

УДК 624.154

А.О. КОЛЕСНИКОВ, В.Н. ПОПОВ, Т.Н. КОСТЮК

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГЛУБЛЕНИЯ
И РАСПОЛОЖЕНИЯ СВАЙ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ
ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ФУНДАМЕНТОВ***

Рассчитываются собственные частоты колебаний в рамках волновой модели и СП 26.13330.2012 при рассмотрении вертикальных и горизонтальных колебаний заглубленных фундаментов на обычном и свайном основании. Определено, что полное заглубление способствует увеличению частот при горизонтальных колебаниях более чем в 1,6 раза, при вертикальных колебаниях до 1,4 раза и его влияние на фундаменты на естественном основании более значительно. Установлено, что при вертикальных колебаниях изменение расстояния между сваями в кусте может менять собственную частоту в 1,3 раза. Показано преимущество результатов расчетов в рамках волновой модели по сравнению с методом из СП 26.13330.2012 и их высокое совпадение с данными экспериментальных исследований, полученных в ходе серии импульсных динамических нагружений, выполненных в полунатурных условиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: фундамент под машину, волновая модель, собственная частота колебаний фундамента, заглубленный фундамент, взаимное влияние свай в группе.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-725-5-39-52

При существующих требованиях к точности результатов при расчетах колебаний фундаментов в соответствии с СП 26.13330.2012 (далее – СП 26) необходимо более полно учитывать динамические характеристики системы «фундамент–грунт» [1–14]. Так, взаимодействие заглубленных боковых граней фундамента с окружающей средой или изменение расстояния между сваями в кусте влияют на частоту собственных колебаний, что подтверждается экспериментами, проведенными на опытном полигоне, в лабораторных и натуральных условиях [3–6, 15–18]. Поэтому учет плотного контакта боковой поверхности фундамента и взаимодействия свай с окружающим грунтом при расчетах и проектировании фундаментов под машины позволяет определять более точные значения амплитудно-частотных характеристик колебаний системы в целом [7, 8, 17–19].

Вместе с тем при проведении расчетов при проектировании или исследовании характеристик обычных, заглубленных и свайных фундаментов наблюдается расхождение полученных результатов с данными экспериментальных исследований [4, 6, 17]. Для повышения точности расчетов, возможно, необходимо учитывать геометрию фундамента и другие его индивидуальные характеристики, что требует детального исследования [10, 12–14].

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610136-3).

© Колесников А.О., Попов В.Н., Костюк Т.Н., 2019

Необходимо отметить, что определение динамической жесткости фундамента является актуальной инженерной задачей, так как точность вычисления собственной частоты колебаний системы «фундамент–машина» позволяет предупредить возникновение резонансных явлений. При этом на практике желательно получать достоверные результаты, используя при расчетах достаточно простые соотношения. В связи с этим настоящая работа посвящена проведению инженерных расчетов с использованием результатов из [7, 10, 13] при определении собственной частоты при вертикальных и горизонтальных колебаниях фундаментов с учетом их заглубления, расположения свай в группе и сопоставлению результатов с данными, полученными в ходе экспериментов на опытном полигоне.

С целью оценки влияния заглубления на собственные частоты при вертикальных и горизонтальных колебаниях фундаментов, а также для оценки взаимовлияния свай в ростверке на собственные частоты при вертикальных колебаниях были проведены комплексные экспериментальные исследования, схема которых представлена на рис. 1. Всего испытывалось пять специально изготовленных фундаментов.

Исследование влияния заглубления проводилось с использованием двух специально изготовленных фундаментов – на свайном (Ф-1) и на естественном основании (Ф-2) (рис. 1, а, б). Фундамент Ф-1 был выполнен в виде монолитного железобетонного ростверка с габаритными размерами $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м, опирающегося на четыре жестко закрепленные сваи диаметром 114 мм с рабочей длиной 2 м, изготовленные из металлических труб с толщиной стенки 6 мм. Расстояние между осями свай, равное шести с половиной диаметрам, составляло 750 мм и исключало их взаимное влияние в кусте [13]. Монолитный фундамент на естественном основании Ф-2 имел аналогичные размеры $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м. Опалубкой при бетонировании опытных фундаментов служили выровненные стенки котлована. Масса фундаментов Ф-1 и Ф-2 равнялась 2650 и 2500 кг соответственно.

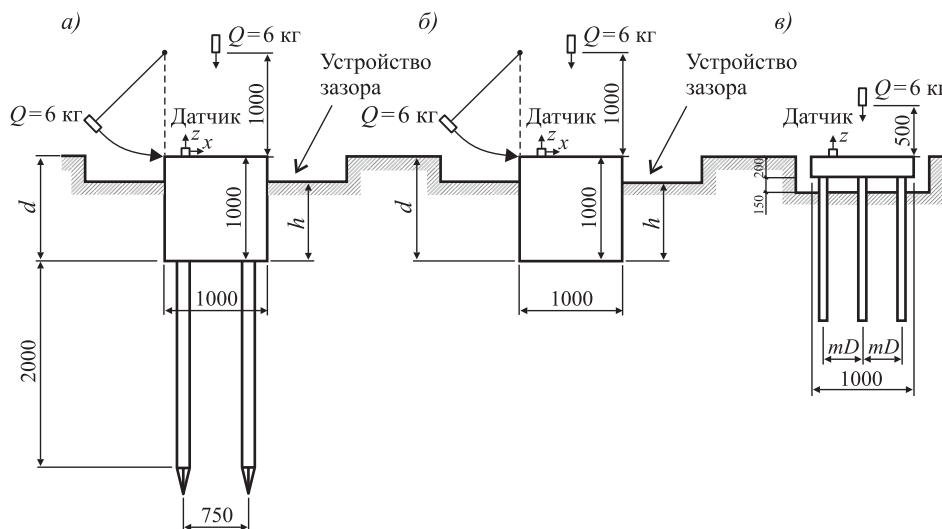


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований опытных фундаментов Ф-1 (а), Ф-2 (б), Ф-3 – Ф-5 (в)

