



19-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2016 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 19th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2016, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 19-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2016 г., Вильнюс, Литва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВЛИЯНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ ПЛОТНОЙ ЗАСТРОЙКИ

Мария Барабаш¹, Марина Ромашкина², Ярослав Башинский³

*Национальный авиационный университет, Кафедра компьютерных технологий строительства
пр. Космонавта Комарова, 1, 03058 Киев, Украина*

Эл. почта: ¹bmari@ukr.net; ²romashkina.nau@gmail.com; ³y.bashik@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена численному исследованию вибрационного воздействия метрополитена неглубокого заложения на несущие конструкции многоэтажного здания. Проанализированы параметры динамических действий от рельсового транспорта (поезд, трамвай, метрополитен) и причины, которые усиливают их негативное влияние на эксплуатируемые здания. Приведен пример моделирования динамических действий метрополитена неглубокого заложения на высотное здание. Были определены вертикальные и горизонтальные составляющие виброскорости на поверхности почвы. Проведен анализ НДС железобетонного каркаса здания на основе метода конечных элементов, в программном комплексе ЛИРА-САПР.

Ключевые слова: колебания; собственные колебания; вынужденные колебания; частота собственных колебаний; вибрационное воздействие.

Введение

Транспортные динамические нагрузки безусловно оказывают влияние на несущие конструкции зданий, находящихся вблизи крупных магистралей с почти непрерывным транспортным потоком, в связи с их высокой интенсивностью и широким распространением. При этом ведущая роль принадлежит рельсовому (наземному и подземному) транспорту – железнодорожным составам, трамваю и метрополитену, что обусловлено, в первую очередь, существенно меньшим демпфированием колебаний при передаче их грунту от стального колеса через жесткую систему “рельс-шпала”. Определенную роль играет также вес источника и присутствие ударных импульсов в спектре воздействия за счет ударов колеса об рельсы на стыках.

Метрополитен, как и всякий рельсовый транспорт, является источником повышенного уровня вибрации и шума. Новые линии метро часто строятся в сложившейся городской застройке, что вызывает рост вибрации в прилегающих к трассам или расположенных над ними зданиях. И также новые здания строятся в местах пролегания метрополитена.

Среди авторов работ по созданию современных виброзащитных конструкций и методик их расчета выделяются следующие специалисты: В. Ф. Барабо-

шин, М. А. Дашевский, 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 (Vogiatzis 2011), Petyt M., Sheng X., Struit H. G. Thompson D. J., Konstantinos Vogiatzis (СП 23-105-2004), и др.

Актуальность задачи защиты зданий от вибраций движущегося транспорта

Транспортные динамические нагрузки вызывают высшие формы собственных горизонтальных колебаний здания и, как следствие, вертикальные колебания (колебания из плоскости) перекрытий именно верхних этажей. Эту особенность динамических откликов элементов конструкции зданий повышенной этажности необходимо учитывать до начала строительства объекта и при проведении контрольных измерений динамических характеристик уже возведенного здания.

Проблема защиты зданий от вибраций, возникающих при движении поездов метрополитена, приобрела особую актуальность в последние годы, когда при строительстве новых линий метрополитена нача-

ли прокладывать, как правило, тоннели мелкого заложения. Этот способ прокладки тоннелей имеет технико-экономические преимущества по сравнению с прокладкой тоннелей глубокого заложения и в настоящее время является основным. Во многих случаях вибрация внутри зданий значительно превышает допустимые нормы с точки зрения физиологического воздействия на людей и нормальной работы высокоточного оборудования

Анализ транспортных вибраций. Постановка задачи

При проектировании трассы метрополитена мелкого заложения следует учитывать, что при песчаных грунтах вибро смещения фундамента здания на расстоянии, например, 40 м от тоннеля на частоте 31,5 Гц отличаются от вибро смещений фундамента здания, расположенного вблизи тоннеля, более чем в 10 раз. При плотных грунтах (супесях, суглинках) амплитуды колебаний фундаментов снижаются на расстоянии 40 м меньше чем в два раза (Kun, Onargan 2013).

