

Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Влияние грунтового ядра на оптимизацию свай-оболочки

Г.Я. Булатов¹, Н.С. Воронина²

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251,
Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Информация о статье

УДК 624.154-462

История

Подана в редакцию 1 апреля 2015

Ключевые слова

висячая свая;
свая-оболочка;
оптимизация фундаментов;
равнопрочная свая;
грунтовое ядро;
эффект "самозапираания"

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена возможность оптимизации по материалоемкости стальных свай-оболочек, погружаемых с открытым нижним концом. Расчеты выполнены с учетом влияния грунтового ядра. Вычислена несущая способность свай различных глубин погружения. Вычислены напряжения, возникающие в поперечных сечениях свай. Напряжения проверены по теориям прочности. Рассчитаны толщины стенок равнопрочной свай-оболочки и экономия материала, достигаемая оптимизацией. Сделаны следующие выводы: 1. Проведенные в данной статье вычисления с учетом давления грунтового ядра позволяют утверждать, что оптимизация стальных свай-оболочек (ССО) по материалу с обеспечением условия равнопрочности возможна; 2. Напряжения в материале сваи после оптимизации толщины ее стенок были проверены по соответствующим теориям прочности; 3. Главный результат работы – возможность экономии основного строительного материала сваи при выполнении условия ее равнопрочности. Оптимизация наиболее эффективна для сваи меньшей длины из рассмотренных в статье, то есть для 11-метровой.

Содержание

1.	Введение	8
2.	Обзор зарубежной и отечественной литературы	8
3.	Постановка задачи	9
4.	Математическое моделирование влияния грунтового ядра на оптимизацию свай-оболочки	9
5.	Численное моделирование влияния грунтового ядра на оптимизацию свай-оболочки	13
6.	Заключение	17

1

Контактный автор:

+7 (812) 297 5949, gybulatov@mail.ru (Булатов Григорий Яковлевич, доцент)

2

+7 (931) 317 9287, tata_101@mail.ru (Воронина Наталья Сергеевна, студент)

1. Введение

В России в последние 10 лет значительно увеличились темп и объемы строительства высотных зданий, в том числе и в городах, чьи инженерно-геологические условия не в состоянии воспринимать столь значительные нагрузки без устройства фундаментов повышенной несущей способности. Этим условиям в наибольшей мере отвечают свайные фундаменты, размер, форма и материал которых могут значительно различаться в широких пределах.

В свайном фундаментостроении, несмотря на общеизвестность данного метода фундирования и широкое применение свай повсеместно, а также длительного их исследования, существует еще очень много неизученных вопросов, которые могут оказать решающее значение при проектировании. Особенно остро вопрос стоит в случае со сваями-оболочками с открытым нижним концом.

2. Обзор зарубежной и отечественной литературы

Санкт-Петербург располагается на северо-западной части Русской плиты, верхняя толща которой состоит из отложений осадочного чехла – песчано-глинистых грунтов мощностью от 3-5 м до 12-20 м, реже более 20 м [1]. Такие грунты обладают чувствительностью к техногенным воздействиям, они неустойчивы, их прочность и несущая способность мала, что значительно влияет на характер фундаментостроения в городе и области [2-12, 44]. В связи с этим в Санкт-Петербурге распространены висячие стальные сваи-оболочки, достоинства и недостатки которых, наряду с проблемами исследования, излагаются в работах [13-20].

За рубежом, где стальных трубчатые сваи используются уже достаточно давно при возведении объектов различного типа (причальные и шельфовые сооружения, нефтяные платформы, опоры мостов), практически отсутствует литература, описывающая подробный механизм взаимодействия этих свай с грунтом [21]. Вопрос об определении несущей способности (НС) стальных свай-оболочек (ССО), погруженных с открытым нижним концом, несмотря на множество опубликованных ранее работ по этой теме, до сих пор остается открытым и изучается многими [21-28].

В предыдущей работе [29] в расчетах несущей способности стальных свай-оболочек и при определении толщин стенок свай, необходимых для обеспечения условия равнопрочности, авторами не учитывалось влияние грунтового ядра, что отвечает требованиям расчета по методике СП [11]. Однако, несмотря на теоретическую правильность такого расчета, он, по опыту предыдущих исследований, имеет ряд недостатков и неточностей. Так, СП [11] не содержит конкретных рекомендаций для расчета ССО, погружаемых с открытым нижним концом. Только согласно пункта 7.2.2 в расчетах НС площадь опирания сваи на грунт принимается по площади сваи-оболочки нетто. В этом случае, если в расчетах принимать только ножевую площадь опирания, составляющая НС под нижним концом сваи будет сильно занижена в сравнении с реальным значением [21, 30]. Кроме того, при изучении СП [11], обнаружено, что коэффициенты условий работы в таблице 7.4 даны только для железобетонных свай диаметром до 0,8 м с открытым нижним концом. Также СП [11] не содержит в себе конкретных рекомендаций по вычислению осадок свай-оболочек, хотя на эту тему исследователи уже публиковали свои труды [31].

Игнорирование влияния грунтового ядра в расчетах, кроме описанного выше явления занижения составляющей НС под нижним концом сваи, имеет и другие последствия. Уменьшая значение несущей способности ССО, мы вносим вклад в запас прочности. Однако, не принимая во внимание разрывающее действие грунтового ядра, мы рискуем получить растягивающие напряжения, которые неспособны воспринять слишком тонкие стенки оптимизированной сваи.

В работе [32] описана инновационная геотехническая модель "геомассив-основание-фундамент-сооружение". В публикации [33] представлены некоторые "расчетные модели свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой". Также взаимодействие грунта со свайей учтено в работе Прудентова [34], а Рахаринуси в своих трудах [21, 31] изложил "инженерные методы расчета несущей способности и осадки стальных трубчатых свай на осевые вдавливающие нагрузки при их погружении в грунты оснований портовых гидротехнических сооружений". В работе рассмотрены сваи с открытым нижним концом.

Публикации Прудентова и прочих подтолкнули к дальнейшим исследованиям влияния грунтового ядра и эффекта "самозапираания" авторов статей [35-37], благодаря чему стало известно о новых технологиях: "свая в трубе" и "фундамент на трубогрунте". Многие доклады на конференциях также посвящены этой теме [30, 38-43].

В рамках данной статьи авторами предпринята попытка численного учета влияния грунтового ядра внутри и давления грунта снаружи ССО на возможность ее оптимизации. Расчеты выполнены по различным методикам, с учетом эффекта "самозапираания".

3. Постановка задачи

Целью работы является оптимизация стальной сваи-оболочки с учетом влияния грунтового ядра. Под оптимизацией понимается назначение толщин стенок ССО, удовлетворяющих условию равнопрочности.

Расчет ведем по методике оценки напряженного состояния стенок сваи, как от действия грунтового ядра, так и от наружного давления грунта, возникающих на конечной стадии погружения сваи. Напряженное состояние определяем методами сопротивления материалов. Поведение грунта описывается моделью предельного равновесия [34, 37, 38]. НСС определяем по СП [11].

