

Ключові слова: методика, моделювання, скінченно-елементні моделі, зростаюча жорстка сила відновлення, нелінійно пружна основа, ПК ЛІРА-САПР.

Annotation. Article is devoted to the problem of creating finite element models for the calculation of structures on a nonlinear elastic foundation with increasing stiffness during loading and modeling support links with stiff restoring force in the medium LIRA-SAPR.

Key words: methods, modeling, finite-element models, stiff restoring force is nonlinear elastic foundation, beam, plate, LIRA-SAPR.

Стаття надійшла до редакції у листопаді 2013р.

УДК 624.042.8:69.032.22(043.2) Башинський Я.В., магістр,³¹
молодший науковий співробітник
Науково-дослідний інститут
будівельного виробництва,
м. Київ, Україна

ОСОБЕННОСТИ ВИБРОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ ВБЛИЗИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Аннотация. В городах со сложившейся застройкой, линии метро, как правило, проложены под землёй и лишь иногда выходят на поверхность или на эстакады. Данная статья посвящена исследованию проблем, связанных с пагубным влиянием метрополитена на здания. Рассматривается эмпирический подход на примере высотного здания у метрополитена в г. Киев, Украина.

Ключевые слова: метрополитен, вибрации, цифровая модель.

Введение. 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.

³¹ © Башинський Я.В.

Ґрунт являється доволно складною середой, требующою записи громоздких моделей теорії упругості і їх трудоємкого численного аналізу. В доповнення к математическим трудностям проблема ускладнюється неповнотою даних о геометрических характеристиках і упругих свойствах слоїв ґрунта. В цьому случаї даже коректно сформулировані моделі практически бесполезні вслідствие їх параметрическої неопределенности. В силу цього використання традиционных численных підходів при моделюванні розпространення упругих волн, основаних на достаточнo точних алгоритмах метода кoнечних елементів, метода граничных елементів, сеточних і варіацiонних підходах, приводить к избыточним вичислительним затратам при неизбежной потере точности из-за ошибок в задании параметров. Здесь же возникает и проблема выбора шага интегрирования исходных уравнений.

Общие положения. Расчет вибрации от движения поездов метрополитена проводится при прогнозировании ожидаемых значений вибрации в зданиях, расположенных в зоне возможного влияния проектируемых линий метрополитена, с целью проверки их на соответствие требованиям СНиП 32-02, а также при разработке конкретных технических решений по виброзащите зданий и сооружений.

Не идеально гладкая поверхность материала колеса и рельса, деформированные колеса, эффект виляния поезда при движении создают поличастотную вибрацию. Наиболее опасным является ударное воздействие (25-50 Гц).

Продолжительность колебаний в зданиях, которые вызваны поездом метрополитена, составляют, примерно, 10 с. В часы пик на трассе метрополитена может проходить в

Проблеми розвитку міського середовища. Вип.2 (12) 2014

обоих направлениях до 25 пар поездов. Соответственно, продолжительность действия колебаний может достигать 10-20% общего времени работы метрополитена.

Спектральный состав этих колебаний достаточно широк – 5-100 Гц, но основная энергия колебаний сосредоточена в более узком диапазоне – 35-60 Гц. Максимальные амплитуды колебаний строительных конструкций и сооружений, которые находятся вблизи линий метрополитена, равны нескольким микронам. Обычно амплитуда колебаний редко превышает 1 мкм. Колебания такой интенсивности не влияют на прочность строительных конструкций. Вместе с тем, скорость колебаний может быть 0,5 мм/с, а ускорение колебаний – 20 см/с². Колебания такой интенсивности уже могут быть ощутимыми и создавать дискомфорт.

Техногенные динамические нагрузки распространяются, как правило, в верхней части почвенной массы до глубины 10-15 м, потому что основная часть энергии переносится к зданию поверхностными волнами Рэлея, которые быстро затихают с увеличением глубины. Примерно до такой отметки углубляются фундаменты большинства общественных зданий, жилых домов в частности. Кроме того, значение наиболее низкочастотных составляющих транспортных динамических нагрузок часто близки к значениям собственных частот колебаний большинства зданий, которые нередко находятся в пределах 2-8 Гц. Поэтому в зонах действия метрополитена иногда наблюдается дополнительное проседание зданий на 50-150 мм.

Оценку вибрации от движения поездов метрополитена в жилых помещениях, палатах больниц, санаториев необходимо проводить для ночного времени суток.

