

УДК 624.154:624.07

**СВАИ МАЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ
ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ МАЛОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ, УПРОЧНЕНИЯ ГРУНТОВ И ИХ РАСЧЕТ****канд. техн. наук, доц. В.Н. КРАВЦОВ; П.В. ЛАПАТИН
(Институт БелНИИС, Минск)**

Представлены основные результаты исследований и разработки конструкций забивных свай малого поперечного сечения для фундаментов малоэтажных зданий, сооружений и упрочнения грунтов в условиях Республики Беларусь. Обосновано их применение в условиях Республики Беларусь. На основании обработки вероятностно-статистическим методом свыше 100 результатов испытаний забивных свай малого поперечного сечения получены расчетные характеристики сопротивления грунта в уровне их нижнего конца R и вдоль ствола R_r . В результате точность оценки несущей способности забивных свай малого поперечного сечения по сравнению с нормативной методикой, регламентируемой ТКП 45-5.01-256-2012, повысилась не менее чем на 20%.

Ключевые слова: забивные сваи малого поперечного сечения, фундаменты малоэтажных зданий, упрочнение грунтов и их расчет, сравнение с нормативной методикой.

Введение. В связи с выходом Указа Президента Республики Беларусь № 405 «О некоторых мерах по строительству жилых домов (квартир) в сельскохозяйственных организациях» малоэтажное строительство на селе и индивидуальном секторе приняло в гражданском строительстве значительный размах. Однако указанная застройка имеет достаточно высокую стоимость. Поэтому повышение эффективности производства и качества работ, внедрение прогрессивных решений фундаментов на таких объектах является важной задачей, так как затраты труда, времени и стоимости на их возведение в зависимости от сложности грунтовых условий составляют 15...30% от общей стоимости здания, превышая аналогичные расходы для многоэтажного гражданского и промышленного строительства (5...20%). Не менее актуальным направлением фундаментостроения в Республике Беларусь является освоение в строительных целях неудобей, свалок и территорий с пониженными характеристиками грунтов в черте городов (насыпные, обводненные, пойменные площадки с биогенными грунтами и др.), ранее не используемых в качестве оснований фундаментов, учитывая то, что отвод сельскохозяйственных земель под строительство в настоящее время законодательно ограничен. Для освоения таких территорий согласно [1; 2], как правило, следует применять свайные фундаменты или предварительно упрочнять природные грунты жесткими элементами из набивных или забивных свай (армирование). Это позволяет снизить материальные и трудовые затраты по сравнению с плитными фундаментами на неупрочненном основании до 30...50% (последнее для специфических грунтов) за счет сокращения земляных работ, ручного труда до 50% [1; 3 и др.].

В настоящее время до 80% из общего количества используемых в строительстве свай в Республике Беларусь приходится на стандартные забивные сваи сечением 250×250, 300×300 и 400×400 мм длиной от 3 до 12 м. Особенно затратно применение стандартных забивных свай для малоэтажных объектов (до трех этажей) с небольшими нагрузками на фундаменты из-за повышенного расхода материалов в результате недопогружения, срубки их голов и, как следствие, увеличения сроков строительства, трудоемкости и объемов ручного труда. Кроме того, для их забивки и транспортировки требуется тяжелая специализированная строительная техника, что также существенно удорожает строительство, особенно на площадках, удаленных от мест базирования техники и материальных баз.

С экономической точки зрения в подобных случаях более эффективны сваи малого поперечного сечения (далее – свая СМ) от 100×100 до 200×200 мм. Для таких свай по сравнению со стандартными массивными аналогами на 100 кН несущей способности фундамента требуется бетона меньше на 40%, стали – на 5%. Кроме экономии материала, при использовании свай СМ снижаются также затраты на их погружение и транспортные расходы, так как они легче забивных свай типовой номенклатуры. Это позволяет применять для забивки свай СМ более легкие молоты, что уменьшает инерционные силы при ударе и снижает энергоемкость процесса их погружения в грунт. К преимуществам свай СМ можно отнести и то, что они могут использоваться в любых грунтовых условиях с погружением до проектной отметки (без срубки голов), обеспечивая практически одинаковую несущую способность по грунту и материалу. В последнее время сваи СМ также эффективно используются в качестве жестких элементов для вертикального упрочнения (армирования) грунтов [10 и др.]. Однако из-за отсутствия рабочих чертежей на изготовление и нормативной базы по их проектированию они до сих пор не получили широкого распространения при возведении фундаментов.

