

## ВИБРАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ, ВЫЗВАННАЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

*Докт. техн. наук, проф. АЛЯВДИН П. В., асп. МУЗЫЧКИН Ю. А.*

*РУП «Институт БелНИИС»*

В соответствии с требованиями нормативных документов [1] здания и сооружения в зависимости от источников вибрации должны располагаться на расстоянии не менее 100 м – для железнодорожных путей и 40 м – для метро мелкого заложения (устройство так называемой селитебной зоны). Назначение указанных зон, в первую очередь, вызвано стремлением снизить вредное воздействие вибрации на людей и здания, не прибегая к дорогостоящим методам ее уменьшения. На практике, по данным [2], около 24 % этих площадей застроены, и существующие там объекты должны быть надлежащим образом виброизолированы [3–7].

**Описание объекта исследования.** Исследования распространения колебаний по строительным конструкциям, вызванных движением подвижного состава метро, были выполнены на строящемся жилом доме в г. Минске, расположенном на ул. Притыцкого. Жилой дом с каркасной несущей схемой имеет пять секций с разной этажностью каждой секции. План здания, разделенного на секции, и расположение оси пути тоннеля метро относительно здания представлены на рис. 1.

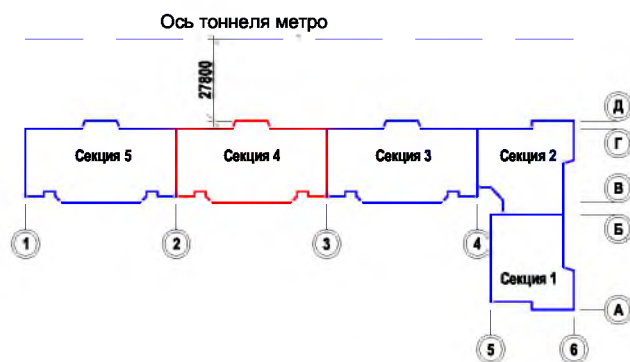


Рис. 1. План здания и расположение оси тоннеля

Секции с первой по третью завершены и имеют девять жилых этажей. Четвертая, также девятиэтажная секция, находится в стадии строительства: возведены фундамент и каркас (без внутренних перегородок и наружных стен).

Анализ вибрации был выполнен для четвертой девятиэтажной секции, расположенной в ~28 м до оси тоннеля метро. Данная секция представляет собой монолитную каркасную систему с продольными и поперечными диафрагмами жесткости и поэтажно опертыми стенами из блоков из ячеистого бетона. Перекрытия монолитные толщиной 200 мм со скрытыми ригелями. Подвальная часть по периметру здания выполнена из монолитного бетона толщиной 400 мм. Колонны имеют размер 400×400 мм. Конструктивная схема типового этажа четвертой секции девятиэтажного монолитного каркасного жилого здания представлена на рис. 2.

В период исследований и измерений производились внутренние работы в секции 3, в результате чего уровень вибрационного фона был повышен.

**Измерение вибраций грунта и конструкций подвала.** Исследование вибрации производилось с помощью четырехканальной измерительной системы с использованием пьезодатчиков, регистрирующих виброускорения. При прохождении поездов метро наибольшие изменения спектра наблюдались в диапазоне частот 1–100 Гц. Измерения вибрации были выполнены на грунте перед зданием (~3,5 м), а также на строительных конструкциях подвальной части здания: диафрагме жесткости и колоннах.