4. Математическое моделирование влияния грунтового ядра на оптимизацию сваи-оболочки

4.1. Моделирование НСС

В качестве действующей будем рассматривать нагрузку в конце процесса погружения сваи. При этом примем допущение, что она равна НСС, что соответствует методу статического вдавливания. При погружении другими методами необходимо вводить соответствующие коэффициенты перегрузки, поскольку могут возникать дополнительные динамические воздействия.

Расчетную схему для вычисления несущей способности стальной трубчатой сваи-оболочки с открытым нижним концом с учетом влияния грунтового ядра представим в виде рисунка 1.

Несущую способность ССО в соответствии с расчетной схемой на рисунке 1, запишем в виде

$$F_d = F_{df} + F_{dR} + F_{dЯ} \quad \text{при} \quad (1)$$

$$F_{df} = \gamma_c \cdot u \sum \gamma_{cf} \cdot h_i \cdot f_i, \quad (1a)$$

$$F_{dR} = \gamma_c \cdot \gamma_{cR} \cdot R \cdot A_{net} \quad \text{и} \quad (1б)$$

$$F_{dЯ} = \gamma_c \cdot \gamma_{cЯ} \cdot R_{Я} \cdot A_{Я}, \quad (1в)$$

где F_{df} – полное боковое сопротивление по наружной поверхности;

F_{dR} – несущая способность на острие сваи;

$F_{dЯ}$ – несущая способность грунтового ядра, заполняющего полость ССО при ее погружении;

γ_c – коэффициент условий работы сваи в грунте;

γ_{cf} – коэффициент условий работы

грунта на боковой поверхности сваи;

$\gamma_{cR} = \gamma_{cЯ}$ – коэффициент условий работы грунта

под нижним концом сваи, учитывающий влияние способа погружения сваи на расчетные сопротивления грунта;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи;

$R_{Я}$ – расчетное сопротивление грунтового ядра под нижним концом сваи;

A_{net} – площадь опирания на грунт сваи, принимаемая по площади сваи-оболочки нетто;

$A_{Я}$ – площадь сечения грунтового ядра;

u – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи;

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи;

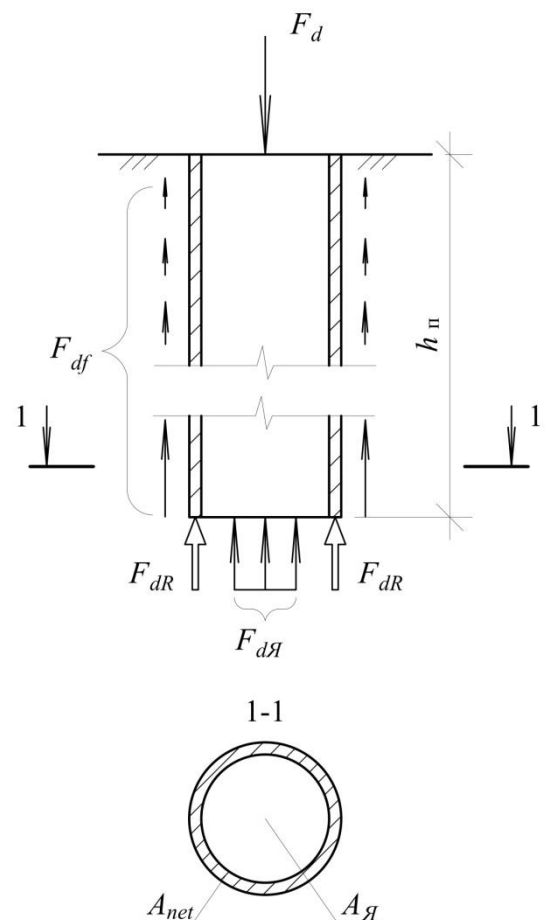


Рисунок 1. Расчетная схема к определению НСС

h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи;

Площадь нетто сваи-оболочки вычисляем по формуле

$$A_{net} = \pi \cdot \left(\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D - 2 \cdot \delta}{2} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где D – наружный диаметр ССО;

δ – толщина стенки ССО.

Площадь сечения грунтового ядра вычисляем по формуле

$$A_{я} = \pi \cdot r^2, \quad (3)$$

где r – внутренний радиус ССО.

Наружный периметр поперечного сечения сваи определяем по формуле

$$u = \pi \cdot D. \quad (4)$$

Удельное сопротивление ядра представим в виде

$$R_{я} = \min\{R_B; R\} \quad \text{при} \quad (5)$$

$$R_B = \max\{q_{я}; R^*\} \quad \text{и} \quad (5a)$$

$$R^* = \frac{F_{df}^*}{A_{я}}, \quad (5b)$$

где R_B – удельное сопротивление проталкиванию грунтового ядра внутрь полости трубы;

$q_{я}$ – удельное сопротивление проталкиванию грунтового ядра с учетом эффекта его «самозапираания»;

R^* – то же, за счет сил простого трения по внутренней поверхности сваи;

F_{df}^* – полное сопротивление простому трению по внутренней поверхности сваи-оболочки.

Для учета давления грунтового ядра на стенки сваи изнутри можно использовать исследования Янсена, который, изучая давления в силосе, показал, что силы трения, возникающие на поверхности его стен, влияют на давление сыпучих материалов на стены и днища силосов, уменьшая их величину [44].

Применительно к трубосваям с открытым нижним концом существует методика определения давления грунтового ядра, описанная в работах [34, 38].

Предельное удельное сопротивление на различных глубинах погружения ядра определяем по формуле

$$q_{я} = \frac{B}{A} \cdot (\exp(h_{я} \cdot A) - 1) \quad \text{при} \quad (6)$$

$$A = \frac{2 \cdot \xi^{6H} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0}{r} \quad \text{и} \quad (7)$$

$$\frac{B}{A} = \frac{2 \cdot c_0 + \gamma_{сп} \cdot r}{2 \cdot \xi^{6H} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0}, \quad (8)$$

где $h_{я}$ – расчетная высота столба грунта, входящего в полость сваи при погружении;

ξ^{6H} – коэффициент бокового давления грунта внутри сваи;

$\gamma_{сп}$ – удельный вес грунта;

φ_0 и c_0 – угол трения и сцепление при сдвиге грунта по поверхности стальной сваи-оболочки;

A и B – постоянные условия «самозапираания» внутренней полости сваи.

$$h_{я} = \frac{\ln\left(\left(q_{я} : \frac{B}{A}\right) + 1\right)}{A}. \quad (9)$$

Фактическая $h_{я}$ может зависеть от многих факторов, например, способа погружения сваи, и может располагаться на разных Z .

Расчетную схему к определению давления на стенки сваи изобразим на рисунке 2.

Давление, вызываемое действием грунтового ядра, определяем по формуле

$$P_{x,i}^{вн} = R_{я,i} \cdot \xi^{вн}. \quad (10)$$

По методике расчета СП [11] не учитывается горизонтальное давление наружного грунта на стенки сваи, в то время как оно может быть довольно значимым в расчетах. Уже существуют публикации, посвященные этой теме [35, 36].

