

УДК 624.042.8:69.032.2

## ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

ЛАПЕНКО О.І.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*  
БАШИНСЬКИЙ Я.В.<sup>2\*</sup>, *аспірант*

<sup>1</sup> Кафедра комп'ютерних технологій будівництва, Національний Авіаційний Університет, просп. Космонавта Комарова 1, Київ 03058, тел. +38 (067) 234-79-99, e-mail: my-partner@ukr.net

<sup>2\*</sup> Кафедра комп'ютерних технологій будівництва, Національний Авіаційний Університет, просп. Космонавта Комарова 1, Київ 03058, тел. +38 (063) 480-44-11, e-mail: y.bashik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0875-8647

**Анотація. Мета.** Одна з найголовніших проблем сучасного містобудування це щільність забудови. У місті Києві, як і у багатьох сучасних містах, активно будуються нові сучасні багатоповерхові будівлі, а також і нові станції метрополітену. В статті розглянута проблема впливу метрополітену мілкого закладення на несучі конструкції висотної будівлі. **Методика.** Як приклад, розглянута монолітна багатоповерхова житлова будівля у місті Києві, поблизу Святошино-Броварської лінії метрополітену. У програмних комплексах змодельований динамічний вплив на несучі конструкції будівлі. **Результати.** Виходячи з результатів розрахунків, зроблені висновки по збільшенню надійності несучих конструкцій та будівлі в цілому. **Наукова новизна.** При сучасному проектуванні та подальшій забудові міста не враховується динамічний вплив від ліній метрополітену, а такий вплив несе в собі руйнівний характер. Пропонується метод моделювання динамічних навантажень та подальше врахування подібних коливань. **Практичне значення.** Враховуючи динамічні впливи на несучі конструкції будівлі на етапі проектування, можливо значно покращити якість і точність розрахунків, що забезпечить надійність будівлі при її подальшій експлуатації.

*Ключові слова:* динамічні навантаження; метрополітен; висотні будівлі; НДС несучих конструкцій

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МЕТРОПОЛИТЕНА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

ЛАПЕНКО О.И.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*  
БАШИНСКИЙ Я.В.<sup>2\*</sup>, *аспирант*

<sup>1</sup> Кафедра компьютерных технологий строительства, Национальный Авиационный Университет, просп. Космонавта Комарова 1, Киев 03058, тел. +38 (067) 234-79-99, e-mail: my-partner@ukr.net

<sup>2\*</sup> Кафедра компьютерных технологий строительства, Национальный Авиационный Университет, просп. Космонавта Комарова 1, Киев 03058, тел. +38 (063) 480-44-11, e-mail: y.bashik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0875-8647

**Аннотация. Цель.** Одна из главных проблем современного градостроительства это плотность застройки. В Киеве, как и во многих современных городах, активно строятся новые современные многоэтажные здания, а также и новые станции метрополитена. В статье рассмотрена проблема влияния метрополитена мелкого заложения на несущие конструкции высотного здания. **Методика.** В качестве примера, рассмотрено монолитное многоэтажное жилое здание в Киеве, вблизи Святошино-Броварской линии метрополитена. В программных комплексах смоделировано динамическое влияние на несущие конструкции здания. **Результаты.** Исходя из результатов расчетов, сделаны выводы по увеличению надежности несущих конструкций и здание в целом. **Научная новизна.** При современном проектировании и дальнейшей застройке города не учитывается динамическое воздействие от линий метрополитена, а такое воздействие несет в себе разрушительный характер. Предлагается метод моделирования динамических нагрузок и дальнейший учет подобных колебаний. **Практическое значение.** Учитывая динамические воздействия на несущие конструкции здания на этапе проектирования, возможно значительно улучшить качество и точность расчетов, что обеспечит надежность здания при его дальнейшей эксплуатации.

