

УДК 624.042.8:69.032.22

**ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА НЕСУЧІ КОНСТРУКЦІЇ
БУДІВЕЛЬ ЧИСЕЛЬНИМИ МЕТОДАМИ**

Барабаш М.С., д.т.н., ст.н.с.,
Башинський Я.В., аспірант,
Національний авіаційний університет
bmari@ukr.net

Анотація. Стаття присвячена чисельному дослідженню вібраційного впливу метрополітену неглибокого закладення на несучі конструкції багатоповерхового будинку. Проаналізовано параметри динамічних дій від рейкового транспорту (поїзд, трамвай, метрополітен) і причини, які посилюють їх негативний вплив на будівлі, що проектуються. Наведено приклад моделювання динамічних дій метрополітену неглибокого закладення на висотну будівлю. Були визначені вертикальні і горизонтальні складові віброшвидкості на поверхні ґрунту. Проведено аналіз НДС залізобетонного каркаса будівлі на основі методу нелінійної динаміки, в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Ключові слова: напружено-деформований стан, програмний комплекс ЛІРА-САПР, нелінійні розрахунки, динамічні навантаження, чисельні методи, коливання, власні коливання, вимушені коливання, частота власних коливань, вібраційний вплив.

**ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА НА НЕСУЩИЕ
КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ**

Барабаш М.С., д.т.н., ст.н.с.,
Башинский Я.В., аспирант,
Национальный авиационный университет
bmari@ukr.net

Аннотация. Статья посвящена численному исследованию вибрационного воздействия метрополитена неглубокого заложения на несущие конструкции многоэтажного здания. Проанализированы параметры динамических действий от рельсового транспорта (поезд, трамвай, метрополитен) и причины, которые усиливают их негативное влияние на эксплуатируемые здания. Приведен пример моделирования динамических действий метрополитена неглубокого заложения на высотное здание. Были определены вертикальные и горизонтальные составляющие виброскорости на поверхности почвы. Проведен анализ НДС железобетонного каркаса здания на основе метода конечных элементов, в программном комплексе ЛІРА-САПР.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, программный комплекс ЛІРА-САПР, нелинейные расчеты, динамические нагрузки, численные методы, колебания, собственные колебания, вынужденные колебания, частота собственных колебаний, вибрационное воздействие.

**DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF SUBWAY ON THE LOAD-BEARING
STRUCTURES OF BUILDINGS WITH NUMERICAL METHODS**

Barabash M.S., Doctor of Technical Sciences, Senior researcher,
Bashynskiy Y.V., post-graduate student,

Abstract. The article is devoted to numerical investigation of the vibration impact of subway on load-bearing structures of high-rise buildings. Parameters of the dynamic action of the rail transport (train, tram, metro) and the reasons that increase their negative impact on the buildings are analyzed. There is an example of modeling of dynamic actions of subway on a real high-rise building. Vertical and horizontal components of vibration on the surface of the soil were determined. The analysis of the stress-strain state of the reinforced concrete frame of the building was performed on the basis of the finite element method in the program complex LIRA-SAPR.

The problem of protecting buildings from vibrations that occur from moving trains in a subway has become especially important in recent years because of the construction of new subway lines with shallow laying. This method of tunnel construction has technical and economic advantages in comparison with the deep laying of tunnels and is now a primary one. In many cases the vibration inside buildings is much higher than the permissible limits in terms of physiological effects on people and the standard operation of high-precision equipment. It is dangerous in terms of damage of the load-bearing structures.

The practical absence of standards for permissible levels of the ground and structures vibration from dynamic effects of subway should be mentioned. Orientation on health standards should be done very carefully, because vibrations in various frequency bands have different levels of danger for human health and for building constructions.

Keywords: stress-strain state, the program complex LIRA-SAPR, non-linear calculations, dynamic forces, numerical methods, vibrations, natural oscillations, forced oscillations, natural frequency, vibration influence.