h – высота засыпки, d – глубина заложения, m – количество диаметров свай D

Оценка влияния расстояния между сваями в ростверке на собственные частоты проводилась для случая вертикальных колебаний. Опытные фундаменты Ф-3–Ф-5 были выполнены в виде монолитного железобетонного ростверка с габаритными размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,2$ м, опирающегося на девять жестко закрепленных свай диаметром $D = 76$ мм с рабочей длиной 1,4 м, изготовленных из металлических труб с толщиной стенки 3,5 мм. Расстояние между осями свай равнялось для Ф-3 – $2D$, для Ф-4 – $3D$, для Ф-5 – $5D$. Опалубкой при бетонировании опытных фундаментов Ф-3–Ф-5 служили выровненные стенки котлована. Грунт опытного полигона до глубины 9,3 м состоял из лесовидной маловлажной твердой супеси с плотностью $\rho = 1,70$ т/м³ и модулем деформации $E = 14$ МПа, подстилаемой полутвердыми суглинками. Грунтовые воды на площадке отсутствовали. Масса каждого из фундаментов равнялась 690 кг.

По одинаковой методике на каждом фундаменте выполнялись серии импульсных динамических нагружений (по 20 раз). Импульсная нагрузка прикладывалась с помощью стального груза, имеющего форму параллелепипеда массой 6 кг.

На фундаментах Ф-1 и Ф-2 при испытаниях с различными вариантами заглубления динамическая импульсная нагрузка создавалась в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 1, а, б). Для получения нагрузки в вертикальном направлении груз свободно падал на поверхность испытуемого фундамента с высоты 1,0 м. Для создания нагружения в горизонтальном направлении использовался маятник с грузом, опускающийся с высоты 1 м и ударяющий в верхнюю кромку боковой грани фундамента. При полном заглублении фундамента, чтобы не создавать помехи, вблизи точки воздействия незначительная часть грунта была удалена.

На фундаментах Ф-3–Ф-5 выполнялись только серии импульсных вертикальных динамических нагружений. Для получения нагрузки в вертикальном направлении груз свободно падал на поверхность испытуемых фундаментов с высоты 0,5 м (рис. 1, в).

Для определения собственных частот колебаний использовалась аппаратура АВМ-1, включающая пять трехкоординатных датчиков виброакселерометров марки Analog Devices, АЦП и персональный компьютер, позволяющая регистрировать колебания и обрабатывать получаемую информацию. Датчики с помощью соединительных кабелей подключались к АЦП, в качестве которого использовался внешний модуль L-CARD E14-140. Вибродатчик представлял собой металлический куб с установленными внутри интегральными двухканальными акселерометрами, который закреплялся на верхней грани фундамента. Основные характеристики виброакселерометра: измерительный диапазон $\pm 5g$, спектральная плотность шума $250 \mu g/\sqrt{Hz}$ rms. Диапазон измерений применяемой аппаратуры представлен на рис. 2.

Данные измерений для каждого из фундаментов Ф-1 – Ф-5 сравнивались с результатами инженерных расчетов, полученных при использовании аналитических выражений, предложенных в [7, 10, 13] и СП 26.

Собственные частоты колебаний фундаментов при вертикальных (λ_z) и горизонтальных (λ_x) колебаниях фундаментов определяются формулами:

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{K_z}{M}}, \quad \lambda_x = \sqrt{\frac{K_x}{M}},$$

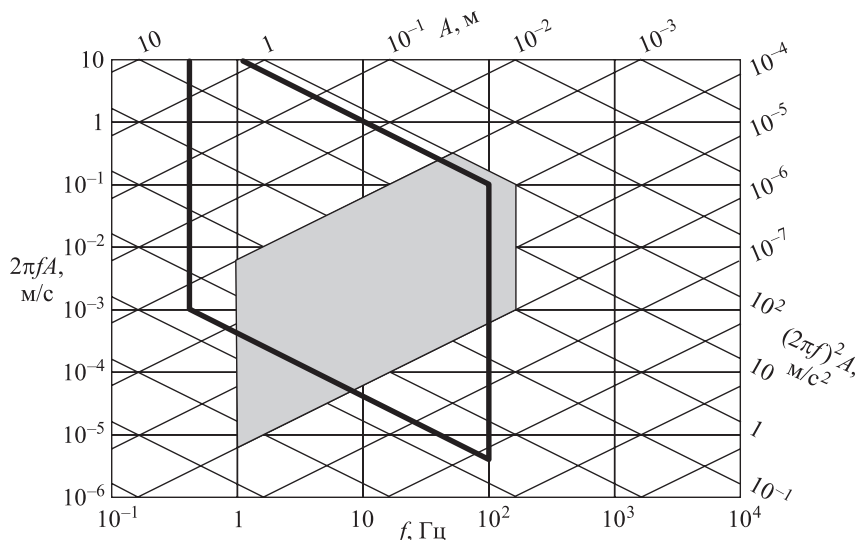


Рис. 2. Диапазон измерений применяемой аппаратуры
 ■ область измеряемых параметров, — виброметр АВМ-1

где K_z, K_x – вертикальная и горизонтальная жесткости фундамента соответственно;

M – масса всей установки.

