



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 3, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.03

УДК 692.1

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ-ОБОЛОЧКИ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

С.А. Матвеев, Е.А. Мартынов, Н.Н. Литвинов, Г.А. Крыжановский

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 28 мая 2021

Принята: 24 июля 2021

Опубликована: 30 сентября 2021

Ключевые слова:

свая-оболочка, несущая способность, грунтовые условия, грунтовое ядро.

АННОТАЦИЯ

Выполнена сравнительная оценка несущей способности стальной сваи-оболочки большой длины при погружении в условиях глубокого залегания плотных грунтов на примере Крымского моста. Грунтовая колонка представлена шестью слоями грунта, из которых только последний шестой слой, расположенный на глубине 62 м, обладает высокой несущей способностью. Рассмотрены три расчетные схемы, учитывающие сопротивление грунта по внешней боковой поверхности и под нижним концом сваи, по внешней и внутренней боковым поверхностям сваи, а также по внешней боковой поверхности и под нижним концом сваи с учетом грунтового ядра и эффекта самозапирания. Результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки по каждой из расчетных схем представлены в табличном и графическом виде. Сделаны выводы о характере изменения сил сопротивления грунта с глубиной погружения сваи как по внешней, так и по внутренней ее боковым поверхностям, а также под ее нижним концом. Установлена глубина, на которой начинается формирование грунтового ядра, а также глубины, в пределах которых происходит уплотнение и самозапирание грунта внутри полости сваи. При этом свая начинает работать как свая с закрытым нижним концом, и дальнейшее увеличение ее несущей способности происходит за счет сил трения грунта по внешней боковой поверхности. Проведено сравнение вычисленных по каждой из трех расчетных схем значений несущей способности с частным значением предельного сопротивления по данным погружения при фактических (измеренных) остаточных отказах по результатам полевых испытаний динамической нагрузкой.

© ПНИПУ

© **Матвеев Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: dfsibadi@mail.ru.

Мартынов Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: asp_evg@mail.ru.

Литвинов Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: niklitvinov_23@mail.ru.

Крыжановский Глеб Андреевич – магистр, e-mail: k_g_b96@mail.ru.

Sergei A. Matveev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: dfsibadi@mail.ru.

Evgenii A. Martynov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: asp_evg@mail.ru.

Nikolai N. Litvinov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: niklitvinov_23@mail.ru.

Gleb A. Kryzhanovskii – Master, e-mail: k_g_b96@mail.ru.

THE LONG SHELL PILE BEARING CAPACITY CALCULATION

S.A. Matveev, E.A. Martynov, N.N. Litvinov, G.A. Kryzhanovsky

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 May 2021
Accepted: 24 July 2021
Published: 30 September 2021

Keywords:

shell pile, bearing capacity, soil conditions, soil core.

ABSTRACT

A comparative assessment of the long steel shell-pile bearing capacity is carried out in conditions of deep bedding of dense soils on the example of the Crimean bridge. The soil column is represented by six layers of soil only the last sixth layer of which located at a depth of 62 m has a high bearing capacity. Three design schemes are considered, taking into account soil resistance along the outer side surface and under the lower end of the pile, along the outer and inner side surfaces of the pile, as well as along the outer side surface and under the lower end of the pile, taking into account the soil core and self-locking effect. The results of calculating the bearing capacity of the steel pile-shell for each of the design schemes are presented in tabular and graphical form. Conclusions are drawn about the nature of the change in the soil resistance forces with the depth of the pile immersion both along its outer and inner lateral surfaces as well as under its lower end. The depth at which the soil core formation begins as well as the depths within which the soil is compacted and self-locking inside the pile cavity has been established. In this case the pile begins to work as a pile with a closed lower end and a further increase in its bearing capacity occurs due to the frictional forces of the soil along the outer lateral surface. A comparison is made of the bearing capacity values calculated for each of the three design schemes with the partial value of the ultimate resistance according to immersion load data with actual (measured) residual failures based on the results of field tests with dynamic load.

© PNRPU

Введение

Сваи-оболочки трубчатого сечения применяются в мостостроении, при возведении сооружений на шельфе, а также при строительстве гидротехнических и других сооружений [1–4]. При больших нагрузках сваи-оболочки имеют преимущества перед другими типами свай, так как имеют повышенную несущую способность за счет включения в работу грунтового ядра внутри свай с эффектом самозапирания [5–7]. Механизм взаимодействия стальных свай-оболочек с грунтовым основанием достаточно полно освещен в современной зарубежной и отечественной литературе [8–16], но оценка несущей способности стальной сваи-оболочки большой длины при погружении в условиях глубокого залегания плотных грунтов еще недостаточно изучена. Такие условия были выявлены при строительстве Крымского моста и послужили исходными данными наряду с конструкциями свай для материалов, изложенных в данной статье.