Вступ. Транспортні динамічні навантаження безумовно впливають на несучі конструкції будівель, що знаходяться поблизу великих магістралей з майже безперервним транспортним потоком, в зв'язку з їх високою інтенсивністю і широким поширенням. При цьому провідна роль належить рейковому (наземному і підземному) транспорту – поїздам, трамваю та метрополітену, що обумовлено, в першу чергу, істотно меншим демпфуванням коливань при передачі їх ґрунту від сталевого колеса через жорстку систему «рейка-шпала». Певну роль відіграє також вага джерела і присутність ударних імпульсів в спектрі впливу за рахунок ударів колеса об рейки на стиках.

Метрополітен, як і всякий рейковий транспорт, є джерелом підвищеного рівня вібрації і шуму. Нові лінії метро часто будуються в сформованій міській забудові, що викликає зростання вібрації в прилеглих до трас або розташованих над ними будівлях. З іншого боку нові будинки будуються в місцях пролягання ліній метрополітену.

Серед авторів робіт по створенню сучасних віброзахисних конструкцій і методики їх розрахунку виділяються наступні фахівці: В.Ф. Барабошін, М.А. Дашевський, І.Я. Дорман, В.А. Глічев, С.І Клинов, Н.А. Костарєв, Н.Д. Кравченко, С.А. Курнавін, М.Г. Мар'єнков, Ю.П. Назаров та ін. З останніх зарубіжних публікацій слід відзначити роботи англійських вчених Andersen L., Crandall SH, Gardien W., Jones CJC, Mete Kun [1], Petyt M., Sheng X., Struit HGThompson DJ, Konstantinos Vogiatzis [2], та ін.

Актуальність задачі захисту будівель від вібрацій рухомого транспорту. Транспортні динамічні навантаження викликають вищі форми власних горизонтальних коливань будівлі і, як наслідок, вертикальні коливання (коливання з площини) перекриттів саме верхніх поверхів. Цю особливість динамічних відгуків елементів конструкції будівель підвищеної поверховості необхідно враховувати до початку будівництва об'єкта і при проведенні контрольних вимірів динамічних характеристик вже зведеного будинку.

Проблема захисту будівель від вібрацій, що виникають при русі поїздів метрополітену, набула особливої актуальності в останні роки, коли при будівництві нових ліній метрополітену почали прокладати, як правило, тунелі мілкого закладення. Цей спосіб прокладки тунелів має

техніко-економічні переваги в порівнянні з прокладкою тунелів глибокого закладення і в даний час є основним. У багатьох випадках вібрація всередині будівель значно перевищує допустимі норми з точки зору фізіологічного впливу на людей, нормальної роботи високоточного обладнання та представляє небезпеку з точки зору пошкодження несучих конструкцій.

Аналіз вібрацій метрополітену. Постановка задачі. Постановка задачі полягає в прогнозуванні поведінки несучих конструкцій споруди до початку будівництва і урахування динамічного впливу в процесі проектування. У зв'язку з цим виникає необхідність створення методики розрахунку висотних будівель, що дозволяє враховувати динамічні і вібраційні впливи більш ефективно.

При проектуванні траси метрополітену мілкового закладення належить враховувати, що при піщаних ґрунтах віброзсув фундаменту будівлі на відстані, наприклад, 40 м від тунелю на частоті 31.5 Гц відрізняється від віброзсуву фундаменту будівлі, розташованої поблизу тунелю, більш ніж в 10 разів. При щільних ґрунтах (супісок, суглинки) амплітуди коливань фундаментів знижуються на відстані 40 м менше ніж в два рази [3].

Вібраційні навантаження в порівнянні зі струсами, що викликаються сейсмічними силами землетрусів, дуже слабкі. Однак внаслідок тривалості впливу вони можуть бути причиною осідання основ і вібротекучості дисперсних ґрунтів. При тривалій дії струсів і зростанні прискорення коливань опір зсуву дисперсних ґрунтів, особливо незв'язних, значно зменшується, а зміна коефіцієнта пористості ґрунтів зі зростанням коливань збільшується, обумовлюючи віброущільнення ґрунтів.

Реакція будівлі і характер поширення вібрації залежить не тільки від рівня і спектрального складу коливань, що передаються через ґрунт, а й від динамічних характеристик несучих і огорожувальних конструкцій, від конструктивної системи в цілому. Головним чином, це стосується частот власних горизонтальних коливань будівель і вертикальних коливань елементів перекриттів, типу ґрунту, відстані до джерела вібрації та ін.