Подход к определению динамической жесткости фундамента, основанный на волновых моделях, предполагает суммирование значений, найденных отдельно для боковой поверхности, подошвы и свай при их наличии [1, 6]. Вертикальные (z) и горизонтальные (x) жесткости опытных фундамента определяются следующим образом:

– для свайных фундамента Ф-1, Ф-3–Ф-5 суммированием жесткости на боковой поверхности ростверка K_1 и жесткостей K_2 каждой из I свай в основании ($I = 4$ для фундамента Ф-1, $I = 9$ для фундамента Ф-3–Ф-5)

$$K_z = K_{z1} + \alpha^{-1} \sum_{i=1}^I K_{z2}, \quad K_x = K_{x1} + \sum_{i=1}^I K_{x2}; \quad (1)$$

– для фундамента на естественном основании Ф-2 суммированием жесткостей по боковой поверхности фундамента K_1 и под его подошвой K_3

$$K_z = K_{z1} + K_{z3}, \quad K_x = K_{x1} + K_{x3}. \quad (2)$$

Вертикальная жесткость по боковой поверхности ростверка или фундамента определяется по формуле [1, 7, 10]

$$K_{z1} = V_s^2 \rho h S_{w1},$$

где h – высота засыпки;

ρ – плотность грунта;

V_s – скорость поперечных волн в грунте;

S_{w1} – коэффициент, определяемый безразмерной частотой колебаний $a_0 = r\omega/V_{s0}$ и геометрической формой в плане заглубленного фундамента (ростверка);

ω – круговая частота колебаний;

r – характерный размер.

Для круглого в плане фундамента с радиусом r

$$S_{w1}(a_0) = 2\pi a_0 [J_0(a_0)J_1(a_0) + Y_0(a_0)Y_1(a_0)] / [J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)],$$

где J_0, J_1, Y_0, Y_1 – функции Бесселя первого и второго рода [1, 7, 10]. В случае прямоугольного в плане тела со сторонами a и b радиус $r = \sqrt{ab}/\pi$.

Вертикальная жесткость одиночной сваи определяется по формуле

$$K_{z2} = \frac{E_p A_p}{r_p} f_{18,1},$$

в которой $E_p = 2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости материала сваи;

A_p – площадь поперечного сечения сваи;

r_p – радиус поперечного сечения круглой сваи или $r_p = c/\sqrt{\pi}$ в случае квадратной в сечении сваи со стороной c ;

$f_{18,1}$ – коэффициент, определяемый по табл. 1, согласно [9], зависящий от соотношений L/r_p и E_p/G , где L – длина сваи;

$G = V_s^2 \rho$ – модуль сдвига грунта;

ρ – плотность грунта, который прорезает свая.

Таблица 1. Коэффициенты вертикальной жесткости $f_{18,1}$ для свай

$L/r_p \backslash E_p/G$	10000	2500	1000	500	250
10,8696	0,0021	0,0052	0,0104	0,0187	0,0332
21,7391	0,0031	0,0083	0,0166	0,0301	0,0509
32,6087	0,0042	0,0104	0,0218	0,0364	0,0571
43,4783	0,0042	0,0125	0,0260	0,0405	0,0582
46,7391	0,0052	0,0135	0,0270	0,0416	0,0582
54,3478	0,0052	0,0145	0,0281	0,0416	0,0582
65,2174	0,0062	0,0166	0,0291	0,0416	0,0582
76,0870	0,0062	0,0177	0,0301	0,0416	0,0582
86,9565	0,0073	0,0187	0,0301	0,0416	0,0582
100,0000	0,0083	0,0197	0,0301	0,0416	0,0582

Подобно [3] введем характеристику – коэффициент взаимодействия свай в группе при осевом смещении α , который определяется по формуле

$$\alpha = S_{w10} / \bar{S}_{w1j}, \quad (3)$$

где \bar{S}_{w1j} – среднее значение коэффициента жесткости свай в кусте;

S_{w10} – коэффициент жесткости одиночной сваи.