Давление, действующее на наружную поверхность стенок сваи от грунта, можно вычислить по формуле

$$P_{x,i}^{нар} = P_{сп,i} \cdot \xi^{нар} \quad \text{при} \quad (11)$$

$$P_{сп,i} = \gamma_{сп} \cdot z_i, \quad (12)$$

где $P_{сп,i}$ – вес грунта снаружи сваи, вычисляемый в i -ом слое;

$\xi^{нар}$ – коэффициент бокового давления (распора) грунта снаружи сваи;

z_i – глубина сечения, на котором определяется давление грунта.

Результирующее горизонтальное давление на стенки сваи от действия грунта снаружи и внутри нее определяем по формуле

$$\Delta p_{x,i} = p_{x,i}^{вн} + p_{x,i}^{нар}. \quad (13)$$

4.2. Моделирование напряжений и равнопрочности сваи

Горизонтальные напряжения определяем по формуле

$$\sigma_x = \frac{\Delta p_x \cdot r}{\delta}. \quad (14)$$

Вертикальные напряжения определяем по формуле

$$\sigma_z = \frac{N_{d,z}}{A_{net}} \quad \text{при} \quad (15)$$

$$N_{d,z} = F_d - F_{df} - F_{df}^{**}, \quad (16)$$

где $N_{d,z}$ – сжимающая сила в рассматриваемом сечении на глубине z .

F_{df}^{**} – сопротивление трению по внутренней поверхности сваи-оболочки с учетом «самозапираания» грунта.

$$F_{df}^{**} \Big|_{z=h_{я}} = F_{df} \Big|_{z=h_{я}}. \quad (17)$$

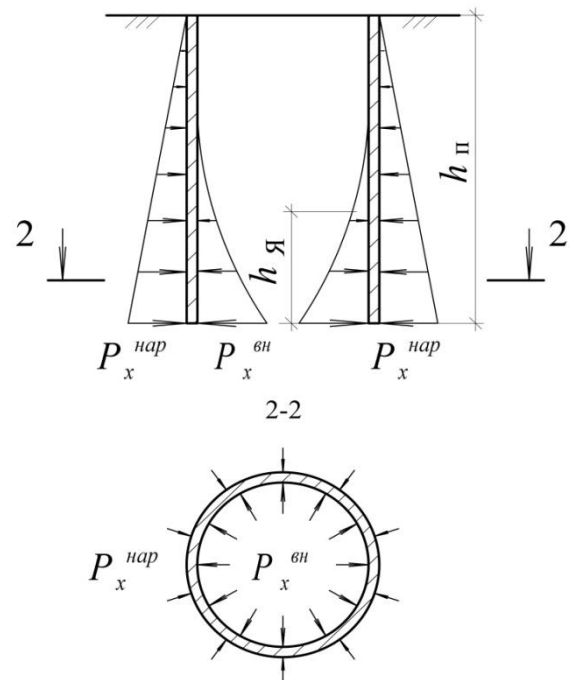


Рисунок 2. Расчетная схема к определению давления на стенки ССО

Для других сечений z сопротивление трению по внутренней поверхности определяем интерполяцией предположив, что F_{df}^{**} изменяется линейно, грунт входит в сваю на высоту $h_{г}$ и $F_{df}^{**}|_{z=h_{г}} = 0$.

Равнопрочной будем считать сваю, для которой площади каждого из рассматриваемых сечений изменяются в соответствии с действующими в них напряжениями, и обеспечивается условие равнопрочности

$$\max(\sigma_x; \sigma_z) = [\sigma], \quad (18)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

Тогда из формулы (14) толщину стенки, необходимую для обеспечения условия равнопрочности, при действии сил по оси x определяем по формуле

$$\delta_x^{opt} = \frac{\Delta p_x \cdot r}{[\sigma]}. \quad (19)$$

Толщину стенки, необходимую для обеспечения условия равнопрочности при действии сил по оси z , определяем по формуле

$$\delta_z^{opt} = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{N_{d,z}}{[\sigma] \cdot \pi}}. \quad (20)$$

Расчетную толщину стенок оптимизированной сваи определяем как

$$\delta = \max(\delta_x; \delta_z). \quad (21)$$

Проверим прочность оптимизированной сваи по условию

$$\sigma_{\vartheta} = [\sigma], \quad (22)$$

где σ_{ϑ} – эквивалентные напряжения, вычисляемые по различным теориям прочности [45];

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

По II теории прочности «наибольших касательных напряжений»

$$\sigma_{\vartheta}^{III} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4 \cdot \tau_{xz}^2}, \quad (22a)$$

где σ_x – нормальное напряжение, действующее на площадке с нормалью x ;

σ_z – нормальное напряжение, действующее на площадке с нормалью z ;

τ_{xz} – касательное напряжение, действующее на площадке с нормалью x в направлении z .

По IV «энергетической» теории прочности

$$\sigma_{\vartheta}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (22б)$$

Экономия материала оптимизированной сваи вычислим по формуле

$$\mathcal{E}_G = \frac{G - G^{opt}}{G} \cdot 100\%, \quad (23)$$

где G – вес неоптимизированной сваи;

G^{opt} – вес оптимизированной.

5. Численное моделирование влияния грунтового ядра на оптимизацию сваи-оболочки

5.1. Исходные данные

В качестве исследуемых объектов принимаем две стальные сваи-оболочки (ССО) глубиной погружения h_n равной 19 и 11 метров с геометрическими характеристиками поперечного сечения, представленными на рисунке 3.

Инженерно-геологические условия условно приняты однородными, грунт – песок средней крупности (далее – песок с/з). Его механические характеристики, необходимые для расчета, представлены в таблице

Таблица 1. Характеристики песка с/з

Характеристика	Усл. обозн.	Ед.изм.	Значение
Коэффициент пористости	e	–	0,55
Угол трения грунта о сталь	φ_0	град.	30
Удельное сцепление	c_0	кПа	4
Коэффициент бокового давления внутреннего грунта	$\xi^{вн}$	–	0,5
Коэффициент бокового давления наружного грунта	$\xi^{нар}$	–	0,5
Удельный вес грунта	$\gamma_{зр}$	кН/м ³	20

