



17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

ВЛИЯНИЕ МЕТРОПОЛИТЕНА НА НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ БЛИЗСТОЯЩИХ ЗДАНИЙ

Мария Барабаш

Институт аэропортов, Национальный авиационный университет, Украина

Эл. почта: bmari@ukr.net

Аннотация. В статье рассматривается влияние вибрационных динамических нагрузок метрополитена на несущую способность конструкций элементов близлежащих зданий. Цель теоретических исследований состоит в разработке методов минимизации влияния вибрационных нагрузок метрополитена на несущие конструкции близстоящих зданий.

Ключевые слова: моделирование, жизненный цикл, вибрационные нагрузки, несущие конструкции, метрополитен, деформации.

Актуальность темы

Развитие современных городов не представляется возможным без соответствующего развития транспортных коммуникаций: автомобильных, трамвайных, железнодорожных, систем метрополитенов различной глубины заложения и других, призванных обеспечивать перевозки всех типов. Любой вид транспорта является источником колебаний, передающихся через грунтовую среду на расположенные вблизи транспортных магистралей сооружения и вызывающих их вибрацию, которая сказывается как на техническом состоянии зданий, так и на санитарно-гигиенических условиях пребывания в них людей. Нередко из-за недостатка свободных площадей в крупных городах строительство жилых и общественных зданий производится вблизи линий метрополитена. По характеру передачи колебательной энергии на сооружение транспортная вибрация является кинематическим возмущением исследуемого сооружения. Рост всех видов грузопотоков, увеличение скорости и интенсивности движения транспорта обуславливают необходимость получения качественных и количественных оценок влияния транспортной вибрации на сохранность зданий. Как в отечественной, так и в зарубежной литературе периодически появляются сообщения об отрицательных последствиях транспортной вибрации, однако она, как правило, не учитывается ни при новом строительстве, ни при реконструкциях существующих зданий и сооруже-

ний. То, что транспортная вибрация не приводит в настоящий момент к чрезвычайным ситуациям, в определенной степени объясняет и практическое отсутствие нормативов, регламентирующих ее интенсивность в численных оценках по критериям прочности и надежности объектов.

Учитывая общее физическое старение существующих зданий, особенно памятников архитектуры, которые не будут сноситься при модернизации исторически сложившихся центров, вопросы обеспечения надежности сооружений, связанные с транспортной вибрацией, могут в ближайшее время стать вполне актуальными. Особенно убыстряется этот процесс в тех случаях, когда проводимые работы нарушают сложившийся гидрологический режим. Прямое применение традиционных теоретических методов решения задач динамики и методы классической строительной механики не дают устойчивых решений, пригодных для практического применения.

Численное моделирование воздействия на сложные строительные сооружения случайных волн той или иной природы является актуальной проблемой для обеспечения надежности и безопасности строительных объектов на этапе эксплуатации.

Наиболее интенсивной и заметной для человека оказывается вибрация, исходящая от поездов и метро. Если человек проживает в непосредственной близости от железнодорожного полотна или над линией метрополитена, то каждый раз при прохождении поезда возникает видимое и слышимое дребезжание

стекло в окнах, удары створок шкафов, подпрыгивание посуды и всех, незакрепленных стационарно мелких предметов быта. Но и в том случае, если человек не наблюдает этих явлений, это не означает, что он не подвергается пагубному воздействию вибрации. Причем вибрация, как правило, усиливается от нижних этажей к верхним.

Область исследований

В традиционной динамике строительных сооружений в настоящее время принята концепция собственных частот колебаний строительных элементов, совпадения которых с частотой нагружения приводят к резонансным явлениям.

До настоящего времени не существовало корректной расчетной методики прогноза значений вибрации от действующих линий метрополитена. Это связано с тем, что механизм возбуждения вибрации изучен недостаточно. Прежде всего, это относится к взаимодействию в системе колесо-рельс и на внешней поверхности обделки тоннеля и излучению упругих волн в грунт.

Грунт является довольно сложной средой, требующей записи громоздких моделей теории упругости и их трудоемкого численного анализа. В дополнение к математическим трудностям проблема осложняется неполнотой данных о геометрических характеристиках и упругих свойствах слоев грунта. В этом случае даже корректно сформулированные модели практически бесполезны вследствие их параметрической неопределенности. В силу этого использование традиционных численных подходов при моделировании распространения упругих волн, основанных на достаточно точных алгоритмах метода конечных элементов (МКЭ), метода граничных элементов (МГЭ), сеточных и вариационных подходах, приводит к избыточным вычислительным затратам при неизбежной потере точности из-за ошибок в задании параметров.

