

## Измерения и анализ вибрации, вызванной движением поездов метрополитена на близлежащие здания и разработка мероприятий по их снижению

И. Е. Цукерников,\* В. А. Смирнов†

*НИИ строительной физики РААСН. Россия, 127238, Москва, Локомотивный пр. д. 21*

(Статья поступила 10.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

В работе представлены результаты исследования процессов распространения колебаний от поездов Калужско–Рижской линии Московского Метрополитена. Основной целью работы является разработка эффективных мероприятий, позволяющих снизить вибрацию перекрытий и структурного шума в проектируемых зданиях, расположенных вблизи линий метрополитена. Рассматриваемый жилой комплекс состоит из 6-ти секций, расположен в 15–52 м от туннелей метро. Проведённые полевые измерения позволили определить вибрацию поверхности грунта и несущих элементов присутствующих на площадке строительства старых зданий в момент прохождения поездов, а также вычислить передаточные коэффициенты с поверхности грунта на несущие элементы здания. Основными этапами при пересчёте уровней вибрации грунта к уровням вибрации перекрытий являются: 1 — определение величины снижения вибрации при переходе от поверхности грунта на фундамент жилого здания; 2 — определение потерь колебательной энергии по конструкции здания; 3 — определение величины резонансного увеличения колебаний центра плиты перекрытий, по сравнению с колебаниями опорного контура. Полученные в работе коэффициенты передачи могут быть использованы для прогноза уровней вибрации в схожих зданиях и расположенных вблизи линий метрополитена. Расчёт уровней вибрации несущих элементов здания оценивается на соответствие санитарным нормам. Предлагаются мероприятия по снижению уровней вибрации и оценивается их эффективность.

PACS: 06.30.Gv

УДК: 624.042.7, 624.042.8, 534.012.

Ключевые слова: транспортная вибрация, вибрация метрополитена, прогноз, распространение колебаний, динамика сооружений, виброизоляция, передаточный коэффициент.

### ВВЕДЕНИЕ

Транспортная инфраструктура крупных городов и мегаполисов невозможна без наличия самого эффективного вида массового транспорта — метрополитена, позволяющего обеспечить наибольший провоз пассажиров. Развитие транспортной сети метрополитена «вгрызается» в существующую спланированную городскую застройку, да и площадок для нового строительства, не подверженных влиянию техногенной активности от метрополитена, становится всё меньше.

Известно, что линии метрополитена мелкого заложения являются источником повышенной вибрации, которая распространяется по грунту и передается на фундаменты зданий, расположенных в технической зоне метрополитена [1]. Данное колебательное воздействие, затем, распространяется по несущим конструкциям здания и вызывает вибрацию стен и перекрытий, которая сказывается как на техническом состоянии зданий, так и на санитарно–гигиенических условиях пребывания в них людей. Вибрация, создаваемая в помещениях жилых и общественных зданий от движения поездов метрополитена, носит непостоянный прерывистый характер с выраженным преобладанием сигнала в полосе частот 22,5–90 Гц и повторяется с периодом, определяемым графиком движения поездов метрополи-

тена. Существующие нормативные документы [2, 3] позволяют оценить допускаемые величины виброскоростей в жилых помещениях зданий. При этом действующий Свод Правил [4] позволяет прогнозировать уровни вибрации поверхности грунта на любом удалении от оси тоннеля.

Однако основной трудностью, встающей на пути инженера при решении задачи прогноза уровней вибрации и структурного шума в жилых помещениях здания, является отсутствие научно–обоснованной методики, которая на стадии проектирования или реконструкции жилого здания позволила бы оценить соответствие уровней вибрации в жилых помещениях требованиям Санитарных норм [2, 3].

Прогнозирование вибрации и структурного шума от движения поездов метрополитена в помещениях проектируемых зданий осуществляется посредством измерения вибрации на грунте строительной площадки, расчета нормируемых параметров вибрации и уровней структурного шума в помещениях с учетом передачи вибрации на фундамент здания, резонансов плит перекрытий и излучения звука ограждающими поверхностями помещений (стены, потолок, пол) с рассчитанными на них уровнями виброскорости.

