



Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru



Факторы, влияющие на эффективность равнопрочной сваи-оболочки

Г.Я.Булатов ¹, Н.С. Воронина ^{2*}

¹⁻² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

doi: 10.18720/CUBS.54.9

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 02.04.2016

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

висячая свая;
свая-оболочка;
несущая способность сваи;
оптимизация фундаментов;
равнопрочная свая;
эффективность сваи;

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены критерии, по которым представляется возможным провести количественную оценку эффективности оптимизации стальных свай-оболочек по материалоемкости. Цель оптимизации – снижение расхода материала на изготовление сваи. По результатам исследования сделаны следующие выводы: 1) Предложена математическая модель обеспечения равнопрочности свай; 2) Рассмотрено влияние различных факторов на эффективность оптимизации, среди которых: различные наружные диаметры, инженерно-геологические условия, глубина погружения сваи. 3) Представлены графики и таблицы, которые могут быть использованы также и для приближенных оценок решений практических задач.

Содержание

1.	Введение	106
2.	Обзор зарубежной и отечественной литературы	106
3.	Постановка задачи	107
4.	Математическое моделирование объекта исследования	108
5.	Численное моделирование объекта исследования	111
6.	Заключение	122

Контактная информация:

- ¹ +7(812)2975949, gybulatov@mail.ru (Булатов Георгий Яковлевич, канд. техн. наук, доцент)
^{2*} +7(931)3179287, tata_101@mail.ru (Воронина Наталья Сергеевна, студент)

1. Введение

Как известно, объем строительства высотных зданий постоянно увеличивается. В настоящее время уже построено несколько сотен зданий высотой более 200 м. При их строительстве, а также при возведении других сооружений, применяются свайные фундаменты. В связи с тенденцией уменьшения стоимости строительства в целом, особую роль играет снижение затрат на возведение подземной части зданий. Из этой задачи вытекает другая – оптимизация свайных фундаментов и количественная оценка эффективности этой оптимизации. Данной теме и посвящена настоящая работа.

Оптимизация, в общем случае, – это выбор из всех возможных вариантов использования ресурсов тех, которые дают наилучшие результаты. Применительно к сваям в рамках данной статьи под оптимизацией следует понимать улучшение существующих конструктивных решений, заключающееся в повышении уровня равнопрочности изделия, конструкции.

Авторами рассматриваются критерии, с помощью которых возможна количественная оценка эффективности свай, а также факторы, влияющие на эффективность оптимизации свайных фундаментов по материалоемкости. Актуальность выбранной темы, кроме прочего, обусловлена тем, что объектом исследования выступают стальные трубчатые сваи-оболочки, часто применимые при строительстве объектов в Санкт-Петербурге и области.

2. Обзор зарубежной и отечественной литературы

Свайные фундаменты применяют при строительстве высотных зданий, возведении сооружений на грунтах пониженной несущей способности, или вследствие технико-экономических преимуществ перед другими типами фундаментов [1-5]. Благодаря более ранним исследованиям, накопленному инженерному опыту, результатам экспериментов в настоящее время существует огромное множество различных конструкций свайных фундаментов, применимых как для решения типовых задач строительства, так и для условий, отличающихся необходимостью в разработке сложных инженерных решений. [6-12] Виды свай различаются по многим признакам, среди которых принцип работы, способ заглубления в грунт, условия взаимодействия с ним, форма поперечного и продольного сечений, материал, прочие конструктивные особенности. [13-22]

Анализ современной зарубежной и отечественной литературы показывает, что развитие современного свайного фундаментостроения, наряду с другими сферами строительной деятельности, направлено по пути оптимизации конструктивных решений в целях экономии денежных средств, затрат труда рабочих, времени на возведение объектов [23-27]. Возрастает и роль инноваций в качестве фактора экономического роста строительства [28].

В публикациях встречаются различные подходы к оптимизации свайных фундаментов [23, 30-31]. В работах [23, 30, 31] исследована взаимосвязь несущей способности сваи с формой ее поперечного сечения в однородных грунтовых условиях, сделан вывод о том, что наиболее эффективны сваи с расширенной боковой поверхностью.

Публикация [29] описывает оптимальный вариант сваи с точки зрения ее сопротивления выдавливанию в рассмотренном пучинистом грунте. Экономия материала по предложенной авторами технологии достигается за счет более развитой волнообразной боковой поверхности сваи.

В работах [32-33] авторы излагают идею применения фибры в изготовлении свай, что существенно повышает их ударостойкость. Кроме того, использование сталефибробетона позволяет избежать «недобивки» свай до проектных отметок, а, следовательно, срезания их голов (свай), и, как результат, является эффективным средством экономии материала. Еще один неоспоримый аргумент экономической эффективности таких свай - время на их погружение сокращается в среднем на 50%, т.к. свая способна воспринимать значительную энергию удара.

Работы [34-38] показывают эффективность применения полипрочных свай, то есть таких, в которых по длине ствола используется бетон переменной прочности в соответствии с характером распределения сжимающих напряжений. Также кратко рассматриваются сваи с уширениями ствола, обладающие высокой удельной несущей способностью [34].

В публикациях [25, 39] предложены новые технологии, направленные на снижение расхода материала и трудоемкости работ, - «свая в трубе», «фундамент на трубогрунте». Расчетные модели свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой представлены в работах [40, 41].

По мнению авторов данной статьи, основополагающим принципом оптимизации свайных фундаментов является снижение их материалоемкости, которое достигается за счет наиболее полного использования прочностного ресурса материала и обеспечения принципа равнопрочности сваи [42-44]. Таким образом, главным качеством любого сооружения и изделия можно считать именно равнопрочность (равнонадежность его элементов), поскольку, во-первых, это качество является интегральным, а, во-вторых, лишь оно может обеспечить наибольший ресурсосберегающий эффект.

Отсутствие возможности количественно оценить эффективность работы сваи приводит к значительному перерасходу строительного материала и, как следствие, к удорожанию фундамента и удлинению сроков работ по его возведению. Однако, несмотря на огромное множество научных исследований в области оптимизации свайных фундаментов, в них не приводятся теоретические основы для количественной оценки эффективности [23-51]. Единственная попытка количественно определить эффективность работы сваи была выполнена в работе [23].

В рамках данной статьи авторами выполнен обзор критериев, по которым возможно провести количественную оценку эффективности работы сваи, а также рассмотрены факторы, которые влияют на возможность и эффективность оптимизации свайных фундаментов по материалоемкости, то есть моделирование равнопрочной сваи. Задача решена на примере стальной трубчатой сваи-оболочки.

3. Постановка задачи

Объектом исследования в данной статье являются стальные трубчатые сваи-оболочки, далее – ССО.

Рассмотрены следующие факторы зависимости толщины стенки δ от глубины расположения поперечного сечения Z при обеспечении условия равнопрочности сваи:

- 1) Влияние различных наружных диаметров свай D при постоянных глубинах погружения h_n и неизменных инженерно-геологических условиях – **фактор D** ;
- 2) Влияние инженерно-геологических (ИГ) условий при постоянных наружных габаритах D и глубинах погружения h_n – **фактор ИГ**;
- 3) Влияние глубины погружения свай h_n при неизменных наружных габаритах D и инженерно-геологических условиях – **фактор h_n** ;

В качестве критериев оценки эффективности работы сваи приняты следующие:

- 1) эффективность по несущей способности (НС) по грунту $\mathcal{E}_{гр}$;
- 2) эффективность по НС по материалу $\mathcal{E}_м$;
- 3) эффективность по коэффициенту использования материала сваи $K_{эм}$;
- 4) КПД загрузки головы сваи $\eta_г$;
- 5) КПД загрузки острия сваи $\eta_{ост}$;
- 6) экономия материала $\mathcal{E}_G$;

Геометрические характеристики поперечного сечения ССО представлены на рисунке 1.

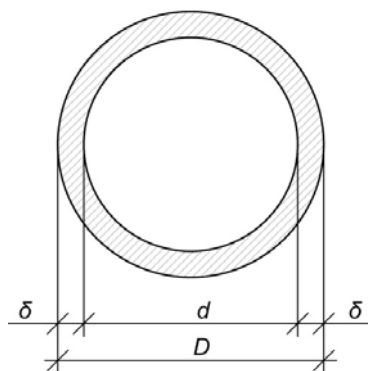


Рисунок 1. Геометрические характеристики поперечного сечения ССО

4. Математическое моделирование объекта исследования

Равнопрочность обеспечивается одинаковыми напряжениями в сечениях сваи на различных глубинах и, в данном случае, изменением площадей поперечных сечений в соответствии с действующими нагрузками. Такие площади сечений будем считать оптимальными.

Для определения оптимальных толщин стенок δ_{opt} , при которых в сечении сваи действует максимальное допускаемое сжимающее напряжение, необходим вывод соответствующих зависимостей.

Условием равнопрочности при этом будет:

$$\sigma_{сж,d} = [\sigma_{сж}], \quad (1)$$

где $\sigma_{сж,d}$ – сжимающие напряжения в поперечном сечении сваи, расположенном на глубине Z ;

$[\sigma_{сж}]$ – допускаемое напряжение сжатия.

Критическими в данной работе полагаем усилия и напряжения, возникающие в процессе погружения свай. В математическом моделировании принимаем допущение, что внешняя нагрузка на сваю будет равна НСС в представлении СП [19].

Площадь нетто сечения сваи

$$A_{net} = \frac{N_d}{[\sigma_{сж}]} \quad (2)$$

Площадь нетто сечения сваи:

$$N_d = F_d - F_{df}, \quad (3)$$

где N_d – сжимающая сила в рассматриваемом сечении на глубине Z ;

F_d – сопротивление погружению, принимаемое равным несущей способности сваи (НСС);

F_{df} – несущая способность на боковой поверхности выше рассматриваемого сечения.

С другой стороны,

$$A_{net} = \pi \cdot \left(\left(\frac{D}{2} \right)^2 - r^2 \right) \quad (4)$$

$$\text{при } r = \frac{d}{2}, \quad (5)$$

где D – наружный диаметр ССО;

r – внутренний радиус ССО;

d – внутренний диаметр ССО.

Отсюда

$$r = \sqrt{\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \frac{A_{net}}{\pi}}. \quad (6)$$

Толщину стенки δ определяем по формуле:

$$\delta = \frac{D}{2} - r. \quad (7)$$

После подстановки (2)–(6) в (7) получим:

$$\delta^{opt} = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{N_d}{[\sigma_{сж}] \cdot \pi}} \quad (8)$$

Свая-оболочка погружена забивкой без выемки грунта, однако при расчетах несущей способности действие грунтового ядра по методике СП [19] условно не учитывается.