*Ключевые слова:* динамические нагрузки; метрополитен; высотные здания; НДС несущих конструкций

## INFLUENCE OF DYNAMIC LOADS FROM SUBWAY ON STRESS-STRAIN STATE OF BEARING STRUCTURES

LAPENKO O.I. <sup>1</sup>, *Dr. Sc., Prof.*  
 BASHINSKY Y.V. <sup>2\*</sup>, *graduate student.*

<sup>1</sup> Department of Computer Technologies of Construction, National Aviation University, pr. Komarova 1, Kiev 03058, Tel. +38 (067) 234-79-99, e-mail: my-partner@ukr.net

<sup>2\*</sup> Department of Computer Technologies of Construction, National Aviation University, pr. Komarova 1, Kiev 03058, Tel. +38 (063) 480-44-11, e-mail: y.bashik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0875-8647

**Annotation. Purpose.** One of the main problems of modern urban planning is the density of buildings. In Kiev, as in many modern cities are actively constructed new modern high-rise buildings, as well as a new subway station. The article considers the problem of the influence of subway on the load-bearing structures of high-rise buildings. **Methods.** As an example, consider a monolithic building in Kiev, near-Svyatoshino-Brovarska subway line. In program complexes was modeled dynamic influence on the load-bearing structures of the building. **Results.** Based on the results of the calculations are made decisions to increase the reliability of the load-bearing structures and the building in general. **Scientific novelty.** In modern design and the further building of the city are not taken into account the impacts from subway lines, and such effect carries a destructive nature. It is proposed f method for simulation of dynamic loads and further consideration of such fluctuations. **The practical importance.** When taking into account the dynamic effects of the load-bearing structure of the building at the design stage, it is possible to significantly improve the quality and accuracy of the calculations that ensure the reliability of the building during its further operation.

*Keywords:* dynamic load; subway; high-rise buildings; stress-strain state of bearing structures

### Динамические колебания

В больших мегаполисах, в условиях плотной застройки, увеличиваются масштабы строительства высотных зданий и сооружений, не говоря уже про строительство над линиями метрополитена, как глубокого, так и мелкого заложения. Так же, в мегаполисах постоянно расширяются линии метрополитена, строятся новые станции, посреди уже существующих микрорайонов.

При строительстве здания вблизи линий метрополитена (особенно неглубокого заложения) необходимо учитывать, что частота вибрации обделки тоннеля метро составляет от 28...35 Гц (сборные обделки) до 60...70 Гц (монолитные обделки) и через грунт передается на фундамент здания. Время однократного воздействия внешней вибрации определяется скоростью поездного состава и составляет 8...15 секунд. Основным источником вибрации является удар при прохождении колеса поездного состава через рельсовый стык. Возникающая при этом вибрация обделки тоннеля гаснет к моменту прохода через стык следующего колеса. На это воздействие накладывается поличастотная вибрация, возникающая от неидеально гладкой поверхности материала колеса и рельса, от деформированных колес, а также от эффекта «вихляния» состава при движении. На фоне такого воздействия преобладающим является вибрационное воздействие в диапазоне частот 25...50 Гц. Если эта частота колебаний близка к собственной частоте обделки, то даже с учетом фильтрующих особенностей грунта, самого строения пути (виброизолированный путь или нет), волновое излучение может усиливаться. Поэтому применительно к метро в общем случае нельзя говорить об одной преобладающей частоте. В связи с этим, не вдаваясь в конструктивные особенности обделки и верхнего строения пути, можно принять рабочий диапазон частот вибраций от метро 20...70 Гц. Характерной особенностью указанного диапазона

является то, что собственные частоты перекрытий зданий, как правило, попадают в этот диапазон. [1]

Применительно к вибрации от метро необходимо отметить, что при измерении колебаний, возбуждаемых в грунте и передающихся на здание при прохождении поездов метро важно учитывать не только особенности транспорта, тоннеля, грунта, но и динамические характеристики самого здания.

Продолжительность колебаний в зданиях, которые вызваны поездом метрополитена, составляют в среднем 10 с. В часы пик на трассе метрополитена может проходить в обоих направлениях до 100 пар поездов. Соответственно, продолжительность действия колебаний может достигать 30...40% общего времени работы метрополитена.

Спектральный состав этих колебаний достаточно широк – 5...100 Гц, но основная энергия колебаний сосредоточена в более узком диапазоне – 35...60 Гц. Максимальные амплитуды колебаний строительных конструкций и сооружений, которые находятся вблизи линий метрополитена, равны несколько микрон. Обычно амплитуда колебаний редко превышает 1 мкм. Колебания такой интенсивности не влияют на прочность строительных конструкций. Вместе с тем, скорость колебаний может быть 0,5 мм/с, а ускорение колебаний – 20 см/с<sup>2</sup>. Колебания такой интенсивности уже могут быть ощутимыми и создавать дискомфорт.

Техногенные динамические нагрузки распространяются, как правило, в верхней части почвенной массы до глубины 10...15 м, потому что основная часть энергии переносится к зданию поверхностными волнами Рэлея, которые быстро затихают с увеличением глубины. Примерно до такой отметки углубляются фундаменты большинства общественных зданий, жилых домов в частности.