Основная часть

Грунтовая колонка и расчетные схемы для вычисления несущей способности стальной сваи-оболочки представлены на рис. 1.

Грунтовая колонка представляет собой 6 слоев грунта (см. рис. 1, *a*). Слои с 1-го по 4-й сложены глиной различной пластичности, текучести и долей органических и прочих включений; 5-й слой – мелкий песок. Несущая способность данных слоев невысока. При сейсмическом воздействии имеется большая вероятность разжижения грунтов 1–4-го слоев, поэтому принята увеличенная длина свай с учетом погружения в нижележащий 6-й слой. Он представлен глиной тугопластичной, являющейся водоупором. Характеристики грунтов представлены в табл. 1.

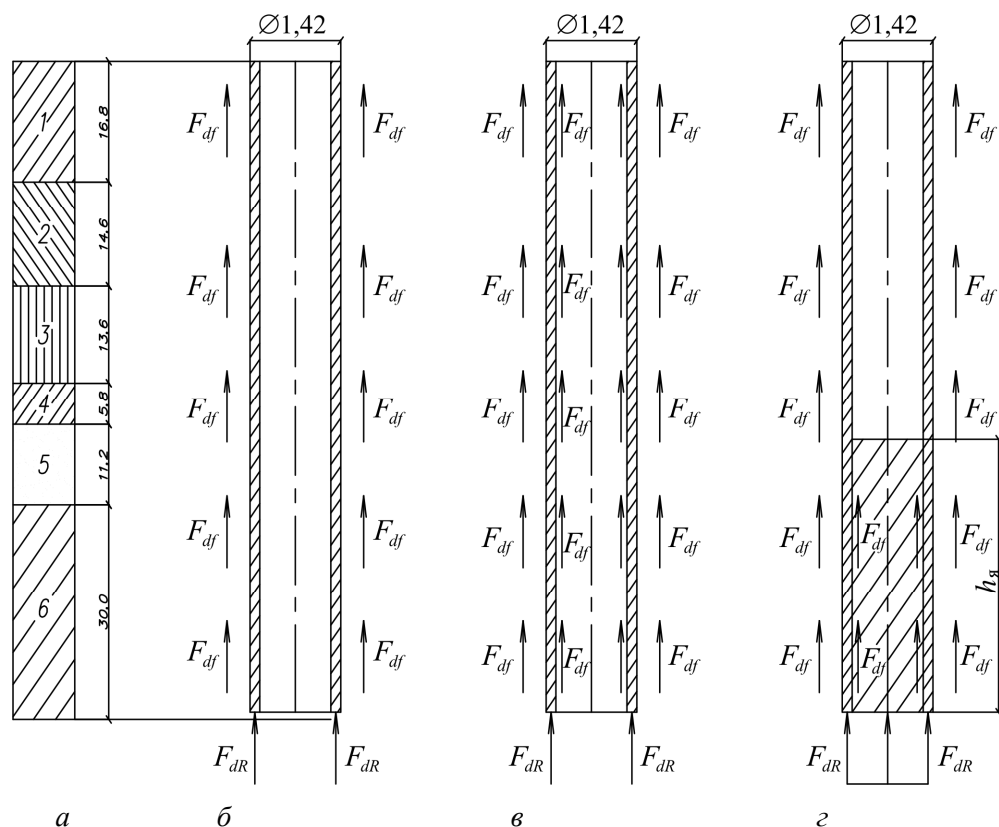


Рис. 1. Расчетные схемы: а – грунтовой колонки; б – стальной сваи-оболочки с учетом сопротивления грунта под нижним концом и по внешней боковой поверхности; в – стальной сваи-оболочки с учетом трения по внутренней и внешней боковой поверхности; г – стальной сваи-оболочки с учетом грунтового ядра и сопротивления грунта по внешней боковой поверхности
 Fig. 1. Design schemes: a – soil column; b – steel pile-shell taking into account the resistance of the soil under the lower end and along the outer side surface; c – steel pile-shell taking into account the friction on the inner and outer side surfaces; d – steel pile-shell, taking into account the soil core and soil resistance along the outer side surface

Таблица 1

Грунтовая колонка в соответствии с ГОСТ 25100

Table 1

Soil column in accordance with GOST 25100

№ ИГЭ	Наименование грунта	Природная влажность, W_e , %	Показатель текучести, I_L , доли е.	Плотность природного грунта, ρ , г/см ³	Мощность слоя, м
1	Глина текучая, с примесью органического вещества	58,5	–	1,65	16,8
2	Глина мягкопластичная, с примесью органического вещества	41,6	0,63	1,80	14,6
3	Глина текучая, с примесью органического вещества	53,7	0,90	1,69	13,6
4	Глина текучепластичная	55,9	1,2	1,66	5,8
5	Песок мелкий	17,0	–	1,98	11,2
6	Глина тугопластичная	29,6	0,38	1,50	29,0