Среднее значение коэффициента жесткости свай в кусте [12, 13] связано с безразмерной частотой колебаний a_0 и расположением свай в рост-верке. Например, для рассматриваемых фундаментов $\Phi-3$ – $\Phi-5$ из девяти свай \bar{S}_{w1j} определяется исходя из схемы расположения свай (рис. 3) по формуле

$$\bar{S}_{w1j} = [4S_{w14}(a_0) + 4S_{w15}(a_0) + S_{w13}(a_0)] / 9,$$

где S_{w13} , S_{w14} , S_{w15} – коэффициенты жесткости, приведенные в [13], равные

$$S_{w13} = S_{w1} - 1,5S_{wcor}, \quad S_{w14} = S_{w1} - 1,25S_{wcor}, \quad S_{w15} = S_{w1} - 0,875S_{wcor},$$

$$S_{wcor}(a_0) = C\pi a_0 [J_0(a_0)J_1(ma_0) + Y_0(a_0)Y_1(ma_0)] / [J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)],$$

$$C = \frac{\sum_{n=1}^N J_{2n-1}(a_0)[Y_{2n-2}(a_0) - Y_{2n}(a_0)] - Y_{2n-1}(a_0)[J_{2n-2}(a_0) - J_{2n}(a_0)]}{\sum_{n=1}^N J_{2n-1}(a_0)[Y_{2n-2}(ma_0) - Y_{2n}(ma_0)] - Y_{2n-1}(a_0)[J_{2n-2}(ma_0) - J_{2n}(ma_0)]},$$

здесь $a_0 = \omega r_p / V_s$;

m – количество диаметров свай между их осями;

J_n , Y_n – функции Бесселя первого и второго рода, $N = 2$.

Вертикальная жесткость под подошвой фундамента определяется по формуле

$$K_{z3} = V_s^2 \rho r F_{1z},$$

где ρ – плотность грунта;

V_s – скорость поперечных волн в грунте ниже подошвы фундамента;

F_{1z} – коэффициент, определяемый согласно [1]:

$$F_{1z} = 5,33 - 0,9a_0^2.$$

Горизонтальная жесткость по боковой поверхности заглубленного ростверка или фундамента определяется по формуле

$$K_{x1} = V_{s0}^2 \rho S_{u1} h,$$

где S_{u1} – коэффициент [1, 7, 10], связанный с безразмерной частотой колебаний a_0 и геометрической формой заглубленного фундамента (ростверка), например, для круглого в плане тела

$$S_{u1}(a_0) = \pi a_0^2 \left[1 + 2 \frac{J_0(a_0)J_2(a_0) + Y_0(a_0)Y_2(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} \right].$$

Горизонтальная жесткость одиночной сваи определяется по формуле

$$K_{x2} = \frac{E_p I_p}{r_p^3} f_{11,1},$$

где I_p – момент инерции сечения сваи;

$f_{11,1}$ – коэффициент, определяемый согласно [20]

$$f_{11,1} = 7,25(V_s/V_c)^2 + 0,38(V_s/V_c) - 0,0013,$$

в котором $V_c = \sqrt{E_p / \gamma_p}$, $\gamma_p = 78,0$ кН/м³ – удельный вес материала сваи.

Горизонтальная жесткость под подошвой фундамента определяется по формуле

$$K_{x3} = V_s^2 \rho r F_{1x},$$

где F_{1x} – коэффициент, определяемый согласно [1]

$$F_{1x} = 4,86 - 0,2a_0^2.$$

Необходимо отметить, что для расчетов использовались значения скоростей поперечных волн V_s , определенных непосредственно на опытном полигоне с помощью метода, описанного в [20]. Для этого использовались две погруженные в грунт на расстоянии 2 м друг от друга металлические сваи «источник» и «приемник» диаметром 76 мм и длиной 1500 мм, имеющие на верхних торцах металлические пластины с закрепленными трехкоординатными вибродатчиками. При ударе по свае-источнику регистрировались импульсы на ней и на свае-приемнике. По времени прохождения импульса между сваями определялась скорость поперечных волн в грунте в зависимости от вертикального или горизонтального направлений приложения импульсной нагрузки. Значения скоростей для грунта опытного полигона определены как $V_{s1} = 146$ м/с – при приложении нагрузки в вертикальном направлении и $V_{s2} = 105$ м/с – при приложении нагрузки в горизонтальном направлении. Разные значения, полученные в зависимости от направления удара, свидетельствуют об анизотропии скоростей упругих волн в грунте [21].

Результаты измерений и расчетов частот собственных колебаний фундаментов Ф-1, Ф-2 приведены в табл. 2 и 3. Для каждого испытуемого фундамента производилась регистрация поступающих данных и одновременный

Таблица 2. Частоты собственных колебаний фундамента Ф-1

№ п/п	Заглубление h/d	Измеренная частота, Гц		Расчетная частота, Гц					
				СП 26		[7]		[10]	
		гор.	верт.	гор.	верт.	гор.	верт.	гор.	верт.
1	1,00	42,47	54,54	31,04	36,17	39,97	56,59	41,33	59,01
2	0,75	41,43	52,25	30,09	35,46	36,96	54,33	39,57	56,23
3	0,50	38,71	50,00	28,60	34,75	35,92	51,96	37,73	53,29
4	0,25	33,85	47,61	26,48	33,27	34,85	49,49	35,79	50,19
5	0,00	30,03	45,40	24,17	31,72	33,75	46,88	33,75	46,88

Таблица 3. Частоты собственных колебаний фундамента Ф-2

№ п/п	Заглубление h/d	Измеренная частота, Гц		Расчетная частота, Гц					
				СП 26		[7]		[10]	
		гор.	верт.	гор.	верт.	гор.	верт.	гор.	верт.
1	1,00	36,10	45,76	28,83	30,30	34,68	44,74	38,27	47,79
2	0,75	32,25	42,30	27,95	29,70	32,08	41,83	35,01	44,29
3	0,50	28,80	39,50	26,56	29,10	29,25	38,70	31,41	40,49
4	0,25	25,45	35,25	24,60	27,85	26,11	35,30	27,34	36,29
5	0,00	22,30	31,15	22,45	26,56	22,55	31,54	22,55	31,54

расчет с использованием формул (1), (2) частот собственных колебаний для различных уровней относительного заглубления $h/d = 1; 0,75; 0,5; 0,25; 0$. Вычисления проводились согласно [7] для круглого в плане фундамента и для прямоугольного в плане тела [10] и согласно СП 26. При определении суммарной жесткости свай в основании фундамента Ф-1 [13] их взаимное влияние не учитывалось ($\alpha = 1$).

