

ЗАЩИТА ЗДАНИЯ ОТ ОДНОВРЕМЕННОГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАМВАЕВ И ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Представлены результаты натурного исследования вибрации рельсового транспорта в жилом здании. Источниками вибрационного воздействия являются трамваи и поезда метрополитена мелкого заложения, расположенные в непосредственной близости к зданию. Проектом предусмотрены мероприятия по защите от вибрации: подземная часть стен здания отделена упругим слоем от грунта. Упругий слой под фундаментом не применяется, поскольку источники вибрации находятся у поверхности грунта и не оказывают значительного динамического воздействия на заглубленный фундамент. Приведены результаты измерений, проведенных на этапе строительства и после его завершения в нескольких точках: на грунте, на фундаментной плите, на плитах межэтажных перекрытий. Показано, что вибрационное воздействие в здании соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

Ключевые слова: вибрация, рельсовый транспорт, виброизоляция, измерения

Введение

В настоящее время основными источниками повышенного вибрационного воздействия в крупных городах являются трамвайные линии и пути метрополитена, проложенные в тоннелях мелкого заложения. Известен ряд виброзащитных мер для снижения вибрации, проникающей в здания: применение специального устройства верхнего строения железнодорожных путей [1], виброизоляторов и эластичных слоев в устройстве фундаментов зданий [2], применение экранирующих устройств [3] и т. д.

Часто здания оказываются в зоне воздействия нескольких источников вибрации, например, в условиях городской застройки здания располагаются вблизи трамвайных линий, тоннелей метрополитена, железнодорожных путей. Это приводит к значительному ухудшению вибрационной обстановки, как следствие, к нарушению гигиенических нормативов в жилье и на рабочих местах, нарушению работы высокочувствительных приборов и оборудования в промышленных зданиях.

В настоящей работе представлено решение по виброзащите жилого здания, находящегося в непосредственной близости от тоннелей метрополитена мелкого заложения и трамвайных путей. За период возведения здания проведено несколько серий натурных измерений, результаты которых приведены ниже.

1. Решение по виброзащите здания

Участок под постройку жилого дома находится между двумя источниками вибрации: метрополитеном мелкого заложения на расстоянии примерно 30 м и трамвайными путями на расстоянии примерно 5 м (рис. 1). Исследование вибрации на площадке застройки и прогноз вибрационного воздействия в проектируемом здании показали, что необходимы специальные мероприятия по виброзащите.

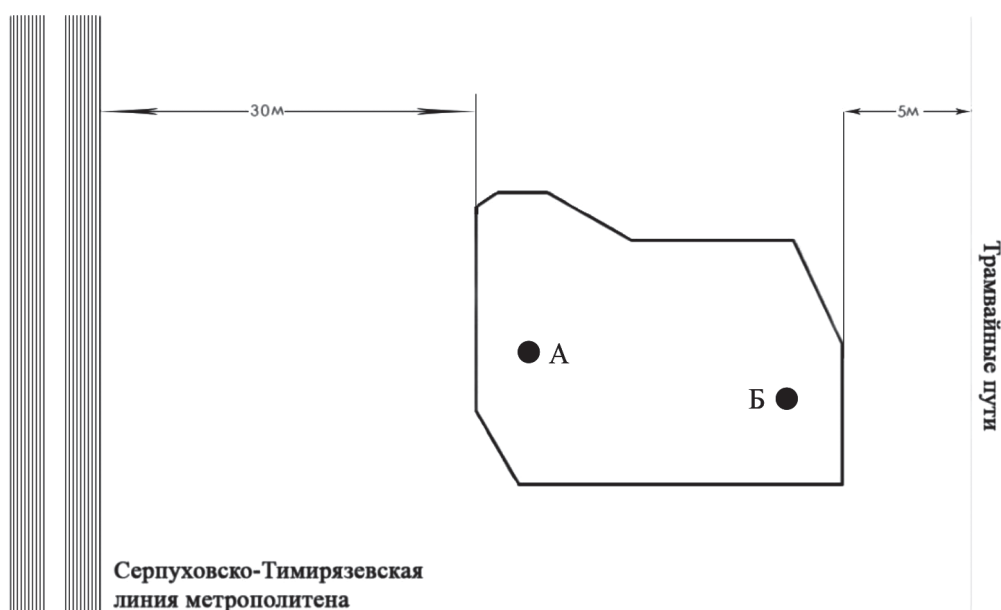


Рис. 1. Расположение здания относительно путей рельсового транспорта.
А и Б — расположение точек измерения

Хорошо известным и эффективным способом виброзащиты зданий является применение дискретных виброизоляторов или сплошных упругих виброизолирующих слоев в его конструкции. В рассматриваемом случае виброзащита выполнялась сплошным упругим слоем, устанавливаемым вертикально с внешней стороны здания ниже отметки поверхности грунта. Толщина и параметры слоя из вспененного полиуретана подбирались в зависимости от требуемой эффективности виброзащиты.

