

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
СВАЙ-ОБОЛОЧЕК БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА В ТАЛЫХ И ОТТАЯННЫХ
ГРУНТАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ВИБРОПОГРУЖАТЕЛЕМ LIEBHERR-PVE-105M**

Цель настоящих исследований — разработка рекомендаций по проведению динамического испытания грунтов основания тем же вибропогружателем, которым производится погружение оболочек.

Динамическое испытание при свайных работах на строящихся мостах предназначено только для контроля за погружением оболочек до необходимой глубины и предварительной оценки несущей способности будущих свай-оболочек в опорах мостов. Данное испытание входит в Регламент изготовления свай-оболочек. Фактическую несущую способность свай-оболочек следует определять по результатам испытания грунта статической нагрузкой.

Работа носит прикладной характер и выполнена на основе результатов испытания свай-оболочек, погружаемых вибропогружателем LIEBHERR-PVE-105M, для строящихся мостов железнодорожной линии Обская — Бованенково (Ямал). Проводить теоретические исследования по этому направлению не предполагалось.

В настоящее время многие известные фирмы (ЦНИИС, НИИОСП) и новые, например ООО «ЭЛГАД-ТОП», занимаются вопросами испытания грунтов сваями динамической нагрузкой, при этом используются специальные молоты с опорной плитой и датчиками, устанавливаемыми на сваю.

Автор считает, что это усложнение динамических испытаний не оправдано задачами и возможностями данного способа, так как категория ответственности сооружения для мостов требует более надежного метода определения несущей способности свай, а, именно, статической нагрузкой. Испытание статической нагрузкой назначается техническим заданием выборочно только для некоторых свай-оболочек.

1. Методика испытаний

Испытаниям динамической нагрузкой следует подвергать каждую оболочку в опоре. Для испытания оболочку погружают до проектной отметки или выше, если отказ, предусмотренный проектом, наступил раньше, а проектная организация согласовала новую отметку конца сваи. Мощность грунтовой пробки должна быть не более $H_{\text{п}} = 2D_{\text{п}}$ м. Испытание проводится в соответствии с ГОСТ [1]. После семисуточного «отдыха» следует провести испытание оболочки тем же вибропогружателем, при этом отказ не должен превышать данный проектный показатель. В противном случае требуется нарастить оболочку и продолжать ее погружение до получения необходимого результата — проектных величин глубины и отказа.

При погружении стальной оболочки и испытании ее динамической нагрузкой следует руководствоваться регламентом погружения и испытания стальных оболочек при устройстве фундаментов опор мостов.

Необходимо фиксировать время погружения каждого метра секций оболочки, начиная со второй. На последнем метре погружения надо отмечать время погружения каждые 10 см оболочки.

После окончания погружения следует остановить вибропогружатель и через 30 мин провести испытание оболочки динамической нагрузкой двумя залогоми по 2 мин, с перерывом между ними в 20 мин. Остаточный отказ при погружении определять по большей величине погружения в залоге.

После 7-суточного «отдыха» каждую оболочку в опоре необходимо испытать динамической нагрузкой в том же порядке, что и при погружении.

При определении каждого частного значения остаточного отказа при погружении и после «отдыха» обязательно фиксировать упругий отказ, в данном случае это амплитуда колебаний погружаемой оболочки. Для этого на оболочку наклеить бумагу, приставить к ней карандаш, лежащий на жесткой основе, и переместить его поперек сваи. Карандаш нарисует график колебаний, при помощи которого можно измерить амплитуду колебаний.

2. Расчет несущей способности свай-оболочек

Испытывая грунт стальной оболочкой, следует учитывать, что она сопротивляется грунту в основном боковой поверхностью. Для глубин погружения более 25 м сопротивление по лобовой поверхности кольца

$$P_A = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_b^2) R \quad (1)$$

по сравнению с сопротивлением грунта по боковой поверхности оболочки

$$P_{Af} = \pi (D_n H + D_b H_n) f_{cp} \quad (2)$$

составляет не более $\frac{1}{10} \dots \frac{1}{12}$, это подтверждается расчетом и испытанием статической нагрузкой на «сжатие» плюс на «выдергивание».

Здесь D_n, D_b — соответственно наружный и внутренний диаметры оболочки, м; H, H_n — соответственно глубина погружения и толщина грунтовой пробки внутри оболочки, м; R, f_{cp} — соответственно сопротивление грунта под нижним концом (кольца) и по боковой поверхности оболочки, кПа.

Скудность информации, представленной заводом-изготовителем по техническим особенностям и характеристикам вибропогружателя, создает определенные трудности при расчете несущей способности свай. Кроме того, работу гидравлического вибропогружателя LIEBHERR PVE 105M можно формализовать очень неопределенно, так как энергия погружения не постоянна и зависит от многих факторов. Поэтому рекомендуем использовать в расчетах эмпирическую корреляционную зависимость (3).

