой сваи СМ при воздействии на нее вдавливающей и выдергивающей нагрузок формируется активная несущая зона, размеры которой зависят от глубины заложения z (мм), и размеров d_c (мм) ее ствола, вида и плотности–влажности грунта.

При воздействии на модельную короткую сваю СМ вдавливающей и выдергивающей нагрузок активная (деформируемая) зона основания в супеси и суглинке составляет (см. рисунок 1): по высоте $h_{max} \cong (3,0\text{--}3,5)d_c$ (меньшее при задавливании, большее при забивке), по ширине $B_{max} \cong 4d_c$ для слабого грунта ($I_L \geq 0,7$) и $h_{max} \cong (4\text{--}6)d_c$ (большее при вдавливании), $B_{max} \cong (5\text{--}6)d_c$ (большее при забивке) для грунтов средней прочности ($I_L \leq 0,5$).

После приложения предельной вдавливающей нагрузки $P_{пр}$ к модели короткой сваи СМ, как правило, при осадке, не превышающей 10 мм, при постоянной нагрузке наступает ее «срыв» в виде непрерывной осадки. В результате происходит внутренний выпор грунта из-под нижнего торца с ее просадкой вниз от исходного положения на (10–15) мм, которая прекращается после формирования новой несущей зоны примерно тех же (исходных) размеров. При этом объем деформируемого грунта в активной зоне под пятой вдавливаемой модели короткой сваи СМ остается примерно одинаковым как для супеси, так и суглинка (см. рисунок 1, в). Величина несущей способности глинистых оснований моделей свай СМ обусловлена сцеплением, а также размерами ствола и глубиной их погружения от поверхности грунта. Давление ниже торца модели короткой сваи СМ в супеси и суглинке распространяется под углом $\alpha \cong 45^\circ$ (см. рисунок 1, в), а в средней прочности под углом $\alpha \cong 45^\circ$ (при задавливании) и $\alpha \cong 60^\circ$ (при забивке).

Установлено что, сопротивление глинистых невлажных ($I_L \leq 0,5$) оснований при вдавливании в них ствола моделей коротких свай СМ в диапазоне глубины погружения от 15 см ($\approx 1,5$ м) до 60 см (≈ 6 м) примерно на 20–40% выше, чем при его выдергивании (большее для глубин погружения моделей больше 30 см (≈ 3 м для натуральных свай СМ).

Для проверки достоверности результатов лабораторных исследований на 3-х опытных площадках (ОП 1–ОП 3) проведен комплекс натуральных экспериментальных работ с опытными сваями СМ в различных грунтовых условиях (см. таблицу 1). Ниже приведены материалы комплексных экспериментальных работ на ОП 3 с натурными сваями СМ, разработанными в РУП «Институт БелНИИС», и их тензометрическими аналогами, погруженными в однородный суглинок. Программа исследований и методика испытаний – см. выше.

Полевые эксперименты. Для оценки усилий, воспринимаемых нижним концом (пятой) и стволом коротких свай СМ, они испытаны как на вдавливающие, так и на выдергивающие нагрузки. Удельные силы трения, приходящиеся на боковую поверхность ствола, приняты исходя из разности усилий между вдавливающей и выдергивающей нагрузками. На ОП 3 испытаны железобетонные квадратные сваи СМ (см. таблицу 1), а также разработанные металлические тензометрические сваи кольцевого поперечного сечения диаметром $d_c = 114, 160$ и 219 мм. Принцип их действия обеспечивает раздельное измерение усилий под нижним торцом (пятой) и вдоль ствола [6].

Грунты основания на ОП 3 представляют собой моренные суглинки, плотные и средней плотности, влажные ($I_L = 0,4$) с включением гравия мелкого и средней крупности (см. таблицу 1).

Железобетонные квадратные сваи СМ испытаны на вдавливание и выдергивание, а круглые тензометрические (далее – сваи ТС) – только на вдавливание.

Для свай СМ часть нагрузки, воспринимаемая пятой, определялась как разность между общей, вдавливающей и выдергивающей нагрузками. Удельные силы трения вдоль ствола свай СМ оценивались, в зависимости от глубины их погружения, посредством деления критической нагрузки P_v при выдергивании на площадь боковой поверхности ее ствола. Согласно [8] характеристическое сопротивление грунта (несущая способность) от вдавливания сваи СМ (F_k) принята для ее осадки $s = \xi s_{u,mi}$ (где $\xi = 0,2$, $s_{u,mi} = 8$ см), т.е. $s = 16$ мм, от выдергивания (F_{ki}) для выхода), $\Delta_v = \xi \Delta_{v,mi} = 0,1 \cdot 20 = 2$ мм (где $\xi = 0,1$ – коэффициент перехода от деформаций здания к выходу сваи при ее выдергивании, $\Delta_v = 2$ см).