Источники вибрации расположены на поверхности грунта (трамвай) и вблизи поверхности грунта (тоннели метрополитена), поэтому возбуждают в грунте поверхностные акустические волны, интенсивность которых ослабляется с глубиной [4]. Поскольку фундаментная плита находится ниже поверхности грунта примерно на 10 м, то это ослабление является значительным. По этой причине виброизолирующий слой под фундаментом здания не применялся [5]. Общая схема виброизоляции здания приведена на рис. 2.

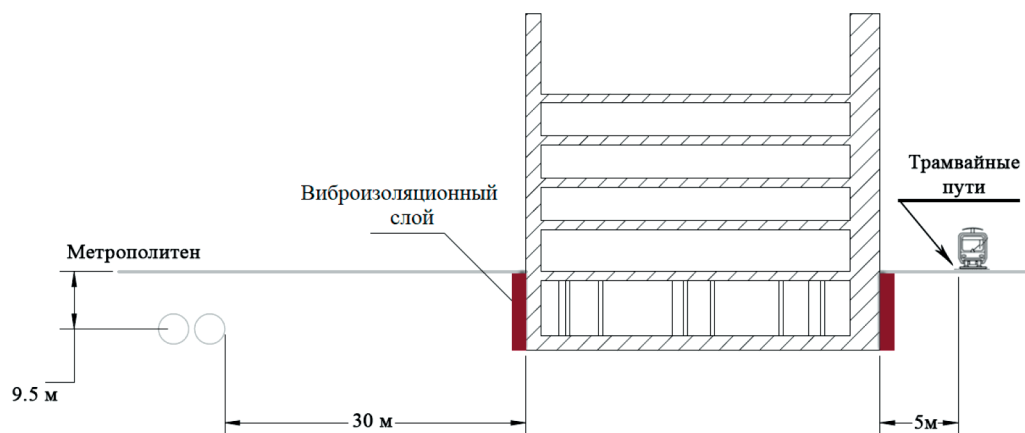


Рис. 2. Схема виброизоляции здания

Рассматриваемое здание имеет 2 подземных этажа и 12 надземных, жилые помещения расположены на 2–12 этажах. Здание имеет монолитный железобетонный каркас, выполненный без деления на температурно-деформационные блоки, его конструктивная схема — смешанная колонно-стенная нерегулярная в плане. Отметка низа фундаментной плиты толщиной 1.2 м находится на 9.5 м ниже поверхности грунта. Согласно геологическим изысканиям состав грунта в месте застройки является типовым для московского региона, в него входят, в основном, пески и суглинки.

2. Гигиеническая оценка вибрации в здании

После завершения строительных работ выполнены измерения вибрации на перекрытиях здания. Жилые помещения расположены на втором и более высоких этажах, поэтому для измерений выбраны перекрытия второго и дополнительно четвертого этажей. Расположение точек измерения схематично приведено на рис. 1: точки А и Б находятся в частях здания, ближайших к метрополитену и трамваю соответственно.

Измерение уровня виброускорения проводилось в геометрическом центре плит перекрытия. Вибрации в вертикальном направлении были значительно выше, чем в горизонтальных, поэтому результаты измерения вибрации в таблице 1 приводятся только для вертикальной вибрации. Длительность измерений в каждой точке выбрана так, чтобы зафиксировать не менее 10 событий прохождения поезда метрополитена или трамвая в каждой точке.

Проблемы гигиенической оценки непостоянной вибрации, связанные с неоднозначностью положений действующих санитарных норм [6], хорошо известны [7,8]. В таблице 1 производится сопоставление максимальных уровней среднеквадратичного виброускорения за 1 с во время проезда поезда метрополитена или трамвая с предельно-допустимыми значениями, соответствующие самой строгой трактовке положений [6].

