

Я.И. Домбровский, н.с.  
Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В ГРУНТАХ ОСНОВАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАГРУЗОК

Приведены основные проблемы, которые возникают при проектировании зданий и сооружений на свайных фундаментах во время действия горизонтальных нагрузок, принципы метода расчетов свайных фундаментов сооружений при учете жесткости грунтового основания. Метод коэффициентов жесткости основания позволяет при расчетах учитывать усилия, которые возникают в свайных фундаментах, а также позволяет выполнять расчеты системы «сооружение-основание», учитывая особенности деформирования грунтов.

**Ключевые слова:** коэффициент жесткости основания, деформируемость грунта, система «сооружение – основание».

Я.І. Домбровський, н.с.  
Державне підприємство «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ У ГРУНТАХ ОСНОВИ ПРИ ДІЇ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Наведено основні проблеми, які виникають при проектуванні будинків та споруд на пальових фундаментах під час дії горизонтальних навантажень, принципи методу розрахунку пальових фундаментів споруд при врахуванні жорсткості ґрунтової основи. Метод коефіцієнтів жорсткості основи дозволяє при розрахунках враховувати зусилля, які виникають у пальових фундаментах, а також дозволяє виконувати розрахунок системи «споруда – основа», урахуваючи особливості деформування ґрунтів.

**Ключові слова:** коефіцієнт жорсткості основи, деформації ґрунтів, система «споруда – основа».

Ja.I. Dombrovsky, Dr-Ing.  
State Enterprise «State Research Institute of Building Structures», Kiev

## FEATURES OF PILE FOUNDATION IN SOIL FOUNDATION UNDER THE INFLUENCE OF HORIZONTAL LOADS

It is resulted the basic problems which arise up at planning of buildings and buildings on pile foundations during the action of the horizontal loadings. It is presented the principles of calculations method of buildings pile foundations at the account of inflexibility of the ground foundation. The method of coefficients of inflexibility of foundation allows at calculations to take into account efforts which arise up in pile foundations, and also allows executing the calculations of the system «building – foundation» taking into account the features of soils deformation.

**Keywords:** coefficient of inflexibility, deformation of soil, «building – foundation» installation.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами.** В последние годы широкое распространение получило строительство зданий повышенной этажности в сейсмически опасных зонах Украины. Учитывая, что сейсмические воздействия являются одними из самых сильных в плане разрушений, к

зданиям и сооружениям в сейсмических зонах предъявляются повышенные требования по прочности конструктивных элементов.

В Украине отсутствует методика моделирования совместной работы грунтов и свайных фундаментов при сейсмических воздействиях. Существующие методики не позволяют определить и задать в расчетных схемах такие параметры, как жесткость грунта вокруг свай в горизонтальном и вертикальном направлении, жесткость кустов свай, жесткости свай крайних рядов и внутренних рядов при прохождении сейсмической волны, отличия в колебаниях сооружения от колебаний основания, которые бы наблюдались в отсутствие сооружения и т.д.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы.** В настоящее время доля свайных фундаментов в гражданском и промышленном строительстве достигает по разным оценкам 25%. При строительстве высотных зданий в сейсмически опасных зонах объем свайных фундаментов достигает 70%.

Основой для современных методов расчета свайных фундаментов при действии вертикальной и горизонтальной нагрузки послужили работы таких специалистов в области механики грунтов, как М.Ю. Абелев, В.Г. Березанцев, С.С. Вялов, А.Л. Гольдин, М.Н. Гольдштейн, М.И. Горбунов-Посадов, Б.И. Далматов, Ю.К. Зарецкий, Н.А. Цытович и многие другие.

Анализ проектов и натуральных объектов, выполненных по результатам расчетов в соответствии с существующими нормативными документами, свидетельствует о значительных запасах и некотором несоответствии теории и практики. Это объясняется тем, что значительный объем данных и их систематизация были выполнены для отдельных свай. Работа группы свай исследована в меньшей мере, и имеющегося объема информации недостаточно для разработки рекомендаций по расчету группы свай.

