

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Л. В. НУЖДИН – канд. техн. наук, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета, г. Новосибирск.

Д. А. ПОЛИНКЕВИЧ – Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск.

Описывается программный комплекс для расчета и оптимизации конструкции свайных фундаментов, эксплуатируемых при динамическом нагружении. Алгоритм программ составлен на основе волновых моделей. Рассматриваются расчетная схема, методики расчета и оптимизации конструкции свайных фундаментов, реализуемые в программах. Приведены особенности программирования и решения по устранению недостатков среды программирования.

Результаты экспериментальных исследований показывают высокую эффективность свайных фундаментов в условиях динамического нагружения. Применение свайных фундаментов при действии динамических нагрузок может привести к значительному сокращению расхода материалов, а следовательно, и существенному снижению стоимости строительства, особенно для фундаментов машин с динамическими нагрузками.

Широкое использование свайных фундаментов и большой диапазон источников колебаний (промышленные источники, строительные машины, метрополитен, железнодорожный и автотранспорт) ставят вопрос о необходимости прогнозирования параметров колебаний при проектировании и реконструкции фундаментов.

Наряду с фундаментами машин с динамическими нагрузками, для которых требования по ограничению вибраций являются определяющими, в последнее время все большее количество строительных объектов нуждается в анализе, а зачастую – в снижении уровня колебаний.

В настоящее время выбор основных параметров (длины, размеров сечения и шага свай, конструкции сопряжения свай с ростверком, типа и размеров ростверка и т. д.) и конструирование свайных фундаментов, эксплуатирующихся в условиях динамического нагружения, основываются, как правило, на инженерном опыте. Расчет колебаний фундаментов заключается только в проверке уже принятых конструктивных решений. Такой подход зачастую приводит к необоснованному перерасходу материалов и стоимости работ. Кроме того, увеличение числа и шага свай в кусте и др. не обязательно приводит к снижению амплитуд колебаний фундамента.

Авторами разработан программный комплекс для оптимизации и динамического расчета свайных фундаментов. Целью данного комплекса являются расчет колебаний и подбор оптимальных параметров свайных фундаментов, обеспечивающих при минимальных затратах наибольшую эффективность конструкции фундамента. Алгоритм программ составлен на основе волновых моделей, наиболее полно отвечающих физическому представлению процесса взаимодействия свайных фундаментов с основанием при динамическом нагружении. Их динамические характери-

ки имеют четкое физическое обоснование и могут определяться волновыми методами.

Свайный фундамент рассматривается как гибкая стержневая система, объединенная поверху жестким ростверком [2]. Взаимодействие ростверка с грунтом не учитывается. Грунтовое основание моделируется вязкоупругим, изотропным, однородным полупространством. Считается, что стержни нижним концом опираются на упругое полупространство, а по боковой поверхности контактируют с совокупностью бесконечно тонких независимых грунтовых пластин, по которым в горизонтальном направлении распространяются упругие волны.

Строгое аналитическое решение проблемы представляет большие трудности, поэтому для практического решения задач проектирования свайных фундаментов предложено использовать ряд допущений и разделить задачу на самостоятельные блоки:

- определение параметров жесткости и демпфирования одиночной изолированной сваи;

- определение параметров жесткости и демпфирования свайного основания;

- расчет амплитуд колебаний фундамента с известными жесткостными и демпфирующими характеристиками системы.

Получаемые по каждому блоку расчетные зависимости приобретают универсальный характер, обеспечивают проведение комплексного анализа и оптимизации размеров фундаментов на стадии проектирования и могут быть использованы для решения смежных задач.

В программе рассчитываются параметры жесткости и демпфирования для одиночной сваи-стойки и висячей сваи, определяются амплитуды всех составляющих колебаний от силового и кинематического нагружения, учитывается жесткое или шарнирное сопряжение сваи с ростверком. Параметры жесткости и демпфирования для свайного основания рассчитываются путем суммирования соответствующих значений для одиночных свай, но также имеется возможность вводить корректирующие коэффициенты, учитывающие взаимодействие свай в кусте. Вычисляются вертикальные и сдвиго-вращательные амплитуды колебаний свайных фундаментов. При этом для сдвиго-вращательных колебаний допол-

нительно вводится матрица размещения свай на свайном поле. Матрица может заполняться как в ручном, так и в автоматическом режимах. В автоматическом режиме свайное поле формируется из заданного числа свай с определенным шагом – стандартным (3d) или задаваемым пользователем.