В связи с изложенным выше в РУП «Институт БелНИИС» проведены исследования технических и ресурсосберегающих свойств забивных свай СМ с поперечным сечением от 100×100 до 200×200 мм,

на основе которых разработаны конструкции (рис. 1), методы расчета и технология их изготовления с использованием существующего парка форм посредством установки в них вкладышей.

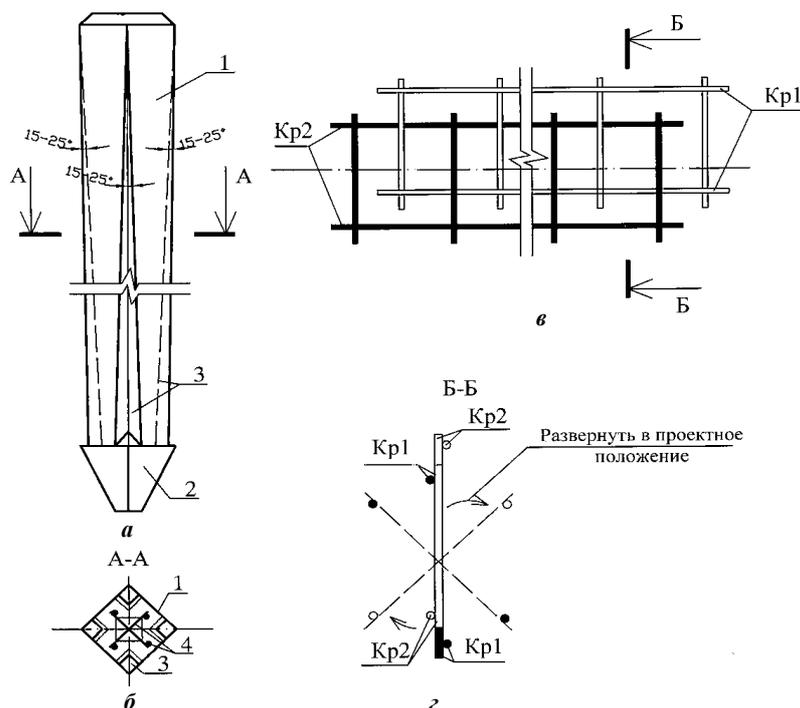


Рисунок 1. – Запатентованная конструкция и технология армирования свай СМ (патент № 19994 «Свая железобетонная»)

В процессе выполненных исследований получены следующие результаты:

- уточнены представления о работе свай СМ в грунтах Республики Беларусь, позволяющие повысить эффективность их проектирования;
- усовершенствованы инженерные методы и программы расчета с разработкой впервые таблиц расчетных сопротивлений грунта вдавливаю остря и ствола свай СМ для условий белорусского региона;
- обоснованы эффективные области использования свай СМ в условиях Республики Беларусь с разработкой эффективной технологии их изготовления;
- усовершенствованы конструкции свай СМ, обеспечивающие их экономическую и ресурсосберегающую эффективность для свайных фундаментов в условиях Республики Беларусь (см. рис. 1).

В данной работе приводятся основные результаты исследований по совершенствованию инженерных методов расчета несущей способности свай СМ на основе разработки таблиц расчетных сопротивлений грунта вдавливаю остря и ствола свай СМ для условий белорусского региона.

Методика расчета несущей способности свай малого поперечного сечения. В современной проектной практике Республики Беларусь наибольшее распространение получил практический метод расчета свай по таблицам нормативных сопротивлений грунтов R и R_f [1; 4] с последующими их выборочными статическими испытаниями как наиболее достоверный и надежный. Метод соответствует принципам проектирования по Еврокоду 1997-1 [5, п. 7.4.1]: «Процесс проектирования должен основываться на эмпирических или аналитических методах расчета, достоверность которых была подтверждена испытаниями статической нагрузкой в схожих условиях».