Расчетная схема к определению НСС представлена на рисунке 2, расчетная схема к моделированию сваи равнопрочного сечения – на рисунке 3.

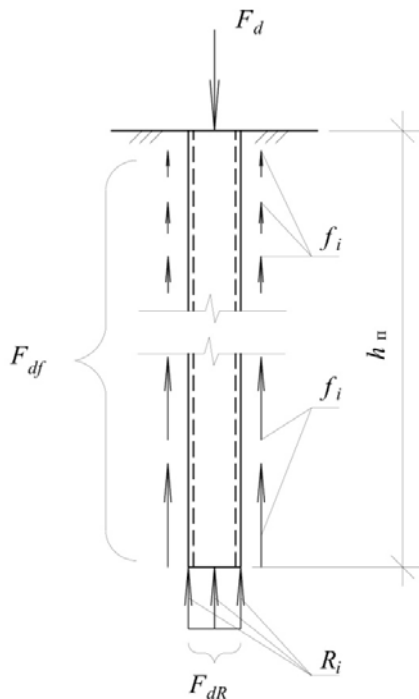


Рисунок 2. Расчетная схема к определению НСС

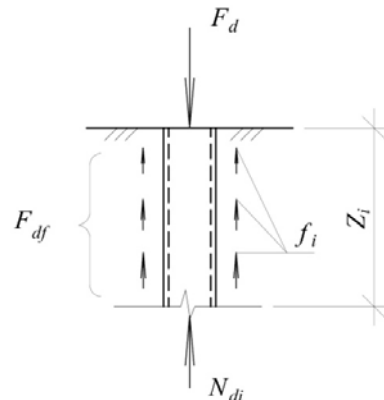


Рисунок 3. Расчетная схема к моделированию сваи равнопрочного сечения

НСС вычисляем по методике раздела 7.2 СП [19], представив в более удобном виде [51]

$$F_d = F_{dR} + F_{df} \quad (9)$$

$$F_{dR} = \gamma_c \gamma_{cR} R A \quad (9.1)$$

$$F_{df} = \gamma_c u \sum \gamma_{cf} f_i h_i, \quad (9.2)$$

где F_{dR} – несущая способность на острие сваи;

F_{df} – несущая способность по боковой поверхности сваи;

γ_c – коэффициент условий работы сваи в грунте;

γ_{cR} – коэффициент условий грунта под нижним концом сваи;

γ_{cf} – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи;

A – площадь опирания на грунт сваи, принимаемая по площади сваи-оболочки нетто;

u – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи;

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

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

Наружный периметр поперечного сечения сваи определяем по формуле

$$u = \pi \cdot D. \quad (10)$$

Эффективность сваи по НС по грунту [1]

$$\mathfrak{E}_{gp} = \frac{F_d}{G}, \quad (11a)$$

где G – вес сваи.

Эффективность сваи по НС по материалу [1]

$$\mathfrak{E}_m = \frac{F_{dm}}{G} \quad (11b)$$

$$F_{dm} = A_{net} \cdot \sigma_{пред} \quad (12)$$

$$\sigma_{пред} = k_m \cdot [\sigma_{сж}], \quad (13)$$

где F_{dm} – несущая способность сваи по прочности ее материала;

$\sigma_{пред}$ – предел прочности материала;

k_m – коэффициент запаса по прочности материала;

Эффективность сваи по коэффициенту использования материала [1]

$$K_{эм} = \frac{F_d}{F_{dm}}. \quad (14)$$

Коэффициент $K_{эм}$ вычисляется для сваи, погруженной на h_n .

КПД загрузки головы сваи

$$\eta_z = \frac{\sigma_z}{\sigma_{пред}} \quad (15a)$$

$$\sigma_z = \frac{N_d \big|_{Z=0}}{A_{nett} \big|_{Z=0}}, \quad (16)$$

где σ_z – сжимающее напряжение в сечении сваи на ее голове;

КПД загрузки острия сваи

$$\eta_{ост} = \frac{\sigma_{ост}}{\sigma_{пред}} \quad (15b)$$

$$\sigma_{ост} = \frac{N_d \big|_{Z=h_n}}{A_{nett} \big|_{Z=h_n}}, \quad (17)$$

где $\sigma_{ост}$ – сжимающее напряжение в сечении сваи на ее острие;

Экономию материала вычислим по формуле

$$\mathfrak{E}_G = \frac{G - G^{opt}}{G} \cdot 100\%, \quad (18)$$

где G^{opt} – вес оптимизированной сваи.

Критерии оценки эффективности по формулам (11а), (11б), (14), (15а), (15б), (18) вычисляем для оптимизированной равнопрочной сваи с переменной толщиной стенки δ^{opt} и для неоптимизированной сваи с постоянной по глубине Z толщиной стенки $\delta = \delta^{opt}|_{Z=0}$.

5. Численное моделирование объекта исследования

5.1. Исследование ССО при влиянии фактора D (наружного диаметра)

В качестве объектов исследования были приняты ССО с одинаковой толщиной стенки $\delta=10$ мм и глубиной погружения $h_p=30$ м, но с различным наружным диаметром D . Грунт – песок мелкозернистый.

Для изучения были выбраны 6 свай с отличным друг от друга наружным диаметром D , равным:

- | | |
|-------------|-------------|
| 1) 800 мм; | 4) 1100 мм; |
| 2) 900 мм; | 5) 1200 мм; |
| 3) 1000 мм; | 6) 1300 мм. |

Выполним вычисления по формулам (2) – (7) и запишем их результаты в сечениях на глубинах 0, 2 и 30 м в виде таблицы 1. Графически результаты вычислений представим в виде рисунка 4 во всех сечениях Z .

Таблица 1. Результаты оптимизации ССО, толщины стенок δ^{opt} при изменении диаметра D

		Наружный диаметр свай D , мм					
		800	900	1000	1100	1200	1300
i	Z , м	Толщины стенок δ^{opt} , мм					
0	0	14,08	14,67	15,26	15,86	16,45	17,04
1	2	13,79	14,38	14,98	15,57	16,16	16,76
...	...	...	...	...	...	...	...
5	30	4,75	5,34	5,94	6,53	7,13	7,72

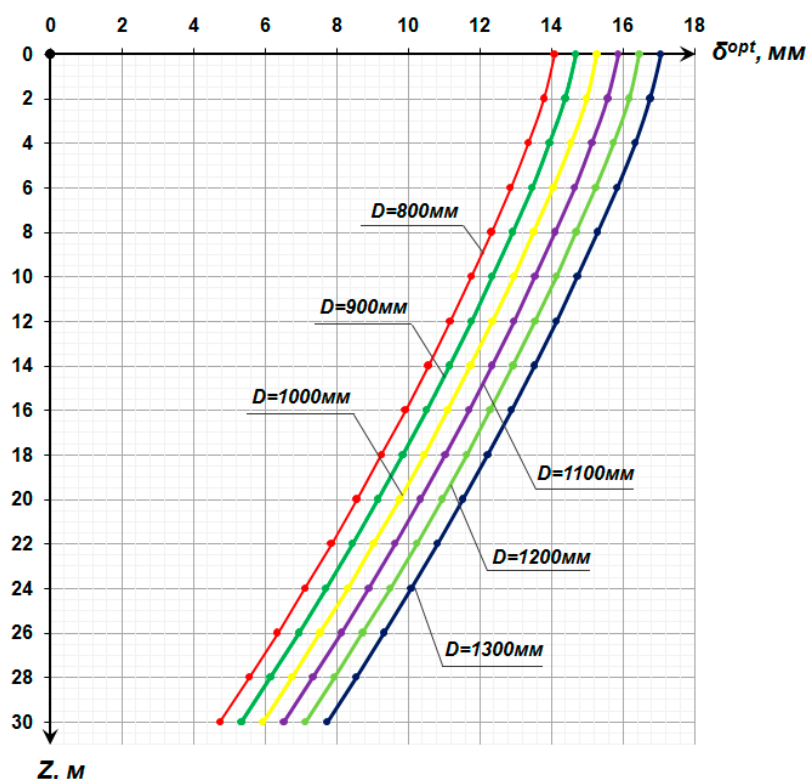


Рисунок 4. График зависимости толщины стенки от глубины расположения поперечного сечения равнопрочной ССО при различных диаметрах D

Графики на рисунке 4 наглядно показывают, что при влиянии фактора D с увеличением глубины расположения поперечных сечений толщина стенки ССО, необходимая для обеспечения условия равнопрочности, уменьшается. Кроме того, с увеличением наружного диаметра, толщина стенки

равнопрочной сваи увеличивается на некоторую постоянную величину в каждом рассматриваемом сечении. Таким образом, графики позволяют не только выбрать оптимальные толщины стенок для трубчатых свай исследуемых диаметров, но и прогнозировать их (толщины) для прочих, отличных от показанных на графике, наружных диаметров, пользуясь методами линейной интерполяции.

5.1.1. Вычисление эффективности сваи по НС по грунту Э_{гр}

Вычислим критерии оценки эффективности $\mathcal{E}_{\text{гр}}$ и $\mathcal{E}_m$ по формулам (11а), (11б) для равнопрочной сваи с переменной толщиной стенки δ^{opt} и для неоптимизированной сваи с постоянной по глубине Z толщиной стенки $\delta = \delta^{\text{opt}}|_{Z=0}$. Результаты вычислений для глубин погружения свай h_n равных 0, 2 и 30 м представим в виде таблиц 2 – 3, графически, для всех глубин h_n и крайних диаметров D , – в виде рисунков 5 – 6.

