

В. А. БАНАХ (Запорожская государственная инженерная академия)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЧЕРЕЗ ГРУНТОВЫЙ МАССИВ

У статті проаналізовані фактори, які впливають на міцнісні характеристики будівельних конструкцій експлуатованих будівель у складних інженерно-геологічних умовах. Показаний вплив на експлуатовані будівлі динамічних дій, у тому числі від міського транспорту. Досліджені особливості врахування таких дій при формуванні розрахункових моделей будівель. Приведені рекомендації щодо моделювання роботи будівельних конструкцій з урахуванням деформованої схеми будівель при динамічних діях.

*Ключові слова:* будівельна конструкція, динаміка, ґрунт, МСЕ, Ліра

В статье проанализированы факторы, влияющие на прочностные характеристики строительных конструкций эксплуатируемых зданий в сложных инженерно-геологических условиях. Показано влияние на эксплуатируемые здания динамических воздействий, в том числе от городского транспорта. Исследованы особенности учета таких воздействий при составлении расчетных моделей зданий. Приведены рекомендации по моделированию работы строительных конструкций с учетом деформированной схемы зданий при динамических воздействиях.

*Ключевые слова:* строительная конструкция, динамика, ґрунт, МКЭ, Лира

Factors influenced on strength parameters of constructions of exploiting buildings in difficult engineering-geological conditions are analysed. Influence of dynamic forces, including forces from a public transport on the exploiting building is shown. The features of account of such influences at forming of calculation models of building are investigated. Recommendations of the design of work of constructions taking into account the deformed scheme of building at dynamic influences are resulted.

*Keywords:* building construction, dynamics, ground, FEM, Lira

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о существенном влиянии ґрунтового основания на динамические характеристики, показатели прочности и комфортности в зданиях. При этом выбор расчетной модели взаимодействия зданий с основаниями для получения корректных результатов динамических расчетов становится приоритетной проблемой.

Вопросами моделирования работы строительных конструкций при динамических воздействиях, особенностями формирования расчетных моделей, в том числе и с учетом основания, возможностями их анализа и контроля адекватности рассчитываемых систем реальным объектам занимались В. П. Агапов, А. С. Городецкий, А. А. Дыховичный, И. Д. Евзеров, С. Ф. Клованич, Э. З. Криксунов, В. В. Кулябко, А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий и др. [1...7].

Работа выполнялась в развитие Постановления Кабинета Министров Украины № 409 от 05 мая 1997 г. «Об обеспечении надежности и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных сетей».

**Цель работы** заключается в выявлении особенностей моделирования работы строительных конструкций эксплуатируемых зданий при взаимодействии с деформируемым основанием.

Случаи участия ґрунтовых оснований при динамических воздействиях на здания можно разделить на две группы:

– динамические воздействия приложены непосредственно к конструкциям зданий (технологическое производственное и бытовое оборудование, ветровая нагрузка и прочие), и основания выступают в роли вторичного динамического фактора – своеобразного демпфирующе-го устройства;

– динамические воздействия передаются через основания и приложены вне зданий (сейсмические воздействия, строительная техника, городской транспорт и прочие), и основания выступают в роли первичного фактора, который инициирует динамические процессы в зданиях.

В обоих случаях ґрунтовое основание является таким же важным компонентом расчетной модели, как и само здание. Решение проблемы передачи динамических воздействий через

грунтовые основания возможно следующими способами:

- моделирование основания пространственными конечными элементами и приложение динамических воздействий в месте их возникновения;

- моделирование взаимодействия с основанием специальными конечными элементами в зоне контакта конструкций здания с основанием и приложение динамических воздействий либо внутри здания, либо в зоне контактных конечных элементов;

- учет динамических воздействий на здание с моделированием реакции основания в виде вынужденных смещений (осадок) конструкций фундаментов по результатам обследования технического состояния, с приложением динамических воздействий либо внутри здания, либо в зоне контакта с основанием;

- моделирование основания сосредоточенными массами, соединенными специальными конечными элементами, с приложением динамических воздействий за пределами здания, и получение динамических характеристик основания методами прямого интегрирования систем дифференциальных уравнений движения.

