

УДК 624.042.8

к.т.н., доцент Банах А.В., Тарарсик А.А.,
Запорожская государственная инженерная академия

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ДЛИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ВБЛИЗИ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Проанализированы параметры динамических действий от транспорта и причины, которые усиливают их негативное влияние на эксплуатируемые здания. Приведен пример моделирования динамических действий на здания, расположенные вблизи транспортных магистралей, и результаты численных исследований их колебаний при различных вариантах моделирования взаимодействия с основанием при динамических воздействиях на основе метода конечных элементов. Представлен анализ зависимостей динамических параметров зданий от способа моделирования их взаимодействия с основанием.

Ключевые слова: динамические воздействия на здания, транспортные коммуникации, эксплуатируемые здания, метод конечных элементов, модели взаимодействия здания с грунтовыми основаниями

Актуальность проблемы. Транспортные воздействия, передаваемые через дорожное покрытие, характеризуются горизонтальным динамическим воздействием, которое можно представить как детерминированный колебательный процесс периодического действия. При исследовании передачи таких процессов через грунтовые основания с использованием конечноэлементных моделей появляется возможность проверки их адекватности по результатам динамической диагностики. Таким образом, возможна корректировка расчетных моделей взаимодействия зданий с основаниями для достижения соответствия динамической реакции модели и реального объекта, и последующее ее исследование на предмет достижения конструкциями предельных состояний, аварийных ситуаций, определения остаточного эксплуатационного ресурса.

Транспортные динамические воздействия, передаваемые через дорожное покрытие, необходимо исследовать с точки зрения влияния на показатели прочности и комфортности зданий, эксплуатируемых продолжительное время, так как они наиболее уязвимы даже при небольшой интенсивности воздействий.

Однако в настоящее время транспортная проблема в больших городах проявляется все острее. Учитывая малую пропускную способность

центральных частей больших городов и значительный прирост количества транспортных средств, необходимо решать проблемы расширения улиц и дорог, устройства удобных транспортных развязок, увеличения количества транспортных инженерных сооружений (мостов, эстакад, тоннелей), развития транспортной инфраструктуры и прочего. Это затрагивает существующую городскую инфраструктуру и приводит к дополнительным и нехарактерным воздействиям на эксплуатируемые здания и сооружения.

При этом, чем больше возраст города, тем жестче ограничения на расширение проезжих частей улиц и дорог, проезд в центральных частях города, их реконструкцию, экологические требования. Необходимо также принимать к сведению негативные аспекты развития транспортной инфраструктуры в больших городах – культурно-исторических центрах, где имеется историческая застройка, которая подпадает под влияние динамических воздействий от транспортных коммуникаций. Такие здания и сооружения, как правило, плохо сопротивляются динамическим воздействиям и быстро достигают аварийного состояния, что полностью недопустимо для объектов, которые имеют значительную историческую ценность и находятся под охраной государства.

Для определения наиболее достоверного способа передачи на здания динамических воздействий от транспорта через грунтовые основания и их влияния на показатели прочности и комфортности, необходимо провести численные исследования различных вариантов расчетных моделей.

Цель исследования – выяснить зависимость параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) зданий, эксплуатируемых длительное время при транспортных воздействиях, от способа учета их взаимодействия с грунтовыми основаниями в конечноэлементных расчетных моделях.

Материалы исследования. Исследования были выполнены в соответствии с приоритетными научными направлениями «Научно обоснованные методы оценки технического состояния и остаточного ресурса конструкций длительной эксплуатации» и «Динамика, устойчивость и оптимизация взаимодействующих дискретно-континуальных механических систем», определенными приказом Министерства образования и науки Украины и Национальной академии наук Украины от 26.11.2009 г. № 1066/609 «Основные научные направления и важнейшие проблемы фундаментальных исследований в сфере естественных, технических и гуманитарных наук на 2009-2013 гг.».

Обычно вибрация распространяется как в грунте, так и в строительных конструкциях, с относительно малым затуханием. Поэтому для количественного анализа динамических воздействий на здания в первую

очередь необходимо применять обоснованные расчетные модели, учитывающие как конструктивные особенности здания, так и особенности передачи динамических воздействий на его конструкции [1-6].

В качестве объекта моделирования передачи через грунт динамических воздействий, рассмотрим жилое здание в г. Запорожье по адресу: пр. Ленина, 185, расположенное вблизи оживленной транспортной магистрали.