Таблица 2. Результаты вычисления критериев $\mathcal{E}_{\text{гр}}$ для различных диаметров D

		Наружный диаметр сваи D , мм											
		800		900		1000		1100		1200		1300	
i	$n, \text{м}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}$	$\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$
1	2	1020		1020		1020		1020		1020		1020	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	30	8,60	18,84	8,56	18,79	8,57	18,80	8,57	18,81	8,58	18,83	8,56	18,79

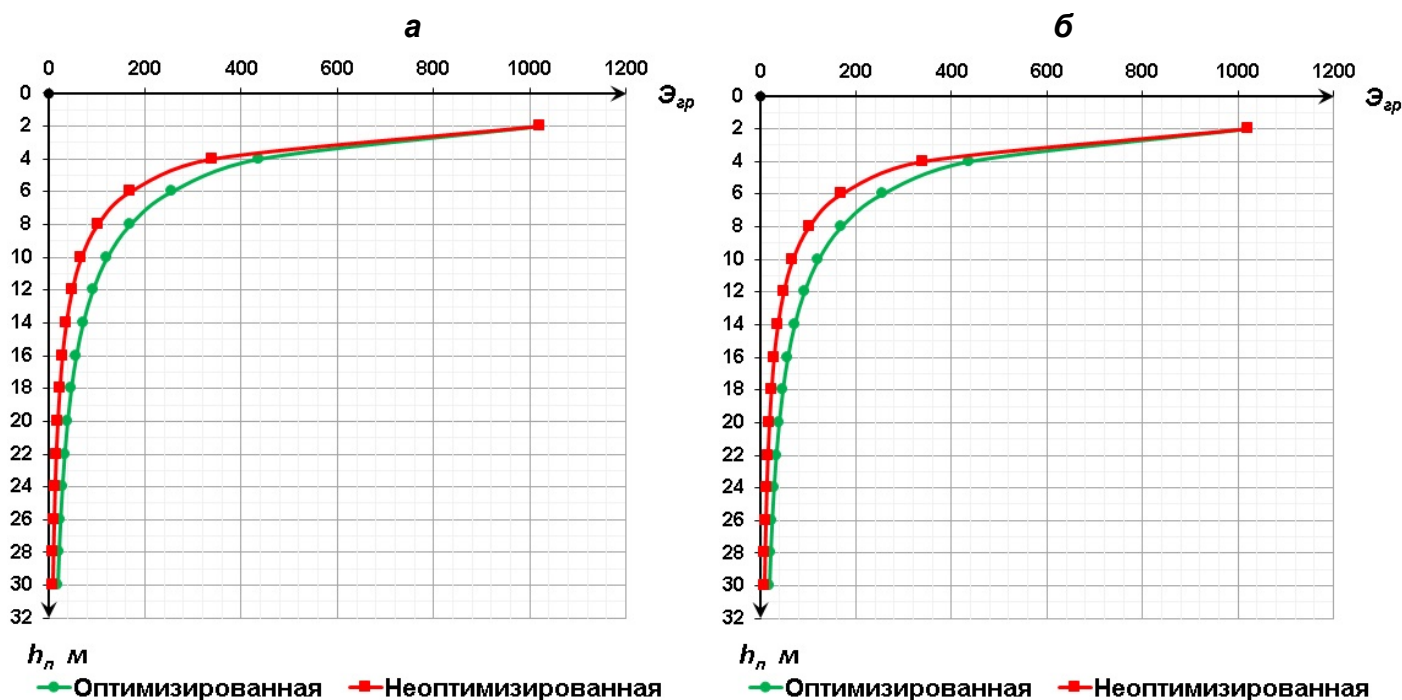


Рисунок 5. Графики зависимости коэффициентов $\mathcal{E}_{\text{гр}}$ от глубины погружения сваи h_n :

а – при $D=800\text{мм}$; б – при $D=1300\text{мм}$

Графики на рисунке 5 показывают, что эффективность оптимизации сваи, оцененная по критерию $\mathcal{E}_{\text{гр}}$, наиболее выражена при малых глубинах погружения h_n и затухает с их увеличением. Кроме того, построенные графики позволяют свидетельствовать о том, что в вопросах оптимизации свайных фундаментов, короткие сваи являются приоритетными по сравнению с длинными, вследствие того что с глубиной эффективность сваи по НС по грунту убывает.

Значения $\mathcal{E}_{\text{гр}}$ и $\mathcal{E}_{\text{гр}}^{\text{opt}}$ для различных диаметров отличаются друг от друга в рамках вычислительной погрешности, поэтому можно сделать вывод, что величина наружного диаметра D не влияет эффективность оптимизации сваи, оцененную по критерию $\mathcal{E}_{\text{гр}}$.

5.1.2. Вычисление эффективности сваи по НС по материалу Эм

Таблица 3. Результаты вычисления критериев $\mathcal{E}_m$ для различных диаметров D

		Наружный диаметр сваи D , мм											
		800		900		1000		1100		1200		1300	
	$\eta, \text{М}$	$\mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$	$\mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$
1	2	1427		1427		1427		1427		1427		1427	
...	...	...		...		...		...		...		...	
15	30	11,89	26,11	11,89	26,08	11,89	26,09	11,89	26,10	11,89	26,10	11,89	26,06

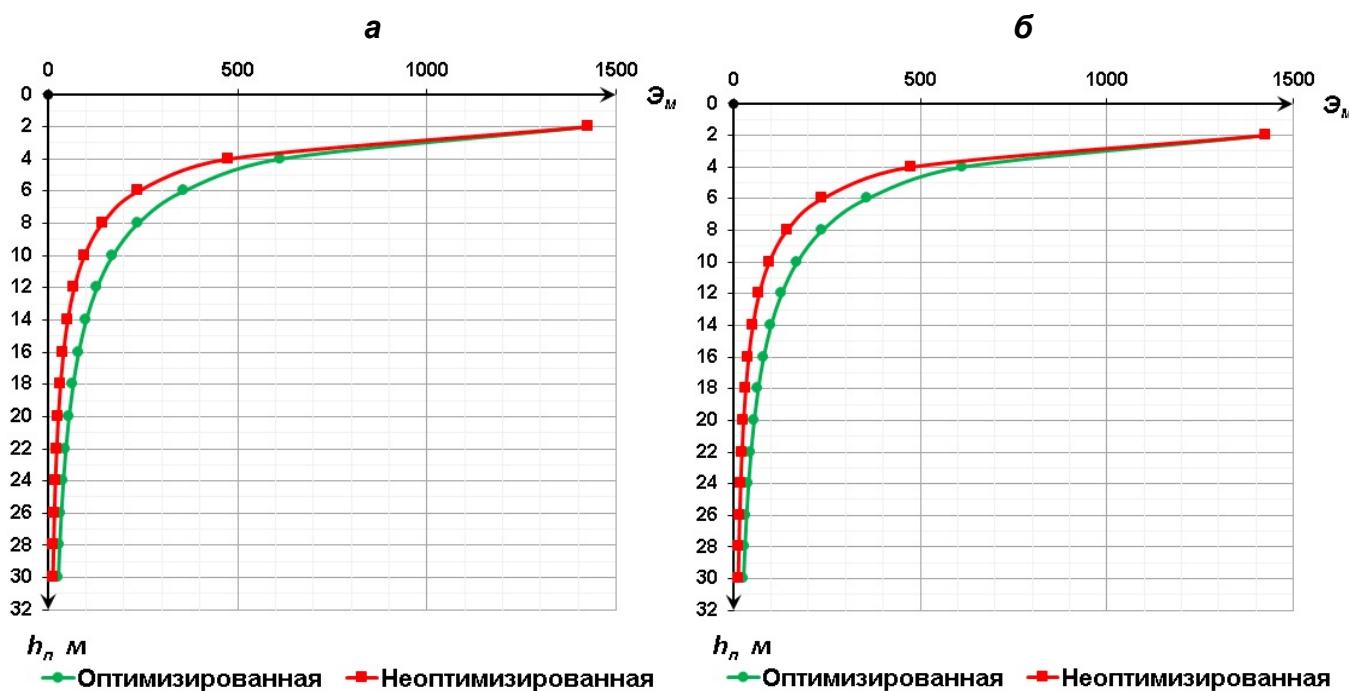


Рисунок 6. Графики зависимости коэффициентов $\mathcal{E}_m$ от глубины погружения сваи h_n :

а – при $D=800\text{мм}$; б – при $D=1300\text{мм}$

Графики на рисунке 6 имеют ту же зависимость, что и графики на рисунке 5, и так же свидетельствуют о значительной эффективности оптимизации сваи на малых глубинах погружения h_n . Для всех приведенных в таблице 3 диаметров D значения $\mathcal{E}_m$ и $\mathcal{E}_m^{\text{opt}}$ различаются в рамках погрешности вычислений, поэтому величина D не влияет на эффективность оптимизации сваи по критерию $\mathcal{E}_m$.

5.1.3. Вычисление коэффициента использования материала $K_{\text{эм}}$ и КПД загрузки головы $\eta_{\text{г}}$

При вычислении критериев $K_{\text{эм}}$ и $\eta_{\text{г}}$ по формулам (14) и (15а) соответственно, выявлено, что они не зависят от наружного диаметра сваи D и глубины ее погружения h_n , а также являются постоянной величиной, равной 0,714 при в случае, если сечение сваи запроектировано оптимально.

Под оптимальным конструктивным решением следует понимать сваю, толщина стенки δ которой подобрана так, что в сечении на глубине $Z=0$ действуют максимальные допускаемые напряжения, то есть $\sigma_{сж,d} = [\sigma_{сж}]$, а $\delta = \delta^{opt}$. В случае, когда $\delta > \delta^{opt}$, критерии $K_{эм}$ и η_z окажутся меньше 0,714.

В приведенном примере расчета использовался коэффициент запаса по прочности материала $k_m = 1,4$, при других значениях коэффициента результаты вычислений $K_{эм}$ и η_z будут иметь результат, отличный от числа 0,714, однако, зависимости сохранятся.

В ходе вычисления коэффициентов $K_{эм}$ и η_z , кроме прочего, были обнаружены следующие зависимости:

- 1) для оптимально запроектированной сваи предельная несущая способность по материалу F_{dm} должна быть больше предельной несущей способности по грунту F_d на коэффициент запаса по прочности материала k_m то есть

$$F_{dm} = F_d \cdot k_m; \quad (19)$$

- 2) подставляя (19) и (15) в (12), получим

$$A_{net} = \frac{F_d}{[\sigma_{сж}]} = \frac{F_{dm}}{\sigma_{пред}}; \quad (20)$$

Так как выяснено, что критерии $K_{эм}$ и η_z не зависят от рассматриваемых факторов D , ИГ и h_n , в дальнейшем, при учете влияния грунтовых условий и глубины погружения сваи, их вычислять не будем.

5.1.4. Вычисление КПД загрузки острия пост

Вычислим критерий оценки эффективности $\eta_{осм}$ по формуле (15б) для равнопрочной сваи с переменной толщиной стенки δ^{opt} и для неоптимизированной сваи с постоянной по глубине Z толщиной стенки $\delta = \delta^{opt}|_{Z=0}$. Результаты вычислений для некоторых глубин погружения свай h_n представим в виде таблицы 4.