На рис. 1 показаны различные расчетные схемы стальной сваи-оболочки. Первая расчетная схема – схема висячей забивной сваи с учетом сопротивления грунта под ее нижним концом и по внешней боковой поверхности (см. рис. 1, б). Вторая расчетная схема – аналогичная первой, но с учетом трения по боковой внутренней поверхности сваи (см. рис. 1, в). Третья расчетная схема учитывает возникновение грунтового ядра и эффект самозапирания, при этом свая работает как свая с закрытым нижним концом (см. рис. 1, г).

Несущая способность сваи для первой расчетной схемы (см. рис. 1, б) рассчитывается в соответствии с СП 24.13330.2011 по формулам:

$$F_d = F_{dR} + F_{df}, \quad (1)$$

$$F_{dR} = \gamma_c \gamma_{cR} R A, \quad (2)$$

$$F_{df} = \gamma_c u \sum \gamma_{cf} f_i h_i, \quad (3)$$

где F_d – несущая способность сваи, кН; F_{dR} – несущая способность сваи на острие, кН; F_{df} – несущая способность по боковой поверхности сваи, кН; γ_c – коэффициент условий работы сваи $\gamma_c = 1$; γ_{cR} , γ_{cf} – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, учитывающие влияние способа погружения сваи и расчетные сопротивления грунта; R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа; R_i – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи при глубине погружения нижнего конца сваи до уровня i -го слоя, кПа; A – площадь опирания сваи на грунт, равная площади поперечного сечения сваи-оболочки нетто, м²; u – периметр поперечного сечения ствола сваи, м; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи, кПа; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; h_n – глубина погружения сваи, м.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Зависимость несущей способности стальной сваи-оболочки от глубины погружения для первой расчетной схемы, установленная по методике СП 24.13330.2011, представлена на рис. 2.

Для второй расчетной схемы рассмотрена модель погружения сваи с учетом сопротивления грунта не только под ее нижним концом и по внешней боковой поверхности, но также с учетом трения по внутренней боковой поверхности сваи-оболочки (см. рис. 1, в). Значение несущей способности сваи по второй расчетной схеме F_d^* складывается из несущей способности F_d , определяемой для расчетной схемы 1, суммируемой с несущей способностью сваи по внутренней боковой поверхности F_{df}^* , определяемой в соответствии с СП 24.13330.2011 по формулам:

$$F_d^* = F_d + F_{df}^*, \quad (4)$$

$$F_{df}^* = \gamma_c u_{\text{вн}} \sum \gamma_{cf} f_i h_i, \quad (5)$$

где F_d^* – несущая способность сваи с учетом трения по внутренней боковой поверхности, кН; F_d – несущая способность сваи без учета трения по внутренней боковой поверхности, кН; F_{df}^* – несущая способность по боковой поверхности внутренней части сваи, кН; $u_{\text{вн}}$ – внутренний периметр поперечного сечения ствола сваи, м.

Таблица 2

Результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки для первой расчетной схемы (см. рис. 1, б)

Table 2

The results of calculating the bearing capacity of the steel pile-shell for the first design model (fig. 1, b)

Слой	Мощность части слоя, м	h_n , м	$\sum f_i h_i$	R_{is} , кПа	F_{df} , кН	F_{dR} , кН	F_d , кН
1	0,8	0,8	0,00	1100	0,00	67,73	67,73
	8×2,0	16,8	0,00	1100	0,00	67,73	67,71
2	7×2,0	30,8	246,40	1300	1099,17	80,05	1179,22
	0,6	31,4	257,38	1300	1148,15	80,05	1228,20
3	6×2,0	43,4	353,38	1300	1576,40	80,05	1656,45
	1,6	45,0	366,18	1300	1633,50	80,05	1713,55
4	2×2,0	49,0	366,18	1300	1633,50	80,05	1713,55
	1,8	50,8	366,18	1300	1633,50	80,05	1713,55
5	5×2,0	60,8	1066,18	4100	4756,15	252,45	5008,61
	1,2	62,0	1150,18	4100	5130,87	252,45	5383,32
6	9×2,0	80,0	2086,18	4180	9306,30	257,38	9563,68