Реакция здания и характер распространения вибрации зависит не только от уровня и спектрального состава колебаний, передающихся через грунт, но и от динамических характеристик несущих и ограждающих конструкций, от конструктивной системы. Главным образом, это касается частот собственных горизонтальных колебаний зданий и вертикальных колебаний элементов перекрытий, типа грунта, расстояния до источника вибрации и др.

При строительстве здания вблизи линий метрополитена (особенно неглубокого заложения) необходимо учитывать, что частота вибрации обделки тоннеля метро составляет от 28–35 Гц (сборные обделки) до 60–70 Гц (монолитные обделки) и через грунт передается на фундамент здания. В результате преобладающие частоты, передающиеся на здания, могут составлять от 20 до 80 Гц. Время однократного воздействия внешней вибрации определяется скоростью поездного состава и составляет 8–15 секунд (Борисов *et al.* 2007; Динамический... 1984). Основным источником вибрации является удар при прохождении колеса поездного состава через рельсовый стык. Возникающая при этом вибрация обделки тоннеля гаснет к моменту прохода через стык следующего колеса.

На это воздействие накладывается поличастотная вибрация, возникающая от неидеально гладкой поверхности материала колеса и рельса, от деформированных колес, а также от эффекта «вихляния» состава при движении. На фоне такого воздействия преобладающим является вибрационное воздействие в диапазоне частот 25–50 Гц. Если эта частота колебаний близка к собственной частоте обделки, то даже с учетом фильтрующих особенностей грунта, самого строения пути, независимо от того виброизолированный путь или нет, волновое излучение может усиливаться (Динамический... 1984; Дубровская *et al.* 1986). Поэтому применительно к метро в общем случае

нельзя говорить об одной преобладающей частоте. В связи с этим, не вдаваясь в конструктивные особенности обделки и верхнего строения пути, можно принять рабочий диапазон частот вибраций от метро 20–70 Гц. Характерной особенностью указанного диапазона является то, что собственные частоты перекрытий зданий, как правило, попадают в этот диапазон (Динамический... 1984; Дубровская *et al.* 1986; Ишанходжаев 1986).

Для сравнения интенсивность колебаний грунтов вблизи метрополитена соответствует 6, 7 – балльному землетрясению. Карта в институте геофизики говорит о том, землетрясение магнитудой 5 – на большинстве территорий Украины происходит раз в 100 лет. 6 – балльное – раз в 5 тысяч, то есть вероятность возникновения землетрясения в зоне Киева и Киевской области достаточно мала. При этом постоянно действующая вибрация от движущего транспорта, но с относительно малой амплитудой колебаний может привести к повреждениям несущих конструкций, трещинообразованию и, если не применять меры, даже к разрушениям.

Рассматриваемая проблема имеет следующие основные задачи:

- исследование динамики грунта и вибрации охраняемых сооружений от различного типа динамических нагрузок;
- получение оценок уровня риска превышения параметров НДС в несущих конструкциях близстоящих зданий нормативно-допустимых значений;
- разработка методики проектирования для зданий-аналогов.

Математические зависимости

Вертикальные и горизонтальные составляющие виброскорости на поверхности грунта определяются по формуле:

$$v_{1,2}(i) = \sqrt{v_R^2 + v_{1,2l}^2}, \quad (1)$$

здесь v_R – виброскорость, вызванная волной Рэлея, вычисляемая по формуле

$$v_R = \sqrt{\frac{R_0}{H_0}} v_{\max} \exp(-\beta \cdot k_R \cdot x), \quad (2)$$

β – коэффициент затухания в грунте; k_R – волновое число волны Рэлея; $v_{1,2l}$ – соответствующие проекции виброскорости, вызванные продольной волной в грунте, вычисляемые по формуле

$$v_{1,2l} = \sqrt{\frac{R_0}{\sqrt{x^2 + H_0^2}}} \sqrt{v_{1\max}^2 + v_{2\max}^2} \exp(-\beta \cdot k_1 \sqrt{x^2 + H_0^2}), \quad (3)$$

причем H_0 – глубина, на которой находится лотковая часть обделки тоннеля; x – удаление от продольной оси тоннеля; R_0 – характерный размер, представляющий собой минимальное из $D/2$ – половины ширины

тоннеля; $k_R = \frac{c_1}{\omega}$ – отношению скорости продольных волн в грунте к круговой частоте; $v_{1,2\max}$ – максимальные величины виброскорости на лотковой части обделки тоннеля; v_{\max} – максимальное из них.

