

УДК 624.073.6:534.014.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИИ МНОГОЭТАЖНОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ, ВЫЗВАННОЙ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

EXPERIMENTAL AND NUMERIC INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF A MULTI-STOREY SKELETON CONSTRUCTION CAUSED BY TRAINS OF THE SHALLOW SUBWAY

Музычкин Юрий Александрович, научный сотрудник, лаборатория ограждающих конструкций РУП «Институт БелНИИС», ул. Ф.Скорины 15 "Б", г. Минск, Беларусь, т.р.2631371

АННОТАЦИЯ

Исследована вибрация грунта перед зданием и вибрация конструкций каркасного здания, расположенного в пределах селитебной зоны, от движения поездов метро мелкого заложения. Получены диаграммы уровней вибрации монолитной плиты перекрытия в зависимости от частоты. Измерены уровни вибрации на перекрытиях и колоннах второго, пятого и девятого этажей. Проведен натурный эксперимент для определения собственных частот колебаний монолитной плиты перекрытия. Результаты численного моделирования собственных частот колебаний фрагмента каркасного здания сопоставлены с экспериментальными данными. На основе решения задачи идентификации параметров уточнены исходные данные для численного анализа фрагмента здания. Предложены рекомендации для построения расчетной модели при выполнении динамических расчетов каркасного здания.

ANNOTATION

Vibration of ground in front of the construction and vibration of the building structure located within the residential zone of movement of trains in shallow-laid subway have been investigated. Diagrams of vibration levels of a monolithic floor slab depending on the frequency have been received. Vibration levels on floor slabs and columns of the second, fifth and ninth floors have been measured. A natural experiment to define base frequencies of vibrations of a monolithic floor slab has been taken. Results of numeric modeling of base frequencies of vibrations in a frame construction fragment have been correlated with experimental data. On the basis of the solution of a task for identification of parameters, initial data for numeric analysis of a construction fragment have been specified. Recommendations for building a design model when performing dynamic analysis of a frame construction have been offered.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные магистрали, в том числе железнодорожные пути и линии метрополитена, являются одними из основных источников вибраций зданий и сооружений, расположенных в черте городской застройки.

Для некоторых типов зданий, особенно старой постройки, расположенных вблизи транспортных магистралей, вибрация, возбуждаемая при движении большегрузных автомобилей или товарных составов, может влиять на прочность и деформативность конструкций, провоцируя появление и развитие трещин в несущих и ограждающих конструкциях.

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

В 1975-1990 гг. кафедрой "Техническая эксплуатация зданий" МГСУ и институтом МОСЖИЛНИИПРОЕКТ были проанализированы данные технических отчетов по обследованию более 1000 зданий постройки 1900-1970 гг. [14], расположенных в различных округах г. Москвы вблизи автомобильных магистралей. Оценивалось наличие дефектов: появление трещин, сколов, разрушение защитного слоя бетона и т. п. в стенах, перекрытиях, фундаментах. Анализ существующих колебаний не проводился.

В различных округах разрушение фундаментов и подземных стен составили соответственно 15–20% и 50–80%, что существенно выше, чем в аналогичных зданиях, расположенных внутри кварталов.

Главным образом, это связано с медленно затухающими осадками на слабых водонасыщенных грунтах при постоянном действии довольно значительных вибраций. Такая картина наблюдается, в частности, в зданиях, расположенных вблизи Окружной железной дороги (ОЖД).

При проектировании трассы метрополитена мелкого заложения следует учитывать, что при песчаных грунтах вибросмещения фундамента здания на расстоянии, например, 40 м от тоннеля на частоте 31,5 Гц отличаются от вибросмещений 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 [6; 15; 16].

Реакция здания и его элементов зависят не только от уровня и спектрального состава колебаний, передающихся через грунт, но и от динамических характеристик несущих и ограждающих конструкций. Главным образом, это касается частот собственных горизонтальных колебаний зданий и вертикальных колебаний элементов перекрытий, вида грунта и др. К настоящему времени проведено значительное число обследований колебаний зданий, расположенных вблизи транспортных магистралей. Однако большинство из этих исследований относятся к конкретным объектам и не ставят цель – дать общие рекомендации по прогнозу колебаний и их возможных последствиях.

Исключение составляют достаточно многочисленные исследования колебаний поверхности грунта и зданий, расположенных вблизи линий метрополитена. Эти обследования проводились, как правило, в рамках решения актуальной и важной инженерной проблемы – виброзащиты зданий от воздействий, возбуждаемых поездами метро. Организациями, имеющими большой опыт создания и устройства систем виброзащиты, являются ЦНИИСК им.Кучеренко и НТЦ Вибросейсмозащита [14].