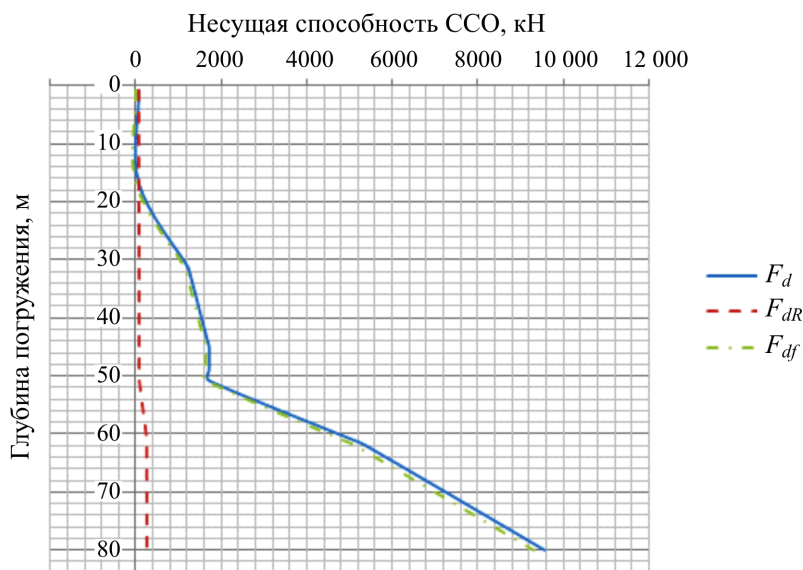


Рис. 2. Зависимость несущей способности стальной сваи-оболочки (ССО) от глубины погружения в соответствии с первой расчетной схемой
 Fig. 2. Dependence of the bearing capacity of the steel shell pile (SSP) on the immersion depth in accordance with the first design model

Результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки для второй расчетной схемы представлены в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3

Результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки с учетом трения по боковой поверхности внутренней части сваи

Table 3

Results of calculating the bearing capacity of a steel pile-shell taking into account friction along the lateral surface of the inner part of the pile

Слой	Мощность части слоя, м	$h_{п}$, м	R_i , кПа	F_d , кН	F_{df}^* , кН	F_d^* , кН
1	0,8	0,8	1100	67,73	0,00	67,73
	8×2	16,8	1100	67,73	0,00	67,73
2	7×2	30,8	1300	1179,22	1068,21	2247,43
	0,6	31,4	1300	1228,20	1115,81	2344,01
3	6×2	43,4	1300	1656,45	1532,00	3188,45
	1,6	45	1300	1713,55	1587,49	3301,04
4	2×2	49	1300	1713,55	1587,49	3301,04
	1,8	50,8	1300	1713,55	1587,49	3301,04
5	5×2	60,8	4100	5008,61	4622,18	9630,78
	1,2	62	4100	5383,32	4986,34	10369,66
6	9×2	80	4180	9563,68	9044,15	18607,83

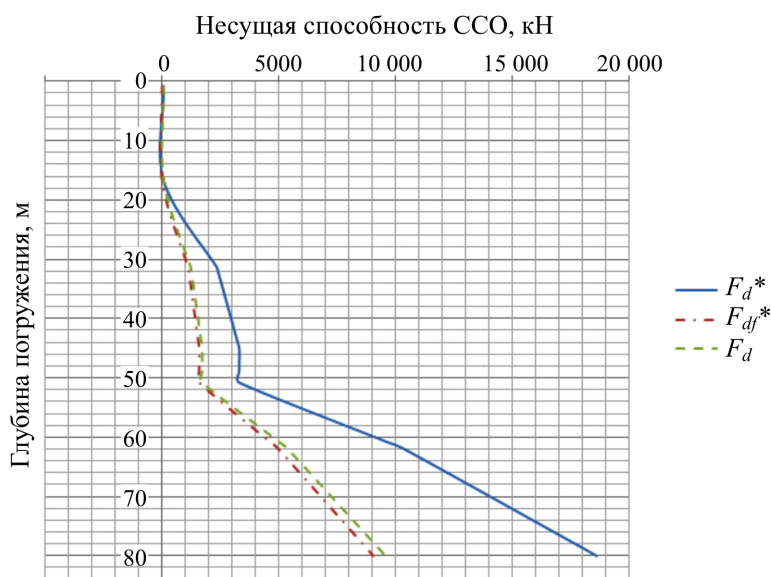


Рис. 3. Зависимость несущей способности стальной сваи-оболочки (ССО) от глубины погружения с учетом трения по боковой поверхности внутренней части сваи

Fig. 3. Dependence of the bearing capacity of the steel shell pile (SSP) from the immersion depth taking into account the friction on the lateral surface of the inner part of the pile

Особенностью стальной сваи-оболочки с открытым нижним концом при ее погружении является наличие грунтового ядра, которое существенно влияет на несущую способность сваи, но по методике расчета СП 24.13330.2011 не учитывается. Применительно к трубосваям с открытым нижним концом существует методика учета грунтового ядра, описанная в работах [6, 7]. По данной методике несущая способность сваи зависит от со-