Из результатов экспериментов, проведенных на опытных фундаментах Ф-1 и Ф-2, следует, что увеличение заглубления приводит к повышению частот собственных колебаний как свайных фундаментов, так и фундаментов на естественном основании. Изменение частот от заглубления имеет фактически линейную зависимость (рис. 4). Полное заглубление способствует увеличению частот при горизонтальных колебаниях для свайного фундамента в 1,5 раза, для фундамента на естественном основании более чем в 1,6 раза. При вертикальных колебаниях для свайного фундамента частота возрастает в 1,3 раза, для фундамента на естественном основании в 1,4 раза. Можно отметить, что для фундаментов на естественном основании заглубление более значительно влияет на изменение частот собственных колебаний, чем для свайных. В качестве подтверждения полученных результатов измерений на рис. 4, б представлены данные из [4] для фундамента аналогичных размеров и со схожими свойствами грунта.

Приведенные в табл. 2 и 3 результаты, полученные согласно СП 26, иллюстрируют значительно более низкие значения рассчитанных частот собственных колебаний, чем были определены в ходе опытных замеров. Можно сделать вывод, что заглубление в данном случае учитывается не в полной мере. Это подтверждается тем, что максимальное расхождение с экспериментальными данными составляет при вертикальных колебаниях для фундамента на сваях и на естественном основании – 33 %. В случае горизонтальных колебаний максимальные расхождения составляют от 20 % для фундамента на естественном основании до 27 % для свайного фундамента.

Табл. 2, 3 и рис. 4 отображают результаты, полученные при проведении расчетов с использованием формул (1), (2) для определения жесткостей свайных фундаментов и на естественном основании с учетом заглубления. При

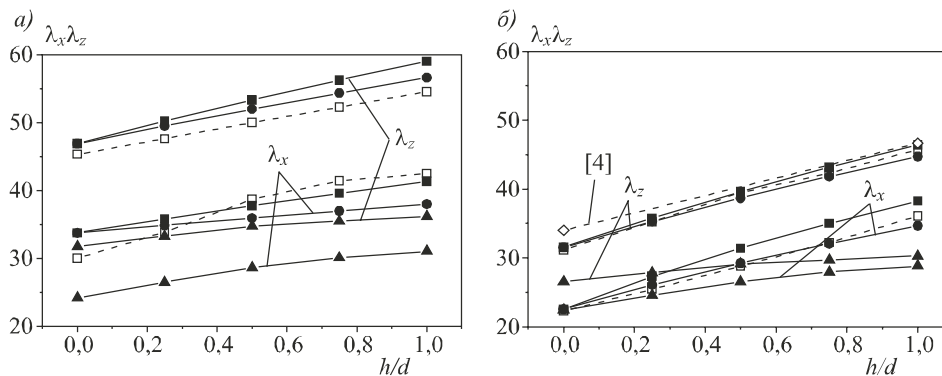


Рис. 4. Зависимость резонансных частот λ_x, λ_z от величины относительного заглубления h/d фундаментов Ф-1 (а), Ф-2 (б)

Штриховые линии – данные измерений авторов (□) и [4] (◇), сплошные линии – результаты расчетов согласно [7] (●), [10] (■) и СП 26 (▲)

вычислении частот собственных колебаний фундаментов коэффициенты S_{w1} и S_{u1} определялись для круглого [7] и для прямоугольного в плане тела [10]. На основании представленных значений частот можно утверждать, что расчеты в рамках используемых приближений позволяют получить хорошее совпадение с экспериментальными данными. Частоты для прямоугольного в плане тела имеют более высокие значения, что объясняется большей боковой поверхностью заглубленного фундамента, взаимодействующей с грунтом и, как следствие, большей жесткостью. Рассматривая результаты, полученные с использованием S_{w1} и S_{u1} , определяемых по формулам [7] для круглого в плане тела, различие с опытными данными при горизонтальных колебаниях оценивается от 6 до 12,5 % для свайных фундаментов и до 4 % для фундаментов на естественном основании. Большая величина расхождения зафиксирована при заглублении $h/d = 0$ как следствие погрешности вычисления суммарной жесткости свай в основании. При вертикальных колебаниях различие с опытными данными меньше – до 4 % для свайных фундаментов, около 2 % для фундаментов на естественном основании.

При оценке результатов, полученных со значениями S_{w1} и S_{u1} , рассчитанными на основании [10] для прямоугольного в плане тела, при горизонтальных колебаниях различие с опытными данными составляет от 3 до 12,5 % для свайных фундаментов и 6 % для фундаментов на естественном основании. Здесь также максимальное расхождение получено при заглублении $h/d = 0$ в ходе вычисления жесткостей свай в основании. При вертикальных колебаниях различие с опытными данными не превышает 8 % для свайных фундаментов и 4 % для фундаментов на естественном основании.