Однако характер распространения вибрации по зданиям изучен еще недостаточно и во многом зависит от их конструктивной системы. При оценке уровня колебаний зданий, расположенных вблизи магистралей, степени и характера повреждений должен учитываться полный перечень фактов, а именно: вид транспортных средств, частотный спектр возбуждаемой вибрации, тип грунта, расстояние до магистрали, конструктивные особенности зданий и их частотные характеристики. В то же время, усредненный по площади уровень вибрации однослойного перекрытия, дБ, в октавной полосе, содержащей первую частоту собственных колебаний перекрытия, выше уровня вертикальной вибрации прилегающих к нему стен на $\Delta L = 10 \lg(1 + 1,46/\alpha)$, где α — коэффициент потерь

перекрытия (в зависимости от конструкции $\sigma = 0,04...0,15$) [7]. Эта вибрация усиливается или снижается в зависимости от близости частот возмущения к частоте колебаний тоннельной обделки, что и определяет основную частоту колебаний, передающихся через грунт на здание. В результате преобладающие частоты, передающиеся на здания, могут составлять от 20 до 80 Гц. Это означает, что однозначного ответа на вопрос - возбуждается ли близкая к резонансной частоте вертикальная вибрация перекрытий – нет. В [14] дан приближенный способ оценки вибрации перекрытий в зависимости от частот вынужденных и собственных колебаний и уровня колебаний грунта. По сравнению с уровнем колебаний грунта вблизи фундамента уровень колебаний перекрытий в околорезонансных режимах может быть больше в 1,5-3 раза.

Исследований, в которых определялся или хотя бы оценивался характер и уровень колебаний поверхности грунта и расположенных вблизи зданий от автомобильных дорог, мало. Хотя очевидно, что спектр воздействий в этом случае очень широк.

В Республике Беларусь нет действующих норм регламентирующих допустимые уровни вибрации конструкций для зданий и сооружений, вызванных транспортной вибрацией. Единственным документом в данной области является СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-33-2002 "Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий", в соответствии с которым установлены нормы вибрационного воздействия для людей, находящихся в здании.

Вместе с тем, существует ряд международных документов, устанавливающих частотно-зависимые критерии оценки вибрации. Ниже представлены наиболее часто используемые в международной практике критерии оценки вибрации зданий, установленные национальными стандартами и другими нормативными документами зарубежных стран.

Национальный стандарт Германии DIN 4150-3:1999 "Structural vibration – Part 3: Effects of vibration on structures" (Вибрация сооружений. Часть 3. Воздействие вибрации на сооружения).

Предельные значения (рисунок 1) установлены в отношении кратковременной вибрации для пиковых значений скорости на фундаменте здания для трех категорий зданий:

- зданий делового назначения, производственных зданий и сооружений, имеющих аналогичную конструкцию (категория 1);
- жилых зданий и зданий, имеющих аналогичную конструкцию или назначение (категория 2);
- сооружений, не относящихся к категориям 1 или 2. имеющие высокую социальную важность (например, охраняемых памятников архитектуры, категория 3).

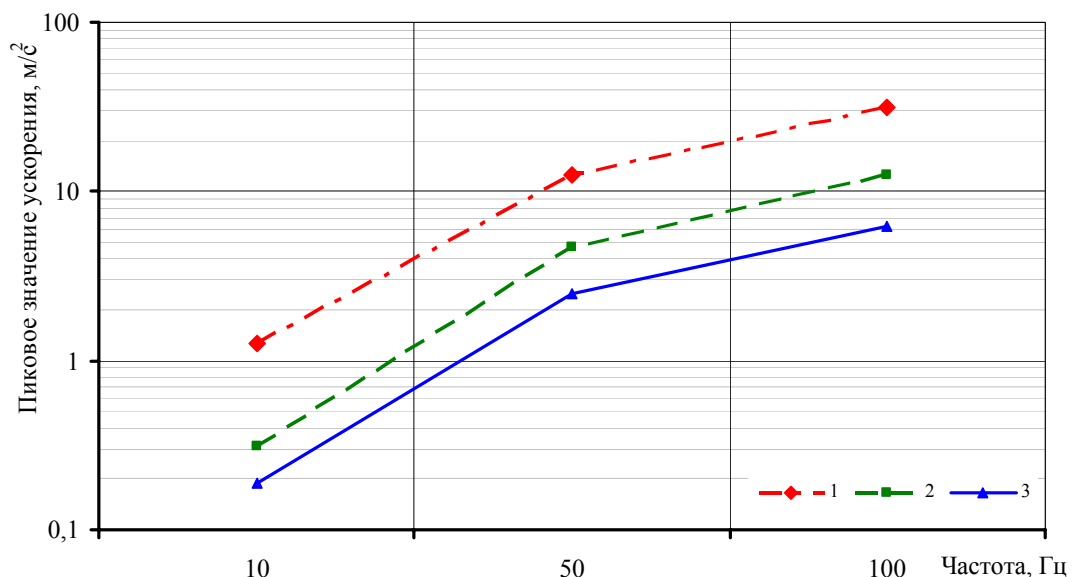


Рисунок 1 – Предельные значения ускорения, измеренного на фундаменте здания

Дополнительно предлагается измерять скорость V в горизонтальном направлении для верхнего перекрытия здания. Предельные значения этой характеристики для кратковременной и продолжительной вибрации приведены в таблице 1. Если предельные значения для перекрытий (стен) превышают указанные в таблице 1, рекомендуется оценить механические напряжения.