Таблица 4. Результаты вычисления коэффициентов $\eta_{осм}$ для различных диаметров D

		Наружный диаметр сваи D , мм	
		800; 900; 1000; 1100; 1200; 1300	800; 900; 1000; 1100; 1200; 1300
i	$h_n, \text{м}$	η_o	η_o^{opt}
1	2	0,160	0,714
2	4	0,109	0,714
3	6	0,074	0,714
...	...	...	...
12	24	0,021	0,714
13	26	0,020	0,714
14	28	0,019	0,714
15	30	0,018	0,714

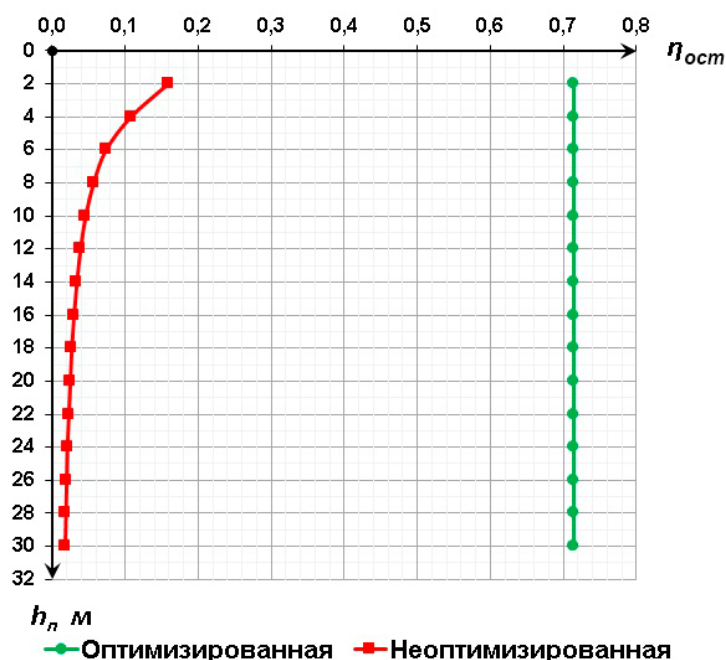


Рисунок 7. Графики зависимости коэффициентов η_o от глубины погружения сваи h_n для диаметров $D=800; 900; 1000; 1100; 1200; 1300$

В ходе проведения вычислений коэффициенты $\eta_{ост}$ для свай различных наружных диаметров D на одинаковых глубинах погружения h_n оказались равны в рамках вычислительной погрешности. Были построены графики зависимости коэффициента $\eta_{ост}$ от глубины погружения сваи h_n оптимизированной и неоптимизированной свай (см. Рисунок 7).

По графикам на рисунке 7 можно сделать вывод, что эффективность оптимизации сваи, оцененная по коэффициенту $\eta_{ост}$, наиболее ярко выражена при больших h_n : у неоптимизированных свай большей глубины погружения острие недогружено значительно сильнее, чем у коротких свай.

Так, можно утверждать, что эффективность оптимизации по материалу и применение равнопрочных свай эффективно лишь в случае их значительных длин.

5.1.5. Вычисление экономии материала ЭГ

Вычислим коэффициенты экономии материала $\mathcal{E}_G$ по формуле (18) для равнопрочной сваи с переменной толщиной стенки δ^{opt} и для неоптимизированной сваи с постоянной по глубине Z толщиной стенки $\delta = \delta^{opt}|_{Z=0}$. Результаты вычислений для некоторых глубин погружения свай h_n представим в виде таблицы 5.

Таблица 5. Результаты вычисления критериев ЭГ для различных диаметров D

		Наружный диаметр сваи D , мм
		800; 900; 1000; 1100; 1200; 1300
i	$h_n, \text{м}$	$\mathcal{E}_G$
1	2	0
2	4	22,4
3	6	33,49
...	...	...
2	24	53,50
3	26	53,90
4	28	54,21
5	30	54,46

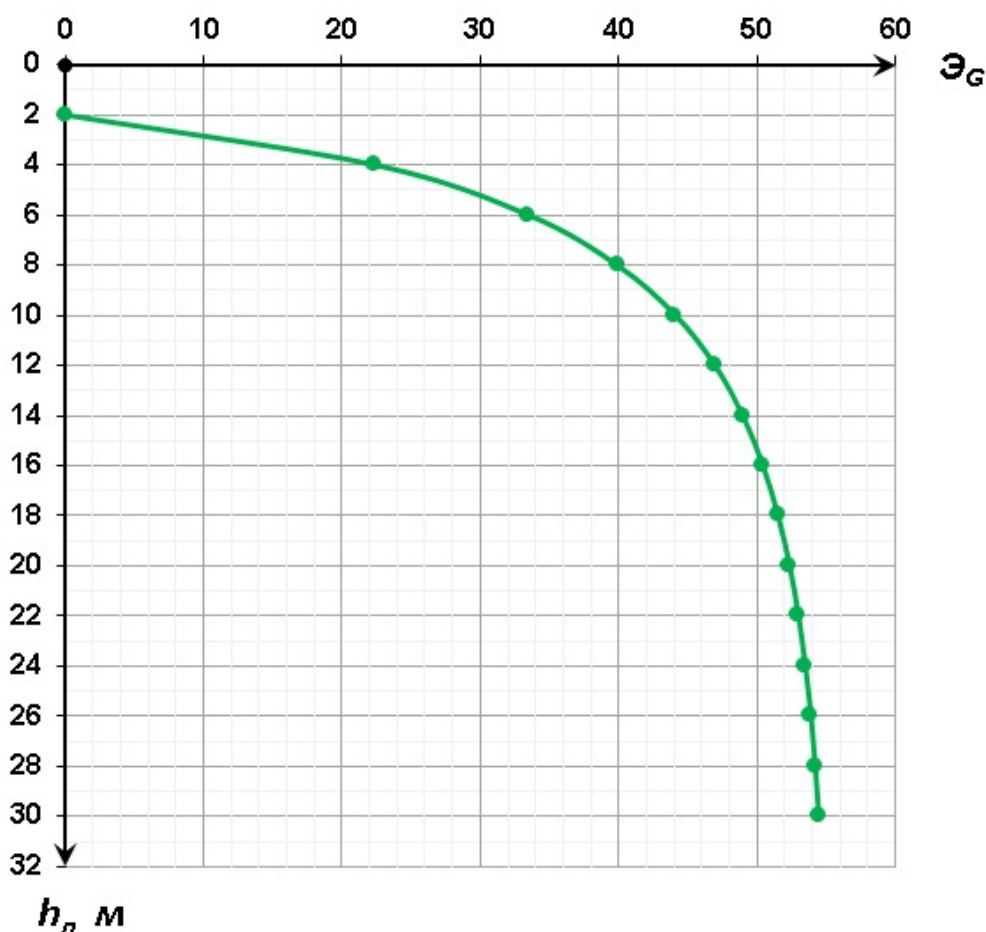


Рисунок 8. График зависимости коэффициентов $\mathcal{E}_G$ от глубины погружения свай h_n для диаметров $D=800; 900; 1000; 1100; 1200; 1300$

Критерии $\mathcal{E}_G$ для свай различных наружных диаметров D на одинаковых глубинах погружения h_n равны. По графику на рисунке 7 видно, оптимизация свай при оценке по коэффициенту экономии материала наиболее эффективна для ССО большой глубины погружения. Однако, после глубины 15 м $\mathcal{E}_G$ возрастает незначительно. Наружный диаметр D не влияет на критерий $\mathcal{E}_G$.

Таким образом, величина наружного диаметра D не влияет на эффективность оптимизации свай по материалоемкости.

5.2. Исследование ССО при влиянии фактора ИГ (инженерно-геологических условий)

В качестве объектов исследования были приняты ССО с одинаковой толщиной стенки $\delta=10$ мм, глубиной погружения $h_n=30$ м и наружным диаметром $D=1100$ мм, но с различными ИГ условиями.

Для изучения были выбраны 8 свай в отличных друг от друга ИГ условиях:

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1) песок гравелистый; | 5) песок пылеватый; |
| 2) песок крупный; | 6) глина $I_L=0,2$; |
| 3) песок средней крупности; | 7) глина $I_L=0,5$; |
| 4) песок мелкозернистый; | 8) глина $I_L=0,7$; |

Выполним вычисления по формулам (2) – (7) и запишем их результаты в сечениях на глубинах 0, 2 и 30 м в виде таблицы 1. Графически результаты вычислений представим в виде рисунка 4 во всех сечениях Z .

Таблица 6. Результаты оптимизации ССО, толщины стенок δ^{opt} при изменении ИГ условий

		ИГ условия							
		песок гравелистый	песок крупный	песок ср.крупности	песок м/з	песок пылеватый	глина $I_L=0,2$	глина $I_L=0,5$	глина $I_L=0,7$
	Z, м	Толщины стенок δ^{opt} , мм							
0	0	14,04	13,74	13,50	9,56	6,92	13,61	5,25	1,96
1	2	13,60	13,31	13,07	9,27	6,73	13,18	5,10	1,91
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	30	0,88	0,59	0,35	0,24	0,13	0,46	0,13	0,00

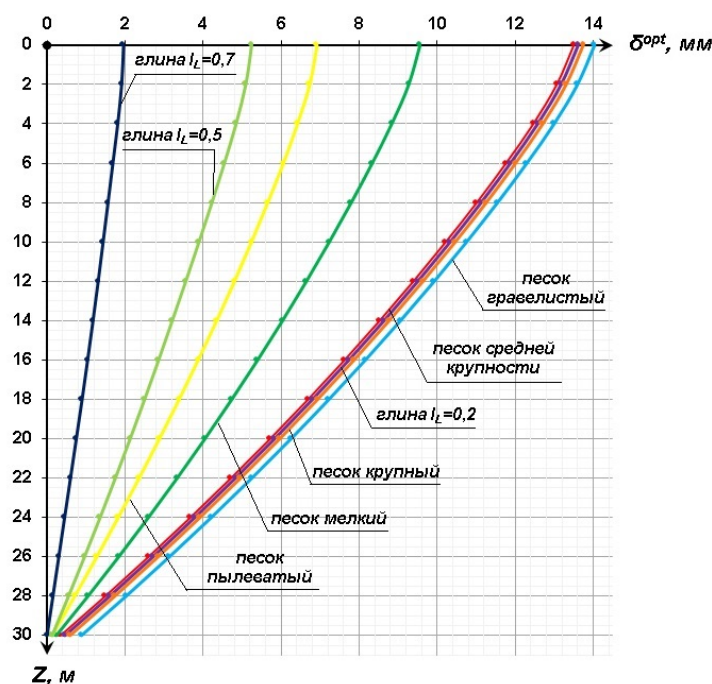


Рисунок 9. График зависимости толщины стенки от глубины расположения поперечного сечения равнопрочной ССО при различных ИГ условиях

По графикам на рисунке 9 видно, что толщина стенки ССО, необходимая для обеспечения условия равнопрочности, уменьшается с увеличением глубины расположения поперечных сечений. При влиянии фактора ИГ невозможно прогнозировать толщины стенок для прочих, отличных от приведенных на графике, ИГ условий, как это было в случае с влиянием фактора D, так как кривые имеют случайный характер. По графикам также можно судить о том, что наибольшего эффекта оптимизация по материалу достигается в грунтах с большим сопротивлением, например, в гравелистых, крупных и песках средней крупности, глинах с малыми значениями показателя текучести I_L .