Выполнение измерений проводят в соответствии с методом, установленным сводом правил СП 23-105-2004 [1], в котором учтена отмеченная выше специфика источника вибрации, состоящая в том, что поезда метрополитенов создают значимую вибрацию лишь в трех октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16, 31,5 и 63 Гц, а в остальных более низких

\*E-mail: 3342488@mail.ru

†E-mail: belohvost@list.ru

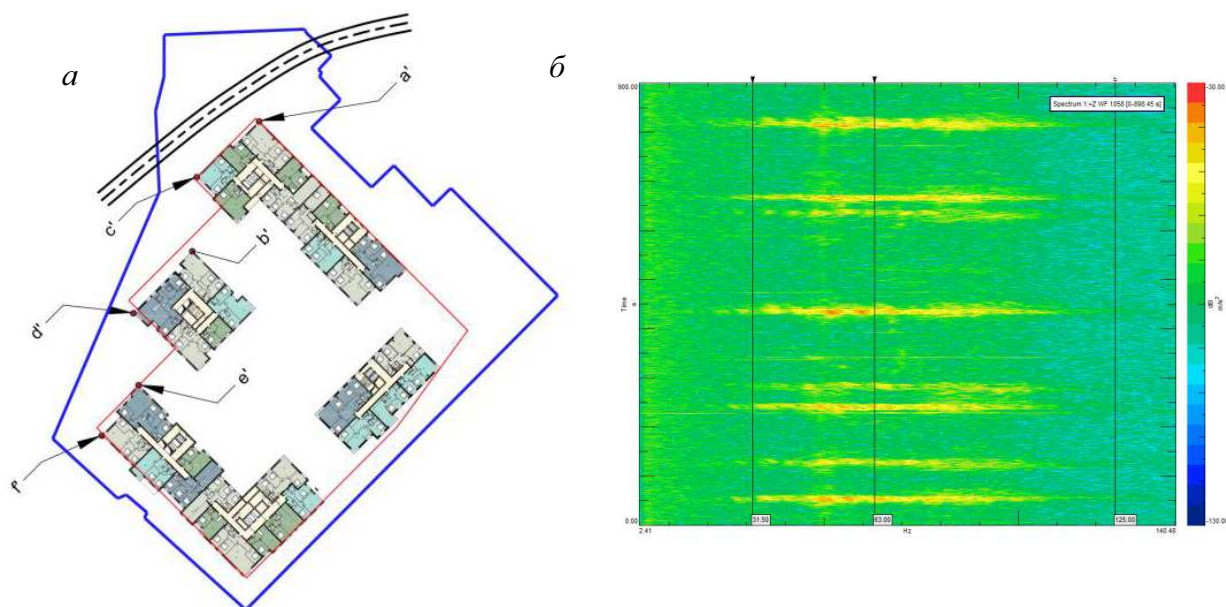


Рис. 1: Относительное расположение жилого здания и тоннелей метро: *a* — точки измерений; *б* — спектрограмма колебаний

нормируемых полосах частот она не выделяется над уровнем фоновой вибрации. Вместе с тем для оценки уровней структурного шума в проектируемом здании измерения вибрации необходимо выполнять также в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, превышающими 63 Гц, до полосы, начиная с которой сигнал от проходящего поезда не будет выделяться над фоновым сигналом.

## 1. ПОЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения были проведены на строительной площадке жилого здания недалеко от тоннеля линии Калужско-Рижской линии вблизи станции метро «Ленинский проспект». Линия метро состоит из двух тоннелей круглого поперечного сечения, диаметром 5.5 м и толщиной 0.2 м. Глубина туннелей составляет 8–10 м. Характеристики слоев грунта с их геологическим данным представлены в [5]. Относительное расположение жилого дома и тоннелей метро представлено на рис. 1, *a*. Там же условно показаны точки измерений (*a*'–*f*').

На площадке строительства на момент проведения измерений стояли существующие здания, в которых также были проведены измерения с целью определения коэффициентов передачи. Измерения проводились синхронно в нескольких точках по трем направлениям. В соответствии с СП 23-105-2004 [1], измерялось среднеквадратическое ускорение сигнала с периодом интегрирования 1 с. Время измерения составляло до 15 мин, в течение которых регистрировалось не менее 10 проходов поезда метро. На рис. 1, *б* представлена спектрограмма записи виброускорений в точке *c*'.