Здесь же возникает и проблема выбора шага интегрирования исходных уравнений.

Среди авторов работ по созданию современных виброзащитных конструкций и методик их расчета выделяются следующие специалисты: В. Ф. Барабашин, М. А. Дашевский (Бычков *и др.* 1986; Дашевский *и др.* 1986), И. Я. Дорман, В. А. Тльичев, С. И. Клинов, Н. А. Костарев, Н. Д. Кравченко, С. А. Курнавин, Ю. П. Назаров *и др.*

Из последних зарубежных публикаций следует отметить работы сотрудников Института исследований Звука и Вибраций Саутгемптонского университета (Англия) Andersen L., Crandall S. H., Gardien W., Jones C. J. C., Mete Kun (Mete Kun 2013), Petyt M., Sheng X., Struit H. G. Thompson D. J., Konstantinos Vogiatzis (Vogiatzis 2011), и др.

Рассматриваемая проблема имеет следующие основные задачи:

– измерение динамики грунта и вибрации сооружений от различного типа транспортных потоков и их сочетаний;

– получение оценок уровня риска превышения динамикой грунта и исследуемых сооружений нормативно-допустимых значений;

– разработка методики численного моделирования влияния воздействий вибраций на здания и сооружения, находящиеся вблизи метрополитена.

В связи с вышеизложенным, решение задачи по уменьшению вибрации конструкций несущих зданий, расположенных вблизи транспортных потоков, представляется как актуальная задача, имеющая важное значение.

Решение проблемы

Для снижения вибраций имеется несколько возможностей:

– использование конструкций зданий и фундаментов, снижающих уровень проникающей вибрации;

– виброизоляция – применение эластичных элементов, устанавливаемых в несущих конструкциях (стенах, колоннах), под фундаментной плитой или в конструкциях пола;

– демпфирование колебаний;

– применение экранирующих устройств (траншей) в грунте.

Методы расчёта, основанные на классических численных методах, не всегда позволяют полностью обеспечить выполнение данных требований. В связи с этим разрабатываются методы расчёта максимально приближенные к реальным условиям. Поэтому большое значение приобретает создание компьютерных моделей адекватно описывающих работу несущих систем зданий при влиянии динамических нагрузок, вызванных воздействиями метрополитена.

Используемые методы. Было проведено исследование для метрополитена глубокого и мелкого заложения.

Компьютерное моделирование произведено с применением программного комплекса ЛИРА САПР. Приведенный в данной работе численный эксперимент дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложной системы «наземная часть здания – основание – грунт – тоннель метрополитена с движущимся поездом», заменяя, таким образом, экспериментальные исследования вычислительным экспериментом. Такая реализация приводит к экономии времени при решении ряда подобных задач, и позволяет сделать соответствующие выводы по напряженно-деформированному состоянию несущих конструкций, подвергающимся постоянному воздействию динамических нагрузок.

Автором настоящей статьи проводились исследования каркасно-монолитных зданий. Задача решалась в плоской постановке. В расчетах колонны моделировались пластинами, ригели моделировались стержнями с жесткими узлами, перекрытия – стержнями с приведенной жесткостью, грунт моделировался пластинами переменной жесткости.

Для учета особенностей поведения несущих конструкций под воздействием динамических нагрузок, в программном комплексе ЛИРА-САПР используется система ДИНАМИКА+ (Городецкий, Евзеров 2009). В основу алгоритма расчета на динамические нагрузки положен итерационный процесс, чередующий этап задания статической нагрузки на конструкцию, затем задание весов масс, затем задание динамической нагрузки на конструкцию. В программном комплексе ЛИРА-САПР реализовано 4 типа динамических нагрузок:

1. Кусочно-линейная (ломаная) нагрузка с произвольным шагом.
2. Синусоидальная нагрузка.
3. Акселерограмма в относительных единицах.
4. Кусочно-линейная нагрузка с равномерным шагом.