Жилой 5-этажный дом, построенный в 1936-1937 гг., восстановлен после пожара в 1946 г. Здание относится ко II группе капитальности с нормативным сроком эксплуатации 125 лет. Здание имеет Г-образную конфигурацию в плане, с размерами каждой из сторон: длина – 53,8 м, ширина – 15,2 м, длина – 45,6 м, ширина – 13,8 м. В здании имеется подвал глубиной 3,2...3,4 м. Деформационные швы и другие конструктивные защитные мероприятия от воздействия неравномерных осадок основания отсутствуют. Капитальный ремонт здания за период эксплуатации с 1946 г. не производился. Проектная документация на здание отсутствует.

Конструктивная схема здания состоит из несущих продольных и поперечных стен, включая несущие кирпичные столбы. Стены – кирпичные из глиняного обожженного кирпича М100 на растворе М30, М50, толщина стен 510 мм. Фундаменты под несущие стены ленточные из бутового камня М200 на растворе М15 толщиной 1,2 м. Междуетажные перекрытия – монолитные железобетонные, сборные и деревянные по балкам из железнодорожных рельс и прогонам из двутавра № 20...24. В подвале главные балки из монолитного бетона В15. Перегородки – кирпичные из шлаковых плит толщиной 8 см и деревянные щитовые. В уровне перекрытий 3 и 4 этажей наружные стены соединены тяжами из стержней Ø 25 мм по стенам лестничных клеток, ранее имевшим вертикальные трещины.

Развитие неравномерных осадок основания обусловили необходимость повторного обследования здания и оценку состояния его конструкций, определения причин дальнейшего развития деформаций, а также оценку динамических воздействий, передающихся через грунтовое основание на здание от транспорта, движущегося по проспекту Ленина – центральной магистрали г. Запорожья.

Основанием здания являются суглинки лессовые естественного сложения, полутвердой консистенции. Специальной подготовки основания не выполнялось. Причиной деформаций здания является проявление просадочных свойств грунтов основания по причине их замачивания из водонесущих коммуникаций. Изысканиями не установлены причины активизации деформационного процесса строительных конструкций здания в сентябре-октябре 2002 г. Предположительно, это также произошло из-за аварийной

утечки из водонесущих коммуникаций. Динамические воздействия от транспорта способствовали развитию деформаций.

Хотя фактическое минимальное расстояние от обследуемого здания до транспортной магистрали составляет 15 м, учитывая особенности данного объекта, возникла необходимость проверки уровня колебаний фундаментов, при котором динамические воздействия не вызовут развития дополнительных деформаций здания.

Для исследования влияния динамических воздействий на эксплуатационные качества здания были проведены измерения уровня колебаний здания в наиболее опасных (ослабленных оконными проемами) и доступных для измерений точках. Задача виброметрических измерений состояла в инструментальном определении частоты и амплитуды смещения несущих стен обследуемых зданий с последующим вычислением скорости и ускорения колебаний, и сопоставлении этих величин с нормативными значениями ВСН 490-87 «Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки» и соответствующих санитарных норм [7].

Для исследования влияния воздействий от транспорта на эксплуатационные качества здания были проведены измерения уровня колебаний в наиболее опасных (ослабленных оконными проемами) и доступных для измерений точках здания. Задача виброметрических измерений состояла в инструментальном определении частоты и амплитуды смещения несущих стен обследуемых зданий при транспортных воздействиях (с последующим вычислением скорости и ускорения колебаний) и сопоставлении этих величин с нормативными значениями.

Для решения этой задачи был использован виброметрический комплекс: датчики И001 в комплекте с самописцем уровня ЭК ИТ-04 для регистрации смещений в диапазоне частот 2...30 Гц. Для оперативной оценки уровня колебаний, настройки комплекса и уточнения мест расстановки датчиков использовался также электронный цифровой виброметр БИП-7. Были проведены измерения вертикальных и горизонтальных колебаний здания при прохождении трамвайных поездов и автомобильного транспорта по магистрали. Вибродатчики устанавливались в оконных проемах помещений третьего этажа и ориентировались для восприятия вертикальных и горизонтальных колебаний.

При движении трамвайных поездов и автотранспорта зафиксированы следующие максимальные величины колебаний:

- вертикальных: $f = 11$ Гц; $A = 4,5$ мкм; $v = 0,312$ мм/с; $a = 21,2$ мм/с² ;
- горизонтальных: $f = 13$ Гц; $A = 4,1$ мкм; $v = 0,335$ мм/с; $a = 27,3$ мм/с² .

В соответствии с таблицей 2 [1], для бескаркасных зданий с несущими стенами и III группой грунтов оснований, допустимое ускорение вертикальных колебаний фундаментов, при котором не происходят дополнительные деформации оснований, составляет 150 мм/с^2 , что значительно больше, чем фактически замеренные значения.