противления грунта по боковой поверхности и на острие сваи, а также от несущей способности грунтового ядра (см. рис. 1, з). Расчетные формулы для определения несущей способности имеют вид

$$F_d^{**} = F_{dR} + F_{df} + F_{dЯ}, \quad (6)$$

$$F_{dЯ} = \gamma_c \gamma_{cЯ} R_Я A_Я, \quad (7)$$

где F_d^{**} – несущая способность сваи, кН; F_{dR} – несущая способность сваи на острие, кН; $F_{dЯ}$ – несущая способность грунтового ядра, заполняющего полость стальной сваи-оболочки при погружении; F_{df} – несущая способность по боковой поверхности сваи, кН; γ_c – коэффициент условий работы сваи $\gamma_c = 1$; $\gamma_{cR} = \gamma_{cЯ}$ – коэффициент условий работы грунта под нижним концом сваи, учитывающий влияние способа погружения сваи на расчетные сопротивления грунта; $R_Я$ – расчетное сопротивление грунтового ядра под нижним концом сваи; A_{net} – площадь опирания сваи на грунт, принимаемая по площади поперечного сечения сваи-оболочки нетто; $A_Я$ – площадь сечения грунтового ядра; u – периметр поперечного сечения ствола сваи; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи; h_n – глубина погружения сваи, м.

Вычисление несущей способности стальной сваи-оболочки трубчатого сечения производится с применением коэффициентов $\gamma_c = 1$, $\gamma_{cR} = 0,7$, $\gamma_{cf} = 0,9$.

Удельное сопротивление грунта ядра запишем в виде

$$R_Я = \min \{ R_B; R \}, \quad (8)$$

при

$$R_B = \max \{ q_Я; R^* \}, \quad (9)$$

$$R^* = \frac{F_{df}^*}{A_Я}, \quad (10)$$

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.

Предельное удельное сопротивление проталкиванию грунтового ядра с учетом эффекта «самозапираания» на различных глубинах погружения определяем по формулам

$$q_Я = \frac{B}{A} (\exp(h_Я \cdot A) - 1), \quad (11)$$

при

$$A = \frac{2 \xi_{вн} \operatorname{tg} \varphi_0}{r}, \quad (12)$$

$$\frac{B}{A} = \frac{2 c_0 + \gamma_{гп} \cdot r}{2 \xi_{вн} \operatorname{tg} \varphi_0}, \quad (13)$$

$$h_{я} = \frac{\ln\left(\left(q_{я} : \frac{B}{A}\right) + 1\right)}{A}, \quad (14)$$

где $h_{я}$ – расчетная высота столба грунта, входящего в полость сваи во время погружения; $\xi_{вн}$ – коэффициент бокового давления грунта внутри сваи; $\gamma_{гр}$ – 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; r – радиус поперечного сечения грунтового ядра.

Результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки с учетом грунтового ядра представлены в табл. 4 и на рис. 4.

Таблица 4

Результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки с учетом грунтового ядра

Table 4

Results of calculating the bearing capacity of a steel pile-shell taking into account the soil core

Слой	Мощность части слоя, м	$h_{п}$, м	R_i , кПа	F_d , кН	$F_{дЯ}$, кН	F_d^{**} , кН
1	0,8	0,8	1100	67,73	0	67,73
	8×2	16,8	1100	67,73	0	67,73
2	7×2	30,8	1300	1179,22	0	1179,22
	0,6	31,4	1300	1228,20	0	1228,20
3	6×2	43,4	1300	1656,45	0	1656,45
	1,6	45,0	1300	1713,55	0	1713,55
4	2×2	49,0	1300	1713,55	0	1713,55
	1,8	50,8	1300	1713,55	0	1713,55
5	2,0	52,8	4100	2510,48	1536,10	4046,58
	2,0	54,8	4180	3135,01	1960,96	5095,97
	2,0	56,8	4180	3759,54	2385,81	6145,36
	2,0	58,8	4180	4384,08	4292,57	8676,64
	2,0	60,8	4180	5008,61	4292,57	9301,17
	1,2	62,0	4180	5383,32	4292,57	9675,89
6	2,0	64,0	4180	5852,19	4376,33	10 228,51
	2,0	66,0	4180	6316,12	4376,33	10 692,45
	2,0	68,0	4180	6780,06	4376,33	11 156,38
	2,0	70,0	4180	7244,00	4376,33	11 620,32
	2,0	72,0	4180	7707,93	4376,33	12 084,26
	2,0	74,0	4180	8171,87	4376,33	12 548,19
	2,0	76,0	4180	8635,87	4376,33	13 012,13
	2,0	78,0	4180	9099,74	4376,33	13 476,07
	2,0	80,0	4180	9563,68	4376,33	13 940,00