Кроме того, значение наиболее низкочастотных составляющих транспортных динамических нагрузок

часто близки к значениям собственных частот колебаний большинства зданий, которые не редко находятся в пределах 2...8 Гц. Поэтому в зонах действия метрополитена иногда наблюдается дополнительное проседание зданий на 50...150 мм.

В условиях динамического воздействия наиболее устойчивы к вибрации здания и сооружения из монолитного железобетона. Такая возможность обеспечивается свойством работы монолитных конструкций воспринимать не резонансы, а более мягкие резонансные воздействия. Наиболее рациональная конструктивная схема в данном случае это колонный каркас, эффективность которого повышается с увеличением толщины плит перекрытия и уменьшением сечения колонн или пилонов. В качестве фундамента рекомендуется использовать сплошную монолитную железобетонную плиту на свайном поле, что позволяет уменьшить влияние неоднородностей грунтового основания.

#### Расчетная модель

Для проведения численного эксперимента за основу было взято 41-этажное монолитное здание, расположенное вблизи Святошино-Броварской линии Киевского метрополитена. Фундамент - сплошная монолитная железобетонная плита на свайном поле. Численный эксперимент проводился в программных комплексах ЛИРА САПР и МОНОМАХ САПР. [2] Расчет производился с учетом ветровых и снеговых нагрузок согласно нормативным документам. [3] Учтены долговременные и кратковременные нагрузки на плиты перекрытия типовых этажей, а также чердачного перекрытия. Класс бетона В30, класс рабочей арматуры АIII. Толщина монолитного перекрытия 200 мм, толщина вертикальных несущих конструкций 300 мм. Колебания грунтов основания дома вблизи метрополитена соответствуют 6...7 бальному землетрясению

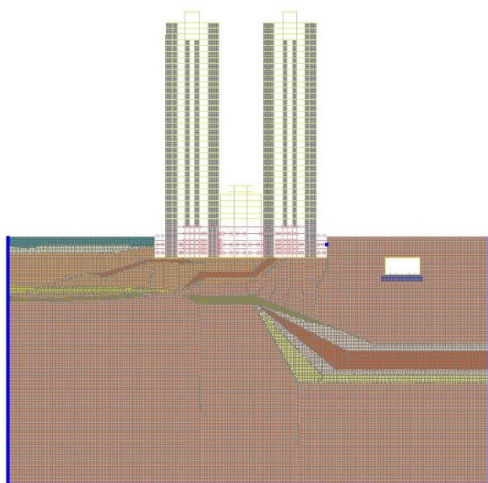


Рис. 1. Модель здания вблизи метрополитена с учетом разных слоев грунта /

#### Model of building near the subway considering different soil layers

Была создана модель здания (рис.1), с типами грунтов, непосредственно в зоне строительства, а также с учетом динамических колебаний, исходящих от тоннеля метрополитена. Динамические колебания от метрополитена были смоделированы с помощью подсистемы ДИНАМИКА+. Рассматривался участок времени, когда состав тормозит и останавливается. Проводился расчет здания с толщиной плит перекрытия 200, 300 и 400 мм. Результаты расчетов сведены в таблицу 1 и положены в основу определения коэффициента динамичности  $\beta$  в зависимости от периода колебаний  $T_i$  и сечения плит перекрытия.

Таблица 1

#### Частоты и периоды колебаний при изменении толщины плиты перекрытия /

Толщина плиты	Горизонтальные перемещения, м	Форма колебаний	Частота	Период, с
200	0,011	1	0,67	1,4876
		2	0,80	1,2576
		3	0,85	1,1008
		4	2,93	0,3418
		5	3,43	0,2916
300	0,008	1	0,81	1,2361
		2	0,92	1,0880
		3	0,96	1,0447
		4	3,25	0,3074
		5	3,85	0,2597
400	4,1e-004	1	0,5	1,5297
		2	0,77	1,2917
		3	0,83	1,2064
		4	2,85	0,3504
		5	3,33	0,3003

#### Frequency and period of oscillations with different thickness of the floor slab

Проводился расчет здания с толщиной плит перекрытия 200, 300 и 400 мм. Результаты расчетов положены в основу определения коэффициента динамичности  $\beta$  в зависимости от периода колебаний  $T_i$  и сечения плит перекрытия. [4]