Спектрограмма на рис. 1, *б* характерна для такого вида динамического воздействия. Динамическое воздействие от движения поездов метрополитена длится от 10 до 15 с и вызывает наибольшие колебания в октавных полосах со среднегеометрической частотой 31,5–125 Гц. Уровни колебаний поверхности грунта в моменты проезда поездов достигают 80–85, дБ, при этом фоновые значения в среднем на 25–30 дБ ниже.

## 2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

ГОСТ [6] содержит перечень факторов, влияющих на передачу колебательной энергии от тоннеля метрополитена до фундамента здания. Полный и достоверный учёт указанных в [6] факторов приводит к значительному усложнению расчётной модели. Для учёта большей части факторов измерения проводились на площадке застройки. На рис. 2, *a* показан процесс проведения измерений, при котором синхронно измерялись виброускорения на грунте и на фундаменте существующих зданий. На рис. 2, *б* показан однооктавный спектр виброускорений точек на фундаменте (сплошные столбики) и на грунте (голубая и розовые линии) при прохождении поезда в октавной полосе со среднегеометрической частотой 8–4000 Гц в горизонтальном (*X*) и вертикальном (*Z*) направлениях.

По результатам измерений отмечено снижение амплитуд колебаний фундамента по сравнению с колебаниями грунта на 17–18 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5–125 Гц. Для анализа, коэффициенты передачи получали усреднением по всем проходам поездов по каждому из направлений из-

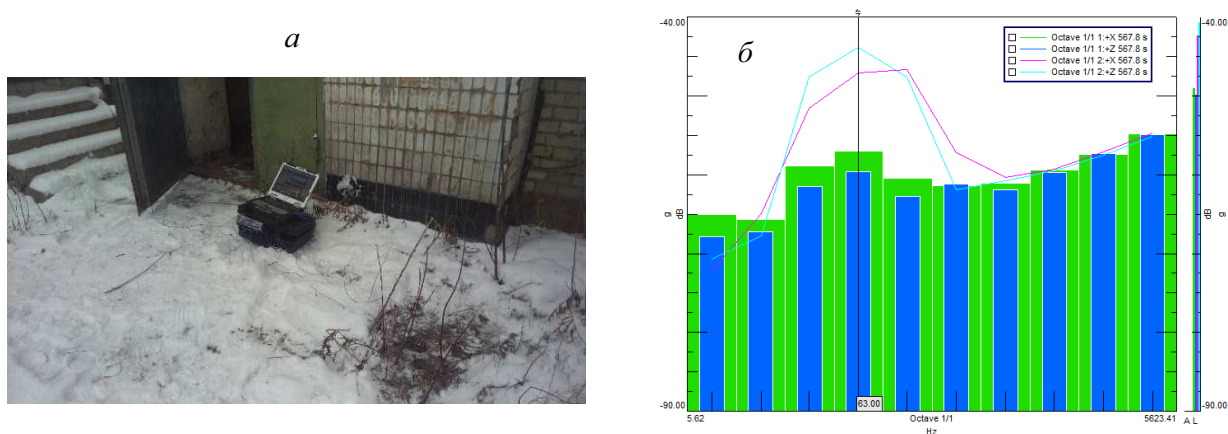


Рис. 2: а — Процесс измерений; б — Виброускорения в момент прохода поезда

мерений.

### 3. РАСЧЁТ РЕЗОНАНСНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

В работе [5] представлен инженерный метод оценки виброскорости колебаний плит перекрытий внутри зданий используя передаточные коэффициенты. Скорость колебаний плиты перекрытия  $v_{floor}(t)$ , м/с, определяется по формуле:

$$v_{floor}(t) = v_{g.s.}(t) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (1)$$

где  $v_{g.s.}(t)$  — скорость колебания грунта вблизи здания, м/с;  $k_1$  — коэффициент, характеризующий передачу вибрации с грунта на фундамент здания;  $k_2$  — коэффициент, соответствующий резонансному увеличению колебаний перекрытиями;  $k_3$  — коэффициент, учитывающий изменение колебаний по высоте здания.