При будівництві будівлі поблизу ліній метрополітену (особливо неглибокого закладення) необхідно враховувати, що частота вібрації оздоблення тунелю метро становить від 28...35 Гц (збірні оздоблення) до 60...70 Гц (монолітні оздоблення) і через ґрунт передається на фундамент будівлі. В результаті, домінуючі частоти, що передаються на будівлю, можуть становити від 20 до 80 Гц. Час одноразового впливу зовнішньої вібрації визначається швидкістю поїзного складу і становить 8...15 секунд [4, 5]. Основним джерелом вібрації є удар при проходженні колеса поїзного складу через рейковий стик. Виникаюча при цьому вібрація гасне до моменту проходження через стик наступного колеса.

На цей вплив накладається полічастотна вібрація, що виникає від неідеальної гладкої поверхні матеріалу колеса і рейки, від деформованих коліс, а також від ефекту «вихляння» складу під час руху. На тлі такого впливу переважаючим є вібраційний вплив в діапазоні частот 25...50 Гц. Якщо ця частота коливань близька до власної частоти оздоблення, то навіть з урахуванням фільтруючих особливостей ґрунту, самої будови колії, незалежно від того віброізолюваний шлях чи ні, хвильове випромінювання може посилюватися [5, 6]. Тому стосовно впливу метрополітену на несучі конструкції будівлі, в загальному випадку, не можна говорити про одну переважну частоту. У зв'язку з цим, не вдаючись у конструктивні особливості оздоблення і верхньої будови колії, можна прийняти робочий діапазон частот вібрацій від метро 20...70 Гц. Характерною особливістю зазначеного діапазону є те, що власні частоти перекриттів будівель, як правило, потрапляють в цей діапазон [5-8], що є особливо небезпечним.

Для порівняння, інтенсивність коливань ґрунтів поблизу метрополітену відповідає 6, 7 бальному землетрусу. Карта в інституті геофізики говорить про те, що землетрус магнітудою 5 – на більшості територій України відбувається раз в 100 років, 6-бальний – раз у 5 тисяч, значить ймовірність виникнення землетрусу в зоні Києва і Київської області досить мала. При цьому, постійно діюча вібрація від рухомого транспорту, але з відносно малою амплітудою коливань може призвести до пошкоджень несучих конструкцій, тріщин і, якщо не застосовувати захисні заходи, навіть до руйнувань.

Описана проблема має такі основні завдання:

- дослідження динаміки ґрунту і вібрацій огорожувальних споруд від різного типу динамічних навантажень;
- отримання оцінок рівня ризику перевищення параметрів НДС в несучих конструкціях ближніх будівель нормативно-допустимих значень;
- розробка методики проектування для будівель-аналогів з врахуванням малоциклових, малоамплітудних впливів на несучі конструкції будівель із застосуванням методів нелінійної динаміки.

Математичні залежності. Вертикальні і горизонтальні складові віброшвидкості на поверхні ґрунту визначаються за формулою:

$$v_{1,2}(t) = \sqrt{v_R^2 + v_{1,2t}^2}, \quad (1)$$

де v_R – віброшвидкість, викликана хвилею Релея, що обчислюється за формулою:

$$v_R = \sqrt{\frac{R_0}{H_0}} v_{\max} \exp(-\beta \cdot k_R \cdot x), \quad (2)$$

β – коефіцієнт згасання в ґрунті;

k_R – хвильове число хвилі Релея;

$v_{1,2t}$ – відповідні проекції віброшвидкості, викликані поздовжньої хвилею в ґрунті, які обчислюють за формулою:

$$v_{1,2t} = \sqrt{\frac{R_0}{\sqrt{x^2 + H_0^2}}} \sqrt{v_{1\max}^2 + v_{2\max}^2} \exp(-\beta \cdot k_1 \cdot \sqrt{x^2 + H_0^2}), \quad (3)$$

де H_0 – глибина, на якій знаходиться лоткова частина оброблення тунелю;

x – видалення від поздовжньої осі тунелю;

R_0 – характерний розмір, який представляє собою мінімальну з $D/2$ - половина ширини тунелю;

$k_R = \frac{c_1}{\omega}$ – відношення швидкості поздовжніх хвиль в ґрунті до кругової частоти;

$v_{1,2\max}$ – максимальні величини віброшвидкості на лотковій частині оброблення тунелю;

v_{\max} – максимальне з них.