Существующие методы расчета группы свай можно условно разделить на две группы:

1. Методы по определению несущей способности группы свай по сопротивлению горизонтальной нагрузке одиночной сваи со свободным оголовком.

2. Методы расчета группы свай как рамных систем.

В этих методах игнорируется такой параметр, как жесткость грунта в межсвайном пространстве, что приводит к значительным запасам.

В сейсмически опасных районах работа группы свай на горизонтальную и вертикальную нагрузку приобретает особое значение. Кустовой эффект, который приводит к более рациональному количеству свай и месту их расположения, исследован на недостаточном уровне и носит фрагментарный характер.

В таблице 1 приведены некоторые результаты исследований работы группы свай на действие горизонтальной нагрузки. Результаты исследований свидетельствуют о значительно большем сопротивлении горизонтальным нагрузкам группы свай по отношению к сопротивлению одиночной сваи.

**Выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья.** При расчете зданий на сейсмические воздействия существуют два основных метода:

1. Спектральный метод, недостатком которого является представление о работе грунта основания как жесткого тела, на котором размещается сооружение, то есть при расчетах игнорируется податливость фундаментов в грунтах основания.

2. Прямой динамический метод. При расчете зданий с помощью прямого динамического метода используются расчетные акселерограммы, которые являют собой инструментальные записи ускорений грунта при сейсмических воздействиях. При этом возможны искажения в акселерограммах во время их записи и оцифровке. На этапе моделирования грунта основания при этом методе возникают проблемы, связанные с

размерами грунтового массива под зданием, заданием граничных условий, большим временем расчета и т.д.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований сопротивления горизонтальным нагрузкам группы свай

Авторы экспериментов	К-ство свай в группе	Сечение свай, см	Длина свай, м	Расстояние между сваями	Ростверк	Грунтовые условия	Коэф. $K_{ке}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Голубков В.Н.	15	Ø28	6,00	3d	Низкий	Мелкий илистый песок	1,92
	15	Ø28	6,00	3d	Низкий		1,90
	9	Ø28	5,98	3d	Низкий		2,05
	9	Ø28	6,00	3d	Низкий		1,50
Быков В.И.	4	30x30	5,50	3d	Низкий	Глинистые грунты твердой та полутвердой	1,80
	4	30x30	4,00	3d	Низкий		1,90
Денисов О.Л.	4	30x30	5,35	4d	Низкий	Глинистые грунты твердой консистенции	1,31
	5	30x30	5,50	4d	Низкий		1,90
Бабенко В.А.	4	30x30	5,40	3d	Высокий	Лесовые грунты	1,50...1,80

**Цель работы** – получение методики моделирования жесткости грунта в горизонтальном направлении и распределение жесткостей по сваям в направлении действия сейсмической нагрузки, совершенствование совместных расчетов системы «сооружение – фундамент – основание». В статье приведены отдельные результаты моделирования работы свайных фундаментов.

**Изложение основного материала исследования.** Энергия любых динамических воздействий переносится от их источников волнами напряжений разного типа. По мере распространения волны часть ее энергии теряется, что приводит к снижению интенсивности динамической нагрузки с удалением от ее источника и называется затуханием. Причины затухания различны и связаны главным образом с неидеальной упругостью, дискретностью и неоднородностью строения любого массива грунтов как среды распространения упругих волн. В соответствии с различными механизмами потерь энергии волны можно выделить следующие виды затухания:

1. Расхождение (геометрическое затухание);
2. Рассеяние на различных неоднородностях среды;
3. Поглощение (или гистерезисное затухание).

В реальном грунте все три вида затухания проявляются одновременно, но в зависимости от состава и свойств самого грунта, а также типа и особенно частоты волны соотношение между ними может существенно варьироваться.