Вычисления по формуле (1) допускается выполнять как для абсолютных значений виброскорости, так и для уровней виброскорости, заменив знак произведения суммой, а коэффициенты — на их значения в дБ.

Рассматриваемый подход учитывает характерные особенности распространения колебаний в грунтовом массиве и реальные коэффициенты передачи на границах раздела сред, которые могут быть получены либо численно, либо аналитически. В данном случае применяем передаточные коэффициенты  $k_1$ , измеренные на площадке застройки. Однако передаточные коэффициенты  $k_2$  и  $k_3$  определяются в данном случае численно, поскольку пролёт плит перекрытий проектируемого здания отличен от существующих на площадке строений.

Резонансное увеличение амплитуд колебаний центра плиты перекрытия по сравнению с её контуром зависит от её частот свободных колебаний, которые определяются по результатам модального анализа. Коэффициент  $k_2$  получается по результатам расчёта спектрального отклика плиты перекрытия на постоянное в диапазоне частот 1–200 Гц единичное кинематическое воз-

мущение её опорного контура. На рис. 3,а–г представлены результаты модального анализа плиты перекрытия исследуемого здания, а на рис. 3,д — амплитуды колебаний центра плиты перекрытия в диапазоне 10–120 Гц.

Результаты показывают, что наибольшие амплитуды резонансных колебаний наблюдаются на первой частоте — 16.4 дБ на 18 Гц. С увеличением частоты, амплитуда резонансного увеличения колебаний снижается, например, на частоте 51 Гц она составляет всего 12 дБ.

### 4. ОЦЕНКА УРОВНЕЙ КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕКРЫТИЙ

Используя рассматриваемый подход, были вычислены скорости вертикальных и горизонтальных колебаний плит перекрытий. Полученные в результате максимальные расчетные превышения вибраций по сравнению с СН [2] по секциям составят величины, указанные в табл. 1.

Превышения по секции 1 составляют 14.2 дБ над требованиями СН [2], что требует устройства системы виброизоляции.

### 5. РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Среди предложенных схем виброизоляции, Заказчиком была выбрана виброизоляция с применением полиуретановых матов Sylomer, которые укладывались под фундаментной плитой, а также по боковой поверхности подземной части сооружения. Подбор матов производился исходя из действующих по подошве фундаментной плиты давлений, которое показано на рис. 4,а.

Расчёт на рис. 4,а показывает, что нагрузки по подошве фундаментной плиты варьируются от 220 до 850 кН/м<sup>2</sup>, что приводит к необходимости использовать маты различной несущей способности. Для обеспечения равной эффективности виброизоляции подбор