В первом случае при динамических нагрузках внутри здания модель основания выполняет функции своеобразного демпфирующего элемента и позволяет приблизить динамические характеристики здания к действительным. При этом наиболее ответственным элементом модели становится зона контакта конструкций здания с основанием. Само основание может быть представлено в упрощенном виде – без учета геометрической и физической нелинейности, но с учетом односторонних связей. В случае приложения динамических воздействий вне здания модель основания должна быть максимально подробной, учитывающей наличие неоднородностей, подземных конструкций и инженерных сетей в грунтовой толще, геометрическую и физическую нелинейность, односторонние связи. Нерешенной для такой модели остается проблема раздельного задания логарифмических декрементов колебаний или пропорциональных им коэффициентов неупругого сопротивления и тому подобных мер диссипации для конструкций зданий и оснований. Способ может быть рекомендован для широкого спектра задач, в которых различными диссипативными характеристиками компонентов модели можно пренебречь, например, при сейсмических, импульсных, ударных и взрывных воз-

действиях. Хотя, справедливо будет заметить, что при ударе-импульсе вязкое трение, например, может негативно (при мгновенном воздействии) или позитивно (при длинном импульсе) сказаться на динамической реакции здания.

Во втором варианте при приложении динамических воздействий непосредственно к конструкциям здания моделирование взаимодействия специальными конечными элементами позволяет учесть податливость и динамическую реакцию основания, однако само основание в колебательном процессе не участвует, так как не учитываются его массо-инерционные характеристики. Применение этого способа делает возможным получение корректных динамических характеристик системы при приложении динамических воздействий непосредственно к конструкциям здания. Динамические воздействия, приложенные вне здания, могут быть приложены к контактным элементам здания только в виде динамических реакций, измеренных инструментальными методами непосредственно на конструкциях. Данный способ может быть рекомендован для оценки влияния на показатели прочности и комфортности здания динамических воздействий, приложенных непосредственно к конструкциям здания (динамическая составляющая ветровой нагрузки, работа технологического, бытового и ремонтно-строительного оборудования, а также звуковые воздействия от внешних источников шума).

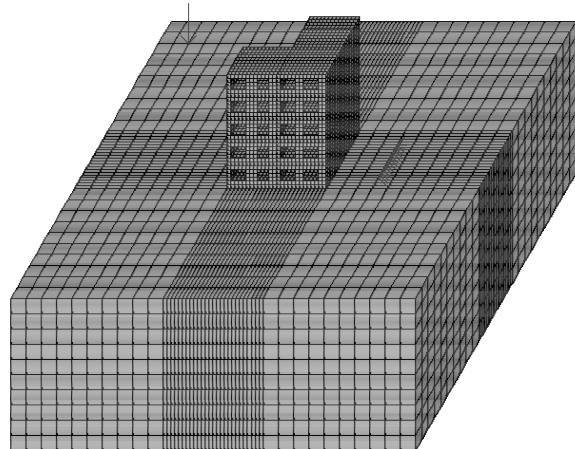
Третий способ, хоть и не учитывает в модели грунтовое основание в виде набора элементов, учитывает взаимодействие заданием величины его деформации, полученной в результате обследования. В этом случае модель здания должна быть откорректирована по результатам паспортизации здания, в том числе и динамической. Таким образом, возможно приложение динамических воздействий непосредственно к конструкциям здания. Такой способ позволяет произвести оценку динамической реакции здания с использованием несложной модели, однако для получения корректных результатов необходимы данные обследования технического состояния и динамической диагностики.