5.2.1. Вычисление эффективности сваи по НС по грунту Э_{гр} и по НС по материалу Э_м

Вычислим критерии оценки эффективности $\mathcal{E}_{гр}$ и $\mathcal{E}_m$ по формулам (11а), (11б), результаты представим в виде таблиц 7 – 8.

Таблица 7. Результаты вычисления критериев $\mathcal{E}_{гр}$ для различных ИГ условий

		ИГ условия															
		песок гравелистый		песок крупный		песок ср.крупности		песок м/з		песок пылеватый		глина $I_L=0,2$		глина $I_L=0,5$		глина $I_L=0,7$	
i	l _н , м	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$	$\mathcal{E}_{гр}$	$\mathcal{E}_{гр}^{opt}$
1	2	1020		1020		1020		1020		1020		1020		1020		1020	
...	...	...		...		...		...		...		...		...		...	
15	30	8,60	18,02	8,60	18,44	8,60	18,83	8,57	18,80	8,55	18,98	8,60	18,65	8,53	19,30	8,51	20,21

Результаты вычислений по таблице 7 совпадают со значениями таблицы 2. Значения $\mathcal{E}_{ep}$ и $\mathcal{E}_{ep}^{opt}$ для различных ИГ условий отличаются друг от друга в рамках вычислительной погрешности. Графики зависимости критериев $\mathcal{E}_{ep}$ от глубины погружения сваи h_n те же, что и на рисунке 5, повторять их не будем. Можно свидетельствовать, что различные ИГ условия не влияют на эффективность оптимизации сваи.

Таблица 8. Результаты вычисления критериев $\mathcal{E}_m$ для различных ИГ условий

		ИГ условия															
		песок гравелистый		песок крупный		песок ср.крупности		песок м/з		песок пылеватый		глина $I_L=0,2$		глина $I_L=0,5$		глина $I_L=0,7$	
i	n, M	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$	$\mathcal{E}_M$	$\mathcal{E}_M^{opt}$
1	2	1427		1427		1427		1427		1427		1427		1427		1427	
...	...	...		...		...		...		...		...		...		...	
15	30	11,89	24,90	11,89	25,50	11,89	26,04	11,89	26,10	11,89	26,41	11,89	25,78	11,89	26,89	11,89	28,24

По результатам вычислений нецелесообразно строить графики, т.к. значения в таблице 8 совпадают с таблицей 3, и графики будут носить такой же характер. Следовательно, эффективность оптимизации сваи, оцененная по критерию $\mathcal{E}_m$, не зависит от фактора ИГ.

5.2.2. Вычисление КПД загрузки острия пост

Вычислим критерий оценки эффективности $\eta_{ост}$ по формуле (15б), результаты вычислений для некоторых глубин погружения свай h_n представим в виде таблицы 9.

Таблица 9. Результаты вычисления коэффициентов $\eta_{ост}$ для различных ИГ условий

		ИГ условия								Оптимиз. свая
		песок гравелистый	песок крупный	песок ср. крупности	песок м/з	песок пылеватый	глина $I_L=0,2$	глина $I_L=0,5$	глина $I_L=0,7$	
i	n, M	η_o								η_o^{opt}
1	2	0,296	0,274	0,162	0,159	0,139	0,158	0,166	0,134	0,714
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	30	0,045	0,031	0,019	0,018	0,014	0,024	0,018	0,009	0,714

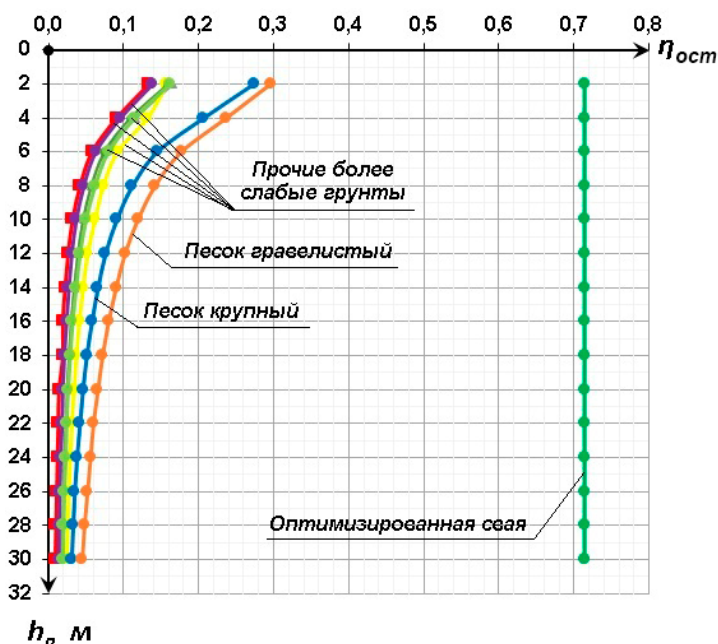


Рисунок 10. Графики зависимости коэффициентов $\eta_{ост}$ от глубины погружения сваи h_n при влиянии фактора ИГ

По графикам на рисунке 10 видно, что коэффициенты $\eta_{ост}$ для различных ИГ условий также отличаются. Особенно значимая разница в значениях $\eta_{ост}$ для различных глубин погружения h_n наблюдается между слабыми и грунтами повышенной несущей способности. Так, оптимизация свай в слабых грунтах носит более выраженный характер.

5.2.3. Вычисление экономии материала ЭГ

Вычислим экономию материала $\mathcal{E}_G$ по формуле (20), результаты вычислений для некоторых глубин погружения свай h_n представим в виде таблицы 10.

Таблица 10. Результаты вычисления коэффициентов $\mathcal{E}_G$ для различных ИГ условий

		ИГ условия							
		песок гравелистый	песок крупный	песок ср.крупности	песок м/з	песок пылеватый	глина $I_L=0,2$	глина $I_L=0,5$	глина $I_L=0,7$
	$h_n, \text{м}$	$\mathcal{E}_G$							
1	2	0							
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	30	52,25	53,37	54,34	54,44	54,97	53,89	55,78	57,89

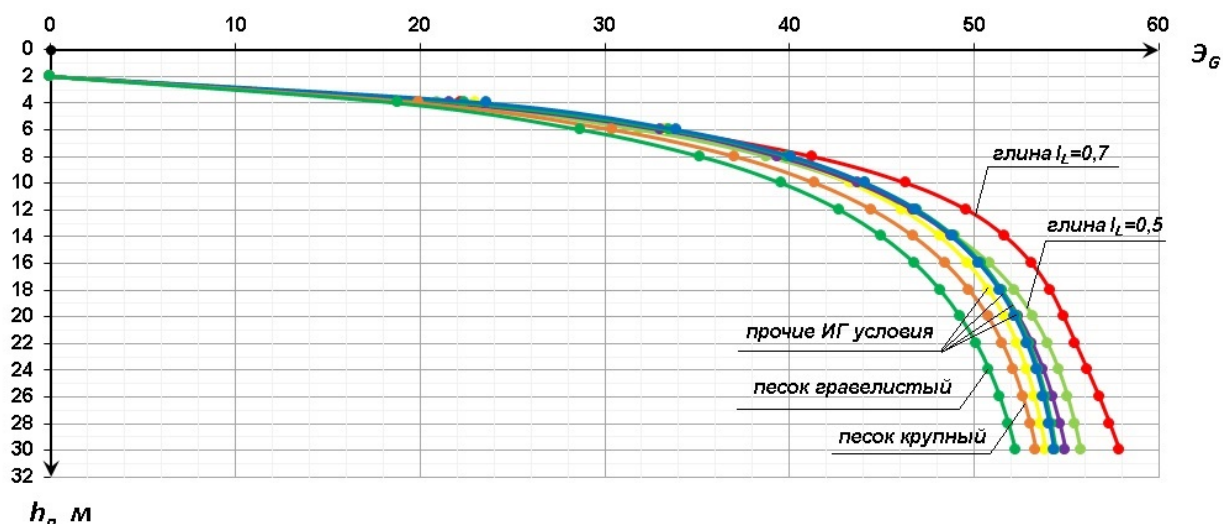


Рисунок 11. Графики зависимости коэффициентов $\mathcal{E}_G$ от глубины погружения свай h_n для различных ИГ условий

По графику на рисунке 11 видно, что критерии $\mathcal{E}_G$ для различных ИГ условий также отличаются. Особенно значимая разница в значениях $\mathcal{E}_G$ для различных глубин погружения h_n наблюдается между слабыми и грунтами повышенной несущей способности. Так, оптимизация свай в слабых грунтах носит более выраженный характер.

5.3. Исследование ССО при влиянии фактора h_n (глубины погружения)

В качестве объектов исследования были приняты ССО с одинаковым наружным диаметром $D=1100$ мм, толщиной стенки $\delta=10$ мм и ИГ условиями – песок мелкозернистый; но различной глубиной погружения h_n .

Для изучения были выбраны 6 свай в отличных друг от друга глубинами h_n равными:

- | | |
|----------|----------|
| 1) 30 м; | 4) 16 м; |
| 2) 24 м; | 5) 12 м; |
| 3) 20 м; | 6) 8 м. |

Выполним вычисления по формулам (2) – (7) и запишем их результаты в виде таблицы 11.