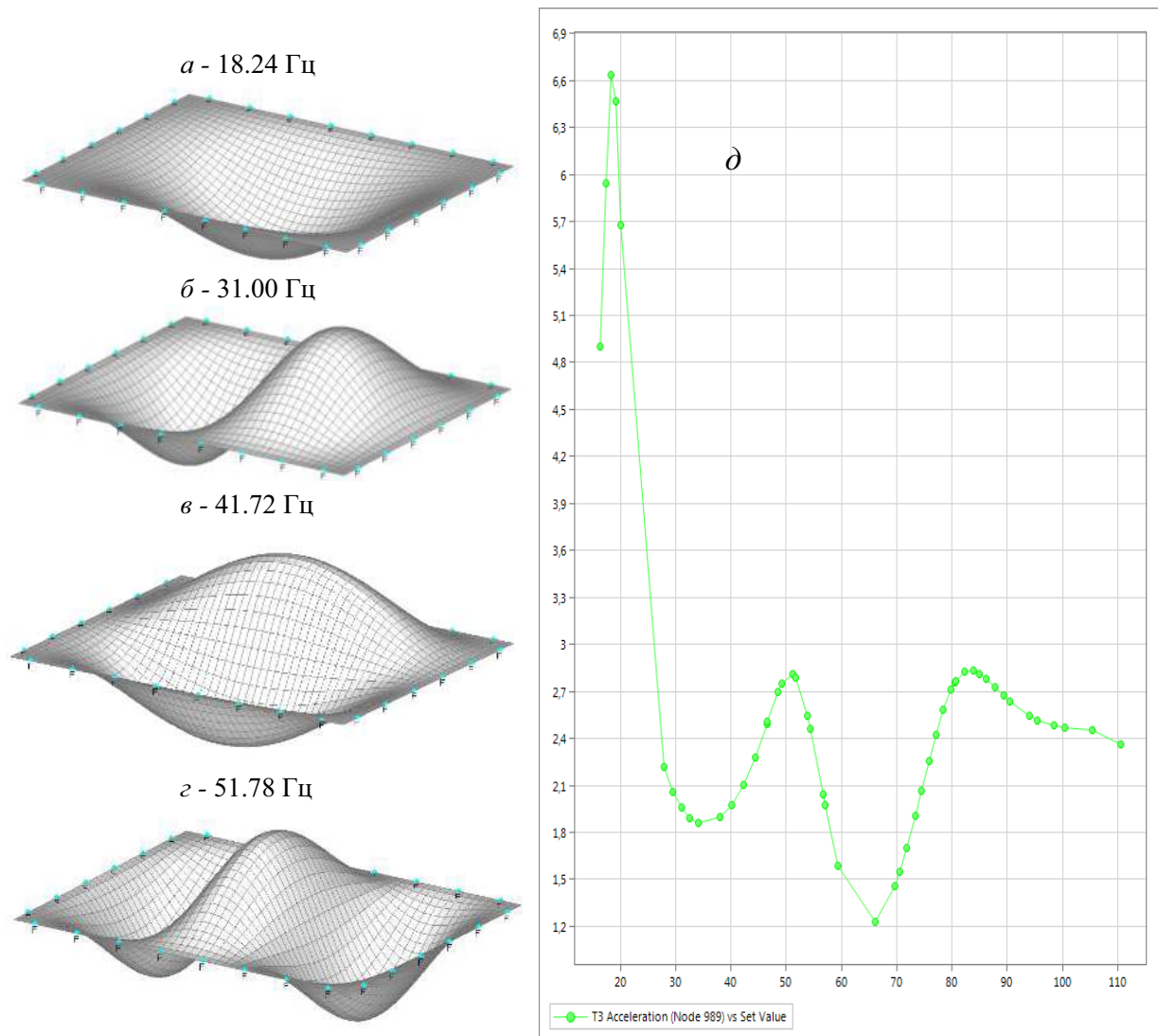


Рис. 3: а–г — Результаты модального анализа; д — спектральный отклик плиты

Таблица I: Максимальные расчетные превышения вибрации по секциям

Секция	Превышение, дБ, в октавной полосе со среднегеометрической частотой, Гц			Превышение по эквивалентному скорректированному уровню виброскорости, дБ
	16	31,5	63	
1	отсутствует	14.2	2.3	14.5
6	отсутствует	3.0	отсутствует	4.0
5	отсутствует	2.6	отсутствует	3.8
3.4 и стилобат	отсутствует	отсутствует	отсутствует	отсутствует

матов производится зонально, как показано на рис. 4,б. При расчётах принимаем, что динамическая система «здание–грунт», подверженная кинематическому возмущению от движения поездов метрополитена может в первом приближении рассматриваться как одномас-

совая колебательная система, при этом упругостью грунта мы пренебрегаем в запас эффективности виброзащитной системы. Считаем, что грунт представляет собой абсолютно жёсткое тело, изгибными деформациями сооружения и фундаментной плиты прене-