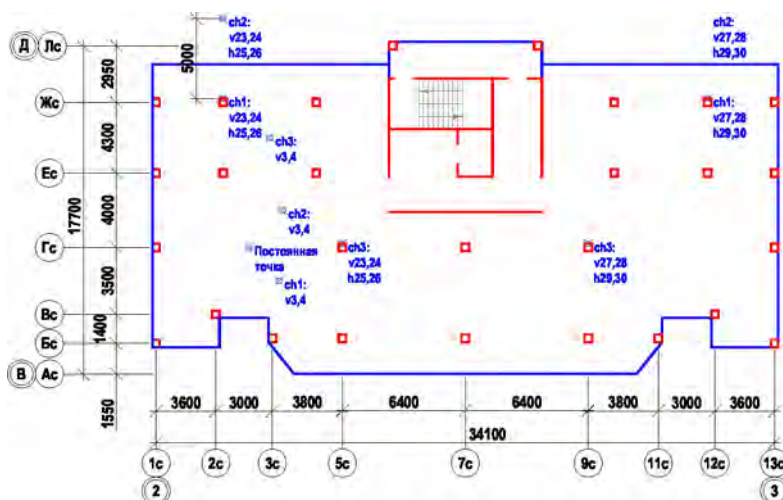


Рис. 2. Конструктивная схема типового этажа третьей секции здания

Схема расположения точек измерения в подвальной части здания представлена на рис. 2. Огибающая узкополосного спектра виброускорения – сплошная линия (уровни фона представлены пунктирной линией), данные по результатам многократных измерений вибраций (не менее трех часов в каждой точке, интервал движения поездов ~5 мин) представлены на рис. 3, 4 (уровни виброускорения  $L_a$  на рисунках указаны в дБ [8]):

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

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

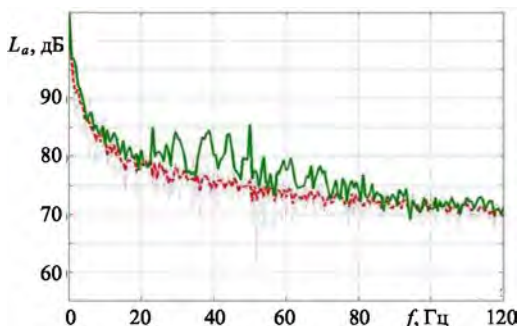


Рис. 3. Спектрограмма вертикальных уровней колебания грунта в точке ch2-v23

Анализ движения поездов метро показал, что с увеличением количества пассажиров (час пик между 17 и 19 ч.) уровни виброускорения на 3,0–3,5 дБ выше по отношению ко времени с 19 до 22 ч. Также уровни виброускорения за-

висят от технического состояния рельсового пути и подвижного состава, скорости движения состава (в час пик скорость, как правило, выше). Все перечисленные факторы сказываются и на частотном распределении уровней виброускорения.

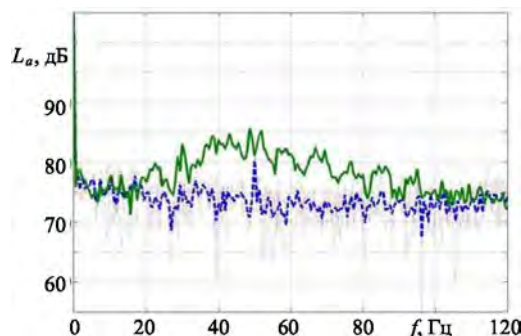


Рис. 4. Спектрограмма вертикальных уровней колебания колонны в точке ch1-v23

На низких частотах, в диапазоне 1–10 Гц, изменения уровней виброускорения незначительны по отношению к фону, и в дальнейшем они не анализировались.

Так как определение объективно-точных границ полос спектра вынужденной вибрации не представляется возможным без полного модального анализа, дальнейший расчет выполнен на основе спектрального метода при учете случайной вибрации.

Действительная диаграмма распределения уровней вибрации была заменена двухуровневой диаграммой (рис. 5) с уровнями  $0,001 m/c^2$  (60 дБ) – для диапазона частот 1–100 Гц;  $0,03 m/c^2$  (90 дБ) – для диапазона частот 20–50 Гц.

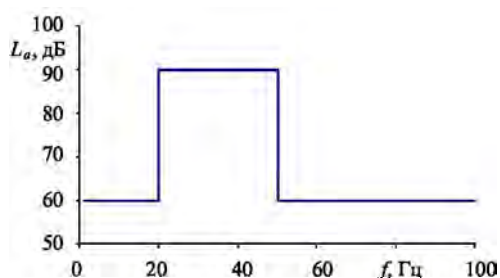


Рис. 5. Спектр виброускорения для расчета вибрации здания

**Численное моделирование вибрации здания.** Модальные перемещения, скорость и ускорение определялись методом complete quadratic combination для получения отклика каркасного здания на возбуждение  $R_a$ , заданное на опорах ускорением:

$$R_a = \left( \sum \sum k \varepsilon_{ij} R_i R_j \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $k = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j; \\ 2 & \text{if } i \neq j; \end{cases}$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8 \sqrt{\xi_i' \xi_j'} (\xi_i' + r \xi_j') r^{3/2}}{(1 - r^2)^2 + 4 \xi_i' \xi_j' (1 + r^2) + 4 (\xi_i'^2 + \xi_j'^2) r^2};$$

$$r = \frac{\omega_j}{\omega_i};$$

$\xi_{i,j}'$  – эффективный коэффициент потерь для мод  $i, j$ .