Согласно результатам измерений, уровень виброускорения от рельсового транспорта не превышает фоновых значений на частотах 2–8 Гц. В диапазоне 16–63 Гц превышений не выявлено, однако измеренные на частоте 16 Гц значения в трех точках близки к предельно-допустимым. Это связано с тем, что в этой октавной полосе находятся первые собственные частоты изгибных колебаний плит перекрытий, на которых происходят колебания с большой амплитудой.

Необходимо отметить, что в период измерений плиты перекрытий были полностью свободны. Можно ожидать, что при установке несущих перегородок, фасадов, выравнивающей стяжки, отделочных материалов пола колебания плиты будут существенно задемпфированы, поэтому их амплитуда значительно снизится, что позволит выполнить требования [6] с надежным запасом. Однако использование конструкций плавающего пола на упругом основании (волокнуистые, вспененные и другие упругие материалы) толщиной несколько сантиметров может привести к увеличению вибрации поверхности пола и нарушению гигиенического норматива [9].

Таблица 1. Санитарно-гигиеническая оценка вибрации

Место измерения	Уровень виброускорения, дБ, в октавной полосе со среднегеометрической частотой, Гц					
	2	4	8	16	31.5	63
Точка А, 2 этаж (метрополитен)	53.2	52.5	51.2	70.1	74.5	61.0
Точка А, 4 этаж (метрополитен)	52.7	53.1	52.9	69.3	72.0	63.4
Точка Б, 2 этаж (трамвай)	50.9	51.0	50.4	53.5	64.3	72.9
Точка Б, 4 этаж (трамвай)	51.2	50.8	51.4	69.6	70.7	66.8
Предельно-допустимые значения [6]	62	63	65	71	77	83

3. Мониторинг вибрации

На разных стадиях строительства здания проводился мониторинг вибрации. Ниже приведены некоторые результаты, которые могут быть полезны для прогнозирования вибрации в зданиях аналогичной конструкции. Отметим, что некоторые данные натурных измерений вибрации рельсового транспорта в зданиях приведены также в [10–13].

Измерения вибрации проводились на грунте до выполнения фундаментной плиты, на поверхности фундаментной плиты до возведения несущих конструкций, т. е. на плите без нагрузки, а также в возведенном здании на фундаментной плите и плитах перекрытий. Измерения вибрации от метрополитена проведены в точке А, от трамвая в точке — Б (рис. 1). Длительность измерений выбиралась таким образом, чтобы зафиксировать не менее 10 проездов поездов или трамваев. Вибрации на конструкциях здания в вертикальном направлении ожидаемо оказались интенсивнее вибраций в горизонтальных направлениях, поэтому анализ проводился только для вибрации в вертикальном направлении.

В каждой точке измерения выбирались пять наиболее интенсивных проездов, а их спектры усреднялись. Далее приводятся значения уровней виброускорения в третьоктавных полосах частот.

3.1. Передача вибрации с грунта на фундамент

Хорошо известно, что при передаче вибрации с грунта на конструкции здания их интенсивность значительно снижается [14]. На рис. 3 приведены спектры вибрации, вызванной движением поездов метрополитена (место измерения обозначено точкой А на рис. 1), на поверхности грунта до начала строительных работ; на поверхности фундаментной плиты до начала возведения несущих конструкций здания, другими словами, на свободной фундаментной плите; на поверхности фундаментной плиты после возведения всей конструкции здания.

Вибрации на фундаментной плите значительно ниже, чем на грунте, при этом при нагрузке фундаментной плиты спектр вибрации изменяется: максимум спектра смещается в низкочастотную область.