Для моделирования этих воздействий с учетом их передачи через грунт воспользуемся конечноэлементным подходом, реализованном в программном комплексе LIRA-Windows. В качестве вариантов для сопоставления воспользуемся приложением динамических воздействий к пространственной модели здания в точках их непосредственного замера (вариант 1), и передачей воздействий от транспортной магистрали через грунтовое основание, смоделированное объемными конечными элементами (вариант 2).

На рис. 1 приведены используемая в численном эксперименте расчетная модель и первые три формы вынужденных колебаний здания при непосредственном приложении динамических реакций, полученных в результате натурных замеров, к элементам здания, на рис. 2 – та же модель с передачей динамических воздействий через грунтовое основание.

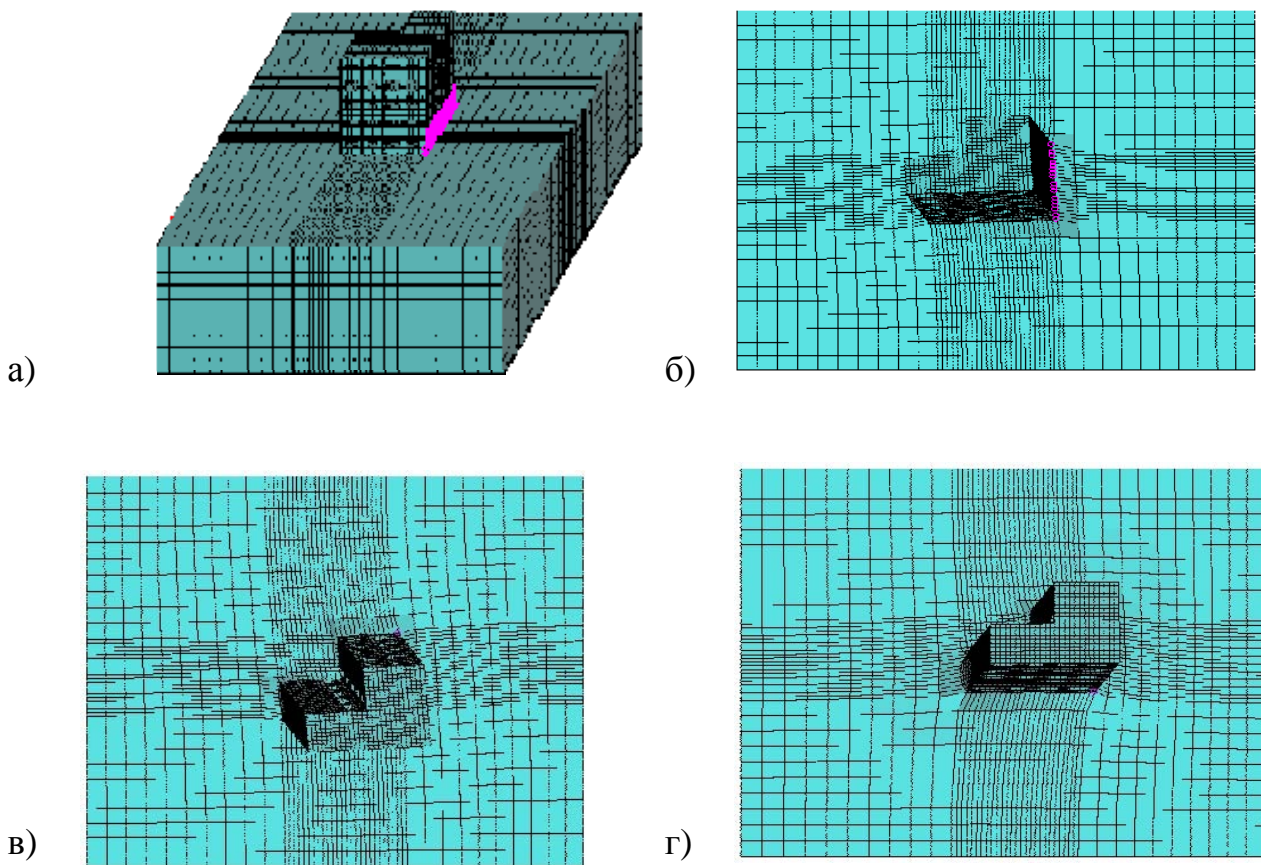


Рис. 1 – Вынужденные колебания здания от динамических воздействий (вариант 1) по формам колебаний: а) фрагмент расчетной модели; б) форма 1; в) форма 2; г) форма 3

