

УДК 624.042.8:69.025

**СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК  
ПРИ ПЕРЕДАЧЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ  
ЧЕРЕЗ ФУНДАМЕНТНУЮ КОНСТРУКЦИЮ**

**REDUCTION OF DYNAMIC LOADS  
IN THE TRANSMISSION OF VIBRATIONAL ENERGY  
THROUGH A FOUNDATION STRUCTURE**

*В.А. СМІРНОВ  
V.A. SMIRNOV*

**(Научно-исследовательский институт строительной физики  
Российской академии архитектуры и строительных наук)  
(Research Institute of Building Physics  
of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)  
E-mail: belohvost@list.ru**

*Работа посвящена исследованию вопросов передачи колебательной энергии с грунта на конструкцию фундамента здания. Волны, излучаемые колеблющейся тоннельной обделкой, воздействуют как на подошву фундамента, так и на часть фундаментной стены, расположенной в грунте. Потери колебательной энергии при переходе из грунта на фундамент, а также вес сооружения приводят к снижению уровня колебаний последнего. В работе проведены измерения колебаний поверхности грунта и фундамента сооружения, расположенного вблизи линии метрополитена.*

*The work is devoted to the study of the transfer of vibrational energy from the soil to the construction of the foundation of the building. Waves emitted by oscillating tunnel lining affect both the base of the foundation and part of the foundation wall located in the ground. The loss of vibrational energy during the transition from the ground to the foundation, as well as the weight of the structure, leads to a decrease in the level of vibration of the latter. In the work, measurements were made of the vibrations of the soil surface and the foundation of the structure located near the metro line.*

**Ключевые слова: вибрация, метрополитен, фундамент.**

**Keywords: vibration, subway, foundation.**

Линии метро мелкого заложения являются источником повышенной вибрации в помещениях зданий, расположенных вблизи трасс на расстоянии до 40...60 м в зависимости от грунтовых условий. 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 метрополитена. Существующие нормативные документы [1], [2] позволяют оценить допускаемые величины виброскоростей в жилых помещениях зданий. При этом действующий Свод правил [3] позволяет прогнозировать уровни вибрации поверхности грунта на любом удалении от оси тоннеля.

В соответствии с методикой прогноза уровней вибрации в помещениях зданий, расположенных вблизи линий метрополитена, представленной в [4], скорость колебаний плиты перекрытия  $v_{\text{floor}}(t)$ , м/с, определяется по формуле:

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

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.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению коэффициента  $k_1$  для плитного монолитного фундамента высотного (высотой до 20 этажей) здания. Поперечный разрез здания и тоннеля метрополитена представлен на рис. 1.

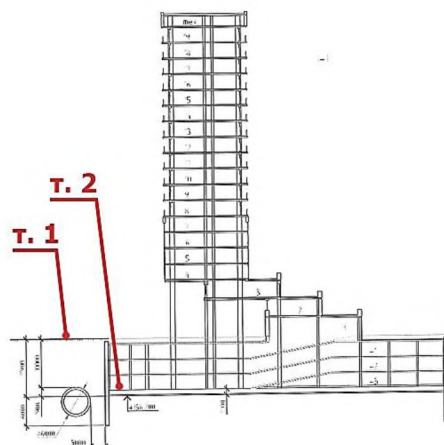
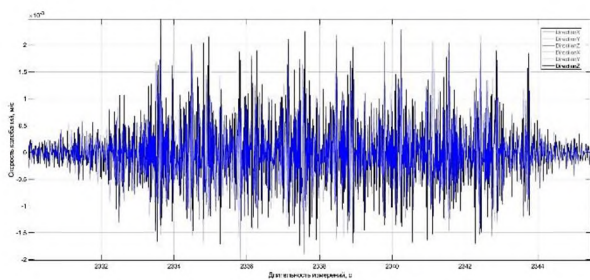


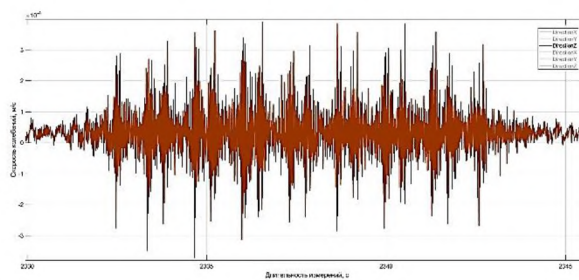
Рис. 1

В точке №2 измерения проведены на фундаменте здания, представляющем собой монолитную армированную железобетонную плиту толщиной 1,7 м. В точке №1 измерения проводили непосредственно над тоннелем.

Акселерограммы вертикальных колебаний поверхности грунта и поверхности фундамента представлены на рис. 2-а и б, соответственно. На акселерограммах отчетливо видны моменты прохождения каждой оси тележки 8-вагонного состава через створ измерений. На основании данных измерений можно определить скорость движения подвижного состава, в частности, по времени между двумя соседними пиками на акселерограмме, которое составляет 0,1 с. С учетом расстояния между осями тележек 2,1 м скорость движения составляет 75 км/ч.