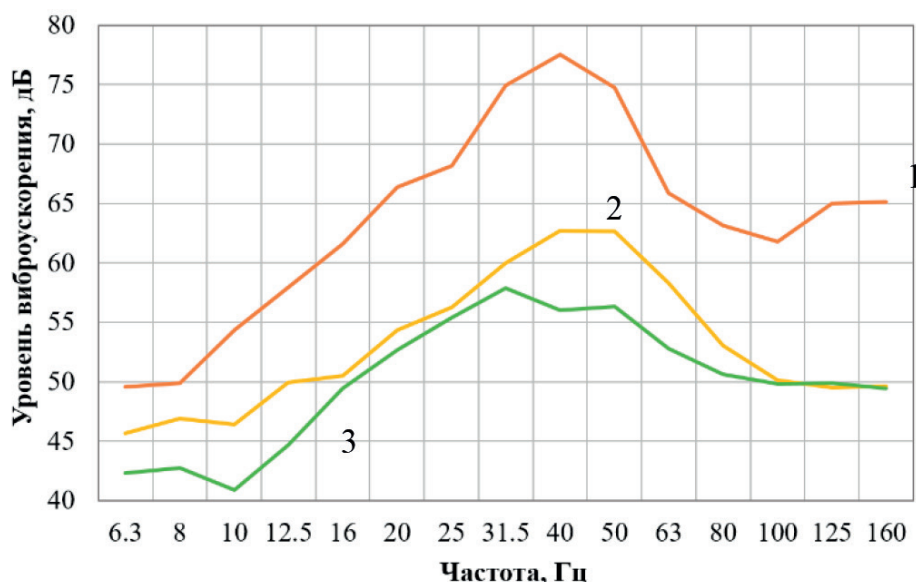


Рис. 3. Вибрации на поверхности грунта (1), на поверхности фундаментной плиты до возведения несущих конструкций (2), на поверхности фундаментной плиты после возведения здания (3).

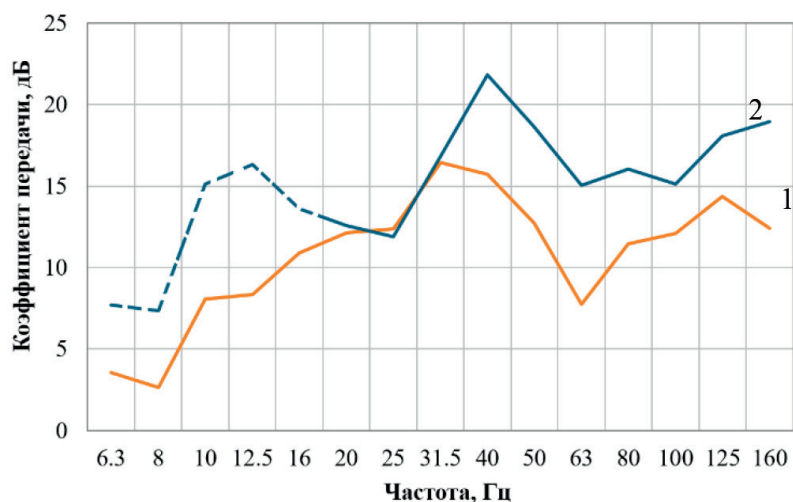


Рис. 4. Коэффициент передачи вибрации с грунта на свободную фундаментную плиту (1) на фундаментную плиту в возведенном здании (2).

Для практических расчетов используется коэффициент передачи с грунта на фундамент здания

$$K = L_1 - L_2 \quad (1)$$

где L_1 — уровень вибрации на грунте, L_2 — уровень вибрации на поверхности фундаментной плиты. Значения коэффициента передачи приведены на рис. 4.

Ослабление вибрации при передаче с грунта на фундамент составляет 10–15 дБ в частотном диапазоне 20–63 Гц, соответствующем максимуму спектра вибрации метрополитена и трамваев. Отметим, что во время измерений на этапе строительства (кривая 2 на рис. 3) фоновые вибрации на частотах ниже 20 Гц были выше вибрации, создаваемой метрополитеном, поэтому значения коэффициента передачи (кривая 2 на рис. 4) в этом частотном диапазоне нельзя считать достоверными. В целом полученные результаты хорошо согласуются с известными эмпирическими данными [14, 15].

3.2. Передача вибрации по конструкции здания

3.2.1. Вибрации метрополитена

Как правило, уровень вибрации уменьшается по мере распространения по этажам здания. При этом некоторые элементы конструкций пола или стен могут ее усиливать на частотах собственных колебаний. Например, железобетонные плиты перекрытий имеют первую резонансную частоту изгибных колебаний в диапазоне от 10 до 30 Гц. На этих частотах амплитуда колебаний плит перекрытий значительно выше амплитуды колебаний фундаментной плиты, что должно обязательно учитываться при проектировании виброзащитных мероприятий.

На рис. 5 приведены спектры вибрации, вызванной движением поездов метрополитена, на фундаментной плите и на перекрытиях 2 и 4 этажей (точка А на рис. 1). Точки измерения на плитах перекрытий выбирались в их геометрическом центре.

Для характеристики передачи вибрации с фундаментной плиты на межэтажные перекрытия применим коэффициент передачи, определяемый (1), где L_1 — уровень вибрации на плите перекрытия, L_2 — уровень вибрации на поверхности фундаментной плиты. На рис. 6 приведены коэффициенты передачи на перекрытия второго и четвертого этажей.