Результаты измерений и расчетов частот собственных вертикальных колебаний фундаментов Ф-3–Ф-5 приведены в табл. 4 и 5. Для каждого испытуемого фундамента производилась регистрация данных и одновременный расчет с использованием формул (1) и (3) собственных частот вертикальных колебаний для различных вариантов размещения свай в ростверке $m = 2, 3, 5$. Вычисления проводились согласно [13] и СП 26.

Из результатов экспериментов, проведенных на опытных фундаментах Ф-3–Ф-5, следует, что увеличение расстояния между сваями в кусте с двух

Т а б л и ц а 4. Частоты собственных колебаний фундаментов Ф-3–Ф-5

Фундамент	Измеренная частота, Гц	Расчетная частота, Гц	
		СП 26	Формулы (1), (3)
Ф-1	76,90	29,39	89,22
Ф-2	91,02	33,73	96,80
Ф-3	101,69	41,15	100,13

Т а б л и ц а 5. Коэффициенты взаимного влияния свай фундаментов Ф-3–Ф-5

Фундамент	Измеренный коэффициент α	Расчетный коэффициент α	
		СП 26	Формула (3)
Ф-1	1,32	1,41	1,3
Ф-2	1,11	1,22	1,1
Ф-3	1,00	1,00	1,03

диаметров до пяти способствует росту частот вертикальных колебаний в 1,32 раза, при этом коэффициент взаимодействия α уменьшается от своего максимального значения, равного 1,32, до 1,0 (рис. 5). Можно отметить, что увеличение расстояния между сваями от 2 до 3 диаметров наиболее значительно влияет на изменение частоты и коэффициента α – около 19 % в обоих случаях. При дальнейшем увеличении расстояния между сваями изменение частоты собственных колебаний и коэффициента взаимодействия составляет около 11 %.

Приведенные в табл. 4 и 5 результаты, полученные согласно СП 26, демонстрируют значительно более низкие значения рассчитанных частот собственных колебаний, чем были определены в ходе опытных замеров. Однако при этом полученные в результате расчетов значения коэффициентов взаимодействия практически полностью совпадают с опытными данными. Из чего следует, что эффект взаимного влияния свай в кусте согласно выражениям, приведенным в СП 26 для определения жесткости свайных фундаментов, учитывается достаточно точно.

Табл. 4, 5 и рис. 5 отображают результаты, полученные с использованием формул (1)–(3) при определении жесткостей фундаментов с различным расстоянием между сваями. При вычислении частот собственных колебаний коэффициенты S_{w1j} для разных вариантов ($j = 3, 4, 5$) размещения свай в группе (см. рис. 3) определялись согласно [13]. Представленные значения частот свидетельствуют, что расчеты в рамках используемых приближений, описывающих взаимодействие свай с грунтом, позволяют получить хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Рассматривая результаты, полученные с использованием формулы (1) для вертикальных колебаний, различие с опытными данными оценивается от 2 до 16 %. Большая величина расхождения, зафиксированная при расстоянии между сваями $m = 2$ для фундамента Ф-3, возможно, является следствием неточности изготовления опытного ростверка в полевых условиях. Из оценки результатов, полученных с использованием формулы (3), следует, что различий с опытными данными практически не существует, разброс для случаев при $m = 2, 3, 5$ составляет от 1 до 3 %.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующее заключение. Определено, что формулы (1)–(3), полученные в рамках волно-

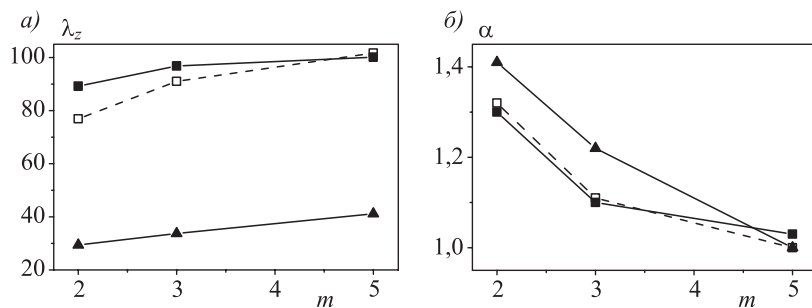


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты λ_z (а) и коэффициента взаимодействия α (б) от расстояния между сваями m

Штриховые линии – данные измерений авторов (□), сплошные линии – результаты расчетов согласно (1) и (3) (■) и СП 26 (▲)

вой модели [7, 10, 13] и применяемые для расчета динамических жесткостей при рассмотрении вертикальных и горизонтальных колебаний заглубленных фундаментов на обычном и свайном основании, учитывающие взаимное влияние свай в кусте, позволяют получать более точные результаты при определении резонансных частот по сравнению с методом, предложенным в СП 26.13330.2012, что подтверждается данными экспериментальных исследований, выполненных в полунатурных условиях. Частоты колебаний, найденные с использованием рассмотренных формул, лучше совпадают с частотами, определенными опытным путем, по сравнению с существующими методами действующих норм.