а)



б)

Рис. 2

На акселерограммах рис. 2 отчетливо прослеживается квазистатический механизм возбуждения колебаний. Особо проявляется он на малом удалении от оси тоннеля, когда различимы проходы отдельных колес по рельсу. Проход поезда может быть представлен в виде перемещения конечного числа сосредоточенных сил, приложенных к рельсу в створе наблюдения. За счет движения сосредоточенных сил, наблюдатель, находящийся на расстоянии от рельса, ощущает колебательное воздействие, несмотря на то, что сила приложена статически. Следующим механизмом генерации вибрации от движущегося в тоннеле метрополитена поезда является механизм параметрического возбуждения колебаний, возникающих из-за периодического опирания рельса на шпалы. Этот механизм схож с механизмом квазистатического возбуждения, поскольку колебания возникают из-за того, что постоянная сосредоточенная нагрузка (нагрузка на ось колеса) передвигается по рельсу с постоянной скоростью. Колебания возникают из-за неравномерной дискретной структуры опор, то есть неравномерной жесткости основания (вызванного наличием точечных опор – лежней), что приводит к возникновению вертикальных динамических нагрузок, приложенных к рельсу. При расстоянии между осями в тележке 2,1 м при скорости 72 км/ч (20 м/с) время прохода составит 0,105 с, а частота воздействия – 9,5 Гц. Частота прохода колесом расстояния между опорами при эпюре 1660 шт/км составит около 32,8 Гц. Также могут возникать частоты, кратные основным, например,  $9,5 \times 2 = 19,0$  Гц,  $10,6 \times 3 = 28,5$  Гц и т.д.

Как показывают результаты измерений, скорости колебаний на фундаменте при-

мерно на порядок ниже, чем на поверхности грунта над тоннелем. При распространении колебания в грунте передаются на фундамент сооружения, они снижаются за счет упругости почвы, массы здания и волновых эффектов в грунте. В общем случае динамическое взаимодействие фундамента с грунтом может быть описано моделью колебательной системы с одной степенью свободы:

$$f_{bs} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_b}}, \quad (2)$$

где  $k_s$  – жесткость грунта основания, Н/м<sup>2</sup>;  $m_b$  – масса здания, кг.

Масса здания  $m_b$  определяется на основании сбора нагрузок со здания в соответствии с положениями СП 20.13330 для нормативных значений нагрузок. Жесткость грунта основания под зданием рассчитывается на основании положений СП 26.13330 и данных физико-механических испытаний грунтов.

Используя одномассовую модель (2), можно теоретически определить коэффициент  $k_1$ . Экспериментально коэффициент  $k_1$  определяется как разность между скоростями колебаний на поверхности грунта и фундамента в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 8...63 Гц. Результаты представлены в табл. 1 (коэффициент  $k_1$  для вертикальных колебаний) и в табл. 2 (коэффициент  $k_1$  для горизонтальных колебаний). Для анализа коэффициенты передачи получали усреднением по всем проходам поездов по каждому из направлений измерений.



Таблица 1

Октавная полоса со среднегеометрической частотой, Гц	Величина коэффициента $k_1$ , дБ	Октавная полоса со среднегеометрической частотой, Гц	Величина коэффициента $k_1$ , дБ
8	14,5	31,5	23,3
16	16,9	63	23,7

Таблица 2

Октавная полоса со среднегеометрической частотой, Гц	Величина коэффициента $k_1$ , дБ	Октавная полоса со среднегеометрической частотой, Гц	Величина коэффициента $k_1$ , дБ
8	26,5	31,5	26,3
16	33,2	63	10,7

## ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты натурных измерений уровней вибрации фундамента здания, расположенного вблизи линии метрополитена мелкого заложения. Основываясь на данных измерений, получены величины коэффициентов передачи  $k_1$  вертикальных колебаний с точек на поверхности грунта на фундамент существующего здания. Величина коэффициента  $k_1$  составила 14...26 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 8...63 Гц. Результаты могут быть использованы для инженерных расчетов при прогнозе уровней вибрации в помещениях зданий, расположенных вблизи линий метрополитена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий: Санитарные нормы.
2. 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.
3. СП 23-105–2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена.

4. Smirnov V., Tsukernikov I. To the Question of Vibration Levels Prediction Inside Residential Buildings Caused by Underground Traffic // *Procedia Engineering*. – Vol. 176, 2017. P. 371...380.

5. Lai CG., Callerio A., Faccioli E., Morelli V., Romani P. Prediction of Railway-Induced Ground Vibrations in Tunnels // *ASME. J. Vib. Acoust.* – 127(5), 2005. P. 503...514.

## REFERENCES

1. SN 2.2.4/2.1.8.566–96. Proizvodstvennaya vibraciya, vibraciya v pomesheniyah zhilyh i obshestvennyh zdaniy: Sanitarnye normy.
2. SN 2.2.4/2.1.8.562–96. Shum na rabochih mestah, v pomesheniyah zhilyh, obshestvennyh zdaniy i na territorii zhiloy zastrojki. Sanitarnye normy.
3. SP 23-105–2004. Ocenka vibracii pri proektirovanii, stroitelstve i ekspluatatsii obektov metropolitena.
4. Smirnov V., Tsukernikov I. To the Question of Vibration Levels Prediction Inside Residential Buildings Caused by Underground Traffic // *Procedia Engineering*. – Vol. 176, 2017. P. 371...380.
5. Lai CG., Callerio A., Faccioli E., Morelli V., Romani P. Prediction of Railway-Induced Ground Vibrations in Tunnels // *ASME. J. Vib. Acoust.* – 127(5), 2005. P. 503...514.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 18.06.18.