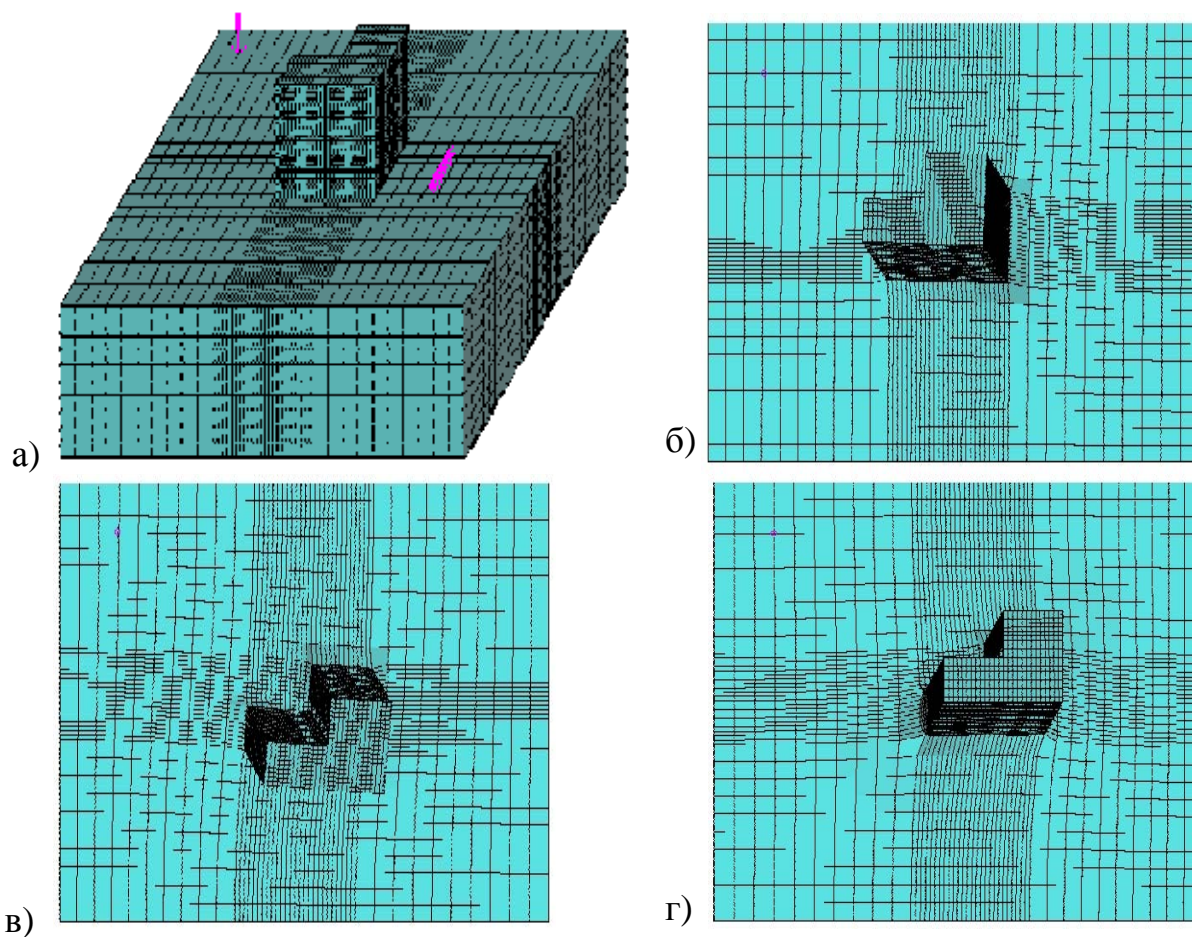


Рис. 2 – Вынужденные колебания здания от динамических воздействий (вариант 2) по формам колебаний: а) фрагмент расчетной модели; б) форма 1; в) форма 2; г) форма 3

Целью численного эксперимента являлось сопоставление динамических характеристик моделей и параметров их НДС для количественной и качественной оценки возможности применения в инженерных динамических расчетах. В качестве динамических воздействий для варианта 1 приняты динамические реакции от движения транспорта, измеренные непосредственно на конструкциях здания. Для модели варианта 2 приняты транспортные воздействия в виде горизонтальных гармонических периодических колебаний.

Информация о размерности рассчитываемых систем: количество элементов 23895, количество узлов 26624, количество неизвестных 82995.

В результате расчета были получены динамические характеристики, из которых анализировались частоты и периоды собственных колебаний системы, а также параметры НДС, из которых анализу подверглись перемещения узлов, усилия в стержневых элементах и главные напряжения в пластинчатых элементах.

Первые формы собственных колебаний здания, на долю которых пришелся максимум использованных модальных масс, приведены на рис. 1-2.

Численные значения динамических характеристик для каждого из вариантов приведены в табл. 1, отклонение параметров от фактически замеренных – в табл. 2 и на рис. 3. При сопоставлении динамических характеристик использовались величины отклонений от значений, полученных при проведении обследования и приведенных к уровню контакта поверхности тротуарного покрытия с цокольной частью здания.