Сравнение результатов по определению частот собственных колебаний не выявило явного преимущества в использовании формул для круглого или квадратного в плане тела, что делает желательным дальнейшие исследования заглубленных фундаментов под динамическими нагрузками при значительном различии в соотношении их сторон и анализа амплитудной характеристики колебаний системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Забылин М.И. Расчет фундаментов под машины. Новосибирск: НИСИ, 1983. 83 с.
2. Пятецкий В.М., Александров Б.К., Савинов О.А. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование. М.: Стройиздат, 1993. 416 с.
3. Prakash S., Puri V.K. Foundations for machines: Analysis and design. New York: John Wiley and Sons, 1988. 656 p.
4. Колоушек В. Динамика строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1965. 632 с.
5. Холмянский М.Л. Учет влияния заглубления и боковой засыпки фундаментов машин на динамические свойства их основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1991. № 5. С. 17–19.
6. Колесников А.О., Попов В.Н. Оценка влияния заглубления ростверка при колебаниях свайного фундамента // Строит. механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 2. С. 55–61.
7. Баранов В.А. О расчете вынужденных колебаний заглубленного фундамента // Вопросы динамики и прочности: Тр. Риж. политехн. ин-та. Рига, 1967. № 14. С. 195–209.
8. Алексеев Б.Г., Швец Н.С., Аграновский Г.Г., Рахлин Ю.Б. О расчетах защемленных в грунте массивных фундаментов под машины с динамическими нагрузками // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1978. № 1. С. 31–37.
9. Novak M., El Sharnouby B. Stiffness and damping constants for single piles // Geotechnical Engineering. 1983. Vol. 109. P. 961–974.
10. Нуждин Л.В., Колесников А.О. К оценке динамических реакций на контуре прямоугольного выреза в бесконечной пластине // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 5. С. 22–31.
11. Колесников А.О., Попов В.Н. Экспериментальные исследования заглубления ростверка при колебаниях свайного фундамента // Строит. механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 4. С. 75–80.
12. Колесников А.О., Попов В.Н. Оценка динамических реакций на контурах нескольких круглых вырезов при колебаниях пластины // Строит. механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 3. С. 37–43.

13. Колесников А.О., Попов В.Н. Динамические реакции на контурах круговых вырезов с учетом их взаимного расположения при колебаниях пластины // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 283. С. 3–10.
14. Колесников А.О., Попов В.Н. Расчет собственной частоты колебаний заглубленного фундамента при импульсном нагружении // Строит. механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 5. С. 360–368.
15. Manna B., Baidya D.K. Dynamic nonlinear response of pile foundations under vertical vibration – Theory versus experiment // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2010. Vol. 30. P. 456–469.
16. Nath U.K., Hazarika P.J. Lateral resistance of pile cap-an experimental investigation // International journal of geotechnical engineering. 2013. Vol. 7. Issue 3. P. 266–272.
17. Bhowmik D., Baidya D.K., Dasgupta S.P. A numerical and experimental study of hollow steel pile in layered soil subjected to vertical dynamic loading // Soil dynamics and earthquake engineering. 2016. Vol. 85. P. 161–165.
18. Rashidifar M.A., Rashidifar A.A., Abertavi A. Nonlinear characteristics of the pile soil system under vertical vibration // Universal journal of engineering science. 2016. 4(4). P. 59–65.
19. Ali O.S., Aggour M.S., McCuen R.H. Dynamic of soil-pile interactions for machine foundations // International journal of geotechnical engineering. 2016. Vol. 8. P. 236–247.
20. Chowdhury I., Dasgupta S.P. Dynamics of structure and foundation – a unified approach: 1. Fundamentals. CRC Press, 2008. 882 p.
21. Петрашень Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.

Колесников Алексей Олегович, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Попов Владимир Николаевич, д-р физ.-мат. наук

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

Костюк Татьяна Николаевна, инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 23.04.2019

Kolesnikov Aleksey Olegovich, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Popov Vladimir Nikolaevich, DSc

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russia

Kostyuk Tat'yana Nikolaevna, Engineer

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

RESEARCH OF THE EMBEDDING EFFECT AND LOCATION OF PILES ON A NATURAL FREQUENCY AT VIBRATIONS OF FOUNDATIONS

The natural frequencies of oscillation within the wave model and SP 26.13330.2012 at considering the vertical and horizontal oscillation of embedded pile and shallow foundations are calculated. It is defined that total deepening increases the frequencies at horizontal oscillations by more than 1,6 times, at vertical oscillations by up to 1,4 times and its influence on the shallow foundations is more significant. It is found that the change in the distance between piles in the group could change the natural frequency by 1,3 times during

vertical oscillations. It is shown the advantage of the results of calculations in the framework of the wave model in comparison with the method of 26.13330.2012 and high coincidence with the experimental data obtained during a series of dynamic pulse loads, performed in semi-natural conditions.

Key words: machine foundation, wave model, natural frequency of foundation vibrations, embedded foundation, mutual influence of piles in a group.