Для моделирования динамических нагрузок движения метрополитена используется синусоидальная нагрузка. Задается в виде

$$A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (1)$$

где A – амплитуда, ω – частота, φ – сдвиг фаз, задается также время начала и окончания действия нагрузки;

В соответствующих полях ввода задаются – амплитуда P силы воздействия, частота воздействия в радианах, сдвиг фазы в градусах, а также время начала и окончания воздействия в секундах. Отображение графика $z(t) = P \cdot \sin(\omega t)$ производится при помощи команды просмотра.

Для решения проблемы динамического расчета конструкций используют два основных метода:

- прямое интегрирование уравнений движения;
- разложение по собственным формам.

Метод разложения по собственным формам можно применять только в рамках линейного расчета, так как принцип суперпозиций недействителен в рамках нелинейной теории. Методы же прямого интегрирования носят общий характер и могут применяться для решения всех задач динамического расчета конструкций.

В динамике во времени используется прямое интегрирование уравнений движения. Термин “прямое” обозначает, что перед интегрированием не выполняются никаких преобразований уравнений.

Расчет на динамические воздействия основан, как известно, на решении системы дифференциальных уравнений

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = \bar{q}(t), \quad (2)$$

где M , C , K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости системы; $\bar{u}(t)$, $\dot{\bar{u}}(t)$, $\ddot{\bar{u}}(t)$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений в момент времени t ; $\bar{q}(t)$ – нагрузка, соответствующая моменту времени t .

Считается, что начальные скорости нулевые $\dot{\bar{u}}(0) = 0$, а начальные перемещения получены из решения первого нагружения $\bar{u}(0) = \bar{u}_1$.

Из рассмотрения (1) как системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами следует, что аппроксимировать скорости, ускорения и перемещения можно любыми конечно-разностными выражениями в перемещениях. Для ускорений в момент времени t , используя метод центральных разностей, можно записать

$$\ddot{\bar{u}}(t) = \frac{\bar{u}(t + \Delta t) - 2\bar{u}(t) + \bar{u}(t - \Delta t)}{\Delta t^2}. \quad (3)$$

Ошибка вычислений по формуле (2) имеет порядок Δt^2 , и для вычисления скоростей и перемещений с ошибками того же порядка необходимо использовать выражения

$$\dot{\bar{u}}(t) = \frac{\bar{u}(t + \Delta t) - \bar{u}(t - \Delta t)}{2\Delta t}, \quad (4)$$

$$\bar{u}(t) = \frac{\bar{u}(t + \Delta t) + \bar{u}(t - \Delta t)}{2}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (2), (3) и (4) в выражение (1) и определяя вектор $(\bar{u}(t + \Delta t) + \bar{u}(t - \Delta t))$, получаем следующую систему уравнений:

$$\left[\frac{2M}{\Delta t^2} + \frac{C}{\Delta t} + K \right] (\bar{u}(t + \Delta t) + \bar{u}(t - \Delta t)) = 2 \left(q(t) + \frac{2M}{\Delta t^2} \bar{u}(t) + \frac{C}{\Delta t} \bar{u}(t - \Delta t) \right). \quad (6)$$

“Новые” перемещения $\bar{u}(t + \Delta t)$ определяются по ранее найденным перемещениям $\bar{u}(t)$ и $\bar{u}(t - \Delta t)$ путем решения системы уравнений (5). Подобные схемы интегрирования называются схемами неявного интегрирования. Данная схема интегрирования получила название модифицированного метода центральных разностей. Выражение (5) является исходным при решении, как линейных, так и нелинейных задач прямым динамическим расчетом в ПК ЛИРА-САПР.

При решении задачи (1) используется согласованная матрица масс, построенная по тем же аппроксимирующим функциям, что и строилась матрица жесткости. При таком подходе учитывается и инерция вращения – появляются “крутильные” элементы матрицы масс.

При интегрировании уравнений движения в окне ПРОЦЕССОРА отображается график кинетической энергии $\left(\frac{1}{2} \dot{\bar{u}}_t^T M \dot{\bar{u}}_t \right)$, который позволяет интегрально судить о характере прохождения процесса. Если дальнейшее интегрирование не представляет интереса, есть возможность прервать процесс интегрирования и просмотреть результаты до точки прерывания.