Значення найбільш низькочастотних складових транспортних динамічних навантажень часто близькі до значень власних частот коливань більшості будівель, які нерідко знаходяться в межах 2...8 Гц, що може привести до додаткового просідання будинків на 50...150 мм [2].

Суть роботи. Зазначені обставини визначили основні напрямки даної статті:

1. Розробка методики розрахунку і аналізу будівлі на дію зовнішнього вібраційного впливу, викликаного рухомим складом метрополітену, з використанням програмного комплексу ЛІРА САПР на основі методу скінченних елементів, по якій можна досліджувати будівлі будь-якого типу для оцінки та інженерного прогнозу поведінки конструкцій.

2. Розробка методик попередньої оцінки та аналізу динамічних явищ в будівлях підвищеної поверховості на стадії проектування, будівництва і експлуатації з метою запобігання негативних ефектів впливу на елементи конструкції і людей вібрацій, викликаних рухом поїзда метрополітену.

Зазвичай для динамічного розрахунку конструкції використовують метод розкладу по формам власних коливань. При цьому точність розрахунку суттєво залежить від числа форм коливання, що враховують. В практичних розрахунках будівельних конструкцій, характерних щільним спектром частот коливань, основним розрахунковим випадком є розрахунок на резонанс.

В сучасному будівництві практично відсутні нормативи з кількісною оцінкою допустимості коливань (по амплітуді і частоті) не тільки ґрунту в районі розташування будівлі або споруди, але і всієї будівлі як в цілому, так і окремих несучих конструктивних елементів. Зустрічаються посилання на те, що якщо виконані санітарні нормативи, то і з міцністю все гаразд, принаймні, не мають під собою наукової та практичної основи. Слід мати на увазі й те, що конструктивна вібрація безпосередньо пов'язана з втомної міцністю.

Для проведення чисельного експерименту було обрано будівлю торгово-офісного комплексу м. Київ, розташовану поруч з метрополітеном неглибокого закладення.

Розрахункова схема (далі РС) є плоскою, у зв'язку з тим, що нелінійний динамічний розрахунок з врахуванням фактору часу при розбитті на кроки величиною до 1 мкс, дуже ресурсоємний. Схема складається із скінченних елементів, що визначають конфігурацію і властивості оточуючих масивів природного ґрунтів, конструкції бурових паль, а також особливості властивостей контактних поверхонь.

Розрахунки було здійснено в програмному комплексі ЛПА-САПР з використанням методів прямого інтегрування рівнянь руху (рис. 1). Це ітераційні крокові методи, які дозволяють отримати компоненти напружено-деформованого стану в будь-який момент часу з урахуванням нелінійних властивостей матеріалу несучих конструкцій та з врахуванням поетапного зведення будівлі. Вже в ході розрахунку можливо виявити виникнення тріщин в деяких елементах [9, 10].