Значение наиболее низкочастотных составляющих транспортных динамических нагрузок часто близки к значениям собственных частот колебаний большинства зданий, которые не редко находятся в пределах 2–8 Гц, что может привести к дополнительному проседанию зданий на 50–150 мм (СП 23-105-2004).

Суть работы

Указанные обстоятельства определили основные направления данной статьи:

1. Разработка методики расчета и анализа здания на действие внешнего вибрационного воздействия, вызванного подвижным составом метрополитена, с использованием программного комплекса ЛИРА САПР на основе МКЭ, по которой можно исследовать здания любого типа для оценки и инженерного прогноза поведения конструкций.

2. Разработка методик предварительной оценки и анализа динамических явлений в зданиях повышенной этажности на стадии проектирования, строительства и эксплуатации с целью предотвращения отрицательных эффектов воздействия на элементы конструкции и людей вибраций, вызванных движением поезда метрополитена.

Практически отсутствуют нормативы с количественной оценкой допустимости колебаний (по амплитуде и частоте) не только грунта в районе расположения здания или сооружения, но и всего здания как в целом, так и отдельных конструктивных несущих элементов. Встречающиеся ссылки на то, что если выполнены санитарные нормативы, то и с прочностью все обстоит благополучно, по крайней мере, не имеют под собой научной основы. Следует иметь в виду и то, что конструктивная вибрация непосредственно связана с усталостной прочностью.

В качестве объекта моделирования выбрано здание торгово-офисного комплекса г. Киев, расположенное рядом с метрополитеном неглубокого заложения (рис. 1).

Расчет был осуществлен в программном комплексе ЛИРА-САПР с использованием методов прямого интегрирования уравнений движения. Это итерационные шаговые методы, которые позволяют получить компоненты напряженно – деформированного состояния в любой момент времени с учетом нелинейности (Ковальчук 2004; Барабаш 2013, 2014).

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

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = \bar{q}(t), \quad (4)$$

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 .

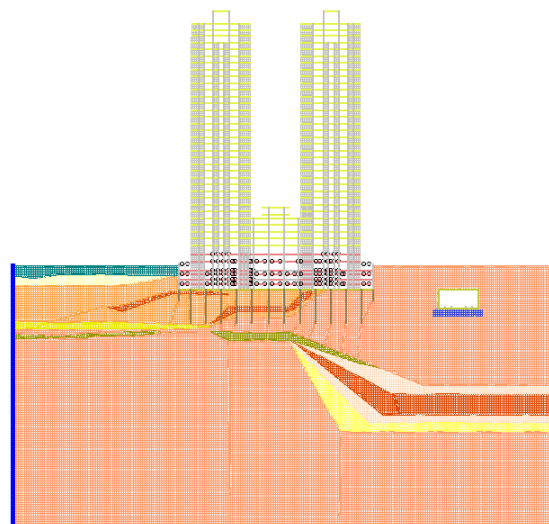


Рис. 1. Расчетная модель с метрополитеном неглубокого заложения

Считается, что начальные скорости нулевые $\dot{u}(0) = 0$, а начальные перемещения получены из решения первого нагружения $\bar{u}(0) = \bar{u}_1$ (Барабаш 2013, 2014).

Задача рассматривается в линейной и нелинейной постановке для метрополитена неглубокого заложения. В ходе исследования было выполнено несколько расчетов с учетом нелинейных свойств грунта, что соответствует реальной работе грунта (рис. 1), с учетом поэтапности возведения здания, что отражает реальное напряженно-деформированное состояние несущих конструкций (рис. 2).