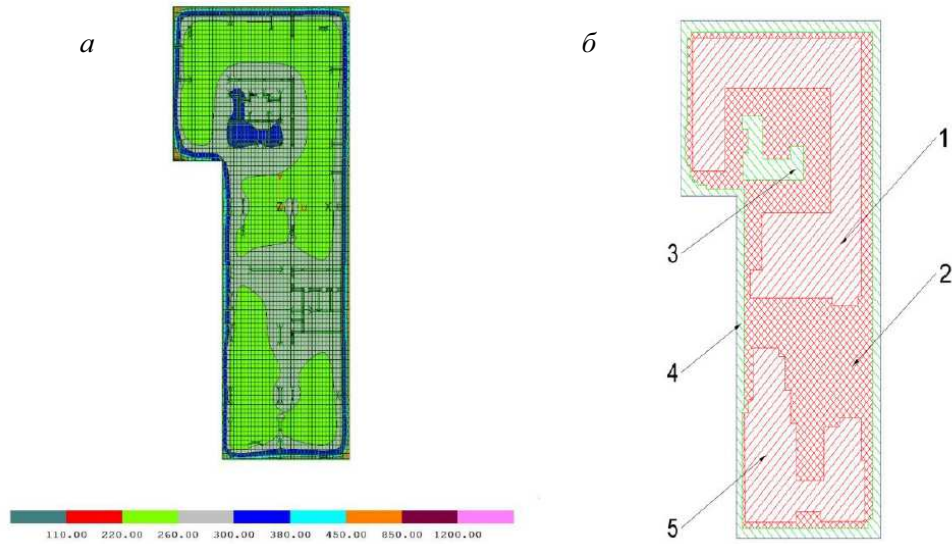


Рис. 4: *a* — Нагрузки по подошве фундаментной плиты; *б* — зоны равных напряжений

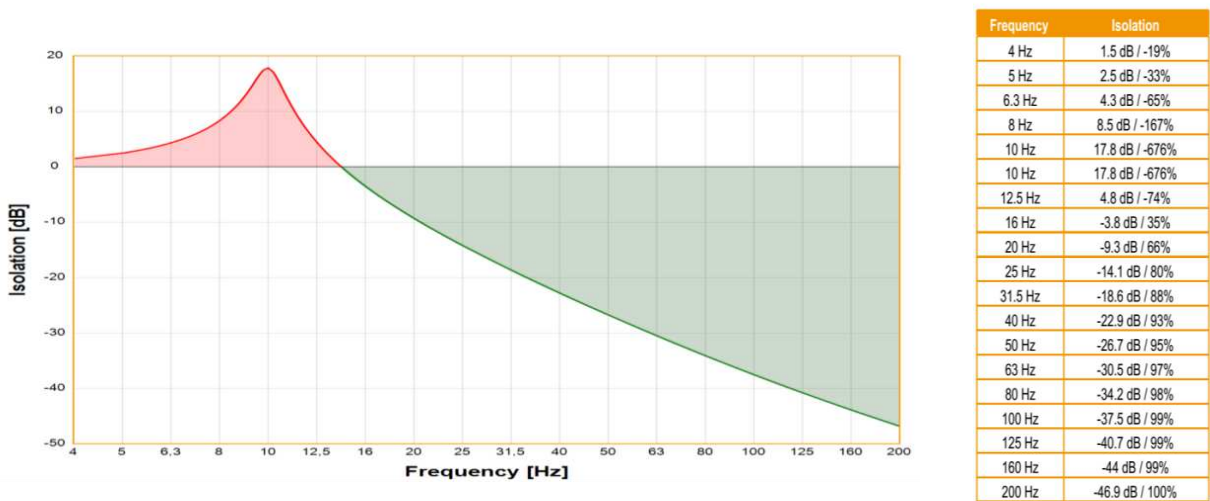


Рис. 5: Эффективность системы виброизоляции здания

брегаем, а в качестве упругого элемента выступает прокладка из виброизолирующего материала Sylomer требуемой марки и толщины. Для такой механико-математической модели эффективность системы виброизоляции  $\Delta L$ , дБ, рассчитывается по формуле:

$$\Delta L = 20 \log_{10} \left( \sqrt{\frac{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \eta^2}{1 + \eta^2}} \right) \quad (2)$$

где  $f_0$  — собственная частота виброизолирующей системы, Гц;  $f$  — частота внешнего колебательного воздействия, Гц;  $\eta$  — коэффициент потерь в виброизолирующем мате.

Используя величины превышений по таблице 1 как значения требуемой эффективности, решается уравнение (2) и определяется собственная частота виброзащитной системы. При заданных значениях нагрузок она не превышает 12.5 Гц.