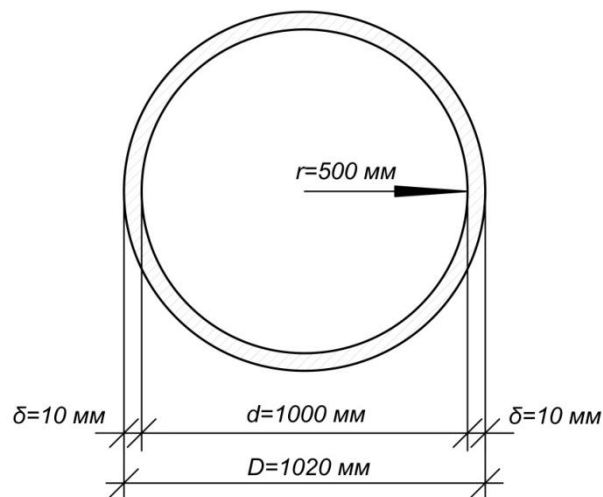


Рисунок 3. Геометрические характеристики поперечного сечения ССО

$$\text{По формуле (3)} \quad A_{net} = 3,14 \cdot \left(\left(\frac{1,02}{2} \right)^2 - \left(\frac{1,02 - 2 \cdot 0,01}{2} \right)^2 \right) = 0,0317 \text{ (м}^2\text{)}.$$

5.2. Расчет напряжений и моделирование равнопрочности сваи

Несущая способность исследуемых свай с учетом грунтового ядра уже была вычислена ранее, авторами работы [38]. Сваи-оболочки погружают вибропогружателями, выемкой грунта под нижним концом сваи или комбинацией этих методов. Однако, в расчетах НС коэффициенты, учитывающие влияние способа погружения сваи, принимаются равными единице, как для забиваемых свай. Такое допущение служит лишь для упрощения расчетов.

По результатам этих расчетов вычислим значения напряжений в стенках сваи длиной $h_n=19$ м по формулам (1) – (17), для некоторых сечений представим в виде таблиц 2 и 3. При вычислениях учитываем, что грунтовое ядро входит в полость сваи на 11 м.

Таблица 2. Расчет напряжений от давления грунта в стенках 19-метровой ССО

Z, м	$p_{x,i}^{вн}$, кПа	$p_{x,i}^{нар}$, кПа	Δp_x , кПа	σ_x , МПа
0	0	0	0	0
4	0	-40	-40	-2
8	781	-80	701	35
12	2080	-120	1960	98
16	2240	-160	2080	104
19	2360	-190	2170	109

Таблица 3. Расчет вертикальных напряжений в стенках 19-метровой ССО

Z, м	F_d , кН	F_{df} , кН	F_{df}^{**} , кН	$N_{d,z}$, кН/м	σ_z , МПа
0	7570	0,00	0	7570	-241
4		485		7085	-226
8		1230	40,5	6300	-201
12		2060	666	4844	-154
16		2960	2648	1962	-62
19		3690	3710	170,0	-5

По [38] для сваи длиной $h_p=11$ м расчет напряжений по формулам (1) – (17) для некоторых сечений на глубинах Z представлен в таблицах 4, 5. При вычислениях было принято предположение, что грунтовое ядро заполняет всю сваю.

Таблица 4. Расчет напряжений от давления грунта в стенках 11-метровой ССО

Z, м	$p_{x,i}^{вн}$, кПа	$p_{x,i}^{нар}$, кПа	Δp_x , кПа	σ_x , МПа
0	0	0	0	0
2	371	-20	351	17,5
4	742	-40	702	35,1
6	1110	-60	1050	52,6
8	1480	-80	1400	70,2
11	2040	-110	1930	96,5

Таблица 5. Расчет вертикальных напряжений в стенках 11-метровой ССО

Z, м	F_d , кН	F_{df} , кН	F_{df}^{**} , кН	$N_{d,z}$, кН/м	σ_z , МПа
0	5190	0	0	5190	-164
2		179	582	4430	-140
4		485	1160	3550	-112
6		842	1750	2600	-82
8		1230	2330	1630	-51
11		1840	3200	150	-5

Построим по результатам вычислений графики для модуля значений σ_x и σ_z , – рисунки 4, 5.

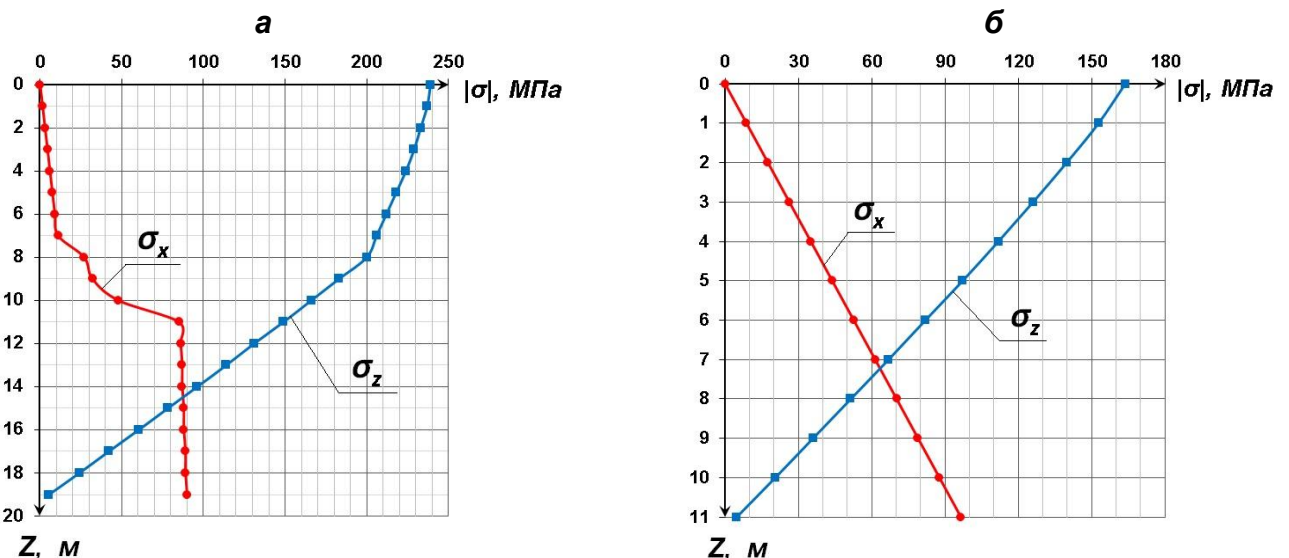


Рисунок 4. Графики зависимости модулей напряжений в поперечных сечениях неоптимизированной сваи: а – глубиной погружения 19м; б – глубиной погружения 11м.

Графики на рисунке 4 показывают, что при подборе оптимальных толщин стенок, не обходимых для обеспечения условия равнопрочности сваи, ни в коем случае нельзя пренебрегать давлением грунта, вызывающим растягивающие напряжения. На графике видно, что в сечении на глубине 14,5 м для 19-

метровой сваи и на глубине 7 м для 11-метровой, вертикальные напряжения оказываются меньше горизонтальных, и подбор толщин стенок ниже этих сечений должен производиться по последним напряжениям.

5.3. Оптимизация сваи и оценка ее эффективности

Вычислим толщины стенок, необходимые для обеспечения условия равнопрочности по формулам (19) – (21). Результаты расчета в некоторых сечениях для свай глубиной погружения 19 и 11 метров запишем в таблицы 8 и 9 соответственно, графически представим в виде рисунка 4.