Все виды нагружения, условия закрепления свай и другие параметры графически отображаются на расчетной схеме программы, что позволяет в процессе ввода исходных данных контролировать правильность расчетной схемы для решаемой задачи.

Следует особо отметить, что в волновой модели для определения параметров жесткости и демпфирования используются истинные динамические характеристики грунтов – модули упругости E и упругого сдвига G , коэффициент Пуассона ν и параметр затухания Φ . Наиболее близко соответствуют физической сущности данных характеристик волновые методы их определения (например, на ультразвуковом стенде), базирующиеся на измерении параметров волн и использовании аналитических зависимостей, представленных в работе [4]. Поэтому в программе реализован тот же подход: в окне ввода исходных данных вводятся скорости распространения поперечных и продольных волн в грунте, плотность, а все характеристики грунтов (модули упругости, упругого сдвига и т. д.) автоматически вычисляются программой. Также имеется возможность ввода самих динамических характеристик, вычисленных иным способом.

Плотность и модуль упругости материала свай устанавливаются автоматически в зависимости от выбранной из списка сваи либо в ручном режиме (для особых материалов). Для расчета могут быть выбраны сваи с круглым или квадратным поперечным сечением.

Также вводятся геометрические параметры ростверка (h_1, h_2, l, b), по которым автоматически рассчитываются центр масс и момент инерции массы ростверка относительно оси, проходящей через центр тяжести перпендикулярно плоскости колебаний. Задаются границы диапазона изменения частоты колебаний (f_1, f_2) и динамическая нагрузка: величины действующих динамических усилий (P_v, P_h, M) при силовом динамическом воздействии или исходные (начальные) амплитуды колебаний

грунта (a_{sv} , a_{sh} , a_{sp}) при кинематическом воздействии.

Для сокращения времени машинного счета можно задавать различный масштаб изменения частоты (шаг изменения частоты колебаний, Гц). Например, для поиска пиков резонансных частот можно задать широкий диапазон изменения частоты колебаний и крупный шаг изменения частоты, затем по графику определить примерный диапазон резонансной кривой, задать минимальный шаг изменения частоты, вычислить точное значение резонансных амплитуды и частоты.

При решении задачи оптимизации конструкции оптимальное решение определяется по следующим параметрам: число свай в кусте, длина и шаг свай, масса ростверка, размеры поперечного сечения для свай круглого или квадратного сечения (рис. 1). Влияние других факторов (например, формы поперечного сечения свай, пластических деформаций грунта вокруг свай и др.) составляет около 8...12% [1], что не превышает статистическую погрешность при динамических расчетах.

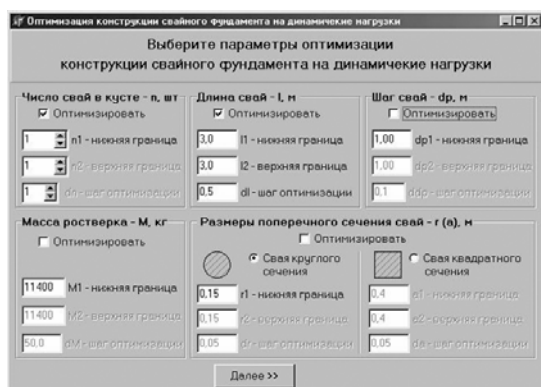


Рис. 1. Диалоговое окно ввода оптимизируемых параметров для расчета и оптимизации конструкции свайного фундамента

Главным критерием подбора оптимальной конструкции свайного фундамента является недопущение превышения заданного значения амплитуд колебаний фундамента. Проверка проводится не только для заданного направления колебаний, но и по всем возможным амплитудам колебаний: для вертикальной и горизонтальной составляющих колебаний при силовом или кинематическом воздействии. Так как задача оптимизации имеет пре-

де всего практическое значение, то, кроме минимизации функции амплитуды колебаний, вводится целевая функция экономических затрат, основным оптимизируемым параметром которой считается расход материала на изготовление свайного фундамента.

С другой стороны, оптимизируемые параметры, такие как длина свай, размер поперечного сечения, количество свай, масса ростверка, имеют физические количественные ограничения, обусловленные сортаментом и номенклатурой выпускаемых свай. Для учета ограничений вводятся верхний и нижний пределы изменения варьируемых параметров и шаг их изменения. Таким образом, оптимизируемые характеристики дают дискретный ряд значений, которым соответствует ряд значений целевых функций. Из последних на основе принятого критерия выбирается наиболее подходящее решение, которое и будет оптимальным.