Частное значение предельного сопротивления грунта по боковой поверхности оболочки рекомендуем определять по преобразованной для данного вибропогружателя формуле СНиП 2.02.03–85.

$$F_{uf} = \frac{2m_2}{\left(\frac{n_p}{A} + \frac{n_f}{A_f}\right) K_m} \frac{2S_a + S_{el}}{S_a + S_{el}} \left[\sqrt{1 + \frac{K_{mE} \left(\frac{n_p}{A} + \frac{n_f}{A_f}\right) (S_a + S_{el})}{4m_2^2 (2S_a + S_{el})^2}} - 1 \right], \quad (3)$$

где m_2 — масса оболочки, т; $n_p = 0,00025$ с·м/кН — коэффициент вязкости грунта под кольцом оболочки; $n_f = 0,025$ с·м/кН — коэффициент вязкости грунта по боковой поверхности; $A = \frac{\pi}{4}(D_n^2 - D_b^2)$ — площадь кольца опирания, м²; $A_f = \pi(D_n H_f + D_b H_{np})$ — площадь боковой поверхности оболочки, соприкасающейся с грунтом, м²; S_{el} — упругий отказ, в нашем случае амплитуда колебания оболочки, м; S_a — остаточный отказ, м/мин, после отдыха; $K_m = 1,33$ т·м/с и $K_{mE} = 8,5 \cdot 10^4$ кН(т·м)²с⁻¹ — эмпирические коэффициенты, характеризующие динамические параметры вибропогружателя, полученные из 6 пар параллельных опытов испытания грунтов оболочкой динамической нагрузкой и испытанием ее на выдергивание статической нагрузкой. Эти коэффициенты по мере накопления информации будут, естественно, уточняться, как и сама зависимость (1).

В табл. 1 приведены параметры свай, испытанных динамической нагрузкой, и сопротивление грунта по боковой поверхности оболочки при испытании динамической и статической нагрузками. Анализируя сопоставительные результаты испытаний, можно отметить их хорошую сходимость в широком диапазоне диаметров оболочек и их глубин погружения. Это дает основание признать правомерность принятой методики испытания грунта.

Таблица 1

Параметры свай, испытанных динамической нагрузкой, и сопротивление грунта по боковой поверхности оболочки при испытании динамической и статической нагрузками

№ п/п	км/опора/оболочка	Диаметр D_n/D_b , м	Масса оболочки m_2 , т	Глубина заделки свай в грунт H , м	Мощность грунтовой пробки H_p , м	Отказы		Сопротивления грунта сваям	
						остаточный S_a , м/мин	упругий S_{el} , м	F_{uf}^d , кН	F_{uf}^c , кН
1	224/9/2	1,420/1,366	21,7	21,5	3,0	0,065	0,0150	4650	4200
2	224/6/2	2,000/1,946	38,4	28,0	7,7	0,020	0,0090	7970	7670
3	224/5/3	2,000/1,946	30,7	18,7	7,0	0,030	0,0085	7090	6300
4	283/2/3	2,400/2,350	49,0	30,8	1,0	0,017	0,0075	7440	7510
5	283/2/2	2,400/2,350	49,0	28,0	1,0	0,010	0,0070	11290	11250
6	110/2/2	2,400/2,348	62,0	35,8	5,0	0,016	0,0070	8430	10000

Если оболочка прорезает песчаные грунты или глинистые с консистенцией $I_L \leq 0,75$, следует принять в расчет больший из двух отказов, полученных при испытании динамической нагрузкой после «отдыха», $S_a = S_a^o$. Если оболочка прорезает слабые глинистые грунты текучепластичной или текучей консистенции $I_L > 0,75$, то особенно сильно проявляется эффект кратковременного «засасывания» свай, когда кратковременное силовое воздействие на нее не вызывает перемещения в грунте, а длительное силовое воздействие (статическое или динамическое) той же величины срывает сваю. Поэтому величину остаточного отказа, принимаемого в расчет для этих грунтов, следует определять по эмпирической формуле, учитывающей эффект «засасывания»:

$$S_a = \frac{S_a^n + 3S_a^o}{4}, \quad (4)$$

где $S_a^п$ – остаточный отказ на последней минуте погружения, м/мин; $S_a^о$ – остаточный отказ после «отдыха», м/мин.