Из анализа результатов расчета, представленных в табл. 4, и графиков на рис. 4 следует, что грунтовое ядро начинает формироваться на глубине 50,8 м, резко увеличивая сопротивление погружению сваи вплоть до глубины 58,8 м. При глубине погружения от 50,8 м до 58,8 м расчетное сопротивление грунтового ядра под нижним концом сваи равно удель-

ному сопротивлению проталкивания грунтового ядра внутрь полости трубы ($R_{\text{я}} = R_{\text{в}}$). На глубине от 56,8 до 58,8 м происходит уплотнение и самозапирание грунта внутри полости сваи. При дальнейшем погружении величину расчетного сопротивления грунтового ядра принимаем равной расчетному сопротивлению грунта под нижним концом сваи на глубине i -го слоя ($R_{\text{я}} = R_i$). При этом дальнейший расчет ведется как для сваи с закрытым нижним концом.

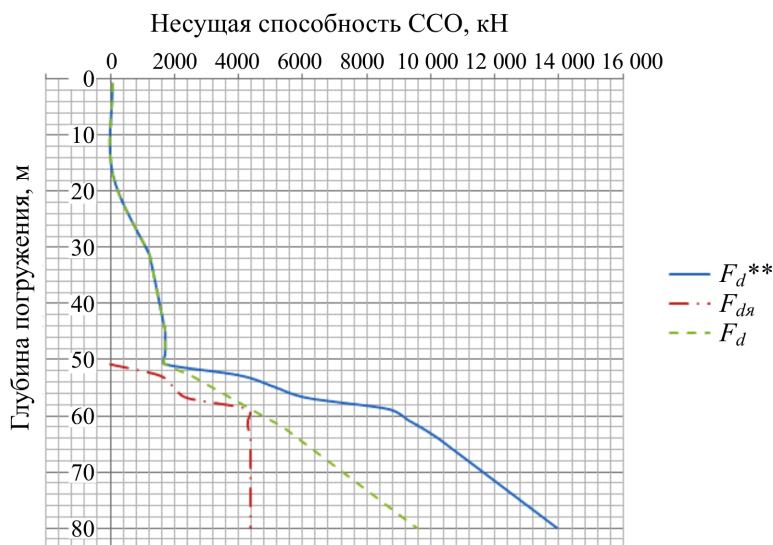


Рис. 4. Зависимость несущей способности стальной сваи-оболочки (ССО) от глубины погружения с учетом грунтового ядра

Fig. 4. Dependence of the bearing capacity of the steel shell pile (SSP) on the immersion depth taking into account the soil core

Для сравнительной оценки полученных результатов используем имеющиеся у нас данные по динамическим испытаниям стальных свай оболочек Крымского моста, опубликованные в статье [17]. Так, для стальной сваи-оболочки диаметром 1420 мм и длиной 70,95 м при близких грунтово-геологических условиях по данным погружения при фактических (измеренных) остаточных отказах было получено частное значение предельного сопротивления сваи $F_u = 13370$ кН. Несущая способность сваи по результатам полевых испытаний динамической нагрузкой определялась в соответствии с требованиями СП 24.13330-2011 и составила $F_d = 14560$ кН.

Из табл. 2–4 определяем значения несущей способности сваи оболочки диаметром 1420 мм при погружении на глубину 70,95 м соответственно для трех расчетных схем (см. рис. 1). Полученные числовые значения несущей способности представлены в табл. 5.

Таблица 5

Несущая способность сваи оболочки при погружении на глубину 70,95 м

Table 5

Bearing capacity of the shell pile when immersed to a depth of 70.95 m

Номер расчетной схемы	Обозначение	Числовое значение, кН
I	F_d	7462
II	F_d^*	14 466
III	F_d^{**}	12 060

Заключение

Оценивая результаты расчета несущей способности стальной сваи-оболочки большой длины по трем расчетным схемам при погружении в условиях глубокого залегания более плотных грунтов, приходим к следующим итогам:

1. При расчете по I расчетной схеме с учетом сопротивления грунта под нижним концом сваи и по внешней боковой поверхности получаем заниженное на 44 % значение несущей способности сваи по сравнению с частным значением предельного сопротивления по данным погружения при фактических (измеренных) остаточных отказах по результатам полевых испытаний динамической нагрузкой. При этом основная часть сопротивления приходится на трение по внешней боковой поверхности сваи.

2. При расчете по II расчетной схеме с учетом сопротивления грунта под нижним концом, а также по внешней и внутренней боковым поверхностям сваи получаем завышенное на 8 % значение несущей способности по сравнению с частным значением предельного сопротивления. При этом основная часть сопротивления приходится на трение по внешней и внутренней боковым поверхностям сваи, распределяясь между ними примерно поровну.