В практике современного строительства для снижения амплитуд колебаний основания массивных сооружений принимают комбинированный свайно-плитный фундамент (КСП) с заглублением нижних концов свай в более плотные грунты. Увеличение глубины заложения фундаментов приводит к снижению амплитуд вибрации в связи с увеличением жесткости основания в основном за счет роста природного давления грунта. Так же это приводит к дополнительному демпфированию за счет трения и сцепления грунта по поверхности контакта свай и плиты с грунтом.

Работа фундаментов при наличии динамических нагрузок характеризуется такими факторами:

1. Параметры динамической нагрузки и схема его передачи на сооружение (обусловленная фильтрующими свойствами грунтов по отношению к колебаниям разной частоты).

2. Свойства грунтов основания (возможность снижения несущей способности грунта, а также его демпфирующие и фильтрующие свойства).

На сегодняшний день поведение одиночной сваи во время действия горизонтальной нагрузки изучено вполне достаточно, что позволило разработать довольно надежные и проверенные на практике методы расчета. Намного меньше изученная работа группы свай от действия горизонтальной нагрузки.

Практика показывает, что поведение одной сваи в группе свай с жестким защемлением оголовка сваи в ростверк значительно отличается от поведения одиночной сваи. Эту разность выражают через кустовой эффект, который определяется как

$$K_{ке} = P_{гг} / nP_{го}, \quad (1)$$

где  $P_{гг}$  – сопротивление горизонтальной нагрузке группы свай, которое отвечает определенному горизонтальному перемещению ростверка;  $P_{го}$  – сопротивление горизонтальной нагрузке одиночной сваи при том же горизонтальном перемещении;  $n$  – количество свай в группе.

Имеющийся материал свидетельствует о значительно большем сопротивлении горизонтальным нагрузкам группы свай по отношению к сопротивлению одиночной сваи. При этом происходит уменьшение перемещения оголовка сваи (по некоторым данным, в 3 и больше раз).

Численные исследования сопротивления групп свай горизонтальной нагрузке показали, что жесткое защемление свай в ростверк повышает их сопротивление горизонтальной нагрузке, при этом взаимное влияние свай приводит к некоторому снижению сопротивления.

Результаты лабораторных исследований сопротивления группы свай горизонтальным нагрузкам свидетельствуют о том, что сопротивление горизонтальным нагрузкам группы свай возрастает с увеличением количества свай в фундаменте, а интенсивность роста сопротивления значительно зависит от расстояний между сваями. Так при расстоянии между сваями  $3d$  увеличение количества свай с двух до четырех приводит к росту сопротивления в 1,6 раза, при увеличении количества свай с двух до шести – в 2,2 раза. Необходимо отметить, что горизонтальная нагрузка группы свай приводит к возникновению разных усилий в сваях разных рядов. Наибольшую нагрузку воспринимают сваи первого ряда.

Существенным фактором, который влияет на сопротивление группы свай горизонтальной нагрузке, есть вертикальная нагрузка (пригруз). Исследование поведения группы свай (которые выполнены разными авторами) свидетельствуют об увеличении сопротивления горизонтальной нагрузке группы свай во время совместного действия горизонтальной нагрузки и пригруза. Эффект увеличения сопротивления куста свай горизонтальным нагрузкам при наличии пригруза объясняется развитием и увеличением сил трения и сцепления по боковой поверхности свай и под пятой сваи.

Ниже приведены результаты моделирования массива грунта с различным количеством свай для определения их влияния на изменение напряженно-деформируемого состояния грунта в околосвайном пространстве и получения жесткостных характеристик системы свая-грунт при сейсмических воздействиях.

Рассмотрено четыре расчетные схемы с количеством свай в одном ряду, изменяющимся от одной до трех, и схема с тремя сваями, объединёнными ростверком (рис 1, 2). Для моделирования сейсмических воздействий применялась синтезированная акселерограмма  $vb1r$  (с максимальной амплитудой радиального ускорения  $1,485m/c^2$ ). При моделировании грунт рассматривался как упругая изотропная среда (аргиллиты с модулем деформации  $E = 50$  МПа) с такими геометрическими размерами: длина –



36 м, ширина – 20 м, глубина – 20 м. Размеры свай: диаметр – 0,62 м, длина – 10 м. Расстояние между осями свай составляет 3,00 м.