Таблица 6. Результаты расчета толщин стенок равнопрочной сваи длиной 19 метров

Z, м	δ_x^{opt} , мм	δ_z^{opt} , мм	δ^{opt} , мм
0	0	14,9	15,0
4	0,38	14,0	14,1
8	1,7	12,4	12,5
12	5,4	9,5	9,6
16	5,5	3,9	7,0
19	5,6	0,33	7,0

Таблица 7. Результаты расчета толщин стенок равнопрочной сваи длиной 11 метров

Z, м	δ_x^{opt} , мм	δ_z^{opt} , мм	δ^{opt} , мм
0	0	10,2	10,2
2	1,1	8,8	8,8
4	2,2	7,1	7,1
6	3,3	5,2	6,0
8	4,4	3,2	6,0
11	6,0	0,3	6,0

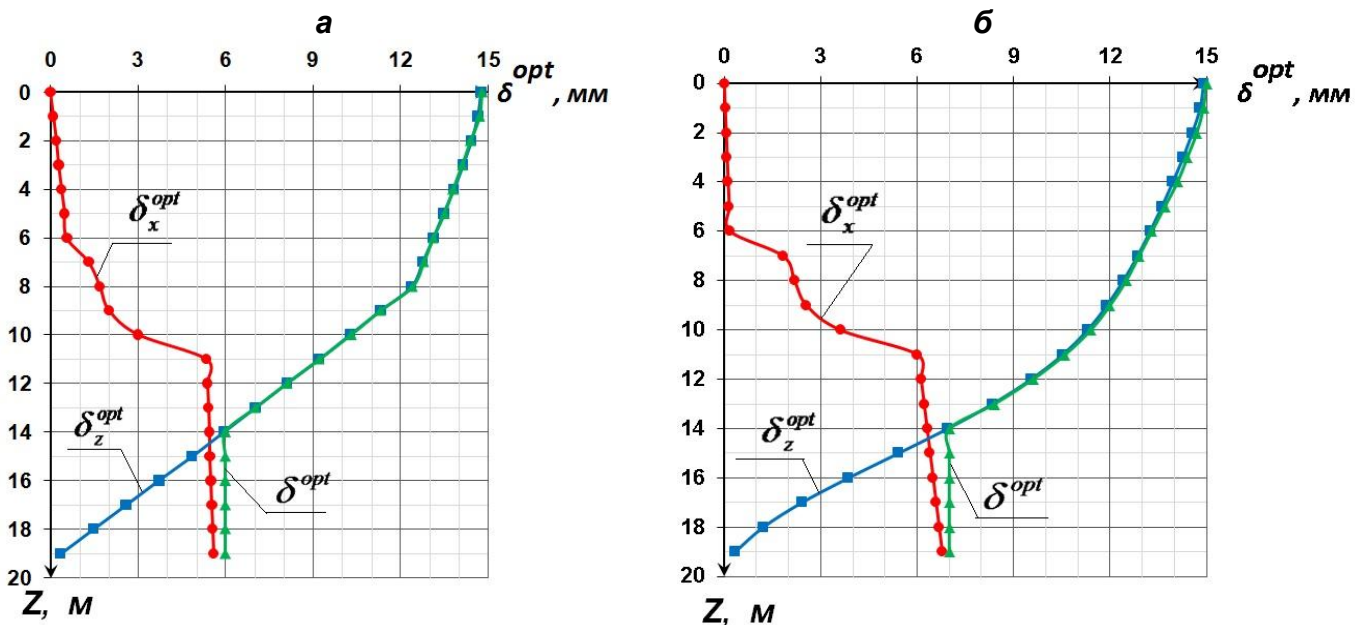


Рисунок 5. Графики зависимости толщин стенок оптимизированной сваи в ее сечениях: а – 19-метровой сваи; б – 11-метровой сваи.

Вычислим напряжения в полученной оптимизированной свае с толщинами стенок δ по формулам (14) – (15) и проверим их по теориям прочности по формулам (22) - (22.3).

Для расчета условно принимаем $\tau_{xy} = 0$. Результаты запишем в таблицы 8-9.

Таблица 8. Расчет напряжений в стенках 19-метровой ССО

Z, м	$\sigma_x = \sigma_1$, МПа	$\sigma_x = \sigma_3$, МПа	$ \sigma_{\vartheta}^{III} $, МПа	$ \sigma_{\vartheta}^{IV} $, МПа
0	0	-160	160	160
4	-1,4	-159	158	158
8	28	-159	187	175
12	102	-159	261	228
16	149	-88	237	207
19	155	-7,6	163	159

Таблица 9. Расчет напряжений в стенках 11-метровой ССО

Z, м	$\sigma_x = \sigma_1$, МПа	$\sigma_x = \sigma_3$, МПа	$ \sigma_{\vartheta}^{III} $, МПа	$ \sigma_{\vartheta}^{IV} $, МПа
0	0	159	159	159
2	20,0	159	178	169
4	49,4	157	206	187
6	86,3	134	220	192
8	115	84	199	173
11	158	7,7	166	162

Как видно из таблиц 8-9, вычисленные эквивалентные напряжения в некоторых сечениях оказались больше допустимых. Скорректируем толщину стенки сваи в соответствии с ними, запишем результаты в таблицу 10 и изобразим в виде графиков на рисунке 6.

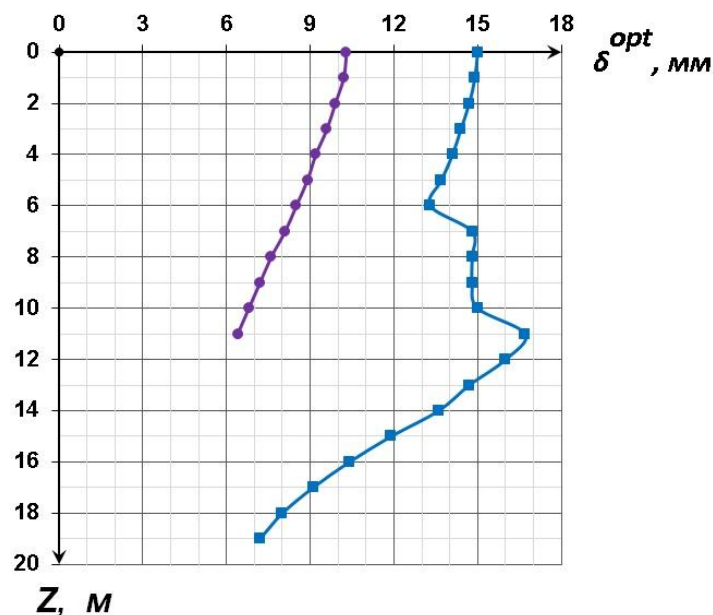


Рисунок 6. Графики зависимости толщин стенок оптимизированной по теориям прочности сваи в ее сечениях

Отметим, полученные расчетом по предложенной математической модели толщины стенок, показывают лишь возможный эффект от оптимизации. В данном случае толщина стенки равнопрочной сваи длиной 11 метров изменяется более плавно по сравнению с 19-метровой, потому что грунтовое ядро не заполняет последнюю ССО полностью, этим вызваны скачки эквивалентных напряжений и, как следствие, толщин стенок.