3. При расчете по III расчетной схеме с учетом сопротивления грунта по внешней боковой поверхности и под нижним концом сваи с учетом грунтового ядра получаем заниженное на 9,8 % значение несущей способности по сравнению с частным значением предельного сопротивления. При этом до глубины 50,8 м грунтовое ядро не формируется, и сопротивление погружению соответствует I расчетной схеме. На глубине 58,8 м сопротивление от грунтового ядра составляет 50,5 % от несущей способности сваи. С увеличением глубины погружения несущая способность сваи возрастает за счет увеличения сопротивления трению по внешней боковой поверхности сваи при неизменном сопротивлении от грунтового ядра, которое на глубине 70,95 м уже составляет всего 36,3 % от несущей способности сваи.

Таким образом, при погружении стальной сваи-оболочки большой длины в условиях глубокого залегания плотных грунтов из трех рассмотренных расчетных схем, используемых для оценки несущей способности сваи-оболочки, наиболее точные результаты получены по II схеме (завышение на 8 %) и по III схеме (занижение на 9,8 %). Наименее пригодной оказалась I схема, используемая в методике СП 24.13330.2011. Расхождение с результатами полевых испытаний составило 44 %.

Библиографический список

1. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии / Р.А. Мангушев, В.В. Знаменский, А.Л. Готман, А.Б. Пономарев. – 2-е изд. – М.: Изд-во АСВ, 2018. – 320 с.
2. Рахаринуси А.П. Применение стальных трубчатых свай с открытым нижним концом в портовых гидротехнических сооружениях: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1999. – 182 с.
3. Соснина С.А. Несущая способность и деформации стальных трубчатых свай, применяемых при строительстве сооружений на шельфе: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2006. – 136 с.
4. Desen Kong, Meixu Deng, Yu Xu. Study on Calculation of Pile Sliding Interval of Large-Diameter Steel Pipe Piles on Offshore Platforms // *Mathematical Problems in Engineering*. – Vol. 2019. – 8 p. Article ID 3549296 <https://doi.org/10.1155/2019/3549296> (дата обращения 23.05.2021)
5. Прудентов А.И. Железобетонные сваи с грунтовым ядром. – Л.: Стройиздат, 1971. – 160 с.

6. Булатов Г.Я., Ножнов А.П. Численное моделирование влияния грунтового ядра на несущую способность трубосваи // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 2. – С. 27–35.
7. Булатов Г.Я., Воронина Н.С. Влияние грунтового ядра на оптимизацию свай-оболочки // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – Вып. 8 (35). – С. 7–23.
8. Булатов Г.Я., Воронина Н.С. Факторы, влияющие на эффективность равнопрочной свай-оболочки // Строительство уникальных зданий и сооружений – 2017. – Вып. 3 (54). – С. 105–128.
9. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Новая технология – «фундамент на трубогрунте» // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2.
10. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общей ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
11. Круглов С.Н., Булатов Г.Я. О несущей способности трубосвай // XXXI Неделя науки СПбГПУ: материалы межвузовской научной конференции. – СПб., 2003. – Ч. I. – С. 99–100.
12. Пономарев А.Б., Безгодов М.А., Безгодов П.А. Сравнение методов определения несущей способности забивных свай по результатам статического зондирования в слабых глинистых грунтах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2015. – № 2. – С. 24–39.
13. Глагольева А.С., Кашарина Т.П. Экспериментальные исследования грунтонаполняемых оболочек в основаниях зданий и сооружений // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 36–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.04.
14. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N. Analysis of pile foundation behavior on modern and ancient clay bases // Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 8AYGEC. – 2016. – P. 111–114.
15. Kjell Karlsrud. Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results. Thesis. PhD. Trondheim. – 2012. – 321 p. [Электронный ресурс]. – URL: file:///C:/Users/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C/Downloads/543448_FULLTEXT01.pdf (дата обращения: 23.05.2021)
16. Veli-Matti Uotinen, Jukka Rantala. Applications and Development of Modern Steel Pile Technology // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 1173–1182.
17. Результаты динамических испытаний грунтов основания Крымского моста металлическими сваями / А.Н. Лазарев, С.А. Матвеев, Е.А. Мартынов, Г.А. Крыжановский // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. науч. тр. нац. науч.-практ. конф. – Омск, 2018. – С. 239–242.