Полное предельное сопротивление свай-оболочки, установленное по результатам динамического испытания, можно представить зависимостью

$$F_u = K_A F_{df} \quad (5)$$

где $K_A = 1,60$ – коэффициент, учитывающий лобовое сопротивление сваи после заполнения ее полости бетоном, полученный по результатам параллельных статических испытаний оболочек (трение + лобовое сопротивление) штампом, и результат испытания статической нагрузкой готовых свай-оболочек.

Оказалось, что при глубине погружения на 20–35 м лобовое сопротивление свай составляет примерно 60 % от трения по боковой поверхности.

Расчет несущей способности свай-оболочек по результатам испытаний грунта оболочкой под воздействием динамической нагрузки автоматизирован. Составлена программа для персонального компьютера, которая передается в электронном виде вместе с отчетом для использования непосредственно на площадке, когда применяется регламент погружения.

На рис. 1, 2, 3 приведены графики зависимости $F_u = f(S_a)$ для трех диаметров и четырех длин оболочек.

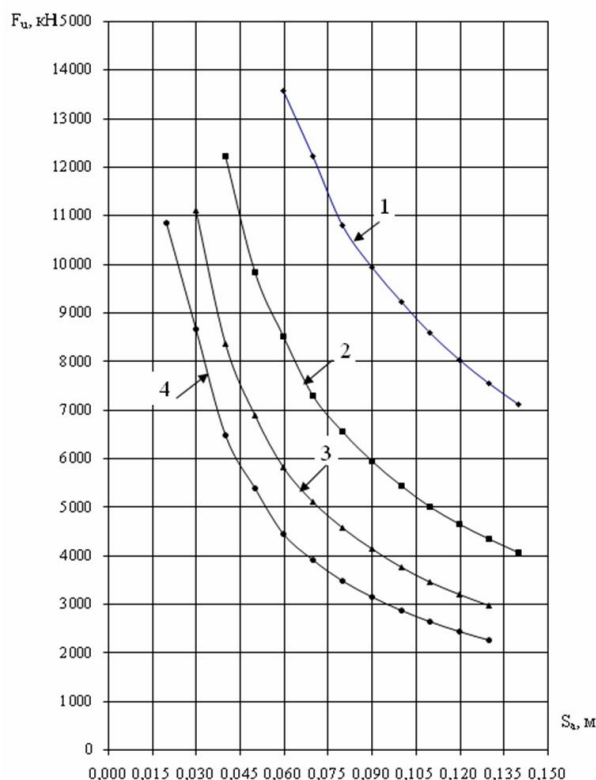


Рис. 1. График зависимости $F_u = f(S_a)$ для стальной оболочки с $D_n = 1420$ мм при испытании динамической нагрузкой:

$L_{об}$ – длина погружаемой оболочки; H_f – глубина погружения оболочки; S_{el} – упругий отказ; 1 – $L_{об} = 11$ м; $H_f = 10$ м; $S_{el} = 0,0100–0,0200$ м; 2 – $L_{об} = 22$ м; $H_f = 20$ м; $S_{el} = 0,0100–0,0200$ м; 3 – $L_{об} = 33$ м; $H_f = 30$ м; $S_{el} = 0,0100–0,0200$ м; 4 – $L_{об} = 44$ м; $H_f = 40$ м; $S_{el} = 0,0100–0,0200$ м

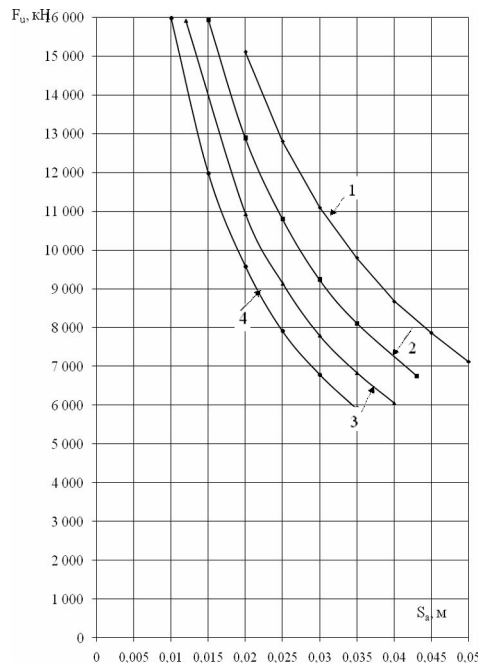


Рис. 2. График зависимости $F_u = f(S_{el})$ для стальной оболочки с $D_n = 2000$ мм при испытании динамической нагрузкой:

$L_{об}$ — длина погружаемой оболочки; H_f — глубина погружения оболочки; S_{el} — упругий отказ; 1 — $L_{об} = 24$ м; $H_f = 20$ м; $S_{el} = 0,0100-0,0120$ м; 2 — $L_{об} = 30$ м; $H_f = 25$ м; $S_{el} = 0,0085-0,0095$ м; 3 — $L_{об} = 30$ м; $H_f = 29$ м; $S_{el} = 0,0085-0,0095$ м; 4 — $L_{об} = 36$ м; $H_f = 35$ м; $S_{el} = 0,0080-0,0090$ м