Таблица 1. Динамические характеристики вариантов моделей при передаче динамических воздействий через грунтовые основания

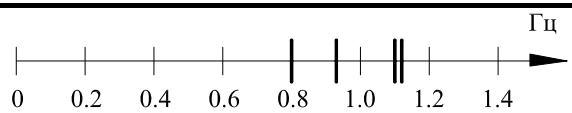
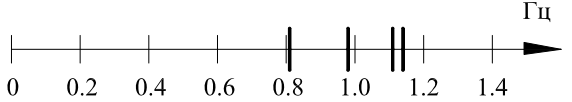
Вариант	Частотный спектр колебаний, Гц	Формы собственных колебаний			
		1	2	3	4
1		0.804	0.929	1.101	1.121
2		0.806	0.937	1.102	1.129

Таблица 2. Сопоставление отклонений характеристик собственных колебаний моделей здания при передаче динамических воздействий через грунтовые основания

Вариант	Динамическая характеристика	Отклонения (%) характеристик по формам собственных колебаний			
		1	2	3	4
2	Частота колебаний	-0.2	-0.9	-0.1	-0.7

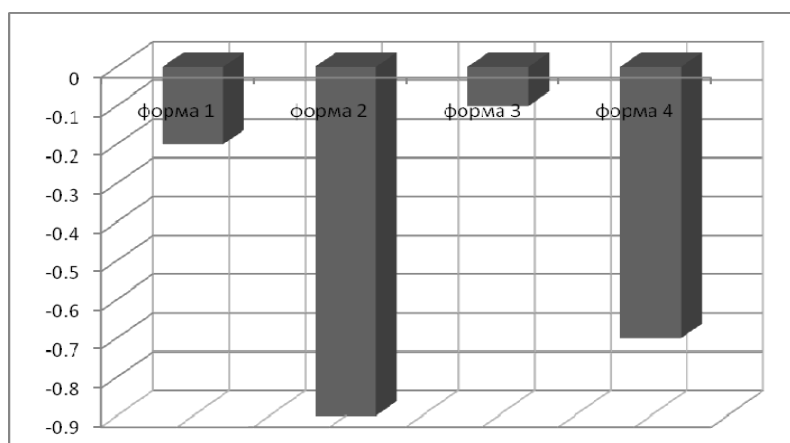


Рис. 3 – Отклонения (%) частот собственных колебаний для модели взаимодействия с передачей динамических воздействий через грунт от фактически замеренных значений

Исследования показали некоторое различие низших форм колебаний при изменении способа передачи динамических воздействий (см. рис. 1-2), хотя

численные значения перемещений близки по величине (см. табл. 1). Также при передаче воздействий от транспорта и забивки свай через грунтовое основание более явно проявляется эффект кручения модели здания в плане за счет его несимметричной структуры и неоднородного состава грунтов основания.

Анализ результатов расчета показал, что отклонение параметров собственных колебаний для использованных моделей не превышает 1 %, следовательно, передача динамических воздействий через грунтовое основание смоделировано корректно.

Для получения параметров динамических реакций здания на воздействия, передаваемые через грунт, воспользуемся возможностью прямого интегрирования уравнений движения, предоставленную ПК LIRA-Windows в программном модуле «Динамика-плюс», для расчета динамических процессов во времени.

Данные по динамическим характеристикам в контрольных точках здания (простенок третьего этажа) по результатам натурных замеров приведены в табл. 3, результаты расчетов для характерных узлов здания – в табл. 4, параметры их вертикальных колебаний (скорости и ускорения) при транспортных воздействиях – на рис. 4, горизонтальных колебаний – на рис. 5.

Расчет динамики во времени выполнялся при условии продолжительности воздействия равной 30 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.

Таблица 3. Динамические характеристики в контрольных точках здания по результатам натурных замеров

Воздействия	Колебания	Динамические параметры			
		Частота, Гц	Перемещение, мкм	Скорость, мм/с	Ускорение, мм/с ²
Транспорт	Вертикальные	11.0	4.50	0.312	21.20
	Горизонтальные	13.0	4.10	0.335	27.30

Таблица 4. Динамические характеристики вариантов моделей при передаче динамических воздействий через грунтовые основания

Воздействия	Колебания	Динамические параметры			
		Частота, Гц	Перемещение, мкм	Скорость, мм/с	Ускорение, мм/с ²
Транспорт	Вертикальные	11.0	4.72	0.323	21.53
	Горизонтальные	13.0	4.26	0.343	26.57