Влияние вибраций метрополитена на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций зданий

Существует большое число работ, авторы которых имеют разные подходы к расчету зданий и сооружений. Однако не каждый метод позволяет отразить реальную работу несущей системы здания. Большая часть этих методов предполагает определение напряженно-деформированного состояния несущих элементов, исходя из готовой расчетной схемы здания, нагруженной полной нагрузкой. Часть методов ориентирована на определение характеристик только отдельных элементов здания, что также приводит к искажению реальной работы здания. Поэтому требуется их дальнейшее развитие и доработка. Целью теоретических и экспериментальных исследований многих ученых в настоящее время является определение влияния процесса вибраций на напряженно-деформированное состояние элементов несущих систем зданий.

Ни в Украине, ни в странах СНГ, ни в Евронормах нет действующих норм, регламентирующих допустимые уровни вибрации для зданий и сооружений, вызванных транспортной вибрацией. Вибрацию от метро оценивают по санитарно-гигиеническим требованиям. Можно посмотреть СП 23-105-2004 «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена». Но в этом документе описаны некоторые методы оценки вибрационного воздействия согласно санитарным нормам воздействия на людей в ночное и дневное время суток. Однако, нигде в нормативной документации не оговорены методы оценки постоянного воздействия динамических нагрузок на несущую способность конструкций зданий, а также на возможность трещинообразования. При этом, очень важным фактором является возможность вызова колебаний резонанса в сооружении при воздействии внешних динамических вибрационных нагрузок метрополитена.

Исследование собственных частот колебаний строительных конструкций имеет важное практическое значение при решении различных задач динамики, анализ пути распространения вибраций в здании представляет сложную инженерную задачу, которую невозможно решить только экспериментально-теоретическим способом.

В зависимости от конструктивных решений, экономичности и безопасности, а также других условий применяют различные методы численного моделирования воздействия вибрационных нагрузок на многоэтажные здания. Но во всех случаях процесс моделирования заключается в том, что здание представляется в виде системы «наземная часть – основание – грунт». При моделировании обязательно нужно учитывать свойства грунта, тип фундамента, тип конструктивной схемы (схема расположения колонн и диафрагмы жесткости, жесткости конструктивных элементов, толщина плиты перекрытия, способы армирования, тип и марка бетона основных несущих конструкций).

Наибольшее влияние на несущую способность здания при действии постоянных динамических нагрузок оказывает состояние грунта. При постоянно действующих вибрациях грунт может давать осадку, изменяются его прочностные характеристики, может возникнуть падение уровня грунтовых вод, и в сочетании с постоянными вибрационными нагрузками, такое состояние может привести к трещинообразованию в конструктивных элементах.

Также большое значение имеет возраст здания, находящегося в зоне воздействия вибраций. Так, например, воздействие вибраций на вновь строящееся здание может быть абсолютно незначительным на прочностные характеристики конструктивных элементов. В этом случае если уровень вибрации в пределах санитарных норм, то на конструкции здания вибрация практически не влияет.

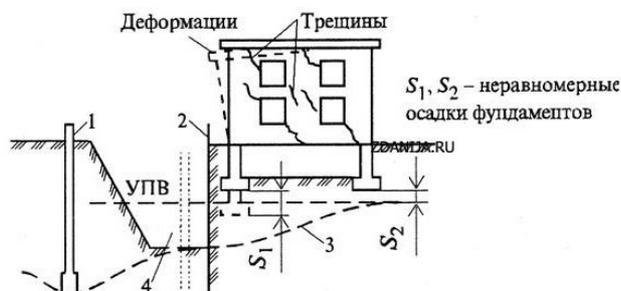
Если же здание имеет более чем тридцатилетнюю историю эксплуатации, возможно развитие деформаций вследствие различных причин, таких как естественное старение материала, просадки грунтов, усталостные повреждения и др. (рис. 1, а, б). И в этих случаях вибрационные нагрузки метрополитена мелкого заложения могут сыграть решающую роль при усугублении деформаций здания, вплоть до нарушения его надежности и безопасности.

На рис. 2, а, б и рис. 3, а, б приведены расчетные схемы и результаты расчета, на которых отображена форма которую принимает расчетная схема при $t = 16$ с. Приведен пример компьютерного моделирования динамических воздействий метрополитена на строящееся здание.

Для изучения поведения работы несущих конструкций многоэтажного здания, расположенного в 10 м от туннеля метрополитена мелкого заложения разработана абстрактная компьютерная модель здания, с фундаментной плитой и моделью грунта, в котором смоделировано движение метрополитена (рис. 2). Поскольку длина поезда метрополитена достигает 140 м, что превосходит длину обычного жилого дома или длину его температурного блока, при проведении численного эксперимента ограничиваемся рассмотрением плоской задачи.