Таблица 1 – Рекомендуемые предельные значения скорости V

| Категория сооружения | V , мм/с | |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Кратковременная вибрация | Продолжительная вибрация |
| 1 | 40 | 10 |
| 2 | 15 | 5 |
| 3 | 8 | 2,5 |

Примечание – Приведенные значения могут быть применены к промежуточным перекрытиям здания, а также к его стенам.

Национальный стандарт Великобритании BS 7635-2:1993 "Evaluation and measurement for vibration in buildings — Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration" (Измерение и оценка вибрации в зданиях. Часть 2. Руководство по определению уровней вибрации передаваемой через грунт и приводящей к повреждению зданий).

Предельные значения (рисунок 2) установлены в отношении кратковременной вибрации для пиковых значений скорости на фундаменте здания для двух категорий зданий:

- зданий делового назначения и производственных зданий, имеющих каркасные или армированные конструкции (категория 1);
- жилых зданий и зданий делового назначения, имеющих облегченную конструкцию, конструкцию без армирования или с облегченным каркасом (категория 2);

Предполагают, что умеренные повреждения могут произойти при превышении предельных значений, указанных на рисунке 2, в два раза, а тяжелые – в четыре раза.

В случае низкочастотного сигнала, имеющего значительные составляющие на частотах ниже 4 Гц, рекомендуется дополнительно проводить измерения перемещения. Предельное пиковое значение перемещения для частот ниже 4 Гц равно 0,6 мм.

В случае продолжительной вибрации, способной вызвать резонансы конструкции (особенно на низких частотах), предельные значения, указанные на рисунке 2, рекомендуется уменьшить в два раза.

Комплексный критерий оценки установлен в национальном стандарте Норвегии NS 6141.2001 ("NS 8141.2001 Vibration and shock — Measurement of vibration velocity and calculation of guideline limit values in order to avoid damage of constructions" (Вибрация и удар. Измерение скорости и расчет предельных значений, рекомендуемых с целью предотвращения повреждения сооружений) и распространяется на вибрацию, вызванную земляными работами, сносом сооружений и движением машин.

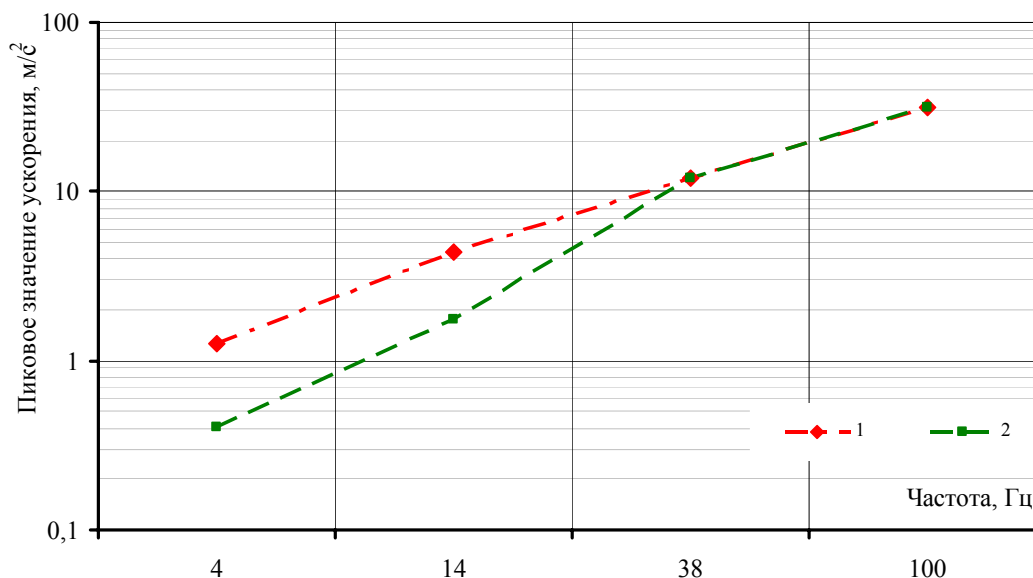


Рисунок 2 – Предельные значения ускорения, измеренного на фундаменте здания

Если проведение земляных работ может вызвать колебания сооружения на частоте резонанса (например, при использовании вибрационных машин или при установке постоянного и кратковременного интервала между пусками электронной системы зажигания при проведении взрывов в ходе строительных работ), то для оценки допустимости возникающих колебаний необходимы дополнительные исследования.