Нагрузка, передаваемая на грунт пятой и стволом по результатам их испытаний на выдергивание и вдавливание, оценивалась по кривой «нагрузка–деформация» $s = f(P)$, $\Delta_v = f(P_v)$, где s – осадка, мм; Δ_v – выход сваи СМ, мм; P , P_v – вертикальная осевая статическая нагрузка, соответственно при вдавливании и выдергивании, кН.

Всего проведено 14 испытаний опытных натуральных свай СМ (см. таблицу 1), в т.ч.: длиной $L = 4,0$ м, размером $d_c = (20 \times 20)$ см, погруженных на глубину $z = 2,5\text{--}3$ м – 6 шт., № (2, 3, 11, 12, 13, 23); длиной $L = 5,0$ м, $d_c = (20 \times 20)$ см, $z = 4,5\text{--}5,0$ м – 8 шт., № (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25).

Результаты испытаний приведены в таблицах 2 и 3 и на рисунке 2 в виде кривых $\Delta_v = f(P_v)$, $s = f(P)$.

Из графиков $\Delta_v = f(P_v)$ свай СМ видно, что их перемещения, соответствующие предельным выдергивающим нагрузкам, до 4 раз больше перемещений, соответствующих критическим нагрузкам, допускаемым для малонагруженных гражданских и производственных зданий при выходе свай из грунта $\Delta_v = (1-2)$ см, которые на 20–30% меньше, чем полученные по графикам $\Delta_v = f(P_v)$, по результатам испытания свай ТС вдавливающей нагрузкой с разделенным определением сил, приходящейся на их пяту и ствол.

В таблицах 2 и 3 приведены средние опытные значения удельных расчетных сопротивлений грунта вдавливанию в него пяты R и ствола R_f (сил трения) и общие критические нагрузки на основания свай СМ и ее пяты с учетом глубины погружения $z = (3 \text{ и } 5)$ м.

Таблица 2. – Расчетные сопротивления грунта R_f вдавливанию ствола свай СМ в суглинок ($I_L = 0,4-0,5$) по результатам испытаний на ОП 3

| Номер (№) и глубина погружения опытных свай СМ | Среднее значение сопротивления грунта R_f вдавливанию ствола (удельной силы трения), кПа |
|--|--|
| № (2, 3, 11, 12, 13, 23), $z = 3$ м | 34,7 |
| № (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 25), $z = 5$ м | 37,5 |

Опытные значения удельных сил трения R_f (см. таблицу 2) на ОП 3 для боковой поверхности свай СМ длиной $L = 3,0$ м по результатам испытаний на ОП 1–ОП 3 составляют 35 кПа; при $L = 5,0$ м ~ 40 кПа (получены делением критической нагрузки P на площадь боковой поверхности свай СМ), т.е. увеличиваются с глубиной. При выдергивании выход свай СМ Δ_v может продолжаться после снятия предельной нагрузки.

Следует различать силы сопротивления грунта, полученные в результате вдавливания и выдергивания ствола свай СМ. По результатам испытания тензометрических свай установлено, что $R_{\text{вдав.}} = k_0 \cdot R_{\text{выдерг.}}$, $k_0 \approx 1,1 + 2,5$ в зависимости от вида грунта и глубины погружения свай СМ. Это обстоятельство следует учитывать при определении удельных сил трения по результатам испытаний свай СМ на выдергивание.

Табличные значения R_f , кПа, используемые в расчетах свай по методике ТКП [11], для суглинка составляют при показателе текучести $I_L = 0,4$ и $L = 3$ м $R_f = 22-28$ кПа; для $L = 5$ м $R_f = 34$ кПа, что значительно меньше опытных данных для свай СМ (см. таблицу 2). Поэтому данные таблиц, приведенные в [11], требуют уточнения.

Таблица 3. – Результаты определения несущей способности глинистых оснований свай СМ для пяты и ствола на ОП 3

| Глубина погружения свай, м | Общая критическая нагрузка на сваи СМ при вдавливании P , кН | Общая критическая нагрузка на сваи СМ при выдергивании P_v , кН | Критическая нагрузка для пяты $P = P - P_v$, кН | Критическая нагрузка для пяты в % от полной нагрузки P |
|----------------------------|--|---|--|--|
| 3,0 | 162,5 | 83,3 | 79,2 | 54 |
| 5,0 | 330,0 | 150,0 | 180 | 46 |

Из таблицы 3 видно, что, при глубине погружения $z = 3-5$ м глинистым основанием пяты свай коротких СМ воспринимается до 50% от общей нагрузки, передаваемой на нее.

Выводы.

1. По итогам выполнения экспериментальных исследований глинистых оснований свай малого поперечного сечения (СМ) на трех опытных площадках (ОП 1–ОП 3), в т.ч. тензосвай, подтверждена эффективность конструкций, разработанных в РУП «Институт БелНИИС»; изучен характер их взаимодействия с глинистыми и песчаными [6] грунтами, который в полной мере соответствует двухкомпонентной расчетной схеме, принятой в действующих нормах [8].