При движении вагонов метрополитена возникает несколько источников колебаний. Это работа двигателя, компрессора, тормозной системы вагона. Колебания с частотой 35–50 Гц вызываются вертикальными колебаниями неподрессоренных масс вагонов. Колесную пару можно рассматривать как систему с одной степенью свободы, упругостью является упругость рельсового основания. Собственная частота такой системы – 40 Гц. Колебания с частотой 50–60 Гц возникают при воздействии горизонтальных колебаний. Движение поездов метрополитена вызывает колебания строительных конструкций зданий с частотой 35–60 Гц и амплитудой от долей микрона до 1–3 мкм. Преобладающими являются горизонтальные колебания. Вертикальные колебания имеют тот же частотный состав вдвое, втрое меньшую амплитуду. Наибольшие амплитуды горизонтальных колебаний

наблюдаются в уровне пола подвала здания. Здесь амплитуды колебаний стен в 2–2,5 раза больше амплитуд лестничной площадки первого этажа. Выше первого этажа амплитуды колебаний могут изменяться как в направлении уменьшения, так и в направлении некоторого увеличения.



а)



б)

Рис. 1. Деформации здания при изменении свойств грунтов

Первопричиной возникновения колебаний является контактное взаимодействие колес подвижного состава и рельсов. Основной причиной возбуждения вибрации системой колесо-рельс является наличие стыков пути, что приводит к подскоку колеса на стыке и неравномерности нагрузки при переходе колеса с одного рельсового звена на следующее (Дубровская, Пятецкий, Файнберг 1986; Ишанходжаев 1986).

Как выше было сказано, расчет производился с помощью подсистемы ДИНАМИКА+ программного комплекса ЛИРА САПР. Была задана вертикальная динамическая нагрузка вдоль оси Z с амплитудой колебаний $\omega = 35$ рад, что соответствует $f = 50$ Гц, количество учитываемых форм колебаний – 100. Выполнен расчет с шагом интегрирования 0,1 с, время интегрирования – 30 с.

Таблица 1. Допустимые средние квадратичные значения виброускорения по оси Z

Обозначение нормативного документа	$a \cdot 10^{-3}, m/s^2$ в октавной полосе со среднегеометрической частотой, Гц	
	31,5	56
СН.2.4/2.1.8.566	7,0	12,75
ISO 2631-2	27,6	49,06
Результаты эксперимента № 1	50,38	112,55
Результаты эксперимента № 2	58,72	138,62

На рис. 2, б отображена форма, которую принимает расчетная схема при $t = 16$ с.

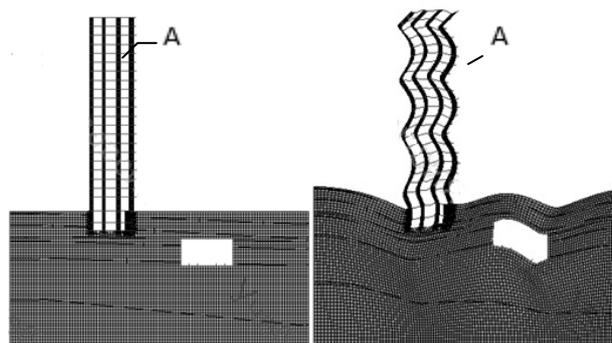


Рис. 2. а) Расчетная схема, до динамического воздействия; б) Форма потери устойчивости здания, после динамического воздействия

На рис.3, а, б приведены расчетная схема здания, с фундаментной плитой и моделью грунта, в котором смоделировано движение метрополитена глубокого заложения.

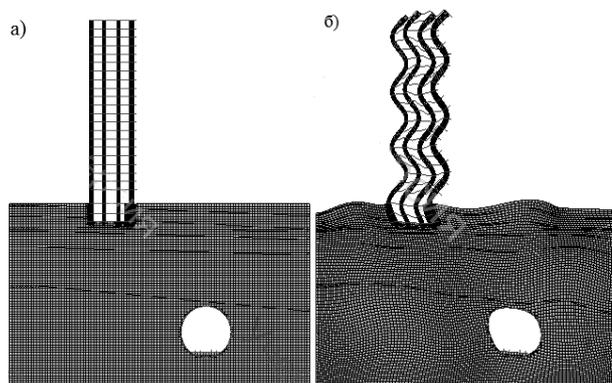


Рис. 3. Расчетная схема для учета воздействия метрополитена глубокого заложения, а – до динамического воздействия; б – после динамического воздействия

В таблице 1 дан сравнительный анализ допустимых виброускорений согласно Санитарных норм, норм ISO, и полученных в численном эксперименте результатов.