В результате расчетов получено:

1. Перемещение головы сваи составляют:

одна свая – 24,5 мм;

две сваи – №2 – 29,0 мм и №3 – 22,2 мм;

три сваи – №4 – 30,1 мм, №5 – 23,9 мм и №6 – 17,3 мм.

три сваи, объединённые ростверком – №7 – 23,4 мм, №8 – 23,1 мм и №9 – 22,9 мм.

2. При увеличении количества свай, армирующих грунт, происходит расширение зоны, в которой изменяются касательные напряжения в массиве грунта, что указывает на частичное поглощение и рассеивание энергии сейсмической волны в зоне фундаментов.

3. При объединении свай ростверком происходит осреднение перемещений оголовков свай и напряжений во внутренних рядах свай.

В НИИСКе разработана методика, которая позволяет моделировать систему «сооружение – фундамент – основание» при действии горизонтальных и вертикальных нагрузок. Особенностью данной методики является возможность ее применения для определения усилий в конструкциях здания по спектральному методу.

Основание представлено через коэффициенты жесткости. Жесткости задаются в двух направлениях по горизонтали (по длине свай), а по вертикали – под пятой сваи.

Для подтверждения возможности применения данной методики были выполнены работы по численному моделированию ряда существующих объектов и определены фактические динамические параметры (преобладающие периоды и частоты при колебаниях по основным формам, формы колебаний, логарифмический декремент затухания) зданий и фундаментов при их микросейсмических колебаниях.

Результаты этих исследований позволили сделать вывод о приемлемости данной методики при оценке усилий, возникающих в зданиях при действии горизонтальных нагрузок.

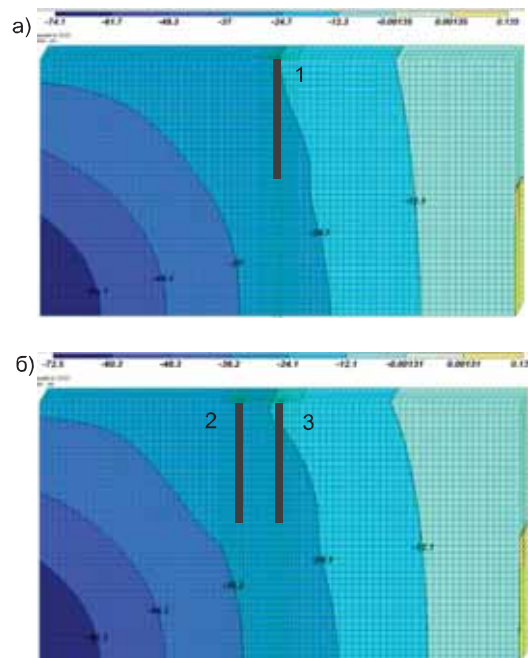


Рисунок 1 – Изополя горизонтальных перемещений в массиве грунта:  
а – одна свая; б – две сваи

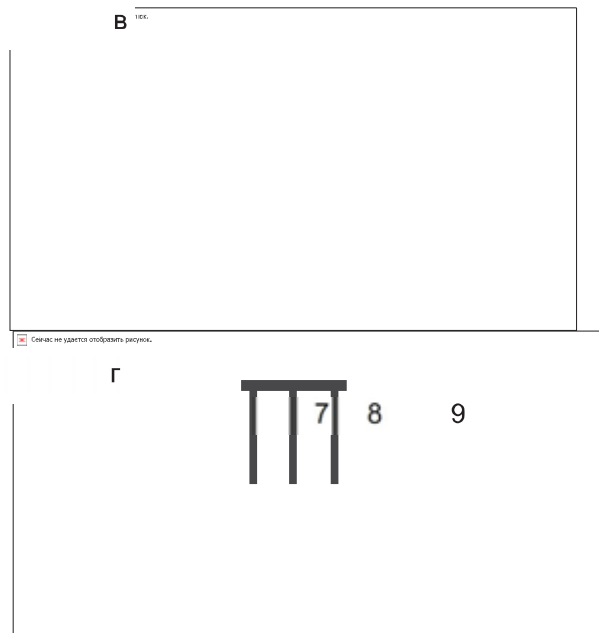


Рисунок 2 – Изополя горизонтальных перемещений в массиве грунта:  
 в – три сваи; г – три сваи, объединённые ростверком