Таблица 11. Результаты оптимизации ССО, толщины стенок δ^{opt} при изменении глубины погружения h_n

		Глубины погружения $h_{\text{п}}$, м					
		30	24	20	16	12	8
i	Z, м	Толщины стенок δ^{opt} , мм					
0	0	9,56	7,18	5,71	4,35	3,08	1,92
1	2	9,27	6,89	5,42	4,06	2,79	1,63
2	4	8,84	6,45	4,99	3,62	2,36	1,19
3	6	8,34	5,95	4,49	3,12	1,86	0,69
4	8	7,80	5,41	3,95	2,58	1,32	0,15
5	10	7,24	4,85	3,39	2,02	0,76	
6	12	6,65	4,26	2,80	1,43	0,17	
7	14	6,04	3,65	2,19	0,82		
8	16	5,40	3,01	1,55	0,18		
9	18	4,74	2,35	0,89			
10	20	4,05	1,66	0,20			
11	22	3,34	0,95				
12	24	2,60	0,21				
13	26	1,84					
14	28	1,05					
15	30	0,24					

Результаты вычислений из таблицы 11 представим графически в виде рисунка 12.

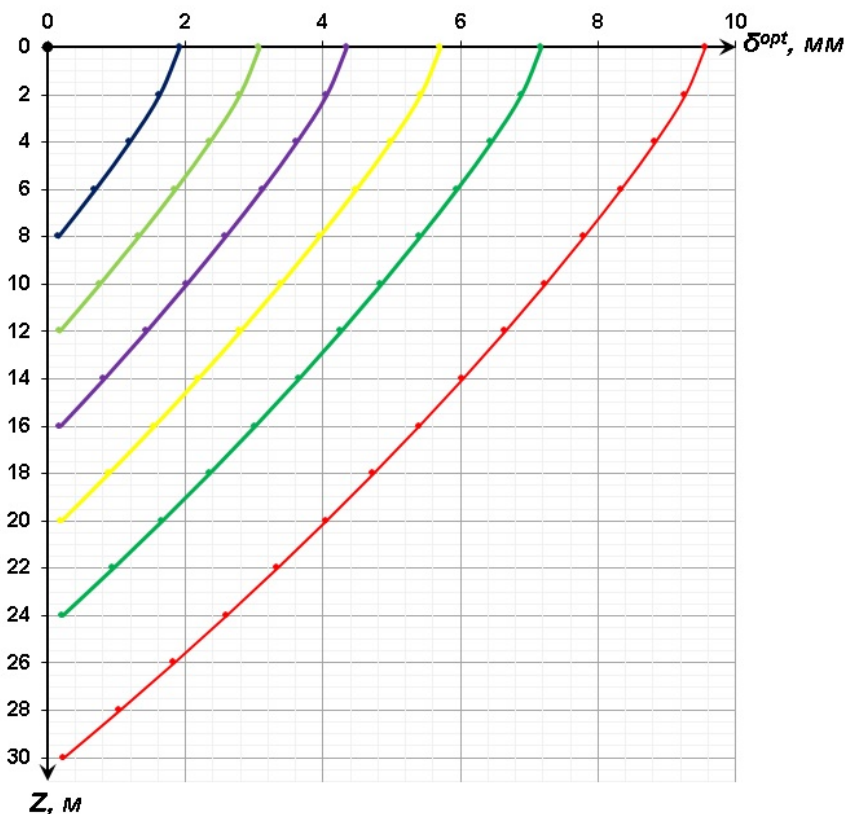


Рисунок 12. График зависимости толщины стенки от глубины расположения поперечного сечения равнопрочной ССО при различных глубинах погружения свай

Графики на рисунке 12 наглядно показывают, что при влиянии фактора h_n , с увеличением глубины погружения, толщина стенки равнопрочной сваи увеличивается на некоторую постоянную величину в каждом рассматриваемом сечении. Построенные графики также, как и графики рисунка 4, позволяют прогнозировать толщины стенок для прочих глубин погружения h_n .

Производить вычисления для критериев $\mathcal{E}_{ep}$, $\mathcal{E}_m$, η_{ocm} и $\mathcal{E}_G$ не имеет смысла, т.к. они были выполнены в таблицах 2 – 5 пункта 3.1, графики зависимости были построены на рисунках 5 – 8. Так, можно утверждать, что эффективность оптимизации свай зависит от фактора h_n .

По критериям $\mathcal{E}_{ep}$, $\mathcal{E}_m$ и η_{ocm} оптимизация носит более значимый характер для свай малой глубины погружения, до 10-15 м (вывод сделан по рисункам 5 – 7). Судя по графику на рисунке 8, по критерию $\mathcal{E}_G$ оптимизация наиболее эффективна для свай глубиной погружения более 15 м, в этом случае достигается наибольшая экономия материала, хотя $\mathcal{E}_G$ с увеличением h_n растет незначительно на больших глубинах.

5.4. Результаты исследования других свай-оболочек

Кроме прочих, нами также были исследованы следующие объекты:

- 1) ССО наружным диаметром $D=1020\text{мм}$, толщиной стенки $\delta=10\text{мм}$, глубиной погружения $h_n=28,5\text{м}$ в неоднородных инженерно-геологических условиях;
- 2) Железобетонная свая-оболочка квадратного наружного сечения с круглым отверстием (ЖБКСО) наружными габаритами $1100\times 1100\text{мм}$, толщиной стенки $\delta=100\text{мм}$, глубиной погружения $h_n=30\text{м}$, ИГ условия – песок гравелистый;

Вычисления по формулам для (15б) и (18) для стальной свай представлены графически на рисунках 13 и 14.

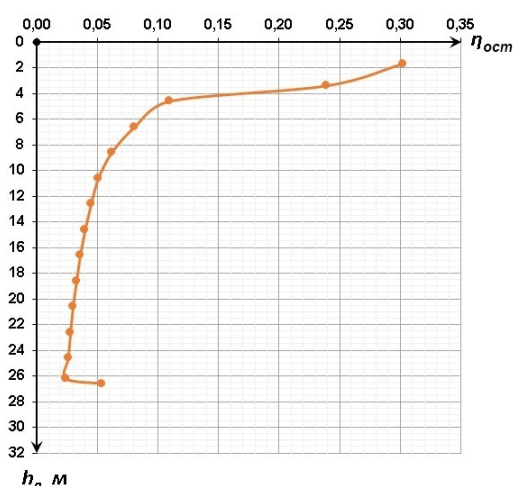


Рисунок 13. Графики зависимости коэффициентов η_{ocm} от глубины погружения свай h_n для ССО при сложных ИГ условиях

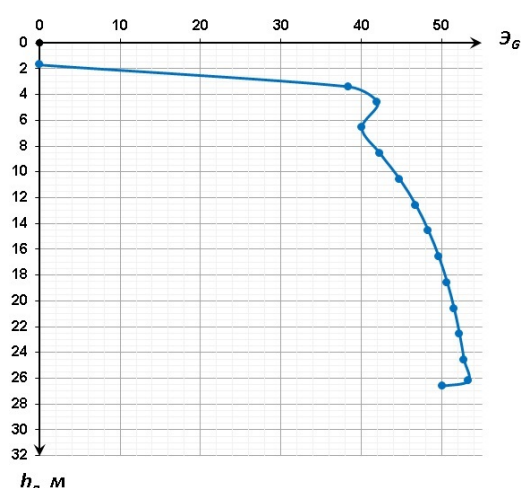


Рисунок 14. Графики зависимости коэффициентов $\mathcal{E}_g$ от глубины погружения свай h_n для ССО при сложных ИГ условиях

По графикам можно сделать вывод о том, что на значения КПД загрузки острия η_{ocm} и экономия материала $\mathcal{E}_G$ влияет неоднородность ИГ условий: на глубинах, где грунт меняет свои свойства, наблюдается «скачок» графиков.

При исследовании ЖБКСО обнаружено, что при больших глубинах заложения в грунтах более слабых, чем гравелистые пески, необходимая для обеспечения условия равнопрочности толщина стенки по расчету принимает отрицательные значения. Однако, при всех условиях A_{net} будет положительна, но в слабых грунтах расчетное квадратное сечение разбивается на четыре треугольные части. Зависимости критериев $\mathcal{E}_{ep}$, $\mathcal{E}_m$ и η_{ocm} от глубины погружения свай те же, что и для свай в пункте 3.1, однако

значение экономии материала $\mathcal{E}_G$ для ЖБКСО на тех же глубинах погружения, что и для ССО, отличаются в большую сторону.

5.5. Результаты исследования свай-оболочек из других материалов

В ходе проведения исследований, предложен вариант замены материала сваи для достижения большего эффекта оптимизации по толщине ее стенок. Рассмотрены: термоупрочненный двухфазный промышленный титан с $[\sigma_{сж}] = 100 \text{ МПа}$ и стеклопластик с $[\sigma_{сж}] = 85 \text{ МПа}$ [52]. В качестве исходных данных взята свая из пункта №3.2 (в песках гравелистых), результаты вычислений по формулам (2) – (7) для новых материалов представлены в таблице 12.

Таблица 12. Результаты оптимизации титановой и стеклопластиковой свай-оболочек

		Материал	
		Титан $[\sigma_{сж}] = 100 \text{ МПа}$	Стеклопластик $[\sigma_{сж}] = 85 \text{ МПа}$
i	$Z, \text{ м}$	Толщины стенок $\delta^{opt}, \text{ мм}$	
0	0	2,25	2,64
1	2	2,18	2,56
...	...	...	...
15	30	0,14	0,17

В дальнейшем могут быть рассмотрены также сваи из следующих комбинаций материалов:

- 1) Сталь (включая нержавеющую) и титан;
- 2) Сталь и стеклопластик;
- 3) Сталь и железобетона.

6. Заключение

1. Предложена математическая модель обеспечения равнопрочности свай. Решение опробовано численно, результаты не противоречат опытным данным, натурным испытаниям.
2. Рассмотрено влияние различных факторов на эффективность оптимизации, среди которых: различные наружные диаметры, инженерно-геологические условия, глубина погружения сваи. Проанализировав эти зависимости, можно сделать вывод о том, что величина наружного диаметра ССО не влияет на эффективность ее оптимизации, а различные ИГ условия (однородные), напротив, оказывают значительное воздействие: наибольшего эффекта оптимизация по материалу достигается в грунтах с меньшим сопротивлением. Кроме того, обнаружено, что весомую роль в эффективности оптимизации играет неоднородность ИГ условий. Оценка влияния глубины погружения дает возможность утверждать, что данный фактор немаловажен: оптимизация наиболее эффективна для свай глубиной погружения более 15 м, в этом случае достигается наибольшая экономия материала.
3. Результаты численного моделирования, представленные в статье в виде графиков и таблиц, могут быть использованы для приближенных оценок решений практических задач.