REFERENCES

1. Zabylin M.I. Raschet fundamentov pod mashiny [Calculation of machine foundations]. Novosibirsk, NISI, 1983. 83 p. (in Russian)
2. Pyatetskiy V.M., Aleksandrov B.K., Savinov O.A. Sovremennyye fundamenty mashin i ikh avtomatizirovannoye proyektirovaniye [Modern foundations of machines and their automated design]. Moscow, Stroyizdat, 1993. 416 p. (in Russian)
3. Prakash S., Puri V.K. Foundations for machines: Analysis and design. New York, John Wiley and Sons, 1988. 656 p.
4. Koloushek V. Dinamika stroitel'nykh konstruksiy [Dynamics of building structures]. Moscow, Stroyizdat, 1965. 632 p. (in Russian)
5. Kholmianskiy M.L. Uchet vliyaniya zaglubleniya i bokovoy zasyпки fundamentov mashin na dinamicheskiye svoystva ikh osnovaniya [Accounting for influence of the deepening and backfilling of machine foundations on the dynamic properties of their foundations]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Bases, foundation and soil mechanics]. 1991. No. 5. Pp. 17–19. (in Russian)
6. Kolesnikov A.O., Popov V.N. Otsenka vliyaniya zaglubleniya rostverka pri kolebaniyakh svaynogo fundamenta [Evaluation of deepening influence of the pile-cap under the oscillations of the pile foundation]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2009. No. 2. Pp. 55–61. (in Russian)
7. Baranov V.A. O raschete vynuzhdennykh kolebaniy zaglublennogo fundamenta [On the calculation of forced oscillations of the deepening foundation]. Voprosy dinamiki i prochnosti. Trudy Rzhskogo Politekhnicheskogo Instituta [Questions of dynamics strength: Proceedings of Riga Polytechnic Institute]. Riga, 1967. No. 14. Pp. 195–209. (in Russian)
8. Alekseev B.G., Shvets N.S., Agranovskiy G.G., Rakhlin Yu.B. O raschetakh zashchemlennykh v grunte massivnykh fundamentov pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami [About calculations of massive foundations restrained in ground under machines with dynamic loadings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1978. No. 1. Pp. 31–37. (in Russian)
9. Novak M., El Sharnouby B. Stiffness and damping constants for single piles. Geotechnical Engineering. 1983. Vol. 109. Pp. 961–974.
10. Nuzhdin L.V., Kolesnikov A.O. K otsenke dinamicheskikh reaktsiy na konture pryamougol'nogo vyreza v beskonechnoy plastine [To an estimation of dynamic reactions on the contour of a rectangular cut in an infinite plate]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2004. No. 5. Pp. 22–31. (in Russian)
11. Kolesnikov A.O., Popov V.N. Eksperimental'nyye issledovaniya zaglubleniya rostverka pri kolebaniyakh svaynogo fundamenta [Experimental investigation of pile-cap deepening at oscillations of the pile foundation]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2010. No. 4. Pp. 75–80. (in Russian)

12. Kolesnikov A.O., Popov V.N. Otsenka dinamicheskikh reaktsiy na konturakh neskol'kikh kruglykh vrezov pri kolebaniyakh plastiny [An estimation of dynamic reactions on the contour of several circular cuts at plate oscillations]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy* [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2014. No. 3. Pp. 37–43. (in Russian)
13. Kolesnikov A.O., Popov V.N. Dinamicheskie reaktsii na konturakh krugovykh vrezov s uchetom ikh vzaimnogo raspolozheniya pri kolebaniyakh plastiny [Dynamic reactions on contours of circular cuts taking into account their mutual arrangement at plate oscillations]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [News of all-Russian research Institute of hydraulic engineering named after B.E. Vedeneeva]. 2017. Vol. 283. Pp. 3–10. (in Russian)
14. Kolesnikov A.O., Popov V.N. Raschet sobstvennoy chastoty kolebaniy zaglublennogo fundamenta pri impul'snom nagruzhenii [Calculation of the natural oscillation frequency of the submerged basement subject to pulsed loading]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy* [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2018. Vol. 14. No. 5. Pp. 360–368. (in Russian)
15. Manna B., Baidya D.K. Dynamic nonlinear response of pile foundations under vertical vibration – Theory versus experiment. *Soil dynamics and earthquake engineering*. 2010. Vol. 30. Pp. 456–469.
16. Nath U.K., Hazarika P.J. Lateral resistance of pile cap-an experimental investigation. *International journal of geotechnical engineering*. 2013. Vol. 7. Issue 3. Pp. 266–272.
17. Bhowmik D., Baidya D.K., Dasgupta S.P. A numerical and experimental study of hollow steel pile in layered soil subjected to vertical dynamic loading. *Soil dynamics and earthquake engineering*. 2016. Vol. 85. Pp. 161–165.
18. Rashidifar M.A., Rashidifar A.A., Abertavi A. Nonlinear characteristics of the pile soil system under vertical vibration. *Universal journal of engineering science*. 2016. 4(4). Pp. 59–65.
19. Ali O.S., Aggour M.S., McCuen R.H. Dynamic of soil-pile interactions for machine foundations. *International journal of geotechnical engineering*. 2016. Vol. 8. Pp. 236–247.
20. Chowdhury I., Dasgupta S.P. Dynamics of structure and foundation – a unified approach: 1. Fundamentals. CRC Press. 2008. 882 p.
21. Petrashen' G.I. Rasprostraneniye voln v anizotropnykh uprugikh sredakh [Propagation of waves in anisotropic elastic media]. Leningrad, Nauka, 1980. 280 p. (in Russian)