Характерной особенностью вибрации строительных конструкций четвертой секции рассматриваемого здания для диапазона частот 0–10 Гц при расчете на случайную вибрацию (возбуждение основания случайной силой, заданной с помощью спектра виброускорения опор) является преобладание вертикальной составляющей перемещений над горизонтальными. Частоты собственных колебаний для диапазона 0–10 Гц представлены в табл. 1.

Таблица 1

Частоты собственных колебаний модели здания от 0 до 10 Гц

№	1	2	3	4	5	6
$f, \text{ Гц}$	1,72	2,38	3,23	5,84	9,07	9,73

На низких частотах наибольший вклад в процесс колебания здания привносит горизонтальная компонента вдоль оси  $Y-Y$  или  $X-X$ , но с увеличением частоты наибольший вклад в колебательный процесс привносится верти-

кальной составляющей вибрации, вдоль оси  $Z-Z$ . Величина Sum (модуль вектора) вычисляется для каждого узла по перемещениям  $X, Y$  и  $Z$

$$\text{Sum} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \quad (3)$$

Распределение суммарных виброперемещений (Sum) и виброперемещений в вертикальной плоскости  $Z-Z$  по элементам строительной конструкции для диапазона частот 0–20 Гц при расчете на случайную вибрацию изображено соответственно на рис. 6 и 7.

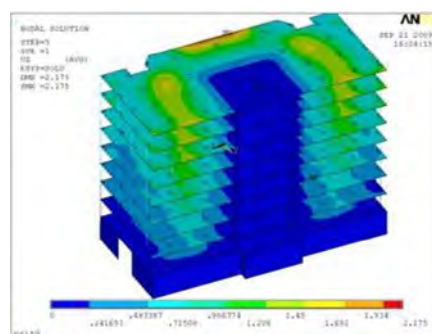


Рис. 6. Виброускорения строительных конструкций ( $Z-Z$ ) для диапазона частот 0–20 Гц

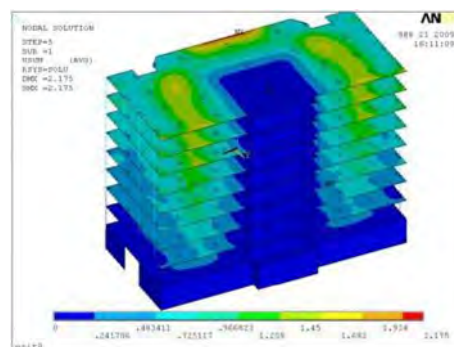


Рис. 7. Виброускорения строительных конструкций (Sum) для частот 0–20 Гц

Количество форм собственных частот колебаний для указанных диапазонов представлено в табл. 2.

Таблица 2

Частоты собственных колебаний модели здания

Диапазон частот, Гц	0–20	20–40	40–60	60–80
Количество форм колебаний	186	278	287	278

Распределение виброперемещений Sum по элементам строительной конструкции для диапазонов частот 20–40 и 40–60 Гц при расчете на случайную вибрацию представлено на рис. 8, 9.

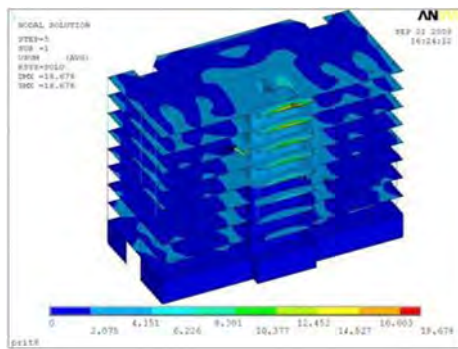


Рис. 8. Виброускорения строительных конструкций Sum для диапазона частот 20–40 Гц

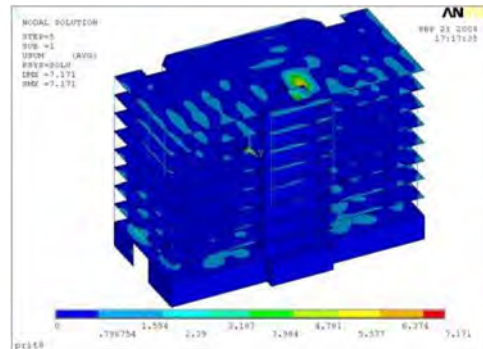


Рис. 9. Виброускорения строительных конструкций Sum для диапазона частот 40–60 Гц