Литература

- [1]. 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.
- [2]. Мангушев Р.А. Современные свайные технологии: учеб. пособие / Р. А. Мангушев, А. В. Ершов, А. И. Осокин. - СПб.: изд-во СПбГАСУ, 2007. - 160 с.
- [3]. Ватин Н.И. Устройство свайных фундаментов: учеб. пособие / Н.И. Ватин и др. - СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2012. - 221 с.
- [4]. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.
- [5]. 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.

- [6]. Veli-Matti Uotinen, Jukka Rantala. Applications and Development of Modern Steel Pile Technology // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1173-1182.
- [7]. Николаев Г.Н. Справочник по строительству портовых гидротехнических сооружений. М.: Изд-во "Транспорт", 1972. 464 с.
- [8]. Tsinker Gregory P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. Harbors. Design and Construction. Printed in the USA: New Jersey, 2004. 881 p.
- [9]. Cyna H. FOREVER (FOndation REnforcees VERticalement). Synthese des rezultates et recommandation du Projet national sur les MICROPIEUX. Paris. Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
- [10]. Рахаринуси А.П. Применение стальных трубчатых свай с открытым нижним концом в портовых гидротехнических сооружениях. Дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.19 СПб., 1999.
- [11]. Binhuang W., Minghua W. Application of steel pipe piles in harbour construction // China Port and Waterway Engineering. 1989. Vol.3. Pp. 9-18.
- [12]. 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.
- [13]. De Ruiter J., Beringen F. L. Pile foundation for large North sea structures // Marine Geotechnolgy. 1979. Vol. 3. Pp. 267-314.
- [14]. Zhang Xudong Research and Application of Mini-sized Steel Pipe Pile Technology in Limited Space // Procedia Engineering. 2014. Vol.73. Pp. 16-22
- [15]. 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.
- [16]. Булатов Г.Я., Лысякова Е.И., Корневская М.А. Обобщение расчетов несущей способности сваи по грунту // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №6(21). С. 120-127.
- [17]. Улыбин А.В., Зубков С.В., Федотов С.Д., Закревский А.Ю. Обследование свайных фундаментов при надстройке зданий // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 4(48). С. 17-27.
- [18]. ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.
- [19]. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.
- [20]. Руководство по проектированию свайных фундаментов // НИИОСП им. Н.М. Герсеевича Госстроя СССР.- М.: Стройиздат, 1980.
- [21]. 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.
- [22]. ГОСТ 19804.6-83. Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные составные с ненапрягаемой арматурой.
- [23]. Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Эффективность свай различных форм поперечного сечения // Инженерно-строительный журнал. 2013. №7. С. 67-76.
- [24]. Вертынский О.С. Определение несущей способности набивных конических свай // Вестник Саратовского Государственного технического университета. 2006. №4(16). С. 77-80.
- [25]. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Технология возведения фундаментов - "свая в трубе" // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С.33-37.
- [26]. Shirato M., Kohno T., Nakatani S. Model errors in bearing capacity of vertically loaded foundations // Geotechnical Special Publication. 2013. No.229. Pp. 505-519.
- [27]. Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г., Дудин М.О. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом // Инженерно-строительный журнал. 2015. №2(54). С. 33-45.
- [28]. Шумаков И.В., Никулин В.Б. Инновационные методы возведения подземной части зданий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-2(38). С. 411-414.
- [29]. Сесюнин С.Г., Леви С.Р., Потапов А.Д. Выбор оптимальной конструкции железобетонной забивной сваи для пучинистого грунта // Вестник МГСУ. 2009. №3. С.167-172.
- [30]. Булатов Г.Я., Колосова Н.Б., Теплов А.Б. Несущая способность забивной сваи различных форм поперечного сечения // Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений". 2013. №1(6). С. 22-27.
- [31]. Булатов Г.Я., Колосова Н.Б., Колосов Е.С., Теплов А.Б. Зависимость несущей способности сваи от форм поперечного сечения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №10(15). С. 15-24.
- [32]. Войлоков И.А. Применение фибры при изготовлении свай // Инженерно-строительный журнал. 2009. №8. С. 6-8.

- [33]. Забивные сваи с железобетонным стволом и сталефибробетонной головой / Г.С. Родов, Л.Г. Курбатов, В.С. Куприянов, М.Я. Хазанов // Материалы семинара по повышению качества нулевого цикла. – Ленинград, 1979. – С. 54-62.
- [34]. Бекбасаров И.И., Байтелиев Р.Т., Шилибеков С.К., Исаков Г.И. Новые перспективные ресурсосберегающие свайные конструкции // Вестник ПНИПУ. 2014. №4. С. 81-92.
- [35]. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И. Принципы создания полибетонных железобетонных свай // Материалы XIII студенческой научно-практической конференции по естественным, техническим, социально-гуманитарным и экономическим наукам, посвященной 20-летию Независимости Республики Казахстан. – Тараз: Изд-во «Тараз университет», 2011. – С. 141-142.
- [36]. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И. Полипрочные и полибетонные сваи // Наука и технологии: шаг в будущее: сб. тез. V Всемир. Конгресса инжиниринга и технологий – WCET – 2012. – Алматы, 2012. – С. 82-84.
- [37]. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И. Забивная свая с переменной прочностью и технологические принципы ее изготовления // Materialy VII mezinarodni vedecko-prakticka Konference "Vedecky prumysl evropskeho kontinentu – 2011". Dil 26 Technicke vedy, Vystavba a architektura. – Praha: Publishing House "Education and Science" s.r.o.pp. 72-75.
- [38]. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И., Саимбетова Б.Т. Технология изготовления и технико-экономические показатели полипрочных свай // Materialy VIII mezinarodni vedecko-prakticka Konference "Efektivni nastroje modrnych ved – 2012". Dil 31 Vystavba a architektura Technicke vedy. – Praha: Publishing House "Education and Science" s.r.o.pp. 69-73.
- [39]. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Новая технология – «фундамент на трубогрунте» // Инженерно-строительный журнал. 2008. №2. С. 32-37.
- [40]. Булатов Г.Я., Ножнов А.П. Численное моделирование влияния грунтового ядра на несущую способность трубосвай // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2. С. 27-35.
- [41]. 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.
- [42]. Чепуренко А.С., Андреев В.И., Языев Б.М. Построение модели равнопрочной многопролетной балки // Инженерный Вестник Дона. 2013. №1. С. 13-20.
- [43]. Муханов А.В. Оптимизация строительных конструкций на основе численного и аналитического решения задач механики неоднородных тел. Ростов-на-Дону. 2013. 24с.
- [44]. Manandhar S., Yasufuku N. Vertical bearing capacity of tapered piles in sands using cavity expansion theory // Soils and Foundations. 2013. No. 6(53). Pp. 853–867.
- [45]. Dai G.-L., Yu Q.-Y., Gong W.-M. Study of effective pile length based on Winkler models // Rock and Soil Mechanics. 2012. No.33 (SUPPL. 2). Pp. 162–166.
- [46]. 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.
- [47]. Корочкина С.О., Булатов Г.Я. Технология регулируемой набивки свай // XXXIII неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. Ч.I: С.121-123, 2005.
- [48]. Кукина А.А., Булатов Г.Я. К расчету несущей способности стальной трубосвай // XXXVI неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. 2009.
- [49]. 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.
- [50]. 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.
- [51]. Булатов Г.Я., Шилкин Ф.С. Выбор и расчеты производительности сваебойного оборудования // Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений". 2013. №3(8). С. 46-59.
- [52]. Преображенский А.И. Стеклопластики – свойства, применение, технологии // Главный механик. 2010. № 5. С. 27-36.

Factors affecting the efficiency of full-strength tubular pile

G.Y. Bulatov ¹, N.S. Voronina ^{2*}

¹⁻² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia*

Article info

scientific article

doi: 10.18720/CUBS.54.9

Article history

Received 02.04.2016

Keywords

friction pile;
tubular pile;
pile capacity;
optimize of foundations;
full-strength pile;
efficiency of pile;

ABSTRACT

The article contains the criteria that give the opportunity to make a quantitative estimates of efficiency optimize a steel tubular pile by materials consumption. The objective of optimize is to reduce the material consumption for the manufacture of pile. On the basis of the studies presented in this article, the following conclusions can be reached. 1) Mathematical model is proposed to ensure the full-strength of pile; 2) Considers the influence of various factors onto the efficiency of the optimize, including: different outside diameters, geotechnical profile, burial depth of pile; 3) There are graphs and tables, which may also be used for approximate estimates of solutions to practical problems.

Contact information:

¹ +7(812)2975949, gybulatov@mail.ru (Bulatov Georgiy, , PhD, Associate Professor)

^{2 *} +7(931)3179287, tata_101@mail.ru (Voronina Natalia, student)

References

- [1]. Dalmatov B.I. Proektirovanie fundamentov zdaniy i podzemnyh sooruzhenij: ucheb. posobie [Design of building foundations and underground structures: tutorial]. M.: Izd-vo ASV, 2001. 440 p. (rus)
- [2]. Mangushev R.A. Sovremennye svajnye tehnologii: ucheb. posobie [Modern pile technology: tutorial] / R. A. Mangushev, A. V. Ershov, A. I. Osokin. - SPb.: izd-vo SPbGASU, 2007. 160 p. (rus)
- [3]. Vatin N.I. Ustrojstvo svajnyh fundamentov: ucheb. posobie [The installation of pile foundations] - SPb.: izd-vo Politehn.un-ta, 2012. 221 p. (rus)
- [4]. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.01-83* [The Foundation of buildings and structures. Updated edition of Building code 2.02.03-83*]
- [5]. Gorshkov N.I., Volkov A.N., Beluckij I.Ju., Krasnov M.A. O proektirovanii osnovanij svajnyh fundamentov iz stal'nyh 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)
- [6]. Veli-Matti Uotinen, Jukka Rantala. Applications and Development of Modern Steel Pile Technology // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1173-1182.
- [7]. Nikolaev G.N. Spravochnik po stroitel'stvu portovyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij. M.: Izd-vo "Transport", 1972. 464 p. (rus)
- [8]. Tsinker Gregory P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. Harbors. Design and Construction. Printed in the USA: New Jersey, 2004. 881 p.
- [9]. Cyna H. FOREVER (FOndation RENforcees VERTicalement). Synthese des resultates et recommendation du Projet national sur les MICROPIEUX. Paris. Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
- [10]. Raharinusi A.P. Primeneni stal'nyh trubchatykh svaj s otkrytym nizhnim koncom v portovyh gidrotehnicheskikh sooruzhenijah [Application of steel tubular piles with an open bottom end in the harbour structures]. SPb. 1999. 182 p. (rus)
- [11]. Binhuan W., Minghua W. Application of steel pipe piles in harbour construction // China Port and Waterway Engineering. 1989. Vol.3. Pp. 9-18.
- [12]. 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.
- [13]. De Ruiter J., Beringen F. L. Pile foundation for large North sea structures // Marine Geotechnology. 1979. Vol. 3. Pp. 267-314.
- [14]. Zhang Xudong Research and Application of Mini-sized Steel Pipe Pile Technology in Limited Space // Procedia Engineering. 2014. Vol.73. Pp. 16-22
- [15]. Ulybin A.V., Kornev V.V. Metod kontrolja dliny stal'nyh svaj-obolochek [The method of length measurement for hollow steel piles] // Internet-zhurnal "Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij". 2013. №1(6). Pp. 28-35. (rus)
- [16]. Bulatov G.Ya., Lysjakova E.I., Korenevskaja M.A. Obobshhenie raschetov nesushhej sposobnosti svai po gruntu [The resumptive pile load capacity equation] // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2014. №6(21). Pp. 120-127. (rus)
- [17]. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D., Zakrevskij A.Ju. Obsledovanie svajnyh fundamentov pri nadstrojke zdaniy [Inspection of pile foundation before constructing additional storeys on existing building] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2014. № 4(48). Pp. 17-27. (rus)
- [18]. TSN 50-302-2004. Proektirovanie fundamentov zdaniy i sooruzhenij v Sankt-Peterburge [Design of foundations of buildings and structures in Saint Petersburg].
- [19]. SP 24.13330.2011. Svajnye fundamenty. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.02.03-85 [Set of rules 24.13330.2011. Pile foundation. Updated edition of Building code 2.02.03-85].
- [20]. Rukovodstvo po proektirovaniju svajnyh fundamentov [Guidance about design of pile foundations] // NIIOSP im. N.M. Gersevanova Gosstroja SSSR.-M.: Strojizdat, 1980. (rus)
- [21]. Vatin N.I., Badanin A.N., Kolosov E.S. Proektirovanie i ustrojstvo vspomogatel'nyh 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)