Проблеми розвитку міського середовища. Вип.2 (12) 2014

Рассчитываемыми параметрами вибрации в соответствии с настоящим Сводом правил [1] являются:

- корректированные максимальные и эквивалентные значения виброскорости \tilde{v}_{\max} и \tilde{v}_{eq} , м/с;
- максимальные и эквивалентные значения виброскорости v_{\max} и v_{eq} , м/с, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16, 31,5 и 63 Гц, наиболее характерных для метрополитена.

Расчет корректированных и эквивалентных значений виброскорости следует выполнять по формулам ГОСТ 12.1.012 [2], принимая весовые коэффициенты коррекции для вертикального и горизонтального направлений для случая общей вибрации.

Прогнозирование величин виброскорости в жилых зданиях и подбор виброзащитных мероприятий проводятся в следующей последовательности:

- а) оцениваются величины вибрации обделок тоннелей и лотковой части пути метрополитена;
- б) задается исходное для расчета геологическое строение верхней части грунта: число и толщины слагающих слоев верхней части грунта общей толщиной $N^3 h + 10$ м, где h - расстояние от поверхности грунта до лотка;
- в) определяются массовые, динамические упругие и диссипативные параметры слагающих грунтов: плотность, скорости продольных и поперечных волн и коэффициент затухания в каждом слое;
- г) определяются ожидаемые значения виброскорости поверхности;
- д) проверяются условия и в случае их невыполнения подбираются виброзащитные мероприятия.

Динамические характеристики грунтов, необходимые для расчета величин вибрации в зданиях определяются в процессе геологических изысканий на основе прямых акустических измерений на месте.

Виброзащита зданий, расположенных рядом с метро

Нередко из-за недостатка свободных площадей в крупных городах строительство жилых и общественных зданий производится вблизи линий метрополитена. Такие здания, как правило, испытывают повышенное вибрационное воздействие, и в соответствии с требованиями строительных и санитарных норм должны быть защищены от проникающих вибраций. 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.

В условиях динамического воздействия наиболее устойчивы к вибрациям конструкции из монолитного железобетона. По сравнению со зданиями из сборных железобетонных элементов они позволяют снизить уровни вибраций перекрытий на 5-8 дБ. Такое снижение обусловлено особенностями динамической работы монолитных конструкций, испытывающих не резонансы, а более «мягкие» резонансные явления. Наиболее приемлемой

схемой здания в этом случае является колонный каркас, эффективность которого увеличивается с увеличением толщины плит перекрытий и уменьшением сечений колонн. В качестве фундамента всегда рекомендуется использовать сплошную монолитную железобетонную плиту, сглаживающую влияние неоднородностей грунтового основания и способствующую распределению колебаний по площади фундамента и, следовательно, их снижению. Монолитные здания, построенные для административно-общественных нужд, могут располагаться даже в непосредственной близости от тоннелей метро.

В тех случаях, когда конструктивных мероприятий оказывается недостаточно, может быть использован второй способ - виброизоляция.

Этот способ имеет две разновидности. В первом случае виброизоляторы в виде резиновых, резинометаллических элементов или элементов на основе специальных эластомеров устанавливаются в горизонтальных деформационных швах под несущие стены и (или) колонны. Во втором случае упругий слой из специального эластомера укладывается на бетонную подготовку под фундаментную плиту. При виброизоляции строительных конструкций для надежного снижения колебаний, в общем случае, должно выполняться два условия:

$$f_0 < f_p / (2,0 \div 3,0)$$

где f_0 – частота настройки виброизолированной системы; для резиновых или резинометаллических виброизоляторов и специальных эластомеров f_0 , как правило, не опускается ниже 8-10 Гц; f_p – первая наиболее низкая собственная частота колебаний перекрытий или других

несущих элементов. При установке здания на виброизоляторы или слой виброизолирующего материала приближенно $f_0 = \sqrt{C/M}$, где C – общая жесткость виброизоляторов; M – масса здания, представляющая собой, в общем случае, функцию частоты $M = M(\omega)$.