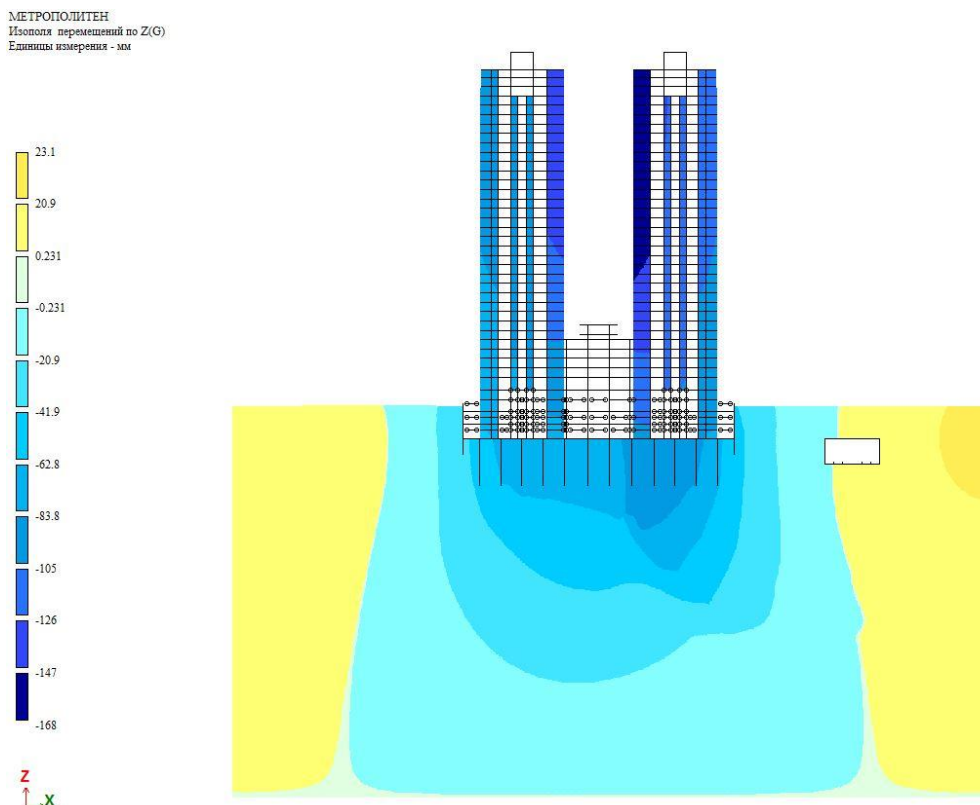


Рис. 1. Результати розрахунку з метрополітемом неглибокого закладення

При розрахунках динамічні навантаження прикладаються з врахуванням фактору часу. Пряме інтегрування рівнянь руху означає, що перед інтеграцією не виконується ніяких додаткових перетворень рівнянь.

Розрахунок на динамічні дії заснований, як відомо, на вирішенні системи диференціальних рівнянь:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = \bar{q}(t), \quad (4)$$

де M, C, K – відповідно матриці мас, демпфірування і жорсткості системи;
 $\bar{u}(t), \dot{\bar{u}}(t), \ddot{\bar{u}}(t)$ – вектори вузлових переміщень, швидкостей і прискорень в момент часу t ;
 $\bar{q}(t)$ – навантаження, відповідне моменту часу t .

Вважається, що початкові швидкості нульові $\dot{\bar{u}}(0) = 0$, а початкові переміщення отримані з рішення першого завантаження $\bar{u}(0) = \bar{u}_1$ [9, 10].

В ході розрахунку визначаються переміщення в контрольних точках будівлі при поступовому прикладанні динамічного навантаження:

$$\left[\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} + \frac{K}{2} \right] u(t + \Delta t) = q(t) + \frac{2M}{\Delta t^2} u(t) - \left[\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t} + \frac{K}{2} \right] u(t - \Delta t) \quad (5)$$

Задача вирішується в лінійній і нелінійній постановці з врахуванням впливу вібрацій метрополітену неглибокого закладення. В ході дослідження було виконано ряд чисельних експериментів з урахуванням нелінійних властивостей ґрунту, що відповідає його реальній роботі (рис. 1), з урахуванням поетапності зведення будівлі, що відображає реальний напружено-деформований стан несучих конструкцій.

При аналізі впливу вібрації від метрополітену на несучі конструкції будівлі розрахунки було проведено згідно рекомендацій [2] в нормованих октавних діапазонах з середньо-геометричними частотами 5,57, 16, 25,5, 31,5 і 63 Гц, так як саме в цих октавах при русі поїздів метрополітену спостерігаються явища резонансу.

На рис. 2 представлена картина вимушених коливань на верхній відмітці 18 поверху будівлі при прикладенні динамічного впливу частотою $\omega = 160$ рад, що відповідає $f = 25,5$ Гц. Виконано розрахунок з кроком інтегрування 0,1 с, час інтегрування – 30 с.