Вычислим теоретическую экономию материала сваи по формуле (23).

Для 19 метровой сваи теоретическая экономия материала \mathcal{E}_G составила 11%, для 11 метровой – 16%. Таким образом, эффективность оптимизации выше для 11-метровой сваи, которую грунтовое ядро заполняет полностью.

6. Заключение

1. Проведенные в данной статье вычисления с учетом давления грунтового ядра позволяют утверждать, что оптимизация стальных свай-оболочек (ССО) по материалу с обеспечением условия равнопрочности возможна.
2. Напряжения в материале сваи после оптимизации толщины ее стенок были проверены по соответствующим теориям прочности.
3. Главным результатом настоящей работы является возможность экономии основного строительного материала сваи при выполнении условия ее равнопрочности. При этом оптимизация наиболее эффективна для сваи меньшей длины из рассмотренных в статье, то есть для 11-метровой.

Литература

- [1]. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. №1. С. 1-47.
- [2]. Севостьянова К.В. Фундаменты на стальных трубчатых сваях в условиях исторической застройки Санкт-Петербурга: учеб.пособие / К.В. Севостьянова; СПб., 2007.
- [3]. Кнатько М.В., Мангушев Р.А., Обухов В.П., Дмитриев И.А. Новая технология устройства площадочного искусственного основания на слабых грунтах Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2014. №6(47). С. 121-126.
- [4]. Далматов Б.И. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений: учеб. пособие / под ред. Б.И. Далматова, 2-е изд. - М.: Изд-во АСВ, 2001. - 440 с.
- [5]. Мангушев Р.А. Современные свайные технологии: учеб. пособие / Р. А. Мангушев, А. В. Ершов, А. И. Осокин. - СПб.: изд-во СПбГАСУ, 2007. - 160 с.
- [6]. Ватин Н.И. Устройство свайных фундаментов: учеб. пособие / Н.И. Ватин и др. - СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2012. - 221 с.
- [7]. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.
- [8]. Горшков Н.И., Волков А.Н., Белуцкий И.Ю., Краснов М.А. О проектировании оснований свайных фундаментов из стальных свай-оболочек МКЭ // Вестник ТОГУ. 2012. №2(25). С. 145-154.
- [9]. Улыбин А.В., Зубков С.В., Федотов С.Д., Закревский А.Ю. Обследование свайных фундаментов при надстройке зданий // Инженерно-строительный журнал. 2014. №4. С. 17-27.
- [10]. ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.
- [11]. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.
- [12]. Ватин Н.И., Баданин А.Н., Колосов Е.С. Проектирование и устройство вспомогательных сооружений при возведении фундаментов: учеб. пособие / Н.И. Ватин и др. - СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2013. - 133 с.
- [13]. Улыбин А.В., Корнев В.В. Метод контроля длины стальных свай-оболочек // Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений". 2013. №1(6). С. 28-35.
- [14]. Veli-Matti Uotinen, Jukka Rantala. Applications and Development of Modern Steel Pile Technology // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1173-1182.
- [15]. Николаев Г.Н. Справочник по строительству портовых гидротехнических сооружений. М.: Изд-во "Транспорт", 1972. 464 с.
- [16]. Tsinker Gregory P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. Harbors. Design and Construction. Printed in the USA: New Jersey, 2004. 881 p.
- [17]. Binhuang W., Minghua W. Application of steel pipe piles in harbour construction // China Port and Waterway Engineering. 1989. Vol.3. Pp. 9-18.
- [18]. Du J.-Q., Du S.-J., Zhao D.-L., Tang W.-Y. Numerical analysis of interaction of pile group-soil-raft under vertical load // Rock and Soil Mechanics. 2013. No. 8(34). Pp. 2414-2420.
- [19]. De Ruiter J., Beringen F. L. Pile foundation for large North sea structures // Marine Geotechnology. 1979. Vol. 3. Pp. 267-314.
- [20]. Zhang Xudong Research and Application of Mini-sized Steel Pipe Pile Technology in Limited Space // Procedia Engineering. 2014. Vol.73. Pp. 16-22.
- [21]. Рахаринуси А.П. Применение стальных трубчатых свай с открытым нижним концом в портовых гидротехнических сооружениях. Дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.19 СПб., 1999.
- [22]. Терцаги Карл и Пек Ральф Б. Механика грунтов в инженерной практике. – М.: Госстройиздат, 1958. – 607с.
- [23]. Datta M., Gulhati S.K. and Rao G.V. The nature of calcareous soils. Proceedings of Geocon-India, Conference on Geotechnical Engineering, vol.1, 1978.
- [24]. Duncan J.H., Chang C.Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Proc. ASCE, 1970, vol. 96, N SM5, pp. 1629-1653.
- [25]. Dutt R.N. and Cheng A.P. Frictional response of piles in calcareous deposits. Proceedings, 16-th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Paper N4838, 1973.
- [26]. Bashar Tarawneh. Pipe pile setup: Database and prediction model using artificial neural network // Soils and Foundations. 2013. Vol 53(4). Pp. 607-615.

- [27]. Koichi Isobe, Makoto Kimura, Satoru Ohtsuka. Desing approach to a method for reinforcing existing caisson foundations using steel pipe sheet piles. 2014. Vol. 54. Pp. 141-154.
- [28]. Jingpei Li, Wei Shao. The effect of chloride binding on the predicted service life of RC pipe piles exposed to marine environments. 2014. Vol. 88. Pp. 55-62.
- [29]. Булатов Г.Я., Воронина Н.С. Математическое моделирование равнопрочной висячей сваи-оболочки // Готово к опубликованию.
- [30]. Круглов С.Н., Булатов Г.Я. О несущей способности трубосвай // XXXI Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. I: С.99–100, 2003.
- [31]. Рахаринуси А.П. Определение осадки стальных трубчатых свай с открытым нижним концом // Науч. труды Ленморниипроекта. Юбилейный сбор. (115 лет). СПб.: 2000. С. 114-122.
- [32]. Шумаков И.В., Никулин В.Б. Инновационные методы возведения подземной части зданий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-2(38). С. 411-414.
- [33]. Саргсян А.Е., Геращенко В.С., Шапошников Н.Н. Расчетная модель свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой // Вестник МГСУ. 2012. №4. С. 69-72.
- [34]. Прудентов А.И. Железобетонные сваи с грунтовым ядром. Л.: Стройиздат, 1971.
- [35]. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Технология возведения фундаментов - "свая в трубе" // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С.33-37.
- [36]. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Новая технология – «фундамент на трубогрунте» // Инженерно-строительный журнал. 2008. №2. С. 32-37.
- [37]. Булатов Г.Я., Ножнов А.П. Численное моделирование влияния грунтового ядра на несущую способность трубосвай // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2. С. 27-35.
- [38]. Булатов Г.Я., Словцов Д.И. К теории трубосвай // XXX неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. 2002 г.
- [39]. Потапенко К.В., Булатов Г.Я. Технологии фундаментов с применением стальных трубосвай (СТС) // XXXIII неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. Ч.I: С.123-125, 2005.
- [40]. Кукина А.А., Булатов Г.Я. К расчету несущей способности стальной трубосвай // XXXVI неделя науки СПбГПУ: материалы межвузовской научно-технической конференции. 2009.
- [41]. Караулин А.С., Созыкин Ю.В., Ножнов А.П., Булатов Г.Я. Погружение полых свай // XXXIV неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. Ч.I: С.107-109, 2006.
- [42]. Исупова А.В., Булатов Г.Я. Технология повышения несущей способности трубосвай // XXXIII неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. Ч.I: С.120-121, 2005.
- [43]. Латышев Б.В. Практические методы расчета железобетонных силосных корпусов. – 2-е изд. доп. и перераб. – Л.: Стройиздат, 1985. – 192 с, ил.
- [44]. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.
- [45]. ГОСТ 19804.5-83 Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные цельные с ненапрягаемой арматурой. Конструкция и размеры