И второе условие, отражающее волновые свойства длинномерных конструкций, например высоких зданий с монолитными несущими стенами:

$$f = C/2H > f_v = 88 \text{ Гц}$$

где f_v – верхняя граничная частота высшей регламентированной октавной полосы, Гц; C – скорость распространения продольной волны в железобетоне; H – высота здания, м. В высоких зданиях на частотах выше f , зоны и строительные конструкции, удаленные от виброизоляторов за счет изменения фазы колебаний, «динамически отключаются» от виброизоляторов, что приводит к нарушению настройки виброизолированной системы и выведению ее в область малоэффективной и даже неэффективной работы. При этом надо учитывать, что на высокие здания оказывают влияние и ветровые нагрузки, которые в конструкциях на податливом виброизолированном основании могут вызвать значительные низкочастотные колебания сооружения.

К способу виброизоляции относится также применение различных конструкций «плавающего пола», в том числе на деревянных лагах и железобетонных плитах. Работа этих конструкций имеет тот же принцип, что и работа зданий на виброизоляторах. Как показывает практика, при частоте настройки 8-10 Гц «плавающий пол» в силу своей более простой схемы, а значит, более точной настройки способен

обеспечить лучшую эффективность, чем установка зданий на виброизоляторы. Недостатком «плавающего пола» является малое снижение уровней структурного шума, из-за чего может потребоваться дополнительная акустическая обработка помещений. В то же время установка «плавающего пола» – практически единственный способ снижения вибраций в высотных сооружениях и реконструируемых зданиях, где производится замена старых перекрытий на железобетонные с сохранением несущих стен.

Поскольку основной вклад в вибрацию перекрытий вносят собственные колебания, и особенно, колебания на первой собственной частоте, одним из направлений снижения вибраций является демпфирование. Так как резонанс представляет собой процесс, при котором упругие силы компенсируются инерционными силами, размах колебаний перекрытий на собственных частотах определяется исключительно показателями внутреннего трения. Для снижения резонансных колебаний могут использоваться конструкционные материалы с высокими коэффициентами потерь. Замечено, что резонансные колебания перекрытий с уложенной на них цементной стяжкой и полом из керамической плитки в монолитных зданиях снижаются до 5 дБ, а в панельных домах – до 7 дБ. Также отмечено, что уложенные на перекрытие мешки с порошкообразной краской (панельный дом серии П44) практически полностью демпфируют резонансные колебания. Поскольку демпфирование колебаний строительных конструкций и демпфирующие свойства строительных материалов изучены мало, в настоящее время трудно рекомендовать какое-либо надежное средство

снижения вибраций. Возможно, в уменьшении вибрации при применении цементной стяжки важную роль играет поверхностное трение, которое возникает в так называемом «холодном» шве.

Конструктивные методы гашения колебаний. Для проведения численного эксперимента за основу было взято 27-этажное монолитное здание, расположенное вблизи Святошино-Броварской линии Киевского метрополитена. Класс бетона В30, класс рабочей арматуры АIII. Толщина монолитного перекрытия 200 мм, толщина вертикальных несущих конструкций 300 мм. Фундамент – сплошная монолитная железобетонная плита на палевом поле. Численный эксперимент проводился в программном комплексе МОНОМАХ. Расчет производился с учетом ветровых и снеговых нагрузок согласно району строительства. Учтены долговременные и кратковременные нагрузки на плиты перекрытия типовых этажей, а также чердачного перекрытия. Колебания грунтов основания дома вблизи метрополитена соответствуют 6-7 бальному землетрясению.

Проводился расчет здания с толщиной плит перекрытия 200, 300 и 400 мм. Результаты расчетов сведены в таблицу 2 и положены в основу определения коэффициента динамичности β в зависимости от периода колебаний T_i и сечения плит перекрытия.

Коэффициент динамичности β вычислялся по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \text{При } T_i \leq 0,5 \text{ с } \quad \beta_i &= 1 + 4T_i; \\ \text{при } 0,5 \text{ с} < T_i \leq 3 \text{ с } \quad \beta_i &= 3; \\ \text{при } T_i > 3 \text{ с } \quad \beta_i &= 8/T_i^{9/10}. \end{aligned} \quad (1)$$

*Таблиця 1
Частоти и периоды колебаний при изменении
толщины плиты перекрытия*

Толщина плиты, мм	Горизонтальные перемещения, м	Форма колебаний	Частота, Гц	Период, с
200	0,011	1	0,67	1,4876
		2	0,80	1,2576
		3	0,85	1,1008
		4	2,93	0,3418
		5	3,43	0,2916
300	0,008	1	0,81	1,2361
		2	0,92	1,0880
		3	0,96	1,0447
		4	3,25	0,3074
		5	3,85	0,2597
400	4,1e-004	1	0,5	1,5297
		2	0,77	1,2917
		3	0,83	1,2064
		4	2,85	0,3504
		5	3,33	0,3003