Reference

1. Mangushev R.A. [et al.]. Svai i svainye fundamenty: konstruksii, proektirovanie i tekhnologii [Piles and pile foundations: structures, design and technology]. Ed. R.A. Mangushev. 2nd. ed. Moscow, ASV, 2018, 320 s.
2. Rakharinusi A.P. Primenenie stal'ny`kh trubchaty`kh svaj s otkry`ty`m nizhnim konczom v portovy`kh gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh [Application of steel tubular piles with an open bottom end in port hydraulic structures]. Ph.D. dissertation. SPb., 1999, 182 p.
3. Sosnina S.A. Nesushhaya sposobnost` i deformatsii stal'ny`kh trubchaty`kh svaj, primenyaemy`kh pri stroitel`stve sooruzhenij na shel`fe [Bearing capacity and deformation of steel tubular piles used in the construction of structures on the shelf]. Ph.D. dissertation. SPb., 2006, 136 p.

4. Desen Kong, Meixu Deng, Yu Xu. Study on Calculation of Pile Sliding Interval of Large-Diameter Steel Pipe Piles on Offshore Platforms. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, 8 p. Article ID 3549296
5. Prudentov A.I. Zhelezobetonny`e svai s gruntovy`m yadrom [Reinforced concrete piles with soil core]. L., Strojizdat, 1971, 160 p.
6. Bulatov G.Ya., Nozhnov A.P. Chislennoe modelirovanie vliyaniya gruntovogo yadra na nesushhuyu sposobnost` trubosvai [Numerical modeling of the influence of the soil core on the bearing capacity of the pipe pile]. *Magazine of Civil Engineering*, 2010, no. 2, pp. 27–35.
7. Bulatov G.Ya., Voronina N.S. Vliyanie gruntovogo yadra na optimizacziyu svai-obolochki [Influence of the soil core on the optimization of the shell pile]. *Stroitel`stvo unikal`ny`kh zdaniy i sooruzhenij*, 2015, no. 8 (35), pp. 7–23.
8. Bulatov G.Ya., Voronina N.S. Faktory`, vliyayushhie na e`ffektivnost` ravnoprochnoj svai-obolochki [Factors Affecting the Efficiency of an Equal Strength Shell Pile]. *Stroitel`stvo unikal`ny`kh zdaniy i sooruzhenij*, 2017, no. 3 (54), pp. 105–128.
9. Bulatov G.Ya., Kostyukova A.Yu. Novaya tekhnologiya – «fundament na trubogrunte» [New technology – "foundation on pipe ground"]. *Magazine of Civil Engineering*, 2008, no. 2, pp. 32–37.
10. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniia, fundamenty i podzemnye sooruzheniia [Handbook of geotechnics. Bases, foundations and underground structures]. 2nd ed. Eds. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2016, 1040 p.
11. Kruglov S.N., Bulatov G.Ya. O nesushhej sposobnosti trubosvaj [About the bearing capacity of the pipe pile]. *XXXI Nedelya nauki SPbGPU: mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, 2003, Part. I, pp. 99–100.
12. Ponomarev A.B., Bezgodov M.A., Bezgodov P.A. Sravnenie metodov opredeleniya nesushhej sposobnosti zabivny`kh svaj po rezul'tatam staticheskogo zondirovaniya v slaby`kh glinisty`kh gruntakh [Comparison of methods for determining the bearing capacity of driven piles based on the results of static sounding in soft clay soils]. *Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arkhitektura*. 2015, no. 2, pp. 24–39.
13. Glagol`eva A.S., Kasharina T.P. E`ksperimental`ny`e issledovaniya gruntonapolnyaemy`kh obolochek v osnovaniyakh zdaniy i sooruzhenij [Experimental studies of soil-filled shells in the foundations of buildings and structures]. *Vestnik PNIPU. Stroitel`stvo i arkhitektura*. 2018, vol. 9, no. 3, pp. 36–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.04.
14. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N. Analysis of pile foundation behavior on modern and ancient clay bases. *Challenges and Innovations in Geotechnics: Proc. of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conf.*, 8AYGEC, 2016, pp. 111–114.
15. Kjell Karlsrud. Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results. Thesis. PhD. Trondheim., 2012, 321 p. available at: file:///C:/Users/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C/Downloads/543448_FULLTEXT01.pdf (accessed 23.05.2021)
16. Veli-Matti Uotinen, Jukka Rantala. Applications and Development of Modern Steel Pile Technology. *Procedia Engineering*. 2013, vol. 57, pp. 1173–1182.
17. Lazarev A.N. et al. Rezul'taty` dinamicheskikh ispy`tanij gruntov osnovaniya Kry`mskogo mosta metallicheskimi svayami [Results of dynamic tests of the soils of the Crimean bridge foundation with metal piles]. *Obrazovanie. Transport. Innovaczii. Stroitel`stvo: sb. nauch. tr. nacz. nauch.-prakt. konf.*, Omsk, 2018, pp. 239–242.