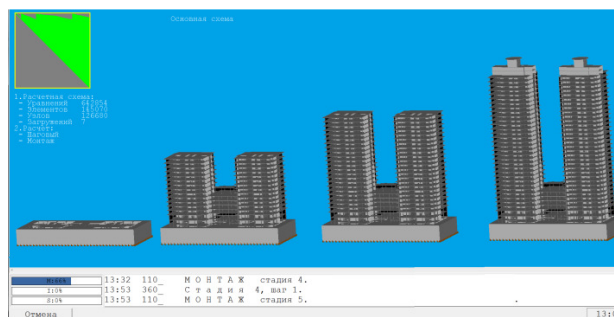


Рис. 2. Расчет а пространственной постановке поэтапностью возведения здания в ПК ЛИРА САПР

Грунт смоделирован плоскими физически нелинейными универсальными конечными элементами. Была задана вертикальная динамическая нагрузка вдоль оси Z величиной 5 т. Согласно рекомендаций

(СП 23-105-2004) при анализе распространения вибрации в грунте от тоннелей метрополитена расчеты следует проводить в нормируемых октавных диапазонах со среднегеометрическими частотами 16, 31,5 и 63 Гц, так как именно в этих октавах при движении поездов метрополитена наблюдаются наибольшие превышения значений.

В статье представлены исследования вибрации на различных этажах здания с частотой колебаний $\omega = 35$ рад, что соответствует $f = 5.57$ Гц. Это частота, близкая к значениям собственных частот колебаний большинства зданий. Выполнен расчет с шагом интегрирования 0,1 с, время интегрирования – 30 с.

Для оценки влияния динамических воздействий на эксплуатационные характеристики здания были выполнены измерения уровня колебаний здания в контрольных точках (табл. 1) по данным натурных замеров и результатам расчета.

Таблица 1. Динамические характеристики в контрольных точках здания

Данные	Расположение контрольных точек	Динамические характеристики		
		перемещений, мкм	скоростей, мм/с	ускорений, мм/с ²
Натурные замеры	1-й этаж	0,26...0,68	не измерялась	не измерялось
	18-й этаж	0,37...1,78	не измерялась	не измерялось
Результаты расчета	1-й этаж	0,24...0,61	0,069...0,071	0,458...0,736
	18-й этаж	0,35...1,62	0,070...0,077	0,321...0,733

Получены следующие результаты:

Постоянно действующие колебания метрополитена, особенно при его торможении, частотой поряд-

Литература

- Kun, M.; Onargan, T. 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.
- Барабаш М. С. 2014. *Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография*. К.: Изд-во «Сталь». 301 с.
- Барабаш, М. С.; Гензерский, Ю. В.; Овчарова В. 2013. Численное моделирование воздействия динамических нагрузок метрополитена на близстоящие здания, *Містобудування та територіальне планування: Наук-техн. збірник* 48: 46–52.
- Борисов, Е. К.; Алимов, С. Г.; Усов, А. Г. 2007. *Экспериментальная динамика сооружений: мониторинг транспортной вибрации*. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 128 с.
- Динамический расчет зданий и сооружений: справочник проектировщика*. 1984. [М. Ф. Барштейн, В. А. Ильичев, Б. Г. Коренев и др.]; под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. М.: Стройиздат. 303 с.
- Дубровская, Т. В.; Пятецкий, В. М.; Файнберг, И. И. 1986. *О выборе конструктивного решения здания, расположенного над линией метрополитена. Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений»*, 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.
- Ковальчук, О. А.; Дашевский, М. А. 2004. Особенности динамической реакции здания повышенной этажности на вибрации, возбуждаемые движением поездов метрополитена. *Промышленное и гражданское строительство* 4: 24–25.
- СП 23-105-2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. М.: Госстрой России. 2004. 42 с.

ка 25 Гц приводят к колебаниям всего здания, что может привести к трещинообразованию.

Анализ результатов расчета, представленных для контрольных точек здания (простенок и подоконная часть в уровне низа оконных проемов 1-го и 18-го этажей) в табл. 1 и их сопоставление с результатами натурных замеров позволяют сделать вывод о близости динамических характеристик (виброперемещений) при учете грунтового массива как средства передачи воздействий.

В современных нормах проектирования многоэтажных и высотных зданий отсутствуют рекомендации по учету динамических нагрузок малой амплитуды. Но исследования напряженно-деформированного состояния несущих конструкций фундамента, колонн, пилонов показывают необходимость учета влияния нагрузок движущегося транспорта.

Выводы

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.