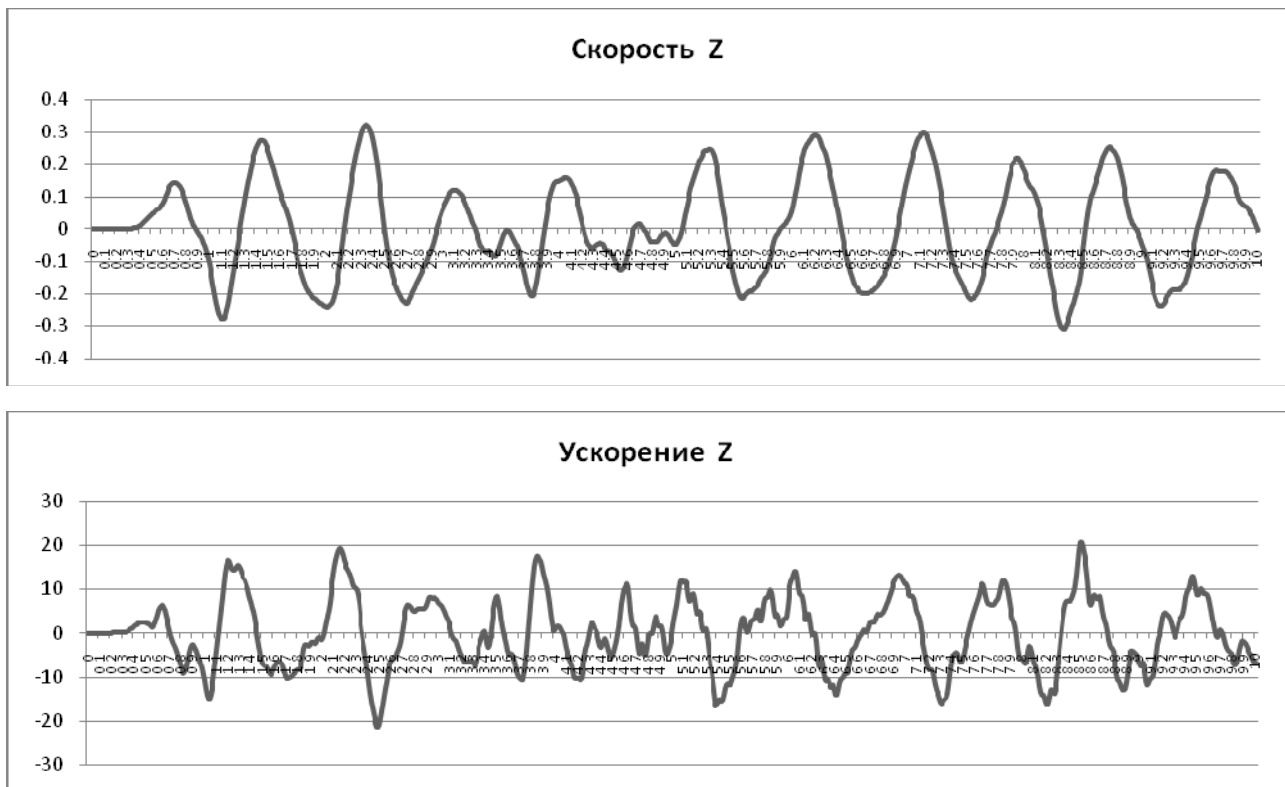
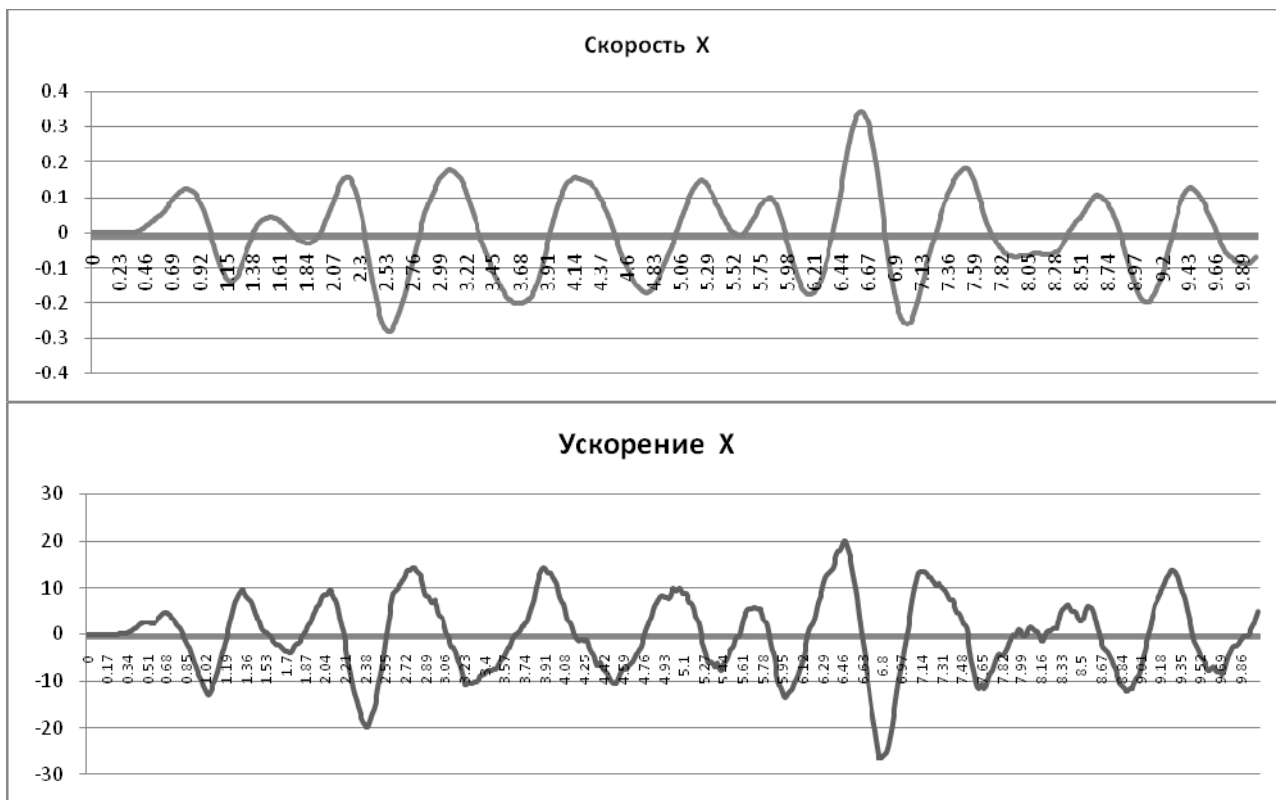