Четвертый способ позволяет учесть подробным образом структуру основания, его инерционные характеристики, смоделировать инженерные сооружения сетей и конструкции, находящиеся в грунте, а также исследовать динамическую реакцию системы «здание-основание» во временной области. Этот вариант представляется наиболее перспективным с точки зрения прогнозирования поведения зданий и сооруже-

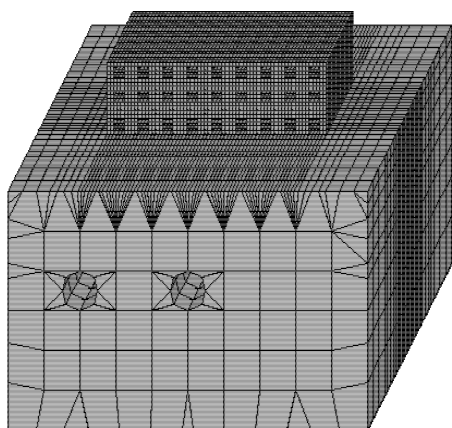
ний при передаче динамических воздействий через грунтовые основания. Это относится как к проектируемым, так и к эксплуатируемым зданиям, что позволяет применить последний способ к широкому классу задач динамики зданий и сооружений.

Вопросы формирования расчетных моделей взаимодействия зданий с основаниями при передаче динамических воздействий через грунтовой массив и их применения в инженерной практике нуждаются в более детальном исследовании.

Для исследования механизма распространения колебаний в толще грунта был выполнен расчет моделей, приведенных на рис. 1, на динамические воздействия во временной области.



а)



б)

Рис. 1. Расчетные модели с учетом грунтового основания и динамических воздействий:  
а – на поверхности грунта; б – в грунтовой толще

Для получения параметров динамических реакций зданий на воздействия, передаваемые через грунт, воспользуемся возможностью прямого интегрирования уравнений движения, предоставленную программным комплексом LIRA-Windows в модуле «Динамика-плюс»,

для расчета динамических процессов во времени [8].

Период времени, за который были определены динамические характеристики, принят равным 10 секундам. В результате расчета были получены параметры вертикальных и горизонтальных колебаний контрольных точек, где были осуществлены натурные замеры, приведенные на рис. 2 и 3.

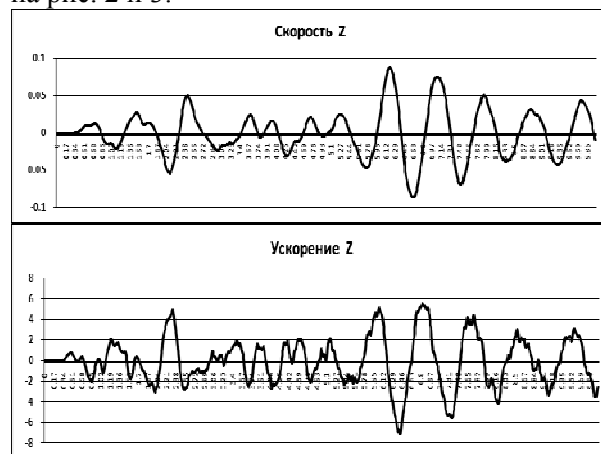


Рис. 2. Скорости (мм/с) и ускорения (мм/с<sup>2</sup>) колебаний контрольных точек моделей здания при передаче воздействий через поверхность грунта

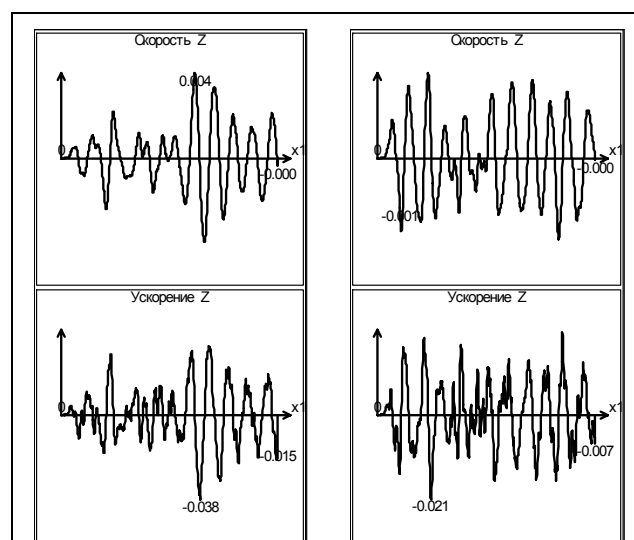


Рис. 3. Скорости (мм/с) и ускорения (мм/с<sup>2</sup>) колебаний контрольных точек моделей здания при передаче воздействий через массив грунта