2. Установлено, что через ствол свай СМ длиной 2–5 м, погруженных в однородные по плотности и влажности глинистые грунты боковой поверхностью, при нагрузках, близких к предельным, на грунт передается до 70% от их общей величины, а при критических – до 40–50%.

3. Опытные величины R_f для глинистых и песчаных [6] грунтов, в т.ч. водонасыщенных, в 1,5–2 раза превышают табличные нормативные значения по [11], поэтому требуется их корректировка в сторону увеличения при использовании для расчета оснований свай СМ.

4. Распределение сил трения вдоль ствола коротких забивных свай СМ, погруженных в однородные супеси, суглинки, близко к равномерному, за исключением участка, примерно 0,5 м, расположенного у поверхности грунта, на котором они плавно снижаются до 0. Срыв (сдвиговая осадка) коротких свай СМ происходит при 2–5 мм ее осадки. Расчетное сопротивление R в пределах критической глубины $L/d_c = 8-15$ сначала возрастает, затем остается постоянным и снова увеличивается в уровне нижнего конца свай СМ на участке (2–3) d вверх от него.

5. На основе настоящих и ранее выполненных исследований [6] разработаны таблицы расчетных сопротивлений грунта вдавливанию нижнего конца (пяты) R и ствола R_f свай СМ [12], обеспечивающие повышение точности их расчетов по сравнению с нормами [11] на 20–30%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сваи железобетонные. Общие технические условия : СТБ 1075-97. – Введ. 01.03.1998. – Минск : МАиС РБ : Стройтехнорм, 1998. – 34с.
2. Сваи забивные железобетонные. Сваи сплошные квадратного сечения с поперечным и без поперечного армирования ствола и сваи квадратного сечения с круглой полостью. Типовые конструкции и детали зданий и сооружений : Серия 1.011-6. – М : НИИЖБ: Госстрой СССР, 1975. – Вып. 1. – 89 с.
3. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М. : Мир, 1972. – 380 с.
4. Разоренов, Г.И. Выбор масштаба при моделировании / Г.И. Разоренов. – М. : Совет. радио, 1973. – 160 с.
5. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – М. : Высш. шк., 1973. – 193 с.
6. Кравцов, В.Н. Исследования и оценка работы забивных свай в песчаном намывном основании / В.Н. Кравцов // Стр. наука и техника. – 2011. – № 2 (35). – С. 40–46.
7. Грунты. Методы полевых испытаний сваями : СТБ 2242-2011. – Введ. 01.07.2012. – Минск : МАиС РБ : Стройтехнорм, 2012. – 40 с.
8. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.01-254-2012. – Введ. 05.01.2012. – Минск : МАиС РБ : Стройтехнорм, 2012. – 164 с.
9. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием : ГОСТ 19912-2012. – Введ. 01.01.2016. – М. : НИ, проект.-изыскат. и конструктор.-технол. ин-т оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова, 2016. – 32 с.
10. Контроль степени уплотнения грунтов при возведении земляных сооружений : Пособие П12-2000 к СНБ 5.01.01-99. – Минск : МАиС РБ : Стройтехнорм, 2012. – 58 с.
11. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Забивные сваи. Правила проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-256-2012. – Введ. 01.07.2012. – Минск : МАиС РБ : Стройтехнорм, 2012. – 144 с.
12. Кравцов, В.Н. Сваи малого сечения фундаментов малоэтажных зданий для упрочненных грунтов и их расчет / В.Н. Кравцов, П.В. Лапатын // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 16. – С. 102–107.

Поступила 02.06.2021

**RESEARCH OF LIMIT STATES BY BEARING CAPACITY
AND DEFORMATIONS OF SHORT CLAY BASES
FINISHED (DRIVEN) PILES OF SMALL CROSS-SECTION
SECTIONS AT THEIR PRESSING AND PULLING**

V. KRAVTSOV

The results and analysis of experimental laboratory and field studies of the bearing capacity of clay bases of finished (driven) short reinforced concrete and metal tensometric piles of small cross section (100×100 mm - 200×200 mm) loaded with static pressing or pulling loads are presented. In the process of research, the field of rational application and understanding of their work in clay soils was clarified, taking into account the size of the cross section and the immersion depth of the experimental short. It is established that the deviations between the values of the bearing capacity obtained by the test results and analytical calculations by the methods of norms are 30-50% and therefore they require adjustment. The effectiveness of designs of short piles of small cross section for low-rise (up to 3 floors) buildings and structures developed at RUE "Institute BelNIIS" was confirmed. The research results are the basis for improving the designs and methods of their calculation, taking into account the soil conditions of the Belarusian region, which reduce the cost of labor costs for the manufacture of foundations of low-rise civil and industrial buildings and structures by 30%.

Keywords: *clay bases, ready-made piles (driven) of small cross section, static tests, load-bearing capacity, reliability, deformation of the ground, efficiency.*