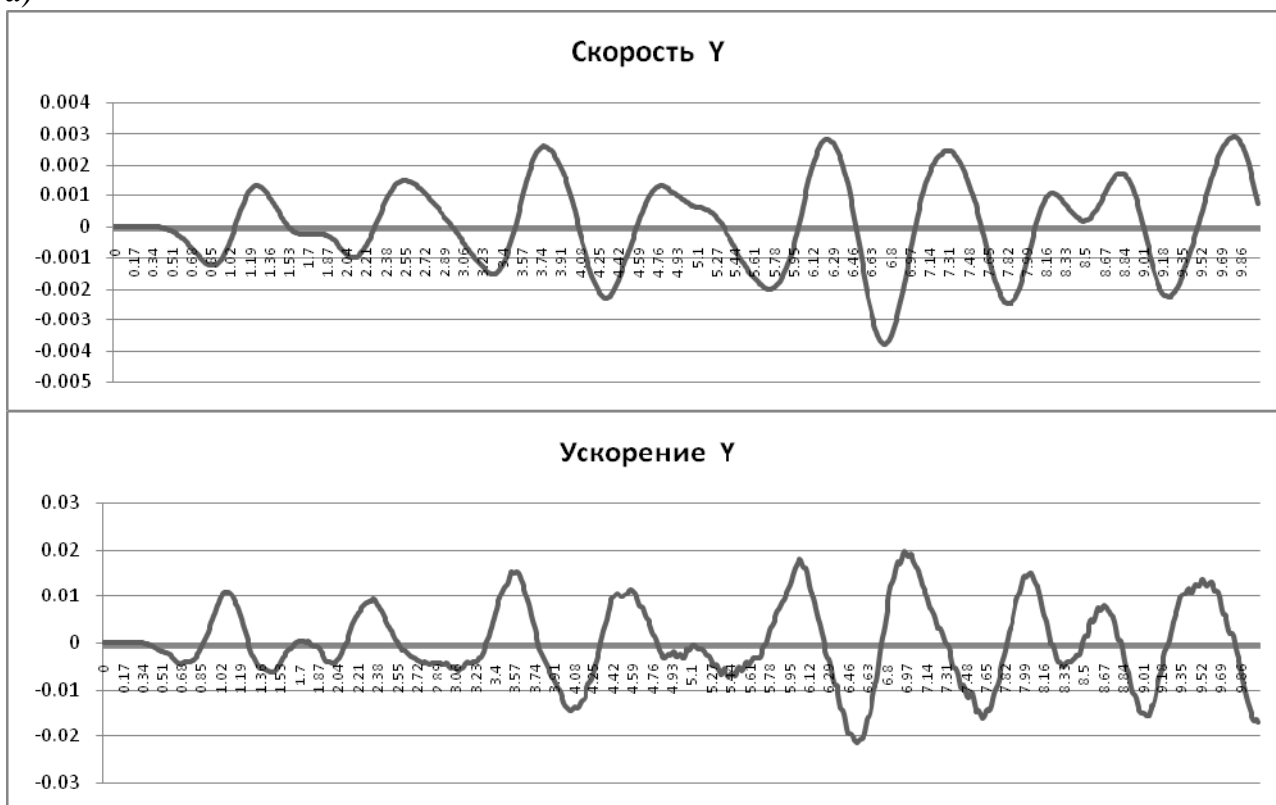