Коэффициент динамичности  $\beta$  вычислялся по следующим формулам:

$$\text{При } T_i \leq 0,5 \text{ с } \quad \beta_i = 1 + 4T_i;$$

$$\text{при } 0,5 \text{ с} < T_i \leq 3 \text{ с} \quad \beta_i = 3; \quad (1)$$

$$\text{при } T_i > 3 \text{ с} \quad \beta_i = 8/T_i^{9/10}.$$

Используя данные из таблицы 1 и формулы (1) построены графики зависимости коэффициента динамичности  $\beta$  в зависимости от периода колебаний  $T_i$  и сечения плит перекрытия (см. рис. 5). Из графиков видно, что с увеличением толщины плиты перекрытия коэффициент динамичности  $\beta$  имеет тенденцию к уменьшению, а, следовательно, здание становится устойчивым к вибрациям. Также в ходе

эксперимента установлено, что с увеличением толщины плит перекрытия наблюдается уменьшение значения горизонтального перемещения верхушки здания.

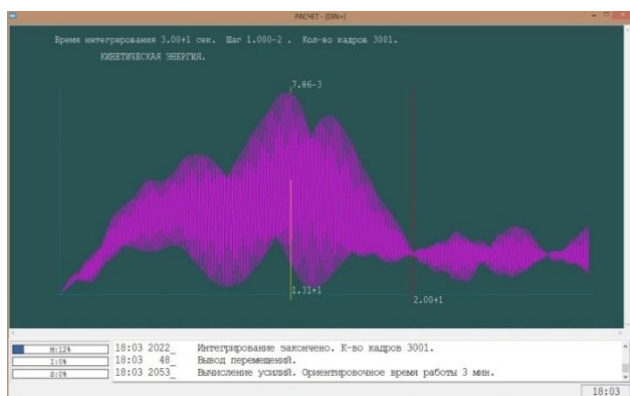


Рис. 2. Спектр колебаний от метрополитена в ДИНАМИКЕ+ /  
The spectrum of oscillations form subway in the DYNAMICS+

Для уменьшения интенсивности вибрации от движения поезда метрополитена в качестве ограждающих конструкций можно использовать железобетонный и металлический шпунт без грунтовой насыпки, но с изоляцией и засыпкой грунта за шпунтом. Поскольку расстояние от метрополитена до здания 50 м, рекомендуется применять двухрядные перемычки цилиндрической формы.

### Результаты

Испытание модели здания на влияния вибрации и применение необходимых мер в ходе проектирования может предотвратить серьезные последствия в будущем. Это демонстрируется на следующей модели (рис.3).

На рисунке 3 видно деформацию и места наибольших усилий возникших в здании. При расчете необходимо учитывать нелинейную работу грунта, которая позволяет учитывать его физико-механические свойства. Это связано с тем, что грунтовое основание имеет неоднородную структуру.