Расчет динамики во времени выполнялся при условии раздельного приложения воздействий от транспорта и забивки свай. При этом продолжительность воздействия была принята равной 10 секундам для обеспечения возможности проявления демпфирующих свойств основания и получения нескольких частотных гармоник. Амплитуды (перемещения) узлов расчетной модели вычислены с учетом деформаций от статических нагрузок, поэтому для

сопоставления выделена только та часть, которая вызвана динамическими воздействиями. Таким образом, при расчете динамики во временной области учитывается деформированная схема здания, что позволяет учесть деформации, вызванные просадкой грунта [9].

Анализ результатов расчета, представленных для контрольной точки (простенок в уровне низа оконных проемов третьего этажа со стороны транспортной магистрали) и их сопоставление с результатами натуральных замеров позволяют сделать вывод о близости динамических характеристик при учете грунтового массива как средства передачи воздействий. Отклонения параметров составляют 3,8...7,3 % для амплитуд, 4,3...10,2 % для скоростей и 7,5...17,3 % для ускорений.

Анализ результатов показывает, что для корректного моделирования передачи на здания динамических воздействий, распространяющихся через дорожное покрытие и поверхностные слои грунта, достаточно упрощенной модели грунтового массива, то есть без учета физической и геометрической нелинейности пространственных КЭ, моделирующих основание, однако с учетом односторонних упругих связей между элементами фундамента и грунта.

Расчеты модели с передачей динамических воздействий через поверхность грунта дают минимальную погрешность параметров динамических воздействий при сопоставлении с фактически замеренными, однако модель получается громоздкая за счет моделирования основания. К достоинствам этого варианта можно отнести и то, что появляется возможность исследований, связанных с поиском оптимального расстояния от зданий до транспортной магистрали, а также прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния зданий в процессе их эксплуатации, близко расположенного строительства или при изменении интенсивности транспортных потоков.

Результаты расчетов показали, что при передаче динамических воздействий через грунтовую толщу параметры динамической реакции зданий существенно отличаются от натуральных, значения виброскоростей и ускорений в несколько раз ниже фактически замеренных значений.

Это говорит о том, что при моделировании грунтового массива пространственными КЭ даже с учетом односторонних связей и физической нелинейности в элементах, в работу включается весь массив, что и приводит к резкому уменьшению значений динамических реакций

(амплитуд, виброскоростей и ускорений). При этом искусственное ограничение грунтового массива в пространстве увеличивает время его реакции на возмущение.

Резкое отличие параметров вертикальных и горизонтальных колебаний контрольных точек расчетных моделей объясняется также применением фиксированного значения логарифмического декремента колебаний для материала конструкций зданий и грунтового массива, причем в данном случае большие погрешности проявляются при любом варианте использования этого параметра для много-компонентной системы.

Существенным также является то обстоятельство, что практически невозможно детально смоделировать структуру грунтового массива со всеми неоднородностями естественного происхождения, остатками фундаментов старых построек и сооружений, инженерных сетей и прочих элементов, которые могут выполнять роль корректора колебаний, что и приводит к существенным искажениям в результатах расчетов таких систем.

Выходом из положения может быть корректировка расчетной модели подгонкой параметров КЭ, моделирующих грунтовое основание, таким образом, чтобы динамические характеристики в контрольных точках здания попадали в интервал допустимых отклонений. Для этого необходимы результаты натуральных обследований эксплуатируемых зданий (например, динамическая паспортизация). Задача может быть решена корректно только для каждого конкретного объекта, никакой общей методики корректировки расчетных моделей в таких ситуациях не предполагается. Возможен также отказ от моделирования грунтового массива пространственными КЭ и приложение приведенных динамических воздействий непосредственно к специальным КЭ, моделирующим контакт здания с упругим основанием. Вопрос моделирования грунтового массива для корректной передачи динамических воздействий на здания и сооружения через грунтовую толщу нуждается в дальнейшем изучении и исследовании. Одним из вариантов такого решения может быть подход, предложенный В. В. Кулябко [5] в виде статико-динамической (инерционной и упруго-диссипативной) модели основания.