В целом, задача оптимизации колебаний свайных фундаментов относится к параметрической (конечномерной) задаче и осуществляется в рамках итерационного подхода. Согласно этому подходу, на итерациях решается система уравнений с учетом принятого физического критерия оптимальности (минимальная амплитуда колебаний свайных фундаментов, минимальный расход материалов).

Заметим, что для оптимального фундамента амплитуды колебаний не обязательно должны принимать минимальное значение в области резонанса. Часто ставится задача уменьшения амплитуд в узком диапазоне частот до возникновения явления резонанса или на определенной частоте. Кроме этого, даже в выделенном интервале частот амплитуда колебаний может иметь не минимальное значение. Достаточно того, что амплитуда колебаний свайного фундамента будет меньше предельно допустимой СНиП 2.02.05–87 или эксплуатационными требованиями, тогда главной целевой функцией будет расход материалов V .

Программа построена в форме интерактивного диалога по блочно-модульному принципу и состоит из 6 основных рабочих и 8 дополнительных окон. Окна содержат исходную информацию, либо результаты расчета и оптимизации, либо вспомогательную инфор-

мацию. Количество активных окон зависит от исходных данных задачи и принятой расчетной схемы. Каждый модуль представляет собой законченную программу, способную функционировать самостоятельно.

Программный комплекс состоит из программы для статистической обработки данных инженерно-геологических изысканий, вычисления динамических характеристик грунтов, определения параметров жесткости и демпфирования одиночной сваи и свайного основания, расчета амплитуд всех форм колебаний свайных фундаментов от динамических нагрузок и кинематического воздействия. Программное обеспечение позволяет определить рациональные размеры фундамента, оптимизировать длину, шаг и количество свай, подобрать наилучшую конструкцию сопряжения свай с ростверком.

При разработке программного комплекса применялась среда быстрой разработки *Visual Delphi 6.0*, в которой в качестве языка программирования используется *Object Pascal*. К недостаткам *Object Pascal* относятся отсутствие стандартных математических операторов работы с комплексными числами и невозможность изменения размерности массивов в режиме выполнения программы (все переменные в *Object Pascal* предварительно объявляются).

Первый недостаток (отсутствие арифметики комплексных чисел) решается с помощью введения нового типа данных – комплексного (*Complex*), состоящего из двух записей: действительной (*real*) и мнимой (*im*). Дальнейшее описание всех математических операций с комплексными числами представлено в виде процедур и функций.

Невозможность работы с массивами переменной размерности решается разложением массивов на векторы и использованием в качестве их компонентов динамических переменных и указателей или описанием массивов с заведомо большими размерностями, что нецелесообразно с точки зрения расхода памяти.

Одним из положительных моментов данного программного комплекса является возможность уточнения расчетных формул и введения новых влияющих параметров при моделировании поведения динамической системы. Наряду с дальнейшими теоретическими

разработками в области динамики колебаний свайных фундаментов планируется введение дополнительных модулей: расчет динамических характеристик грунтов по различным методикам, учет динамического взаимодействия свай в кусте, боковой засыпки ростверка и влияния статического нагружения на колебания свайных фундаментов и др.

Особенностью программного комплекса является полная контролируемость процессов вычисления, так как для всех формул, участвующих в алгоритме расчета (более 50 формул), имеется возможность построения графиков значений с распечаткой результатов. Данные вычисления могут быть полезны при определении общей погрешности расчета динамических колебаний в результате аппроксимации некоторых функций, малого числа итераций при разложении функций в ряд Тейлора и других операциях, связанных с преобразованием аналитических функций в программный код.

Для работы с пакетом программ не требуется специальной подготовки. Ввод исходных данных (рис. 2), определение типа задачи (рис. 3) и выбор представления материала максимально упрощены, производятся в диалоговом режиме.

Рис. 2. Диалоговое окно ввода исходных данных для расчета колебаний свайного фундамента

Все кнопки и поля программы снабжены контекстными подсказками. Во избежание опечаток и синтаксических ошибок ввода на все поля ввода исходных данных поставлен фильтр ввода только цифр и символа десятичной дроби « , » только один раз. Вывод ин-

формации выполнен в виде наглядных таблиц и графиков. График амплитуд колебаний свайного фундамента может быть представлен в двух видах: трехмерном (рис. 4) и двумерном (рис. 5).