**Анализ результатов расчета.** Анализ собственных частот и форм колебаний в диапазоне частот от 1 до 60 Гц показывает, что составляющие горизонтальных перемещений преобладают над вертикальными для наиболее низких частот от 1 до 10 Гц. С увеличением частоты преобладающей компонентой вибрационного режима становится вертикальная составляющая колебания. Поэтому вибрационный анализ от подвижного состава метро рассматривается, главным образом, в плоскости перекрытий первого–девятого этажей.

Соотношения максимальных амплитуд перемещения строительных конструкций (Sum; Z; Y; X, отнесенные к перемещению Sum) для разных форм собственных колебаний в диапазоне частот 1–60 Гц представлены в табл. 3. Максимальные амплитуды перемещения вдоль осей X, Y и Z представлены для различных узлов модели в пределах одной формы колебания, однако значение Sum определено для узла с максимальным перемещением, определенным по (3).

Таблица 3

Соотношение максимальных амплитуд колебаний вдоль ортогональных осей X, Y, Z

Частота, Гц	Sum	Z	Y	X
1,72	1,00	0,13	0,21	0,98
2,38	1,00	0,10	0,79	0,48
3,23	1,00	0,31	0,85	0,72
5,84	1,00	0,33	0,60	0,84
9,07	1,00	0,34	0,50	0,90
9,73	1,00	0,99	0,64	0,75
11,02	1,00	1,00	0,12	0,08
20,13	1,00	1,00	0,67	0,02
35,01	1,00	1,00	0,29	0,10

В строящемся здании имеется возможность свободной планировки. В связи с этим при нерациональном размещении внутренних перегородок на этажах образуются зоны со значительными уровнями колебаний. Возможно появление низкочастотного шума в пустом помещении (эффекта гула).

Установлено, что зоны с повышенной вибрацией могут формироваться на любых этажах здания – с первого по девятый. При различных формах собственных колебаний конструкций указанные выше зоны присутствуют на разных этажах здания. Например, для частоты 40,682 Гц максимальные перемещения перекрытия формируются на девятом этаже, а для частоты 40,721 Гц – на четвертом этаже.

Расчет показал (рис. 10), что возможно образование указанных зон в любом диапазоне частот даже в областях, ограниченных жесткими элементами (малодеформируемыми в вертикальной плоскости относительно прогиба перекрытия): лестничная клетка, диафрагма жесткости, колонна [9].

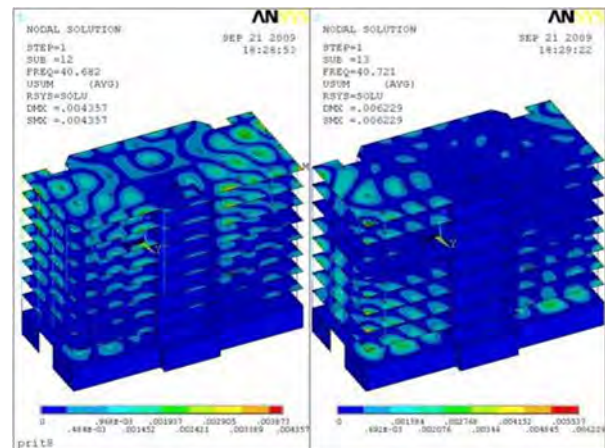


Рис. 10. Положение зон с максимальными виброускорениями на различных этажах, соответствующими разным формам колебаний

Исследована вибрация строительных конструкций при расчете на случайное виброускорение основания от внешнего воздействия с заданной функцией спектральной плотности для различных частотных диапазонов, для одних и тех же узлов, расположенных по вертикали с первого по девятый этаж. Результаты расчета представлены на рис. 11, откуда следует, что уровни колебаний существенно отличаются лишь для диапазона частот 0–10 Гц. Для диапазона же частот 20–60 Гц виброускорение на перекрытиях всех девяти этажей изменяется незначительно, поэтому оно представлено практически горизонтальной линией.