В этом методе несущая способность свай определяется по двухкомпонентной формуле [4]:

$$F_{di} = \gamma_c (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \cdot \gamma_{cf} \sum R_{fi} \cdot h_i), \quad (1)$$

где R – расчетное сопротивление грунта под нижним торцом свай СМ, кПа, по таблице 6.1 [4]; R_{fi} – расчетное сопротивление i -го слоя грунта, прилегающего к i -му участку ствола свай СМ, кПа, по таблице 6.2 [4]; h_i – толщина i -го участка грунта мощностью не более ≤ 2 м, на которые разбивается основание вдоль ствола свай СМ, м; A , u – соответственно площадь поперечного сечения и периметр свай СМ по ее внешнему контуру без учета угловых вырезов, м; γ_{cR} , γ_{cf} – соответственно коэффициенты условий работы грунта под нижним торцом (пятой) и вдоль ствола свай СМ, учитывающие влияние способа ее погружения согласно ТКП 45-5.01-256 [4]; γ_c – коэффициент условий работы свай СМ в грунте, принимаемый по ТКП 45-5.01-256 [4], как правило, равный единице.

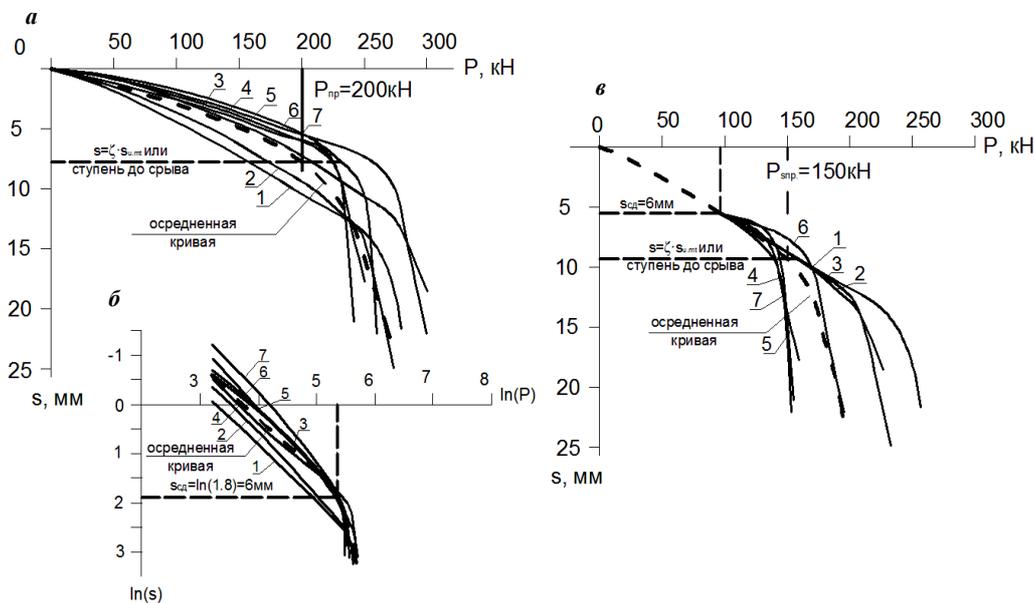
Так как табличные значения расчетных сопротивлений R и R_f в нормах [4] получены для стандартных забивных свай с поперечным сечением более 200×200 мм, отклонение несущей способности свай СМ, F_d , рассчитанных с использованием таблиц [4], от их опытных данных, достигают 70% и более, что требует их уточнения.

Составление таблиц расчетных сопротивлений грунта вдавливанию пяты R и ствола R_f свай СМ. Для определения расчетных сопротивлений R и R_f свай СМ использованы данные более 100 их испытаний, собранные по отчетным данным РУП «Институт БелНИИС», УП «Геосервис» и литературным источникам. В процессе предварительного анализа из рассмотрения были исключены испытания, выполненные с нарушением требований СТБ 2242-2011 [6] и с неполными данными об инженерно-геологических свойствах оснований свай СМ и др. Отобранные испытания объединялись в группы с учетом типа, характеристик грунтов и глубины их погружения в основание.