Рисунок 3 – Расчетная схема здания

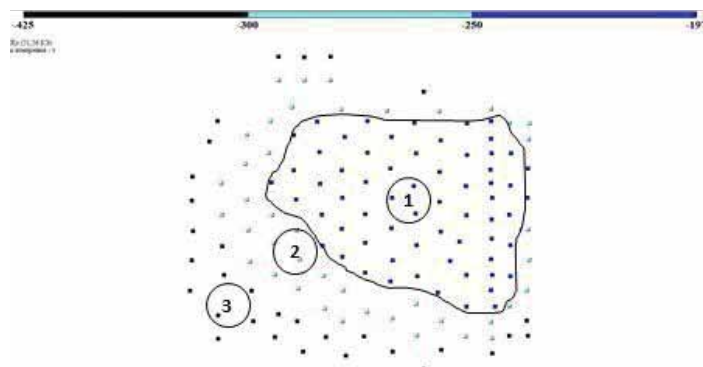


Рисунок 4 – Усилия в сваях

На рисунках 3 и 4 приведена расчетная схема здания и усилия, возникающие в сваях при сейсмических воздействиях, определенных с помощью спектрального метода.

Результаты моделирования грунта вокруг свай в горизонтальном направлении позволяют условно выделить под зданием три характерные зоны:

- 1) зона с наименьшими усилиями в сваях;
- 2) зона средних усилий;
- 3) зона максимальных усилий.

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие **выводы**:

1. Устройство свай в грунте влияет на изменение НДС основания в горизонтальном направлении.

2. Вокруг оголовков свай происходит отрыв грунта в контактной зоне.

3. При устройстве свай в несколько рядов происходит уменьшение перемещений оголовков.

4. При устройстве свай в несколько рядов и объединении их ростверком происходит осреднение перемещений оголовков.

5. Зоны напряжения вокруг свай крайнего ряда и внутренних свай имеют различия по форме распространения.

6. Напряжения в грунте вокруг свай крайних рядов больше чем вокруг свай внутренних рядов.

#### *Литература*

1. Вознесенский, Е.А. *Поведение грунтов при динамических нагрузках* / Е.А. Вознесенский. – М.: Издательство Московского университета, 1997. – 286 с.
2. Знаменский, В.В. *Инженерный метод расчета горизонтально нагруженных групп свай* / В.В. Знаменский. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 127 с.
3. Знаменский, В.В. *Расчет горизонтально нагруженных групп свай* / В.В. Знаменский, А.В. Конов // Труды XI Международного конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. – Сан-Франциско, 1985. – С. 1511 – 1514.
4. Завриев, К.С. *К расчету свай и свай-оболочек на горизонтальные и моментные нагрузки* / К.С. Завриев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1974. – №12. – С. 10 – 11.
5. Клейн, Г.К. *Расчет железобетонных свай на действие вертикальных и горизонтальных нагрузок* / Г.К. Клейн, В.Н. Караваев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. – № 6. – С. 13 – 15.
6. Уздин, А.М. *Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений* / А.М. Уздин. – С-Пб.: 1993. – 174 с.
7. Broms-Bent, B. *Lateral resistance of piles in cohesionless soils* / B. Broms-Bent // *Journal of the Soils Mechanics and Foundation Div.* – Vol. 90. – 1964 – № 3. – С. 123 – 156.
8. СНиП 2.02.03-85 *Свайные фундаменты*. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
9. ДБН В.1.1-12:2006. *Строительство в сейсмических районах Украины*. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 82 с.

*Надійшла до редакції 24.10.2012*

*© Я.И. Домбровский*