В зависимости от жёсткости виброизолирующего мата и его несущей способности для каждой зоны подбирается толщина и марка мата для получения одинакового по всем зонам значения частоты собственных колебаний. График эффективности виброизоляции, построенный в приложении FreqCalc (производства «Getzner»), представлен на рис. 5.

Расчёты показывают, что подобранные таким образом материалы обладают эффективностью виброизоляции не ниже 18.6 дБ в октавной полосе со среднегеометрической частотой 31.5 Гц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты полевых измерений уровней вибрации жилого комплекса, расположенного вблизи линий метрополитена. Основываясь на данных измерений получены величины коэффициентов передачи  $k_1$  вертикальных колебаний с точек на поверхности грунта на фундаменты существующих на площадке строительства строений. Величина коэффициента  $k_1$  составила 17–18 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31.5–125 Гц.

Коэффициенты передачи  $k_2$  получены по результатам численного анализа резонансного увеличения колебаний плит перекрытий жилого комплекса. Ис-

пользуя значения коэффициентов передачи и результатов полевых измерений по методике, предложенной в [5], определены скорости колебаний перекрытий в жилых помещениях здания. На основании сравнения полученных скоростей колебаний с допускаемыми по санитарным нормам определены превышения, которые составили от 2.3 до 14.2 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 и 31.5 Гц соответственно.

Проведён расчёт виброизоляционных матов для снижения превышений по уровням вибрации в жилых помещениях здания. Теоретическая эффективность предлагаемой системы виброизоляции на 4.4 дБ выше требуемого значения.

- 
- [1] Комплекс нормативных документов по оценке шума и вибрации от метрополитена. Сб. нормативных документов МОО «Тоннельная ассоциация». М.: ТИМР, 1998.
- [2] СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий: Санитарные нормы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997.
- [3] СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997.
- [4] СП 23-105-2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. М.: Метрогипротранс, 2004.
- [5] Smirnov V., Tsukernikov I. Proc. Eng. 2017. **176**. P. 371.
- [6] ГОСТ Р ИСО 14837-1-2007. Вибрация. Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Часть 1. Общее руководство.

---

## Measurement and analysis of vibrations caused by the movement of underground trains on surrounding buildings and development of vibration isolation system.

I. E. Tsukernikov<sup>a</sup>, V. A. Smirnov<sup>b</sup>

*NIISF RAABS. Moscow, 127238 Russia*  
*E-mail: <sup>a</sup>3342488@mail.ru, <sup>b</sup>belohvost@list.ru*

This work presents results of thorough investigations of vibration propagation from underground trains on Kalugsko-Rigskaja line of Moscow Underground. The main aim of the work is to develop effective countermeasures that reduce both the floor vibration and structure-induced noise inside scheduled closely adjacent residential compound. This compound consist from 6 sections, that are located 15 to 52 m from the tunnels. Field investigations were performed to measure the ground velocity during underground train passes both on the ground surface and on the foundations of existing buildings. Transfer functions from ground to building foundation were calculated based on these measurements and the prediction of vibration inside the building was performed. The main steps of the prediction analysis, that is in conversion from the vibration levels of the ground surface to the vibration levels of the floors are: 1 – determination of the vibration reduction at the transition from the ground to the foundation of the residential buildings; 2 – determination of the vibration transmission losses through the building constructions; 3 – determination of the resonant increase of oscillations in the center of the floor compared the oscillation of its contour. The paper presents calculated and averaged over the time of measurements transmission coefficients of vertical vibrations between the said groups of structural elements. The calculated transfer coefficients can be used to predict vibration levels in similar buildings subjected to underground traffic impact. Further analysis allowed for calculation of structural member vibration velocity calculations that were compared to valid sanitary standards. Vibration reduction measurements were proposed and their efficiency calculated.

PACS: 06.30.Gv.

*Keywords:* transport vibration, subway vibration, forecast, propagation of vibrations, structural dynamics, vibration, transfer factor.

*Received 10 July 2017.*

### Сведения об авторах

1. Цукерников Илья Евсеевич — доктор техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 482-50-93, e-mail: 3342488@mail.ru.
2. Смирнов Владимир Александрович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел. (499) 381-60-67, e-mail: belohvost@list.ru.