Разделение общей величины нагрузки P , воспринимаемой основанием сваи СМ, на составляющие компоненты – сопротивление грунта вдавливанию (выдергиванию) ее ствола P_{fnp} и нижнего конца P_{snp} – выполнялось по методике, предложенной Далматовым – Лапшиным [7]. Методика основана на концепции о величине сдвиговой осадки свай s_{cd} , которая соответствует моменту исчерпания касательных сил трения вдоль ствола сваи P_{fnp} . Величина сдвиговой осадки для различных типов грунтов находится в пределах от $s_{cd} \leq 3$ мм до $s_{cd} = 30$ мм.

Согласно методике [7] разделение общей нагрузки P на ее составляющие P_{snp} и P_{fnp} по величине сдвиговой осадки s_{cd} производится в следующей последовательности. Отобранные общие графики испытаний свай СМ $s = f(P)$, разбитые на группы в соответствии с типом грунта основания и глубиной заложения их острия от поверхности грунта, разделяются на два параболических участка (рис. 2): начальный, соответствующий осадке s_{cd} ; конечный, характеризующий работу нижнего конца свай СМ.

Так как оба этих участка аппроксимируются уравнениями параболы, их проще выделить, построив график «нагрузка – осадка» в логарифмическом масштабе (рис. 2, б). Такой график будет характеризоваться двумя пересекающимися прямыми, а точка их пересечения, по данным ранее выполненных опытов с тензометрическими сваями СМ и отдельным определениям значений P_{snp} и P_{fnp} [8], дает значение начала сдвиговой осадки. Тогда нижний участок графика «нагрузка – осадка» будет соответствовать кривой, характеризующей работу нижнего конца сваи СМ. Усредненная кривая работы нижних концов сваи в группе находится посредством их экстраполяции при помощи многочлена Лагранжа, на участке с координатами от $s = 0$ до осадки сдвига $s = s_{cd}$ (рис. 2, в).



- 1 – график № 5 в группе из списка отобранных испытаний свай СМ;
 2 – то же, № 20; 3 – то же, № 7; 4 – то же, № 47; 5 – то же, № 118;
 6 – то же, № 105; 7 – то же, № 28; — — — осредненная кривая группы свай;

а – группа экспериментальных графиков $s = f(P)$ с однотипным грунтом и глубиной заложения нижнего торца свай СМ; б – то же в логарифмическом масштабе; в – экстраполяция графика работы торца свай СМ

Рисунок 2. – Пример разделения общей несущей способности свай СМ P_{np} на ее составляющие: сопротивление грунта вдавливанию торца P_{snp} и ствола P_{fnp}

Затем, вычитая из общей предельной нагрузки P_{np} (для ступени, предшествующей нагрузке срыва или соответствующей осадке $s = o \cdot s_{umt}$), нагрузку, приходящуюся на сопротивление грунта под нижним концом сваи СМ P_{snp} , по формуле (2) находится усилие, соответствующее сопротивлению грунта погружению ее ствола P_{fnp} .

$$P_{fnp} = P_{np} - P_{snp}, \text{ кН.} \quad (2)$$

На рисунке 2 представлен пример обработки 7-ми графиков статических испытаний эталонных свай малого сечения диаметром $114 < 200$ мм, забитых на глубину 6...8 м в однотипные грунты основания, состоящего сверху вниз из супеси средней прочности, подстилаемой в уровне торца сваи СМ песком средней прочности с коэффициентом пористости $e \approx 0,6$ ($0,58 \leq e \leq 0,62$).

После сбора в группу однотипных графиков испытаний свай (см. рис. 2, а) и перестройки их в логарифмическом масштабе (см. рис. 2, б) выделена точка перелома, характеризующая начало сдвиговой осадки с координатами $s_{сд}$, $P_{сд}$. Как видно на рисунке 2, для пластичной супеси средней прочности сдвиговая осадка равна $s_{сд} = 6$ мм, а нагрузка, соответствующая сопротивлению грунта вдавливанию ствола, составляет:

$$P_{fnp} = 200 - 150 = 50 \text{ кН.}$$

3. Анализ и обработка экспериментальных данных вероятно-статистическим методом. Определение значений R и R_f произведено с применением вероятно-статистического метода, регламентированного ГОСТ 20522 [9] с учетом основных положений теории надежности. Доверительная вероятность принята равной $\alpha = 0,95$ [4]. Нормативные сопротивления грунта под торцом R_n и вдоль ствола R_{fn} найдены делением частных величин предельных нагрузок P_{si} , P_{fi} (см. рис. 2) на площади поперечного сечения нижнего конца СМ и участков ее боковой поверхности соответственно. Нормативные значения исследуемых грунтов приняты равными их среднеарифметическим величинам для группы R_m , R_{fm} , кПа. При обработке данных исключались частные значения, для которых не выполнялись условия (3):

$$|R_m - R_i| > \nu S^R, \quad |R_{fm} - R_{fi}| > \nu S^f, \text{ кПа,} \quad (3)$$