В результате исследований сделаны следующие выводы:

1. Для корректного моделирования передачи на здания динамических воздействий, распространяющиеся через дорожное покрытие

и поверхностные слои грунта, достаточно упрощенной модели грунтового массива, то есть без учета физической и геометрической нелинейности пространственных КЭ, моделирующих основание, однако с учетом односторонних упругих связей между элементами фундамента и грунта.

2. Наблюдается некоторое различие низших форм колебаний при различных способах передачи динамических воздействий: приложение непосредственно к узлам контакта здания с основанием или с использованием пространственной модели грунтового основания, хотя численные значения перемещений близки по величине. Также при передаче воздействий через грунтовое основание более явно проявляется эффект кручения здания за счет его несимметричной структуры и неоднородного состава грунтов основания.

3. Варианты моделирования оснований пространственными КЭ дают минимальную погрешность параметров динамических воздействий при сопоставлении с фактически замеренными. Положительным фактором является возможность исследований, связанных с поиском оптимального расстояния от зданий до транспортных магистралей, а также прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния зданий в процессе их эксплуатации, при близком расположении к ним строительных площадок или при изменении интенсивности транспортных потоков.

4. При передаче динамических воздействий через грунтовую толщу, представленную пространственными КЭ даже с учетом односторонних связей и физической нелинейности в элементах, в работу включается весь массив, что и приводит к резкому уменьшению значений динамических реакций (амплитуд, виброскоростей и виброускорений). При этом искусственное ограничение грунтового массива в пространстве увеличивает время его активной реакции на возмущение. Также это связано с применением фиксированного значения логарифмического декремента колебаний для материала конструкций зданий и грунтового массива. Кроме того, практически невозможно детально смоделировать структуру грунтового массива со всеми неоднородностями естественного и искусственного (техногенного) происхождения, которые могут выполнять роль как гасителя, так и усилителя колебаний, что и

приводит к существенным искажениям в результатах расчетов таких систем.

5. Вопрос моделирования грунтового массива для корректной передачи динамических воздействий на здания и сооружения через грунтовую толщу нуждается в дальнейшем изучении и исследовании. Одним из вариантов такого решения может быть подход, предложенный В. В. Кулябко в виде статико-динамической (инерционной и упруго-диссипативной) модели основания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов, В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций [Текст] / В. П. Агапов. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 248 с.
2. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Издательство «Факт», 2005. – 344 с.
3. Дыховичный, А. А. Модели строительных конструкций и их идентификация [Текст]: дис. ... доктора техн. наук : 05.23.01 / Дыховичный Александр Александрович. – К., 1995. – 322 с.
4. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики [Текст] / С. Ф. Клованич. – Запорожье, 2009. – 400 с.
5. Кулябко, В. В. Динамика конструкций, зданий и сооружений [Текст]. Ч. 1. Статико-динамические модели для анализа свободных колебаний и взаимодействия сооружений с основаниями и подвижными нагрузками / В. В. Кулябко. – Запорожье: ЗГИА, 2005. – 232 с.
6. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М.: Издательство ДМК Пресс, 2007. – 595 с.
7. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский и др. – К.: ВПП «Компас», 2000. – 328 с.
8. ЛИРА 9.4. Руководство пользователя [Текст] / под ред. А. С. Городецкого. – К.: Изд-во «ФАКТ», 2008. – 164 с.
9. Банах, В. А. Особенности работы на динамические воздействия сооружений, эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях [Текст] / В. А. Банах, А. В. Банах // Вісник ДонНАБА.– Макіївка: ДонНАБА, 2005. – Вип. 2005-8 (56). – С. 56-60.

Поступила в редколлегию 04.05.2011.

Принята к печати 16.05.2011.