The impact of soil plug on optimize tubular pile

G.Y.Bulatov¹, N.S.Voronina²

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

Информация о статье

scientific article

Article history

Received 1 April 2015

Keywords

friction pile;
tubular pile;
optimize of foundations;
strength balance pile;
soil plug;
self-closing;

ABSTRACT

The article considers the possibility of optimizing the consumption of materials for steel pipe piles immersed with an open lower end. The calculations were performed with the influence of the soil plug. Optimization shall be understood to mean the appointment wall thickness of the pile satisfying equal strength. It was calculated pile capacity of different immersion depths. It was calculated stresses in the cross-sections of the piles. The stresses checked by strength theory. It was calculated wall thickness of strength balance pipe pile and material savings achieved optimization. Reached the following conclusions: 1. Conducted in this article calculation taking into account the pressure of the soil plug suggest that optimization of steel tubular piles by materials consumption ensuring full-strength possible; 2. Stresses in the material pile after optimizing the thickness of its walls have been checked on the relevant theory of strength; 3. The main result of this paper is the possibility of saving the basic building material of the pile under the condition of its strength balance. Moreover optimization is most effective for a shorter length of the pile.

¹ *Corresponding author*

+7 (812) 297 5949, gybulatov@mail.ru (Grigoriy Yakovlevich Bulatov, Assistant Professor)

² +7 (931) 317 9287, tata_101@mail.ru (Voronina Natalia Sergeevna, Student)

References

- [1]. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. *Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh usloviy Sankt-Peterburga* [Features of engineering-geological conditions of St. Petersburg] // *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2011. №1. Pp. 1-47.
- [2]. Sevostyanova K.V. *Fundamenty na stalnykh trubchatykh svayakh v usloviyakh istoricheskoy zastroyki Sankt-Peterburga* [Foundations in tubular steel piles under the historical building of St. Petersburg]. Tutorial / K.V. Sevostyanova; SPb., 2007.
- [3]. Knatko M.V., Mangushev R.A., Obukhov V.P., Dmitriyev I.A. *Novaya tekhnologiya ustroystva ploshchadchnogo iskusstvennogo osnovaniya na slabykh gruntakh Sankt-Peterburga* [New technology of device site artificial foundation on soft grounds of St. Petersburg]. *Herald of civil engineers*. 2014. №6(47). Pp. 121-126.
- [4]. Dalmatov B.I. *Proektirovanie fundamentov zdaniy i podzemnykh sooruzhenij: ucheb. posobie* [Design of building foundations and underground structures: tutorial]. M.: Izd-vo ASV, 2001. 440 p. (rus)
- [5]. Mangushev R.A. *Sovremennye svajnye tekhnologii: ucheb. posobie* [Modern pile technology: tutorial] / R. A. Mangushev, A. V. Ershov, A. I. Osokin. - SPb.: izd-vo SPbGASU, 2007. 160 p. (rus)
- [6]. Vatin N.I. *Ustroystvo svajnykh fundamentov: ucheb. posobie* [The installation of pile foundations] - SPb.: izd-vo Politehn.un-ta, 2012. 221 p. (rus)
- [7]. SP 22.13330.2011. *Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakcija SNiP 2.02.01-83** [The Foundation of buildings and structures. Updated edition of Building code 2.02.03-83*]
- [8]. Gorshkov N.I., Volkov A.N., Beluckij I.Ju., Krasnov M.A. *O proektirovanii osnovanij svajnykh fundamentov iz stal'nykh svaj-obolochek MKJe* [About the design of pile foundations using steel shell-type piles by FEM] // *Vestnik TOGU*. 2012. №2(25). Pp. 145-154. (rus)
- [9]. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D., Zakrevskij A.Ju. *Obsledovanie svajnykh fundamentov pri nadstrojke zdaniy* [Inspection of pile foundation before constructing additional storeys on existing building]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 4(48). Pp. 17-27. (rus)
- [10]. TSN 50-302-2004. *Proektirovanie fundamentov zdaniy i sooruzhenij v Sankt-Peterburge* [Design of foundations of buildings and structures in Saint Petersburg].
- [11]. SP 24.13330.2011. *Svajnye fundamenty. Aktualizirovannaya redakcija SNiP 2.02.03-85* [Set of rules 24.13330.2011. Pile foundation. Updated edition of Building code 2.02.03-85].
- [12]. Vatin N.I., Badanin A.N., Kolosov E.S. *Proektirovanie i ustroystvo vspomogatel'nykh sooruzhenij pri vozvedenii fundamentov: ucheb. posobie* [Design and device support facilities during the construction of foundations: tutorial] - SPb.: izd-vo Politehn. un-ta, 2013. 133 p. (rus)
- [13]. Ulybin A.V., Kornev V.V. *Metod kontrolja dliny stal'nykh svaj-obolochek* [The method of length measurement for hollow steel piles] // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. №1(6). Pp. 28-35. (rus)
- [14]. Veli-Matti Uotinen, Jukka Rantala. *Applications and Development of Modern Steel Pile Technology* // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 1173-1182.
- [15]. Nikolaev G.N. *Spravochnik po stroitel'stvu portovykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij*. [Handbook on construction of port hydraulic structures]. M.: Izd-vo "Transport", 1972. 464 p. (rus)
- [16]. Tsinker Gregory P. *Port engineering: planning, construction, maintenance and security. Harbors. Design and Construction*. Printed in the USA: New Jersey, 2004. 881 p.
- [17]. Binhuang W., Minghua W. *Application of steel pipe piles in harbour construction* // *China Port and Waterway Engineering*. 1989. Vol.3. Pp. 9-18.
- [18]. Du J.-Q., Du S.-J., Zhao D.-L., Tang W.-Y. *Numerical analysis of interaction of pile group-soil-raft under vertical load* // *Rock and Soil Mechanics*. 2013. No. 8(34). Pp. 2414-2420.
- [19]. De Ruiter J., Beringen F. L. *Pile foundation for large North sea structures* // *Marine Geotechnology*. 1979. Vol. 3. Pp. 267-314.
- [20]. Zhang Xudong *Research and Application of Mini-sized Steel Pipe Pile Technology in Limited Space* // *Procedia Engineering*. 2014. Vol.73. Pp. 16-22.