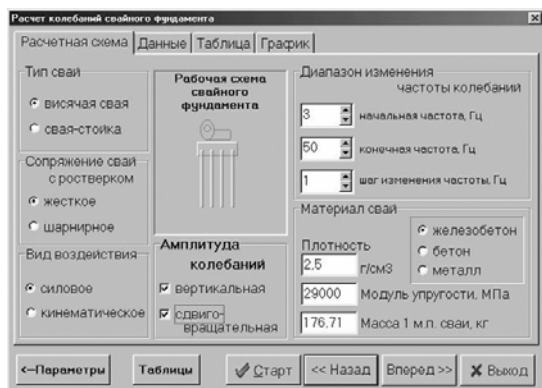


Рис. 3. Диалоговое окно выбора расчетной схемы свайного фундамента



Рис. 4. Окно вывода графика изменения амплитуд колебаний свайного фундамента в зависимости от частоты (трехмерное представление графика)

Для повышения наглядности представления в окне трехмерного графика имеются регуляторы: «Масштаб», «Вращение», «Кручение». В окне двумерного представления графика при перемещении курсора мыши автоматически вычисляются координаты любой точки графика колебаний в соответствующих единицах измерения. В одном окне графика можно построить несколько кривых колебаний свайных фундаментов, что позволяет наглядно сравнивать влияние различных параметров на общую динамическую картину.



Рис. 5. Окно вывода графика изменения амплитуд колебаний свайного фундамента в зависимости от частоты (двумерное представление графика)

В таблице размещаются следующие колонки результатов расчета: амплитуда колебаний свайного фундамента; оптимальная безразмерная частота колебаний; оптимальная частота колебаний; параметры жесткости и параметры демпфирования свайного основания; комплексные безразмерные параметры сопротивления среды колебаниям; оптимальные: число свай в кусте, длина, шаг свай, размер поперечного сечения свай, масса ростверка.

В программе имеется возможность сохранять в отдельный файл исходные данные по грунтам площадки и данные о расчетной схеме. Также сохраняются результаты расчета и оптимизации – графики и таблицы, которые могут быть переданы в пакет Microsoft Excel для обработки, редактирования и построения графиков. Вся исходная и выходная информация может быть распечатана из программы.

Программный комплекс снабжен обширной справочной информацией о методике, алгоритме расчета колебаний свайных фундаментов, которая представлена в виде электронного учебника.

Окно справки вызывается с помощью клавиши F1 и содержит четырнадцать пунктов, касающихся принципов и методики работы программы расчета колебаний. Все пункты содержания выполнены в виде гиперссылок: щелчок на любом пункте вызывает окно с данным разделом. Внутри текста имеются ссылки на другие разделы, справки и комментарии. В окне «Справки» имеется раз-

дел «Указатель», в котором содержатся основные определения и понятия по теме «Колебания свайных фундаментов».

Кроме этого, имеется раздел «Цепочка расчета», в котором формула расчета колебаний свайного фундамента представлена в виде файлового дерева с обозначениями входящих формул вместо каталогов.

Программный комплекс может быть рекомендован для проведения проектных и научно-исследовательских работ по динамике колебаний свайных фундаментов, а также в качестве учебно-методической программы при изучении курса «Фундаменты машин с динамическими нагрузками».

Список литературы

1. Забылин М. И., Линовский С. В, Нуждин Л. В. Проектирование свайных фундаментов под машины: Уч. пособие / НИСИ им. В. В. Куйбышева. Новосибирск, 1991. 88с.
2. Нуждин Л. В., Забылин М. И. Теоретические предпосылки расчета колебаний свайного фундамента-приемника от кинематического возбуждения // Сейсмостойкость энергетических сооружений: Межведомств. сб. науч. тр. (по мат. Всесоюзной конф. СЭО-88) / ВНИИГ. Л., 1990. С. 127–132.
3. Нуждин Л. В. Учет взаимодействия ростверка с грунтом при колебаниях свайных фундаментов // Механика грунтов и фундаментостроение: Тез. докл. нац. науч.-техн. конф. СПб., 1995. С. 505–510.
4. Нуждин Л. В. Анализ динамических характеристик грунтов // Тр. VI междунар. конф. по проблемам свайного фундаментостроения: Т. 2. М., 1998. С. 110–114.
5. СНиП 2.02.05–87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. М., 1987.
6. Культин Н. Б. Delphi 6. Программирование на Object Pascal. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 28 с.