Рис. 4 – Скорости (мм/с) и ускорения (мм/с²) вертикальных колебаний контрольной точки модели здания при передаче через грунт воздействий от транспорта в интервале 10 секунд

Анализ результатов расчета, представленных для контрольной точки (простенок в уровне низа оконных проемов третьего этажа со стороны транспортной магистрали) в табл. 3.4 и их сопоставление с результатами натурных замеров (см. табл. 3.3) позволяют сделать вывод о близости динамических характеристик при учете грунтового массива как средства передачи воздействий. Отклонения параметров составляют 3,8...7,3 % для амплитуд, 2,3...10,2 % для скоростей и 1,5...7,3 % для ускорений.



а)



б)

Рис. 5 – Скорости (мм/с) и ускорения (мм/с²) горизонтальных колебаний контрольной точки модели здания при передаче через грунт воздействий от транспорта в интервале 10 секунд: а) вдоль оси X; б) вдоль оси Y

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 конечных элементов (КЭ), моделирующих основание, однако с учетом односторонних связей между элементами фундамента и грунта.

Выводы:

1. Расчеты по варианту 1 можно рекомендовать при наличии данных прямых замеров параметров динамических воздействий, поскольку процедура составления расчетной модели упрощается и отпадает необходимость моделирования основания, которое может быть учтено введением односторонних связей в узлы контакта модели здания с основанием. При этом предполагается проведение оперативной корректировки расчетной модели с целью приведения в соответствие динамических характеристик рассчитываемой модели и фактически замеренных показателей в контрольных точках здания (места установки датчиков измерительно-регистрирующего оборудования).

2. Расчеты по варианту 2 дают минимальную погрешность параметров динамических воздействий (от 7,3 % для амплитуд и ускорений до 10,2 % для скоростей) 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 НДС зданий в процессе их эксплуатации или при изменении интенсивности транспортных потоков.

Литература

1. Динамический расчет зданий и сооружений : справочник проектировщика / [М.Ф. Барштейн, В.А. Ильичев, Б.Г. Коренев и др.] ; под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

2. Антоновская Г.Н. Экспериментальная оценка динамических воздействий от техногенных источников вибрации на сооружения / Г.Н. Антоновская, Н.К. Капустян, И.М. Басакина // Будівельні конструкції. – К.: ДП НДІБК, 2010. – Вип. 73. – С. 655–660.

3. Ковальчук О.А., Дашевский М.А. Особенности динамической реакции здания повышенной этажности на вибрации, возбуждаемые движением поездов метрополитена // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 4. – С. 24-25.

4. Казакевич М.И. Актуальные проблемы динамики сооружений / М.И. Казакевич, В.В. Кулябко // Металеві конструкції. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 65–74.

5. Казакевич М.И. Введение в виброэкологию зданий и сооружений / М. И. Казакевич, В. В. Кулябко. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – 200 с.

6. Экспериментальная динамика сооружений: мониторинг транспортной вибрации : [монография] / Е.К. Борисов, С.Г. Алимов, А.Г. Усов и др. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 128 с.

7. СанПиН 1304-75. Санитарные нормы допустимых вибраций в жилых домах. – М.: Минздрав, 1975. – 9 с.

Анотація

Проаналізовані параметри динамічних дій від транспорту і причини, які посилюють їх негативний вплив на експлуатовані будівлі. Наведений приклад моделювання динамічних дій на будівлі, розташовані поблизу транспортних магістралей, і результати чисельних досліджень їхніх коливань при різних варіантах моделювання взаємодії з основою при динамічних діях на основі методу кінцевих елементів. Представлений аналіз залежностей динамічних параметрів будівель від способу моделювання їх взаємодії з основою.

Ключові слова: динамічні дії на будівлі, транспортні комунікації, експлуатовані будівлі, метод кінцевих елементів, моделі взаємодії будівлі з ґрунтовими основами

Annotation

The parameters of dynamic effects from transport and causes, increasing their negative influence on exploiting buildings, are analyzed. The example of modeling of the dynamic effects on building, located near-by transport highways, and results of numeral researches of their vibrations at the different models of co-operating of building with foundation under dynamic influences with finite elements method are shown. The analysis of dependences of dynamic parameters of building from the method of modeling of co-operating of buildings with their foundations is presented.

Keywords: dynamic influences on buildings, transport communications, exploiting buildings, finite elements method, models of co-operation of building with foundation