Предельное значение v при кратковременной вибрации определяют для вертикальной составляющей пикового значения скорости по формуле:

$$v = v_0 F_g F_b F_a F_k \quad (1)$$

где v_0 — опорное значение скорости, равное 20 мм/с; F_g — поправка на вид грунта в месте, где установлено сооружение, F_b — поправка на вид сооружения; F_a — поправка на расстояние между источником вибрации и местом ее измерения; F_k — поправка на вид источника вибрации.

Исследование собственных частот колебаний строительных конструкций имеет важное практическое значение при решении различных задач динамики, в том числе сеймики, виброизоляции и акустики [12; 15; 16] анализ путей распространения структурного шума и вибрации в здании представляет сложную инженерную задачу [6].

Для эффективного уменьшения вибрации зданий и сооружений необходимо ее изучение, что позволит рационально выбрать или создать новые технические средства снижения вибрации в жилых зданиях, строящихся или построенных вблизи линий метрополитена мелкого заложения.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ

Измерения выполнялись с использованием виброметра общей и локальной вибрации "Октава 101В", анализатора спектра ZET 017U с обязательной калибровкой перед проведением измерений с помощью калибратора В&К Туре 4291, проходящих ежегодную метрологическую аттестацию. В качестве датчиков использовались три вибропреобразователя AP98-100, регистрирующие виброускорения в трех взаимноперпендикулярных направлениях либо виброускорения одного направления в трех различных точках здания или сооружения. При проведении натуральных испытаний каркаса еще не были установлены на стадии монтажа ни внутренние, ни наружные стены.

Измерения в режиме телеметрии производились в вертикальном и двух горизонтальных направлениях для определения характера и длительности воздействия вибрации, а также для исключения факторов, имеющих случайный характер.

Для определения численных значений уровней вибрации с помощью виброметра проводились измерения тремя вибропреобразователями в режиме автоматической регистрации среднеквадратичных и максимальных уровней виброускорения со временем усреднения 1, 5 и 10 с.

Последующая обработка результатов измерений проводилась в лабораторных условиях на ЭВМ с использованием программных комплексов "Октава", "ZETlab", математического пакета "MATLAB" и с помощью электронных таблиц Excel.

Оценка результатов измерений производилась по ГОСТ 12.1.012 П.6 [1].

При измерении спектров и общих уровней вибрации (СКЗ вибрации) при разбросе значений отсчетов более чем на 1,5 раза (на 3 дБ) производилось еще не менее 2 наблюдений.

Испытания были выполнены на строящемся жилом доме в г. Минске, расположенном на ул. Притыцкого 91. Жилой дом с каркасной несущей системой имеет пять секций, с разной этажностью каждой секции. План здания, разделенного на секции, и расположение оси тоннеля метро относительно здания представлены на рисунке 3



Рисунок 3 – Исследуемая секция здания и расположение тоннеля метро

Характеристики четвертой секции здания:

Грунты: насыпной, толщиной до 0,5 м и далее супесь средней прочности и прочная, плотность 1810 кг/м^3 . Фундамент свайный, цокольный этаж монолитный, толщина стен 400 и 600 мм, бетон класса С16/20, армирование S500 диаметром 12 и 16 мм. Диафрагма жесткости толщиной 200 мм. Шаг колонн нерегулярный (см. рисунок 2.4), бетон класса С40/50, размер колонн 400 x 400 мм; основное армирование S500, 4 стержня диаметром 28 мм. Плита перекрытия монолитная толщиной 200 мм; бетон класса С20/25 – модуль упругости $E_b=32,0 \text{ ГПа}$; $\rho=2500 \text{ кг/м}^3$; нижнее армирование: основное армирование – S500, диаметр 10 мм, шаг армирования 200 мм, $E_s=200 \text{ ГПа}$; верхнее армирование: армирование у колонн – S500, диаметры 12 и 16 мм (продольные и поперечные стержни), длина стержней 2540 мм; шаг армирования 150 мм, $E_s=200 \text{ ГПа}$.

Схема расположения точек измерения вибрации на грунте перед зданием, колоннах и перекрытии показана на рисунке 4.