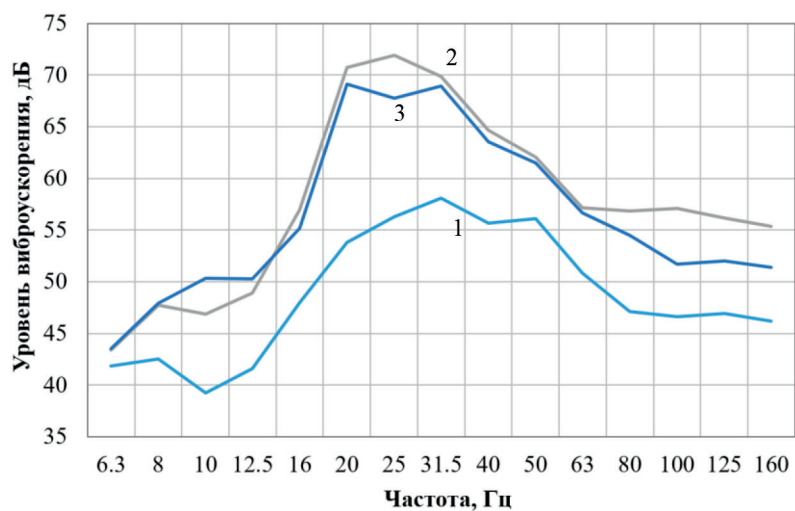


Рис. 5. Вибрация метрополитена на поверхности фундаментной плиты (1), на перекрытии 2 этажа (2), на перекрытии четвертого этажа (3)

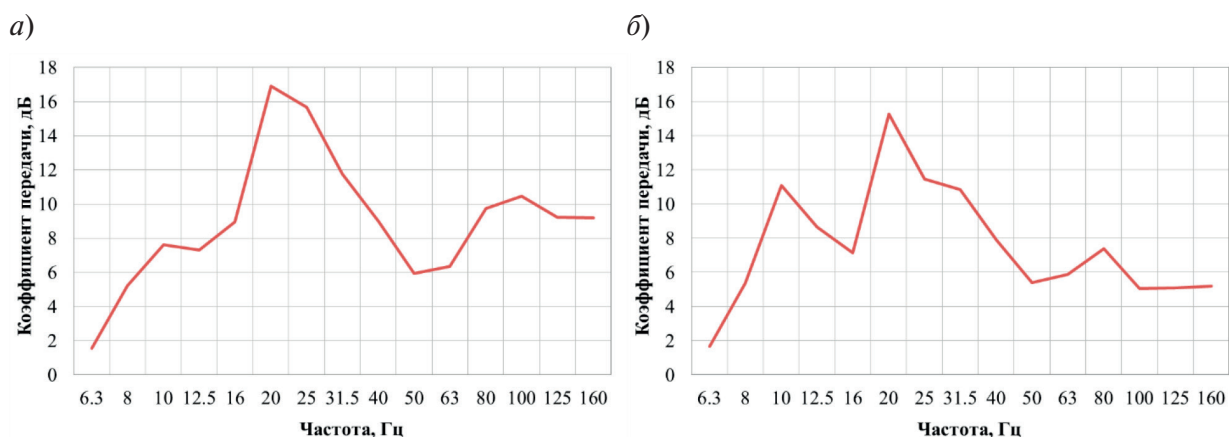


Рис. 6. Коэффициент передачи вибрации метрополитена на второй этаж (а) и на четвертый этаж (б)

Полученные спектры позволяют, во-первых, определить резонансные частоты перекрытий, а во-вторых, значение коэффициента передачи на резонансных частотах. Итак, первая собственная частота изгибных колебаний плит перекрытия находится в третьоктавной полосе 20 Гц, что также подтверждается непосредственным измерением собственной частоты. Коэффициент передачи на этой частоте на второй этаж составляет 17 дБ, на четвертый — 15 дБ. На более высоких частотах коэффициент передачи составляет 5–10 дБ.

Сравнение спектров 2 и 3 на рис. 5 дает представление об изменении вибрации при распространении по этажам вверх. В наиболее значимом диапазоне 16–63 Гц уровни виброускорения на 4 этаже на 1–4 дБ ниже, чем на 2 этаже, что качественно совпадает с данными, приведенными в [16].