- [21]. Raharinusi A.P. *Primeneniestal'nykh trubchatykh svay s otkrytym nizhnim koncom v portovykh gidrotehnicheskikh sooruzheniyah* [Application of steel tubular piles with an open bottom end in the harbour structures]. SPb. 1999 . 182 p. (rus)
- [22]. Tertsagi Karl i Pek Ralf B. *Mekhanika gruntov v inzhenernoy praktike* [Soil mechanics in engineering practice]. – M.: Gosstroyizdat, 1958. – 607 p.
- [23]. Datta M., Gulhati S.K. and Rao G.V. The nature of calcareous soils. Proceedings of Geocon-India, Conference on Geotechnical Engineering, vol.1, 1978.
- [24]. Duncan J.H., Chang C.Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Proc. ASCE, 1970, vol. 96, N SM5, pp. 1629-1653.
- [25]. Dutt R.N. and Cheng A.P. Frictional response of piles in calcareous deposits. Proceedings, 16-th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Paper N4838, 1973.
- [26]. Bashar Tarawneh. Pipe pile setup: Database and prediction model using artificial neural network // Soils and Foundations. 2013. Vol 53(4). Pp. 607-615.
- [27]. Koichi Isobe, Makoto Kimura, Satoru Ohtsuka. Desing approach to a method for reinforcing existing caisson foundations using steel pipe sheet piles. 2014. Vol. 54. Pp. 141-154.
- [28]. Jingpei Li, Wei Shao. The effect of chloride binding on the predicted service life of RC pipe piles exposed to marine environments. 2014. Vol. 88. Pp. 55-62.
- [29]. Bulatov G.Ya., Voronina N.S. *Matematicheskoye modelirovaniye ravnoprochnoy visyachey svai-obolochki* [Mathematical modeling uniform strength of floating pipe pile] // Gotovo k opublikovaniyu.
- [30]. Kruglov S.N., Bulatov G.Ya. *O nesushchey sposobnosti trubosvay* [About capacity of pipe pile] // XXXI Science week SPbGPU. Materials of Interuniversity conference. Ch. I: Pp .99–100, 2003.
- [31]. Rakharinusi A.P. *Opredeleniye osadki stalnykh trubchatykh svay s otkrytym nizhnim kontsom* [Determiniation of precipitation steel pipe piles with an open lower end] // Scientific works of Lenmorniiprojekt.anniversary collection. (115 years). SPb.: 2000. Pp. 114-122.
- [32]. Shumakov I.V., Nikulin V.B. *Innovatsionnyye metody vozvedeniya podzemnoy chasti zdaniy* [Innovative methods of construction of the underground part of buildings] // News of South-Western state University. 2011. № 5-2(38). Pp. 411-414.
- [33]. Sargsyan A.Ye., Gerashchenko V.S., Shaposhnikov N.N. *Raschetnaya model svaynykh fundamentov s uchetom effekta ikh vzaimodeystviya s gruntovoy sredoy* [The calculation model of pile foundations for the effects of their interaction with the soil environment] // Vestnik MGSU. 2012. №4. Pp. 69-72.
- [34]. Prudentov A.I. *Zhelezobetonnyye svai s gruntovym yadrom* [Reinforced concrete piles with soil plug]. L.: Stroyizdat, 1971.
- [35]. Bulatov G.Ya., Kostyukova A.Yu. *Tekhnologiya vozvedeniya fundamentov - "svaya v trube"* [Building technology foundation - "pile in the pipe"]. Magazine of Civil Engineering 2008. №1. S.33-37.
- [36]. Bulatov G.Ya., Kostyukova A.Yu. *Novaya tekhnologiya – «fundament na trubogrunte»* [The new technology - "the foundation on the ground turbo"]. Magazine of Civil Engineering. 2008. №2. Pp. 32-37.
- [37]. Bulatov G.Ya., Nozhnov A.P. *Chislennoye modelirovaniye vliyaniya gruntovogo yadra na nesushchuyu sposobnost trubosvai* [Numerical modeling of the soil core on the bearing capacity of the pipe pile]. Magazine of Civil Engineering. 2010. №2. Pp. 27-35.
- [38]. Bulatov G.Ya., Slotsov D.I. *K teorii trubosvay* [For the theory of pipe pile] // XXX nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhdvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2002.
- [39]. Potapenko K.V., Bulatov G.Ya. *Tekhnologii fundamentov s primeneniyyem stalnykh trubosvay (STS)* [The technology foundation using steel pipe piles] // XXXIII Science week SPbGPU. Materials of Interuniversity conference. Ch.I: Pp.123-125, 2005.
- [40]. Kukina A.A., Bulatov G.Ya. *K raschetu nesushchey sposobnosti stalnoy trubosvai* [On the calculation of the bearing capacity of steel pipe piles] // XXXVI Science week SPbGPU. Materials of Interuniversity conference. 2009.
- [41]. Karaulin A.S., Sozykin Yu.V., Nozhnov A.P., Bulatov G.Ya. *Pogruzheniye polykh svay* [Dive hollow piles] // XXXIV Science week SPbGPU. Materials of Interuniversity conference. Ch.I: Pp.107-109, 2006.
- [42]. Isupova A.V., Bulatov G.Ya. *Tekhnologiya povysheniya nesushchey sposobnosti trubosvay* [Technology to increase the carrying capacity of the pipe pile] // Science week SPbGPU. Materials of Interuniversity conference. Ch.I: Pp.120-121, 2005.
- [43]. Latyshev B.V. *Prakticheskiye metody rascheta zhelezobetonnykh silosnykh korpusov* [Practical methods of calculation of reinforced concrete silo towers]. – 2-ye izd. dop. i pererab. – L.: Stroyizdat, 1985. – 192 p, il.

- [44]. Feodosyev V.I. *Soprotivleniye materialov: ucheb. dlya vuzov* [Strength of materials: a textbook for high schools]. – 10-ye izd., pererab. i dop. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1999. – 592 p.
- [45]. GOST 19804.5-83 *Svai polyye kruglogo secheniya i svai-obolochki zhelezobetonnyye tselnyye s nenapryagayemoy armaturoy. Konstruktsiya i razmery* [Piles of circular cross section and hollow shell of reinforced concrete piles with solid Free of tension reinforcement. Design and dimensions]

Булатов Г.Я., Воронина Н.С. Влияние грунтового ядра на оптимизацию сваи-оболочки // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №8(35). С. 7-23.

Bulatov G.Y, Voronina N.S. The impact of soil plug on optimize tubular pile. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 8(35), Pp. 7-23. (rus)