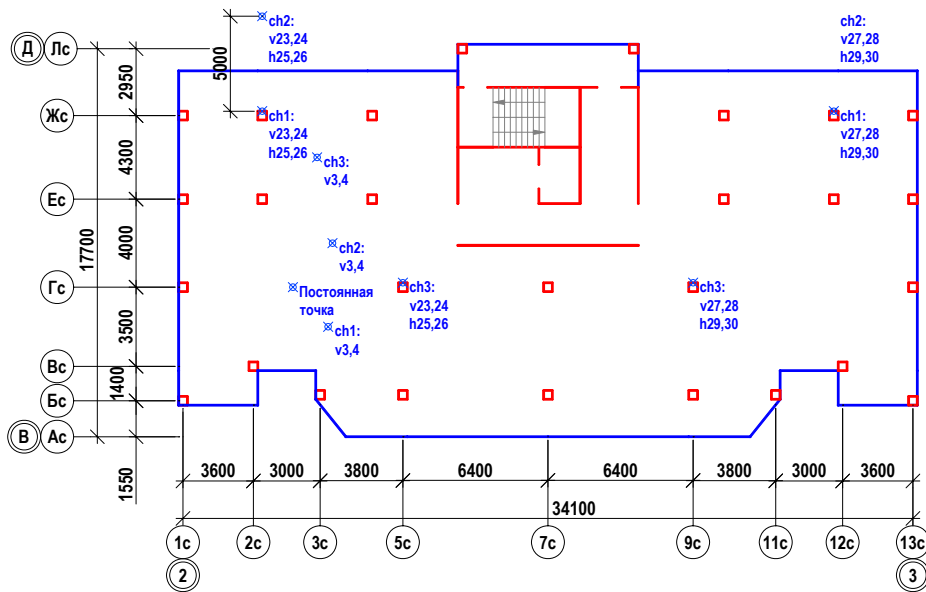
Огибающая узкополосного спектра виброускорения плиты перекрытия – сплошная линия в направлении трех ортогональных осей (уровни фона представлены светлыми линиями тех же цветов), данных по результатам многократных измерений вибраций (не менее 3 часов в каждой точке, интервал движения поездов ~5 минут) представлены на рисунке 5. Уровни виброускорения L_a на рисунках представлены в дБ [1]:

$$L_a = 20 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{a}{1 \cdot 10^{-6}} \right), \quad (2)$$

где $1 \cdot 10^{-6}$ – опорный уровень виброускорения a , м/с^2 .

Анализ движения поездов метро показал, что с увеличением количества пассажиров (час пик между 17 и 19 часами) уровни виброускорения на 3...3,5 дБ выше по отношению ко времени с 19 до 22 часов. Также уровни виброускорения зависят от технического состояния рельсового пути и подвижного состава, скорости движения состава (в час пик скорость, как правило, выше). Все вышеперечисленные факторы сказываются и на частотном распределении уровней виброускорения.

По полученным данным видно, что наибольшие уровни виброускорения плиты перекрытия получены для вертикальной вибрации для диапазона частот от 16 до 80 Гц и превышают значения по другим направлениям более чем на 15 дБ (более чем в 6 раз).



Н
Рисунок 4 – Схема расположения точек измерения на грунте перед зданием и на строительных конструкциях цокольного этажа

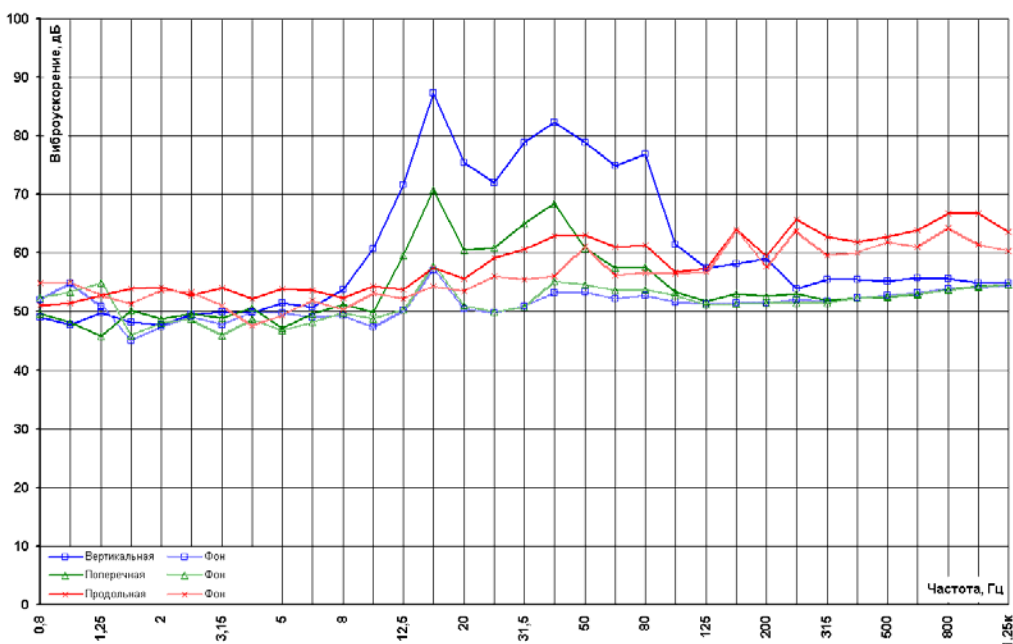


Рисунок 5 – Спектрограмма максимальных уровней вибрации плиты перекрытия в точке ch2-v1,2,3. Синяя линия – вертикальная вибрация; зеленая – поперечная; красная – продольная (светлые линии тех же цветов – уровни фона)

3 МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРАГМЕНТА НА ОСНОВЕ МКЭ

Колебания целого фрагмента с плитой перекрытия, замоноличенной по торцам в обвязочный пояс, были исследованы также на основе метода конечных элементов (МКЭ) [17]. Уравнение МКЭ для свободных колебаний,

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\}, \quad (3)$$

где $[K]$, $[M]$ – соответственно матрицы жесткости и масс, $\{u_i\}$ – вектор-столбец перемещений, было решено с использованием коммерческого программного комплекса ANSYS. Схема сетки КЭ представлена на рисунке 6. В качестве КЭ были приняты оболочечные элементы типа SHELL63 и стержневые – BEAM4. Их общее число – 6528. Полученные таким образом собственные частоты колебаний сопоставлены с экспериментальными данными (см. рисунок 7) представлены в таблице 2.