3.2.2. Вибрации трамвая

Аналогичные измерения проведены при возбуждении колебаний здания движением трамваев. На рис. 7 приведены спектры вибрации на фундаментной плите и на перекрытиях 2 и 4 этажей (точка Б на рис. 1). На рис. 8 представлены коэффициенты передачи с фундаментной плиты на межэтажные перекрытия.

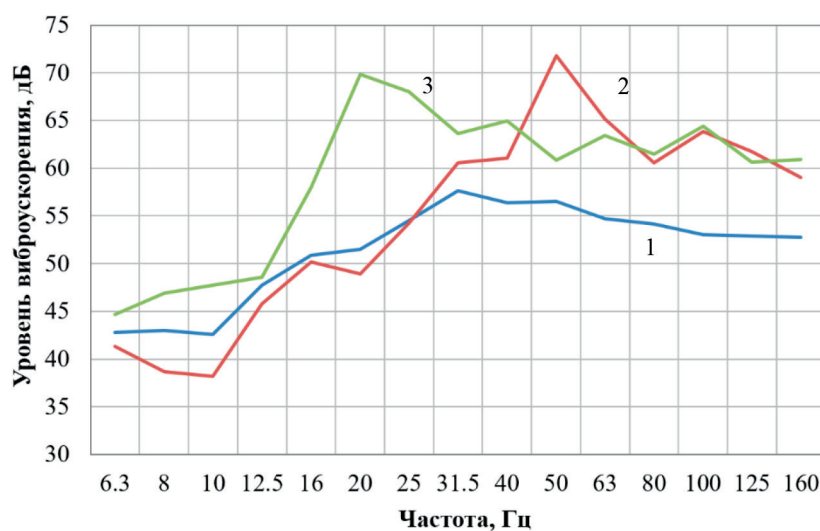


Рис. 7. Вибрация трамвая на поверхности фундаментной плиты (1), на перекрытии второго этажа (2), на перекрытии четвертого этажа (3)

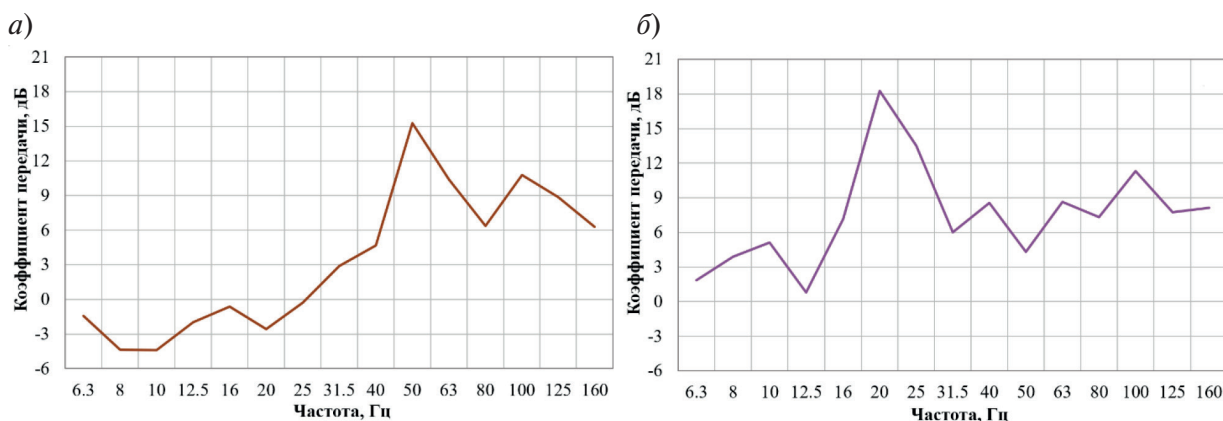


Рис. 8. Коэффициент передачи вибрации трамвая на второй этаж (а) и на четвертый этаж (б)

Измерения показали, как и в случае с метрополитеном, усиление уровня вибрации на этажах выше фундаментной плиты. При этом собственные частоты плит перекрытий оказались существенно отличающимися: на втором этаже она находится в третьоктавной полосе 50 Гц, а на четвертом — в третьоктавной полосе 20 Гц. Коэффициент передачи составляет 15 и 18 дБ соответственно. Выше первой резонансной частоты коэффициент передачи несколько ниже, его значения составляют около 10 дБ.