Используя данные из таблицы 1 и формулы (1) построены графики зависимости коэффициента динамичности β в зависимости от периода колебаний T_i и сечения плит перекрытия (см. рис. 1). Из графиков видно, что с увеличением толщины плиты перекрытия коэффициент динамичности β имеет тенденцию к уменьшению, а, следовательно, здание становится устойчивым к вибрациям. Также в ходе эксперимента установлено, что с увеличением толщины плит перекрытия наблюдается уменьшение значения горизонтального перемещения.

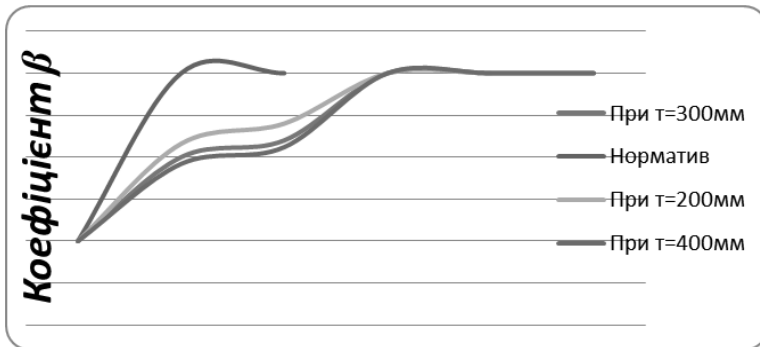


Рис.1. Графік коефіцієнтів динамічності β в залежності від періода коливань T_i і сечення плит покриття

Испытание модели здания на влияния вибрации и применение необходимых мер в ходе проектирования может предотвратить серьезные последствия в будущем. Мы можем увидеть это на следующей модели.

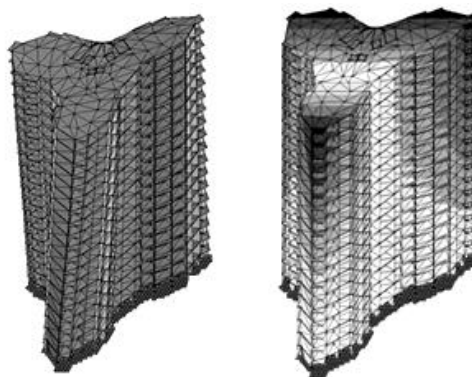


Рис.2. 3D-вид здания: а - деформационная схема; б – горизонтальное перемещения от динамических нагрузок (яркие и темные цвета показывают наиболее напряженные зоны)

На рисунке 2 видно деформацию и места наибольших усилий возникших в здании. При учете влияния вибрации

создается наиболее подходящая модель здания. Таким образом, сохраняется стабильное состояние при влиянии различных видов внешних факторов.

Выводы. В ходе принятия необходимых мер по уменьшению влияния вибрации от метрополитена на несущие элементы необходимо рассматривать различные конструктивные меры, которые могли бы привести к уменьшению колебаний и горизонтальных перемещений.

Список литературы:

1. СП 23-105-2004 Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена.
2. ГОСТ 12.1.012-90 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования».
3. J. Jensen, O. Larsen. Railway Gazette International, Metro Report, 2000, p. 11 – 13.
4. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету: ГОСТ 2775. – М. – Госстандарт, 1988. – 17 с.
5. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Забегаев А.Б. Расчет конструкции на динамические специальные нагрузки. – М.: Высшая школа, 1992. - 319 с.

Abstract. In cities with existing buildings, subway lines are usually laid under the ground, and only occasionally come above the ground or on overpasses. This article is devoted to investigate problems associated with the pernicious influence of subway on nearby buildings. We consider an empirical approach to a high-rise building near subway, Kiev, Ukraine.

Key words: subway, vibration, digital model.

Анотація. У містах із сформованою забудовою, лінії метро, як правило, прокладені під землею і лише іноді виходять на поверхню або на естакади. Дана стаття присвячена дослідженню проблем, пов'язаних з негативним впливом метрополітену на будівлі. Розглядається емпіричний підхід на прикладі висотної будівлі поблизу метрополітену в м. Київ, Україна.

Ключові слова: метрополітен, вібрації, цифрова модель.

Стаття надійшла до редакції у листопаді 2013р.