где ν – статистический критерий по таблице Ж.1 приложения Ж [9] в зависимости от числа определений n ; S – среднее квадратическое отклонение характеристики, найденное по формулам (4):

$$S^R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_m - R_i)^2}, \quad S^f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{fm} - R_{fi})^2}, \text{ кПа.} \quad (4)$$

Здесь R_m , R_{fm} – среднеарифметические значения нормативных сопротивлений грунта; R_i , R_{fi} – частные значения нормативных сопротивлений грунта.

Расчетные сопротивления грунта определены по формулам:

$$R = \frac{R_n}{\gamma_g}, \quad R_f = \frac{R_{fn}}{\gamma_g}, \text{ кПа,} \quad (5)$$

где R_n , R_{fn} – нормативные значения расчетных сопротивлений грунта соответственно под торцом и вдоль ствола сваи СМ группы, кПа; γ_g – коэффициент надежности по грунту в соответствии с формулой (6) [9]:

$$\gamma_g = \frac{1}{1 \pm \rho_\alpha}. \quad (6)$$

Здесь $\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}$ – показатель точности оценки средних значений, знак принимается таким, чтобы обеспечивалась большая надежность основания; ν – коэффициент вариации:

$$\nu^R = \frac{S^R}{R}, \quad \nu^f = \frac{S^f}{R_f}; \quad (7)$$

t_α – коэффициент, принимаемый по таблице Ж.2 приложения Ж [9] в зависимости от выбранной доверительной вероятности α и числа степеней свободы $K = n - 1$.

Итоговые результаты составления таблиц расчетных сопротивлений R и R_f отражены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Расчетные сопротивления грунта R под нижним торцом одиночной сваи СМ квадратного поперечного сечения от 100×100 до 200×200 мм и прямоугольного, круглого поперечных сечений, площадь которых эквивалентна площади сваи квадратного поперечного сечения

Глубина расположения нижнего конца сваи от поверхности планировки z_m , М	Коэффициент пористости e	Расчетные сопротивления R , кПа, грунтов								
		песка				глинистых при показателе текучести I_L , равном:				
		крупного	среднего	мелкого	пылеватого	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
1-2	0,5	8280	3840	2400	1480	6490	3840	1980	990	560
	0,7	6340	2800	1840	1120	5340	3120	1620	810	450
3	0,5	8500	4060	2620	1560	6600	4030	2100	1190	610
	0,7	6500	3120	1960	1280	5500	3310	1860	1030	500
4	0,5	8600	4120	2700	1620	6650	4160	2120	1220	630
	0,7	6620	3180	2120	1340	5560	3350	1940	1100	536
5-6	0,5	8680	4200	2750	1730	6700	4150	2255	1275	655
	0,7	6700	3250	2185	1450	5600	3375	1978	1156	552

Примечание. При промежуточных значениях z_m , e , I_L расчетные сопротивления грунтов R определяются интерполяцией.

Таблица 2. – Расчетные сопротивления грунта R_{fi} вдавливаю стволу одиночной сваи СМ квадратного поперечного сечения от 100×100 до 200×200 мм и прямоугольного, круглого поперечных сечений, площадь которых эквивалентна площади сваи СМ квадратного поперечного сечения

Средняя глубина расположения участка грунта h_i от поверхности планировки z_{mi} , М	Средний коэффициент пористости грунта e на участке h_i	Расчетные сопротивления R_{fi} , кПа, грунтов								
		песка				глинистых при показателе текучести I_L , равном:				
		крупного, среднего	мелкого	пылеватого	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	
1-2	0,5	76	49	42	43	37	31	24	15	
	0,7	52	38	31	42	35	29	22	13	
2-3	0,5	81	54	46	58	48	39	28	17	
	0,7	57	42	35	56	45	36	25	15	
3-4	0,5	82	55	47	70	50	41	29	19	
	0,7	58	43	36	67	46	38	26	17	
4-5	0,5	84	56	49	72	51	43	30	20	
	0,7	60	46	37	68	48	40	27	18	

Примечание. При промежуточных значениях z_m , e , I_L расчетные сопротивления грунтов R_{fi} определяются интерполяцией.