3.3. Спектры вибрации трамвая и метрополитена на фундаменте

Фундаментная плита находится непосредственно на уплотненном грунте, поэтому ее колебания вызываются вибрацией трамвая и метрополитена, передаваемой по грунту. Аналогичное расположение зданий монолитно-каркасной конструкции относительно путей рельсового транспорта встречается довольно часто, поэтому характерные спектры вибрации, создаваемой рельсовым транспортом на фундаменте, могут использоваться в качестве исходных данных для прогноза вибрационного воздействия для проектируемых зданий. На рис. 9 приведены спектры вибрации на фундаменте здания, измеренные в точках А и Б на рис. 1.

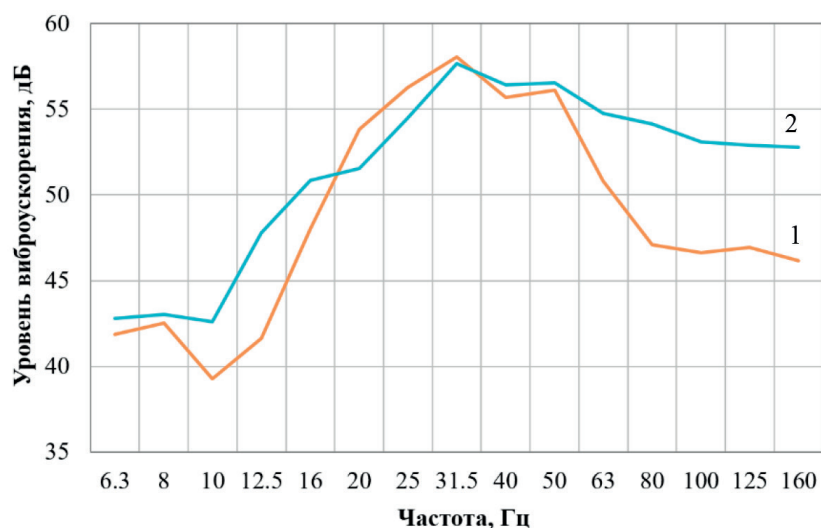


Рис. 9. Уровни вибрации на фундаментной плите от воздействия метрополитена (1) и трамвая (2)

Заключение

Представлено решение по защите здания от одновременного вибрационного воздействия трамваев и метрополитена. Расположение источников вибрации на поверхности грунта и вблизи нее и значительное заглубление фундамента здания позволило применить оптимизированное решение по виброзащите: упругие виброизоляционные маты расположены на внешней стороне стен, находящихся ниже уровня грунта. Измерения вибрации, проведенные после завершения строительных работ, показали, что санитарно-гигиенические нормативы [6] в здании выполняются.

Также в работе приведены результаты измерений передачи вибрации с грунта на конструкции здания, с фундамента на плиты перекрытий и характерные спектры вибрации трамвая и метрополитена на фундаменте здания, которые могут использоваться при прогнозировании вибрации на аналогичных объектах.

Авторы выражают признательность главному инженеру проектов ООО «Акустические материалы» Роденкову В.Н. за помощь в организации и проведении измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 23–105–2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена.
2. Дашевский М.А., Миронов Е.М., Моторин В.В. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002. № 5. С. 37.
3. Leonardi G., Buonsanti M. // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2014. N7. P. 3623.
4. Канев Н.Г. // Труды VII конференции «Защита от повышенного шума и вибрации». Санкт-Петербург. 2019. С. 108.
5. Канев Н. Г. // Подземные горизонты. 2019. № 22. С. 33.
6. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
7. Канев Н.Г. // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 11. С. 16.
8. Цукерников И.Е., Шубин И.Л., Невенчанная Т.О. // Noise Theory and Practice. 2018. № 3. С. 22.

9. *Московец М.Е., Канев Н.Г.* // Труды XXXII сессии Российского акустического общества. Москва. 2019. С. 1449.
10. *Auersch L.* // J. Sound Vib. 2006. **293**. P. 599.
11. *Pronello C.* // Int. J. Acous. Vib. 2003. **8**, N1. P. 21.
12. *Maldonado M., Chiello O., Houedec D.* // Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. 2008. P. 158.
13. *Hanson C. E., Towers D.A., Meister L.D.* Transit Noise and Vibration Impact Assessment // U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration. 2006.
14. *Московец М.Е., Канев Н.Г.* // Труды конференции «Акустика среды обитания». Москва. 2019. С. 142.
15. *Иванов Н.И.* Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. Логос. М., 2016.