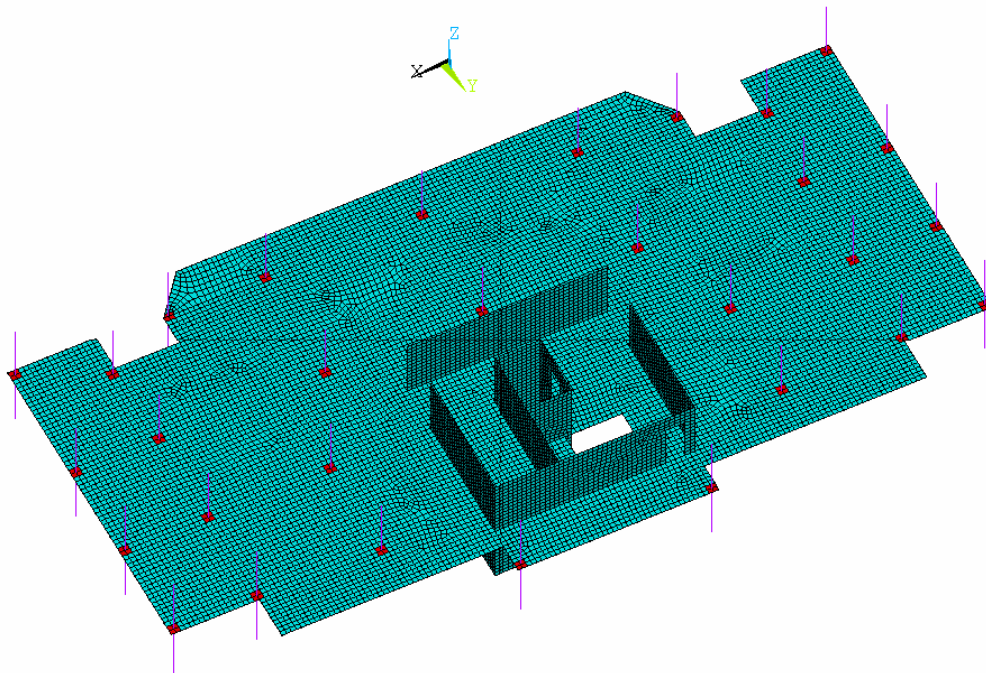


Рисунок 6 – Схема сетки КЭ исследуемого фрагмента

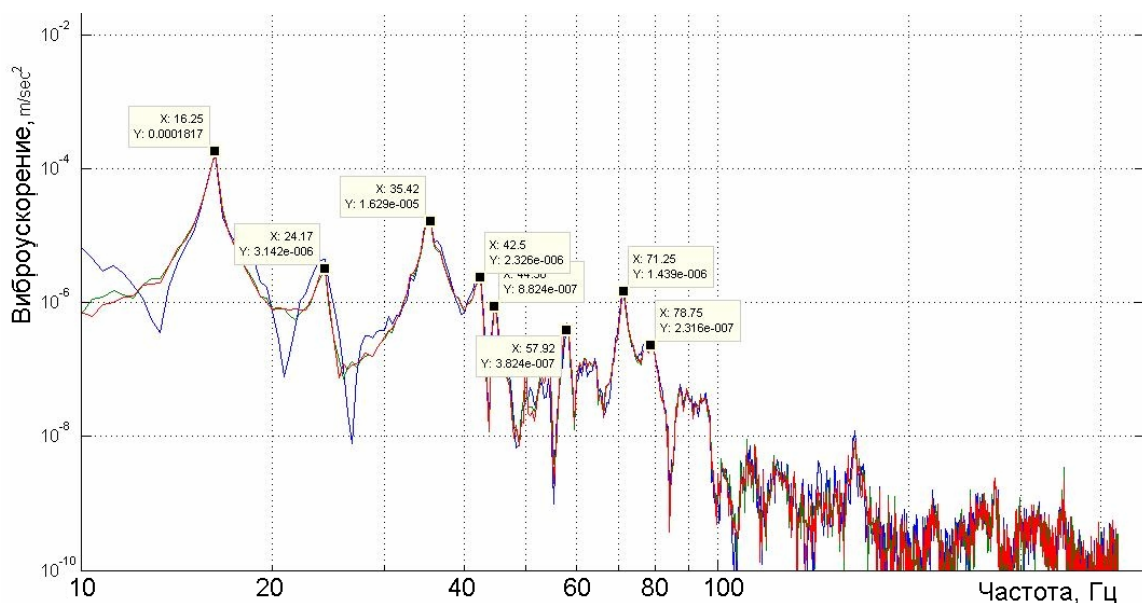


Рисунок 7 –Спектр виброускорения в точке v3-ch1 при ударном возбуждении монолитной плиты перекрытия в середине пролета плиты (см.рисунок 3)