Заключение. В итоге выполненной в РУП «Институт БелНИИС» работы по разработке, исследованию и внедрению в практику строительства забивных свай малого поперечного сечения (СМ) подтверждены экспериментально и апробацией в производственных условиях достоверность предложенных конструкций, методики расчета и технологии изготовления свай СМ [10 и др.].

На основании результатов, полученных при обработке графиков испытаний свай СМ, проведенных в РУП «Институт БелНИИС», собранных по отчетным данным УП «Геосервис» и литературным источникам, уточнен нормативный метод их расчета [4] по несущей способности. Отклонения расчетных значений несущей способности свай СМ, найденных по предлагаемой методике, от их опытных величин не превышают 10%.

Результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований и уточненный на их основе метод расчета свай СМ положены в основу разработанных и утвержденных Рекомендаций по проектированию и устройству фундаментов из свай малого поперечного сечения в условиях Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.01-254-2012. – Введ. 05.01.2012. – Минск : МАиС Респ. Беларусь, 2012. – 164 с.

2. Горбунов-Посадов, М.И. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов. – М. : Стройиздат, 1985. – 480 с.
3. Кравцов, В.Н. Принципы оптимального проектирования и пути повышения эффективности железобетонных фундаментов в грунтовых условиях Республики Беларусь / В.Н. Кравцов, Н.В. Сорока // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы III Междунар. симп., Минск, 9–11 нояб. 2011 г. : в 2-х т. ; редкол.: М.Ф. Марковский (предс.) [и др.]. – Минск : Минскпроект, 2011. – Т. 1 – С. 206–219.
4. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Сваи забивные. Правила проектирования : ТКП 45-5.01-256-2012. – Введ. 05.01.2012. – Минск : МАиС Респ. Беларусь, 2013. – 137 с.
5. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Ч. 1. Общие правила : ТКП EN 1997-1-2009. – Введ. 10 дек. 2009 г. – Минск : МАиС Респ. Беларусь, 2010. – 121 с.
6. Грунты. Методы полевых испытаний сваями проектирования : СТБ 2242-2011. – Введ. 01.07.2012. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2011. – 40 с.
7. Далматов, Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин. – Л. : Стройиздат, 1975. – С. 25–38.
8. Кравцов, В.Н. Исследования и оценка работы забивных свай в песчаном намывном основании / В.Н. Кравцов // Строительная наука и техника. – 2011. – № 2(35). – С. 40–46.
9. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний : ГОСТ 20522-2012. – Введ. 01.07.2014. – Минск : БелГИИС 2011 : НИИОСП. – 24 с.
10. Кравцов, В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование и проектирование оснований плитных фундаментов пониженной прочности, упрочненных вертикальным армированием / В.Н. Кравцов, П.В. Лапатын, С.А. Якуненко // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты : материалы науч.-метод. конф., Минск, 26–27 мая 2015 г. ; редкол.: В.Ф. Зверев (предс.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 228–239.

Поступила 10.10.2016

PILES WITH SMALL CROSS SECTION FOR FOUNDATIONS OF LOW-RISE BUILDINGS, STRENGTHENING GROUNDS AND THEIR CALCULATION

V. KRAVTSOV, P. LAPATIN

Substantiation of applying, main results of researches and structure development of the driven piles with small cross section for low-rise buildings, structures foundations and strengthening grounds are presented. The grounds' design characteristics were obtained on the basis of more than hundreds tests of the piles with small cross-section in the level of their bottom toes R and along their shafts R_f . As a result accuracy of the evaluation of such piles bearing capacity compared with standard procedure regulated by ТКП 45-5.01-256-2012 increased not less than 20%.

Keywords: *driven piles small cross-section, the foundations of low-rise buildings, the hardening of soils and their calculation, comparison with standard methods.*