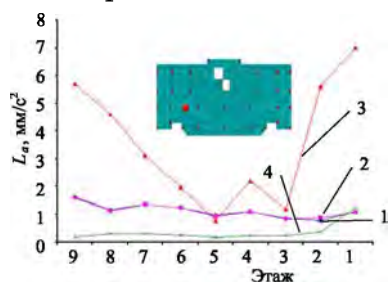


Рис. 11. График изменения по этажам амплитуды виброускорения в узлах, расположенных на одной вертикали: 1 – 0–20 Гц; 2 – 20–40 Гц; 3 – 40–60 Гц; 4 – 60–80 Гц

Аналогично вибрация для узлов с максимальной амплитудой виброускорения ( $Z-Z$ ) на перекрытиях с первого по девятый этаж и для диафрагмы жесткости Sum представлена соответственно на рис. 12, 13.

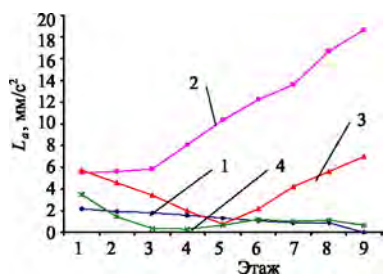


Рис. 12. График изменения по этажам максимальной амплитуды виброускорения в узлах перекрытий: 1 – 0–20 Гц; 2 – 20–40 Гц; 3 – 40–60 Гц; 4 – 60–80 Гц

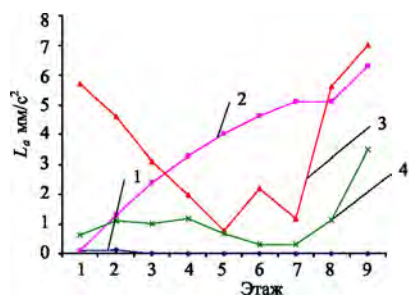


Рис. 13. График изменения по этажам максимальной амплитуды виброускорения в узлах диафрагмы жесткости: 1 – 0–20 Гц; 2 – 20–40 Гц; 3 – 40–60 Гц; 4 – 60–80 Гц

Характер изменения уровней колебаний здесь остается таким же, как и для узлов конструкции, представленной на рис. 11.

## ВЫВОДЫ

Исследование показало, что наибольшее виброускорение для узлов диафрагмы жесткости и перекрытий исследуемой конструкции здания соответствует диапазону частот 20–40 Гц практически для всех этажей каркасного здания. Наибольшие уровни виброускорения перекрытия получены для седьмого–девятого этажей. Следовательно, при разработке конструктивных мероприятий с целью снижения уровней вибрации для данного здания целесообразно провести более полные исследования для указанного диапазона частот и этажей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Градостроительство.** Планировка и застройка населенных пунктов: СНБ 3.01.04–02. – Минск, 2002. – 64 с.
2. **Кудрявцев, И. А.** Влияние вибрации на основания сооружений / И. А. Кудрявцев. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 274 с.
3. **Trifunac, M. D.** Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: III. Damage detection via changes in wavenumbers / M. D. Trifunac, S. S. Ivanovic, M. I. Todorovska // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2003. – Vol. 23. Iss. 1. – P. 65–75.
4. **Tokeshi, J. C.** Reliability of rayleigh wave dispersion curve obtained from f-k spectral analysis of microtremor array measurement / J. C. Tokeshi, M. B. Karkee, Y. Sugimura // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2006. – Vol. 26. Iss. 2–4. – P. 163–174.
5. **Ciesielski, R.** Wave propagation in surface layers of foundation soil: experimental data „in situ” / R. Ciesielski, A. Kwiecień, K. Stypuła. – Krakow: Politechnika Krakowska, Inżynieria Łądowa. – Vol. 263. – 1999. – 172 p.
6. **Hung, H. H.** A Review of Researches on Ground-Borne Vibrations with Emphasis on Those Induced by Trains / H. H. Hung, Y. B. Yang, // *Phys. Sci. & Eng.* – Vol. 25. Iss. 1. – 2001. – P. 1–16.
7. **Справочник по динамике сооружений** / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.
8. **Вибрация в технике: справ.** / под ред. В. В. Болотина. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.
9. **Mickaitis, M.** Vibration transmission through joints of walls and columns in frame buildings / M. Mickaitis, V. J. Stauskis // *Journal of civil engineering and management*. – 2005. – Vol. XI, No. 3. – P. 185–191.

Поступила 29.07.2010