При контроле вибрации в жилье от движения поездов метрополитена в качестве нормируемого параметра используется виброускорение, опираясь при установлении допустимого значения на порог чувствительности человеческого организма. Это позволяет перейти к двухметрической оценке воздействия вибрации: по максимальному и эквивалентному значениям нормируемого параметра.

В результате проведения численного эксперимента получены данные, из которых видно, что движение вагона метро (и мелкого, и глубокого заложения) создает ускорение на верхнем этаже вдвое превышающее допустимое. Поэтому рекомендуется при строительстве использовать демфирующие устройства и принимать конструктивные меры по снижению уровня проникающей вибрации.

В каждом конкретном случае требуется тщательный подбор параметров виброзащитных мероприятий с учетом физических моделей применяемых систем, конкретных технических и геологических условий.

Анализ проблемы безопасности зданий и сооружений показал, что при воздействиях, не предусмотренных первоначальным проектом или в аварийных ситуациях при наличии в конструкциях трещин и дефектов, требуется более точное моделирование геометрии и свойств материалов с учетом накопления повреждений и структурного разрушения, способности поврежденных материалов воспринимать внешнюю нагрузку. Поэтому интерес представляют задачи и методы расчета несущей способности и процессов разрушения реальных строительных конструкций, и подходы к моделированию строительных объектов с трещинами и дефектами, полученными на разных этапах жизненного цикла здания с учетом нелинейного поведения и возможного разброса механических свойств строительных материалов.

Проведение таких исследований становится возможным при использовании методов математического моделирования с использованием численных методов и современных программных комплексов.

В процессе исследований было установлено:

– Дополнительные осадки оснований в зависимости от видов грунтов, их состояния и интенсивности вибрации достигают 50–200 мм, носят, как правило, неравномерный характер и их развитие соизмеримо с периодом эксплуатации объекта;

– Проекты вновь возводимых в радиусе действия транспортной вибрации зданий и сооружений должны выполняться с учетом демпфирующих свойств грунтов их оснований, отвечающих расчетным нагрузкам и режимам воздействия транспортных средств;

– Следует отметить практическое отсутствие нормативов на допустимые уровни вибрации грунта и сооружений от транспортного движения. Ориентироваться в данном случае на санитарные нормы следует очень осторожно, поскольку для человека и строительных конструкций вибрации в различных диапазонах частот имеют разные степени опасности. В равной мере очень проблематично распространение на транспортную вибрацию нормативов сейсмостойкого строительства, которые сами в ряде случаев имеют достаточно проблематичный характер.

Литература

- Mete Kun, Turgay Onargan. 2013. Influence of the fault zone in shallow tunneling: A case study of Izmir Metro Tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology* 33: 34–45.
- Vogiatzis, K. 2011. Environmental ground borne noise and vibration protection of sensitive cultural receptors along the Athens Metro Extension to Piraeu, *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT* 11(7): 359–370.
- Бычков, Н. В.; Прусов, В. И.; Фролов, Г. И. 1986. Экспериментальное исследование колебаний фундамента здания, вызванных движением поездов метрополитена // *Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений»*. – Л.: Госстрой СССР, с. 69.
- Городецкий, А. С.; Евзеров И. Д. 2009. Компьютерные модели конструкций. – М: Изд-во АСВ. 360 с.
- Дашевский, М. А.; Миронов Е. М.; Басинкевич Г. И. 1986. Система виброзащиты производственного здания, возводимого над линией метрополитена неглубокого заложения // *Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений»*. – Л.: Госстрой СССР, с. 117–118.
- Дубровская, Т. В.; Пятецкий, В. М.; Файнберг, И. И. О выборе конструктивного решения здания, расположенного над линией метрополитена // *Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений»*. – Л.: Госстрой СССР, 1986. С. 119–120.
- Ишанходжаев, А. А. 1986. О проблеме защиты сооружений от вибраций, возникающих при прохождении поездов метрополитена // *Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений»*. – Л.: Госстрой СССР, с. 122–123.