Таблица 2 – Сопоставление экспериментальных данных с расчетными, полученными МКЭ

| | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Экспериментальные данные | 16,25 | 24,17 | 35,42 | 42,5 | 57,92 | 71,25 |
| Модальный анализ, ANSYS | 17,9 | 26,55 | 35,75 | 42,31 | 56,97 | 75,95 |

Важно отметить, что полученные результаты отличаются более чем на 10 % для низшей частоты 16,25 Гц, где получены наиболее высокие уровни вибрации при прохождении поездов метрополитена.

4 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАГМЕНТА МЕТОДОМ МИНИМАКСА

Решение задачи распространения вибрации по строительным конструкциям железобетонного (сборного, монолитного) каркасного здания, вызванной движением поездов метрополитена, сопряжена с большим количеством неизвестных факторов, которыми либо пренебрегают, либо принимают, исходя из их нормативной определенности. С целью снижения неопределенности и приведения динамической работы реального каркаса здания к наиболее близкой эквивалентной модели МКЭ была решена задача идентификации ключевых параметров компьютерной модели. В качестве исследуемых параметров определялись: динамический модуль упругости плиты перекрытия и колонн, а также модуль упругости плиты перекрытия в точке соединения плиты перекрытия и колонны. В различных источниках [3; 4; 10] представлено несколько методов для получения эквивалентной модели путем объединения перемещения стыка стержневого элемента и оболочечного ("плита перекрытия-колонна") для решения задач статики, но не представлено каких-либо рекомендаций для решения задач динамики. Для решения поставленных вопросов решена задача идентификации параметров исследуемого фрагмента [18].

В качестве параметров идентификации для фрагмента перекрытия зданий приняты модули упругости бетона соответственно для плиты, колонны и элемента плиты соединенного с колонной, образующие вектор искомых параметров $x = (E_n, E_k, E_{nk}) \in R^n$, $n = 3$. Критерий оптимальности системы, который необходимо минимизировать, запишем в виде

$$\rho(x) = \sqrt{\sum_{i \in I} \left(\frac{f_{mi} - f_{ci}(x)}{(f_{mi} + f_{ci}(x))/2} \right)^2}, \quad (4)$$

где f_{mi} – измеренные значения частот собственных колебаний, $i \in I$; I – множество рассматриваемых частот;

$f_{ci} \equiv f_{ci}(x)$ – значения частот собственных колебаний, полученные решением задачи МКЭ и зависящие от вектора x . Здесь исследовались три частоты собственных колебаний, $|I| = 3$.

Поскольку задача идентификации системы является некорректной, критерий оптимальности (4) видоизменим,

$$\rho_\alpha(x) = \rho(x) + \alpha \|x\|^2, \quad (5)$$

где α – параметр регуляризации А.Н.Тихонова [13], $\alpha > 0$; $\|x\| = \sqrt{\sum_{i \in I} (x_i^2)}$.

Выбор параметра регуляризации α на k -м шаге процесса вычислений, $k = 0, 1, \dots, K$, производим по формуле

$$\alpha_k = \alpha_0 q^k, \quad q > 0, \quad (6)$$

решая $(K+1)$ раз для этого параметра α_{k+1} следующую задачу:

$$\|x_{\alpha_{k+1}} - x_{\alpha_k}\| \rightarrow \min_{k \in 0:K}, \quad (7)$$

вплоть до приемлемой точности решения исходной задачи (5).

Решение задачи было завершено на 14 шаге по достижении наилучшего значения критерия соответствия искомого решения экспериментальным данным на уровне 0,0397. Точность по отношению к первоначальным данным увеличена в 3,4 раза и в 1,39 раза по отношению к решению задачи методом наименьших квадратов. Полученные в результате решения задачи идентификации искомые значения параметров строительных конструкций представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Оптимальные параметры строительных конструкций, полученные решением задачи идентификации для исследуемого фрагмента

| Название параметра | Исходные значения | Оптимальные значения | Измеренные значения |
|--|-------------------|----------------------|---------------------|
| Модули упругости строительных конструкций | | | |
| EM1 (перекрытие) | 3,2E+10 | 3,024E+10 | - |
| EM2 (колонна) | 3,9E+10 | 4,754E+10 | - |
| EM3 (перекрытие в зоне стыка с колонной) | 3,2E+10 | 1,911E+11 | - |
| Собственные частоты колебаний исследуемого фрагмента | | | |
| FREQS04 | 17,877 | 16,601 | 16,25 |
| FREQS13 | 26,554 | 23,428 | 24,17 |
| FREQS24 | 35,748 | 34,582 | 35,00 |

Полученный в результате оптимальный вектор параметров системы x^* содержит следующие значения модулей упругости бетона: для плиты $E_n = 30,24$ ГПа (уменьшение расчетного модуля на 6 %), для колонны $E_k = 33,67$ ГПа (увеличение расчетного модуля на 18 %) и для плиты перекрытия в точке соединения плиты перекрытия и колонны $E_{нк} = 191,1$ ГПа (увеличение расчетного модуля в 5,97 раза).