- [22]. GOST 19804.6-83. Svai polyekruglogo secheniya i svai-obolochki zhelezobetonnye sostavnye s nenaprjagaemoj armaturoj [Tubular pile and pile-shell made of concrete with UN-tensioned reinforcement]
- [23]. Bulatov G.Ya., Kolosova N.B. Jefferktivnost' svaj razlichnyh form poperechnogo secheniya [Efficiency of pile of various cross-sectional forms] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2013. №7. Pp. 67-76. (rus)
- [24]. Vertynskij O.S. Opredelenie nesushhej sposobnosti nabivnyh konicheskikh svaj [bearing test stuffed conical piles] // Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. 2006. №4(16). Pp. 77-80. (rus)
- [25]. Bulatov G.Ya., Kostyukova A.Yu. Tekhnologiya vozvedeniya fundamentov - "svaya v trube" [Building technology foundation - "pile in the pipe"] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2008. №1. S.33-37.
- [26]. Shirato M., Kohno T., Nakatani S. Model errors in bearing capacity of vertically loaded foundations // Geotechnical Special Publication. 2013. No.229. Pp. 505–519.
- [27]. Vatin N.I., Barabanshchikov Yu.G., Dudin M.O. Modelirovaniye nabora prochnosti betona v programme ELCUT pri progreve monolitnykh konstruksiy provodom [Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2015. №2(54). Pp. 33-45.
- [28]. Shumakov I.V., Nikulin V.B. Innovatsionnyye metody vozvedeniya podzemnoy chasti zdaniy [Innovative methods of construction of the underground part of buildings] // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. № 5-2(38). Pp. 411-414.
- [29]. Sesyunin S.G., Levi S.R., Potapov A.D. Vybor optimalnoy konstruksii zhelezobetonnoy zabivnoy svay dlya puchinistogo grunta [Selecting the optimum design of reinforced concrete driven piles for heaving soils] // Vestnik MGSU. 2009. №3. Pp.167-172.
- [30]. Bulatov G.Ya., Kolosova N.B., Teplov A.B. Nesushchaya sposobnost zabivnoy svai razlichnykh form poperechnogo secheniya [Bearing capability of driven piles with different types of cross-section] // Internet-zhurnal "Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy". 2013. №1(6). Pp. 22-27.
- [31]. Bulatov G.Ya., Kolosova N.B., Kolosov Ye.S., Teplov A.B. Zavisimost nesushchey sposobnosti svai ot form poperechnogo secheniya [The dependence of the bearing capacity of the pile from the cross-sectional shapes] // Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2013. №10(15). Pp. 15-24.
- [32]. Voylovkov I.A. Primeneniye fibry pri izgotovlenii svay [Application of fiber in the manufacture of piles] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2009. №8. Pp. 6-8.
- [33]. Zabivnyye svai s zhelezobetonnyim stvolom i stalefibrobetonnoy golovoy [Driven piles with concrete shaft and steel-fibro-concrete head] / G.S. Rodov, L.G. Kurbatov, V.S. Kupriyanov, M.Ya. Khazanov // Materialy seminarov po povysheniyu kachestva nulevogo tsikla. – Leningrad, 1979. – Pp. 54-62.
- [34]. Bekbasarov I.I., Bayteliyev R.T., Shilibekov S.K., Isakov G.I. Novyye perspektivnyye resursosberegayushchiye svaynyye konstruksii [Promising new resource pile construction] // Vestnik PNIPU. 2014. №4. Pp. 81-92.
- [35]. Bekbasarov I.I., Isakov G.I. Printsipy sozdaniya polibetonnykh zhelezobetonnykh svay [Principles for creating polyconcrete reinforced concrete piles] // Materialy XIII studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po yestestvennym, tekhnicheskim, sotsialno-gumanitarnym i ekonomicheskim naukam, posvyashchennoy 20-letiyu Nezavisimosti Respubliki Kazakhstan. – Taraz: Izd-vo «Taraz universiteti», 2011. – Pp. 141-142.
- [36]. Bekbasarov I.I., Isakov G.I. Poliprochnyye i polibetonnyye svai [Polysolid and polyconcrete piles] // Nauka i tekhnologii: shag v budushcheye: sb. tez. V Vsemir. Kongressa inzhiniringa i tekhnologii – WCET – 2012. – Almaty, 2012. – S. 82-84.
- [37]. Bekbasarov I.I., Isakov G.I. Zabivnaya svaya s peremennoy prochnostyu i tekhnologicheskoye printsipy yeye izgotovleniya [Driven pile variable strength and technological principles of its manufacture] // Materialy VII mezinarodni vedecko-prakticka Konference "Vedecky prumysl evropskeho kontinentu – 2011". Dil 26 Technicke vedy, Vystavba a architektura. – Praha: Publishing House "Education and Science" s.r.o.pp. 72-75.
- [38]. Bekbasarov I.I., Isakov G.I., Saimbetova B.T. Tekhnologiya izgotovleniya i tekhniko-ekonomicheskoye pokazateli poliprochnykh svay [Manufacturing technology and the technical and economic indicators polysolid piles] // Materialy VIII mezinarodni vedecko-prakticka Konference "Efektivni

- nastroje modrnich ved – 2012". Dil 31 Vystavba a architectura Technicke vedy. – Praha: Publishing House "Education and Science" s.r.o.pp. 69-73.
- [39]. Bulatov G.Ya., Kostyukova A.Yu. Novaya tekhnologiya – «fundament na trubogrunte» [The new technology - "the foundation on the ground turbo"] // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2008. №2. Pp. 32-37.
- [40]. 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] // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2010. №2. Pp. 27-35.
- [41]. 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.
- [42]. Chepurenko A.S., Andreev V.I., Jazyev B.M. Postroenie modeli ravnoprochnoy mnogoproletnoy balki [Modeling multispan beam of uniform strength] // Inzhenernyy Vestnik Dona. 2013. №1. Pp. 13-20. (rus)
- [43]. Muhanov A.V. Optimizaciya stroitel'nykh konstruktsiy na osnove chislennogo i analiticheskogo resheniya zadach mehaniki neodnorodnykh tel [Optimization of building structures based on numerical and analytical solutions of problems of mechanics of inhomogeneous bodies]. Rostov-na-Donu. 2013. 24p.(rus)
- [44]. Manandhar S., Yasufuku N. Vertical bearing capacity of tapered piles in sands using cavity expansion theory // Soils and Foundations. 2013. No. 6(53). Pp. 853–867.
- [45]. Dai G.-L., Yu Q.-Y., Gong W.-M. Study of effective pile length based on Winkler models // Rock and Soil Mechanics. 2012. No.33 (SUPPL. 2). Pp. 162–166.
- [46]. Isupova A.V., Bulatov G.Ya. Tekhnologiya povysheniya nesushchey sposobnosti trubosvay [Technology to increase the carrying capacity of the pipe pile] // XXXIII nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch.I: Pp.120-121, 2005.
- [47]. Korochkina S.O., Bulatov G.Ya. Tekhnologiya reguliruyemoy nabivki svay [Technology controlled piling] // XXXIII nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch.I: Pp.121-123, 2005.
- [48]. Kukina A.A., Bulatov G.Ya. K raschetu nesushchey sposobnosti stalnoy trubosvai [On the calculation of the bearing capacity of steel pipe piles] // XXXVI nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2009.
- [49]. Karaulin A.S., Sozykin Yu.V., Nozhnov A.P., Bulatov G.Ya. Pogruzheniye polykh svay [Dive hollow piles] // XXXIV nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch.I: Pp.107-109, 2006.
- [50]. Potapenko K.V., Bulatov G.Ya. Tekhnologii fundamentov s primeneniym stalnykh trubosvay (STS) [The technology foundation using steel pipe piles] // XXXIII nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ch.I: Pp.123-125, 2005.
- [51]. Bulatov G.Ya., Shilkin F.S. Vybory i raschety proizvoditel'nosti svaebornogo oborudovaniya [Selections and performance calculations pile-driving equipment] // Internet-zhurnal "Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij. 2013. №3(8). Pp. 46-59. (rus)
- [52]. Preobrazhenskiy A.I. Stekloplastiki – svoystva, primeneniye, tekhnologii [Glass reinforced plastic - properties, application, technology] // Glavnyy mekhanik. 2010. № 5. Pp. 27-36.

Булатов Г.Я., Воронина Н.С., Факторы, влияющие на эффективность равнопрочной сваи-оболочки, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №3 (54). С. 105-128.

Bulatov G.Y., Voronina N.S. Factors affecting the efficiency of full-strength tubular pile. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 3 (54). Pp. 105-128. (rus)