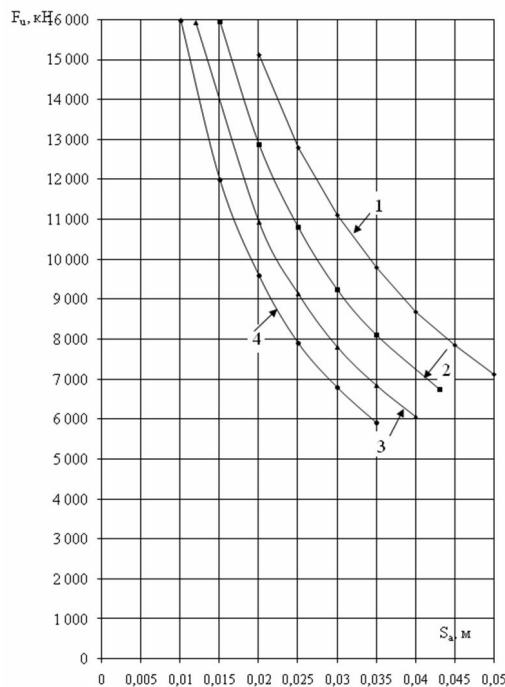


Рис. 3. График зависимости $F_u = f(S_{el})$ для стальной оболочки с $D_n = 2400$ мм при испытании динамической нагрузкой:

$L_{об}$ — длина погружаемой оболочки; H_f — глубина погружения оболочки; S_{el} — упругий отказ; 1 — $L_{об} = 24$ м; $H_f = 20$ м; $S_{el} = 0,0080-0,0095$ м; 2 — $L_{об} = 30$ м; $H_f = 25$ м; $S_{el} = 0,0075-0,0085$ м; 3 — $L_{об} = 36$ м; $H_f = 35$ м; $S_{el} = 0,0070-0,0085$ м; 4 — $L_{об} = 42$ м; $H_f = 40$ м; $S_{el} = 0,0065-0,0080$ м

Результат, полученный при расчетах, сделанных по формуле (3), показывает, что для грунтовых условий Ямала и данного вибропогружателя, соотношение упругих перемещений и остаточных обычно меньше 0,1, $\frac{S_{el}}{S_a} < 0,1$. То есть

в формуле (3) S_{el} можно принять равным нулю, при этом значение предельного сопротивления оболочки будет выше не более, чем на 4 %.

Формула (3) с учетом принятых значений K_m и K_{mE} и приведенного выше допущения примет вид:

$$F_{uf} = \frac{3m_2}{\left(\frac{n_p}{A} + \frac{n_f}{A_f}\right)} \left[\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{n_p}{A} + \frac{n_f}{A_f}\right) \cdot 531}{m_2^2 S_a}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что проектный отказ требуется определять зависимостью

$$S_a = \frac{531 \cdot \left(\frac{n_p}{A} + \frac{n_f}{A_f}\right)}{m_2^2} \left/ \left[\left(\frac{F_{uf} \left(\frac{n_p}{A} + \frac{n_f}{A_f}\right)}{3m_2} + 1 \right)^2 - 1 \right] \right. \quad (7)$$

Наличие графиков $F_u = f(S_a)$ и программ расчетов, заложенных в ПК, позволяет обходиться без упрощенных зависимостей (4), (5).

При назначении проектного отказа, определенного из формулы (4), F_{uf} следует устанавливать исходя из решения уравнения

$$F_{uf} = \frac{\gamma_k N}{K_A}, \quad (8)$$

где N — расчетная проектная нагрузка на сваю-оболочку, кН; γ_k — коэффициент надежности. Принимаем равным 1,4 (коэффициент повышен на 0,15, так как не учитывается упругий отказ).

Таким образом, при сооружении мостов в условиях Ямала F_{uf} (требуемое предельное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи-оболочки) следует определять зависимостью

$$F_{uf} \geq 0,875N. \quad (9)$$

После проведения испытания необходимо убедиться, что грунт вокруг сваи-оболочки находился в талом состоянии. Для этого надо произвести измерение температуры по боковой поверхности оболочки посредством заложения во внутреннюю полость каждой оболочки на месте контакта ее со стенкой сваи термокаротажных трубок. Дальнейшее вмораживание сваи-оболочки только повысит ее несущую способность.

Библиографический список

1. ГОСТ 5686–94. Грунты. Методы полевых испытаний сваями.