При всех последующих расчетах колебаний строительных конструкций четвертой секции здания должны использоваться полученные оптимальные значения модулей упругости для исследуемого фрагмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследование уровней вибрации монолитной плиты перекрытия вызванной движением поездов метрополитена показало, что уровни колебаний существенным образом изменяются при прохождении разных поездов. Наибольшие уровни виброускорения плиты перекрытия получены для вертикальной вибрации для диапазона частот от 16 до 80 Гц и превышают значения по другим направлениям более чем на 15 дБ (более чем в 6 раз).

2. Измеренные значения вибрации отдельных перекрытий исследованного здания значительно (до 2 раз) превышают допустимые нормы по вертикальному логарифмическому уровню виброускорения в полосах со среднегеометрическими частотами 31,5 и 63 Гц.

3. Результаты экспериментальных и численных расчетов монолитной плиты перекрытия отличаются более чем на 10 % для низшей частоты 16,25 Гц, где получены наиболее высокие уровни вибрации при прохождении поездов метрополитена.

4. Решена задача идентификации параметров фрагмента перекрытия на основе измеренных характеристик его вибрации. Найдены следующие значения модулей упругости бетона: для плиты $E_n = 30,24$ ГПа (уменьшение расчетного модуля на 6 %), для колонны $E_k = 33,67$ ГПа (увеличение расчетного модуля на 18 %) и для плиты перекрытия в точке соединения плиты перекрытия и колонны $E_{нк} = 191,1$ ГПа (увеличение расчетного модуля в 5,97 раза). Результаты, полученные на основе идентификации системы,

позволяют повысить точность прогноза параметров вибрации для широкого круга задач динамики, сейсмоки и виброэкологии зданий.

5. Для выполнения динамических расчетов распространения вибрации по строительным конструкциям каркасного здания рекомендуется использовать экспериментальные данные совместно с результатами решения задачи идентификации.

В заключение отметим важность и актуальность общей проблемы - изучения влияния вибраций от транспортных средств на основания, здания и сооружения. Как следует из примеров, приведенных выше, правильная оценка и учет влияния вибраций может избавить от различных нежелательных ситуаций и дать значительный экономический эффект при освоении городских территорий вблизи магистралей с интенсивным движением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибрационная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.01.012–2004. – Введ. 01.07.2008. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. – 28 с.

2. Вибрация. Измерение вибрации внутри железнодорожных туннелей при прохождении поездов: ГОСТ СТБ Р51399–2001. – Введ. 01.07.2002. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2001. – 12 с.

3. Городецкий, А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К: Факт, 2005. – 344 с.

4. Городецкий, А.С. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона (проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии) / А.С. Городецкий [и др.] – К.: Факт, 2004. – 106 с.

5. Градостроительство. Планировка и застройка населённых пунктов: СНБ 3.01.04–02. – Введ. 01.07.03. – Минск: МАИС РБ, 2003. – 63 с.

6. Динамический расчет зданий и сооружений / М.Ф. Барштейн, [и др.]; под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

7. Заборов, В.И. Звукоизоляция жилых и общественных зданий / В.И. Заборов, Э.М. Лалаев, В.Н. Никольский – М.: Стройиздат, 1974. – 264 с.

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

9. Кудрявцев, И.А. Влияние вибрации на основания сооружений / И.А. Кудрявцев. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 274 с.

10. Перельмутер, А.В. Расчётные модели сооружений и возможности их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев: Сталь, 2007. – 600 с.

11. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий: СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-33-2002. – Введ. 31.12.2002. – Минск: Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2002. – 22 с.

12. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

13. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1974. – 286 с.

14. Чернов Ю.Т. Вибрации строительных конструкций / Ю.Т. Чернов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 288 с.

15. Hughes, P. Introduction to Health and Safety in construction / P. Hughes, E. Ferrett. – Elsevier, 2006. – 245 p.

16. Paz, M International Handbook Of Earthquake Engineering Codes, programs, and examples / M. Paz. – Springer, 1995. – 576 p.

17. Paz M. Structural Dynamics. Theory and computation / M. Paz, W. Leigh. – Fourth Edition. – Springer, 1997. – 840 p.

18. Aliawdin Piotr, Muzychkin Yury. Vibration of rc skeleton constructions caused by trains of the shallow subway / Full papers of the 10th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, May 19–21, 2010, Vilnius, Lithuania. - 8 p.