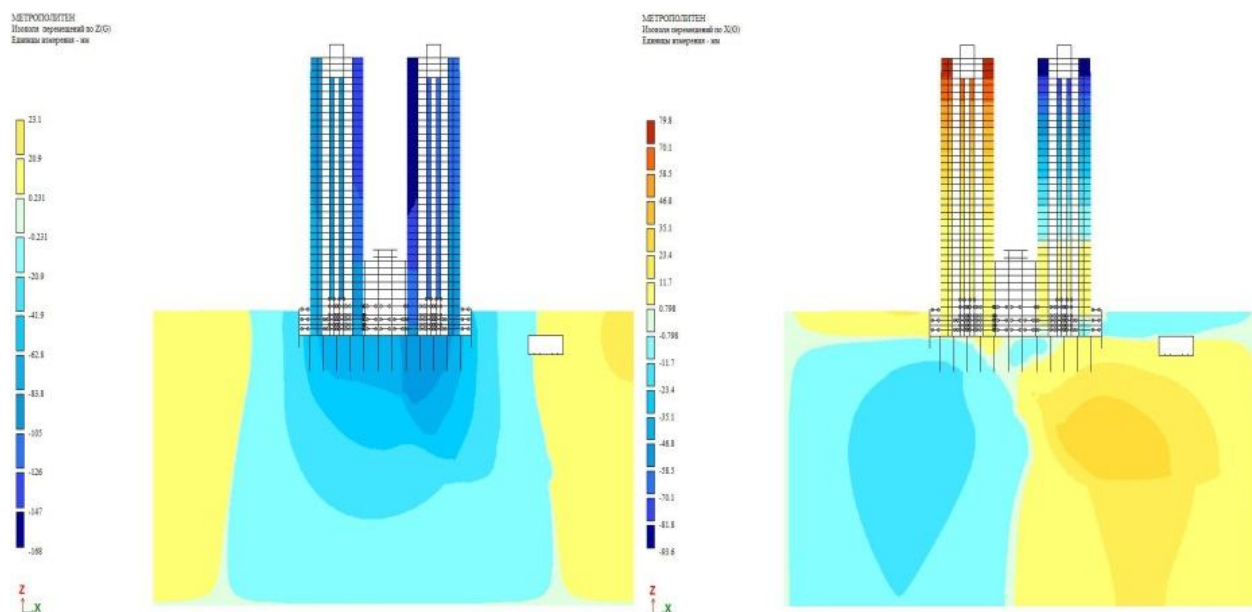


Рис.3. Результаты расчета: а – изополя перемещений по X; б – изополя перемещений по Z (яркие и темные цвета показывают наиболее напряженные зоны) /  
The calculation results: a - contour plots of displacement on X axes; b - contour plots of displacement on Z axes (bright and dark colors show the most intense areas)

### Выводы

До настоящего времени, влиянием динамических нагрузок на здания от состава метрополитена можно было пренебрегать и в нормативной документации это также не учитывалось. Сегодня мы вынуждены обратить внимание на этот вопрос и учесть это влияние с точки зрения трещиностойкости несущих конструкций.

В ходе принятия необходимых мер по уменьшению влияния вибрации от метрополитена на конструктивную систему зданий и сооружений необходимо при проектировании зданий в зоне метрополитена моделировать вибрационные воздействия и анализировать их влияние. Рассмотрев проблему с разных сторон можно сделать вывод, что изменение основы рельсового покрытия поездов метро и принятие конструктивных мер сводит влияние вибрации на здания к минимуму

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ /  
REFERENCES

1. C.O. Aksoy, T. Onargan, The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. *Tunneling and Underground Space Technology*, doi:10.1016/j.tust.2010.03.004.
2. Aijun YAO, Xuejia YANG, Lei DONG, Numerical Analysis of the Influence of Isolation Piles in Metro Tunnel Construction of Adjacent Buildings. // *Procedia Earth and Planetary Science* 5 (2012), pp. 150 – 154.
3. *Barabash M.* Estimation metro influence on structure adjacent buildings/ M. Barabash // *Materials of International Conference Seismics-2014 “Seismic resistance and rehabilitation of buildings”*, 29–30 May 2014, Tbilisi, Georgia. – P. 141–151
4. *Барабаш М. С.* Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш. – К.: Изд-во «Сталь», 2014. – 301 с.  
*M.Barabash.* Computer simulation of life cycle in building objects: Monograph / M.Barabash. – К.: ‘Stal’ Publ., 2014. – 301 p
5. *Dimmock, P. & Mair, R.J.*, 2008. Effect of building stiffness on tunnelling-induced ground movement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), pp.438-450.
6. *Jiangfeng Liu*, Taiyue Qi, Zhanrui Wu, Analysis of ground movement due to metro station driven with enlarging shield tunnels under building and its parameter sensitivity analysis. // *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 28:287-296.
7. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Введено в дію з 01-12-2009]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 45 с. (Державні будівельні норми України).  
General principles for providing reliability and structural safety of buildings, structures and foundations: DBN V.1.2-14-2009. – [Valid from 01-12-2009]. – К.: Minregionbud of Ukraine, 2009. – 45 p. (building code of Ukraine).
8. Konstantinos Vogiatzis, Environmental ground borne noise and vibration protection of sensitive cultural receptors along the Athens Metro Extension to Piraeu // *WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT*. - Issue 11, Volume 7, November 2011, с.359 – 370.
9. Mete Kun, Turgay Onargan, Influence of the fault zone in shallow tunneling: A case study of Izmir Metro Tunnel. // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 33 (2013), pp. 34–45
10. Mohammad S. Pakbaz, S. Imanzadeh, K.H. Bagherinia, Characteristics of diaphragm wall lateral deformations and ground surface settlements: Case study in Iran-Ahwaz metro. *Tunnelling and Underground Space Technology* 35 (2013) pp. 109–121
11. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Забегаев А.Б. Расчет конструкции на динамические специальные нагрузки. - М.: Высшая школа, 1992.

Статья поступила в редколлегию 10.08.2015