Отримані наступні результати. Постійно діючі коливання метрополітену, що являють собою динамічні навантаження, що багаторазово повторюються, частотою близько 25.5 Гц призводять до коливань всієї будівлі, особливо при гальмуванні состава, що може призвести до пошкоджень несучих конструкцій будівлі, утворенню тріщин. Аналіз результатів чисельного експерименту представлених в табл. 1 дозволяють зробити висновок про близькість динамічних характеристик (вібропереміщень) при впливі метрополітену до сейсмічних впливів інтенсивністю 5...6 балів, особливо при його гальмуванні. При врахуванні ґрунтового масиву, як засобу передачі впливів, отримані результати щодо демпфуючих властивостей ґрунту, якщо ґрунт є жорстким, і навпаки – у випадку м'яких або водонасичених ґрунтів.

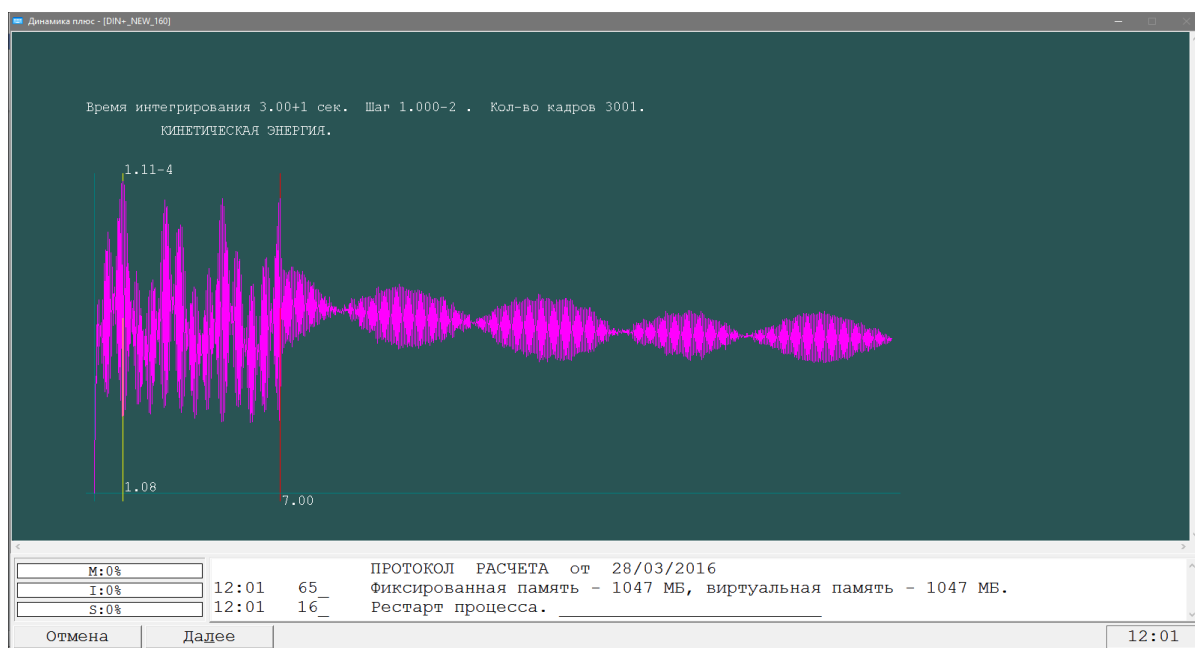


Рис. 2. Картина вимушених коливань в рівні 18 поверху будівлі

В сучасних нормах проектування багатоповерхових і висотних будівель відсутні рекомендації з врахування динамічних мало циклових навантажень. Але при проведенні чисельних експериментів доведено, що при будівництві нових будівель в зоні впливу метрополітену необхідно застосовувати методи гасіння коливань.

Таблиця 1 – Отримані результати чисельного експерименту

Частота, рад	Вібропереміщення, х мм	Віброшвидкість, тах, мм/с	Віброприскорення, тах, мм/с ²
160	783.49	0.084	6.451

Висновки. За основними параметрами: тривалості, зміни в часі, інтенсивністю і частотним складом – динамічні дії від транспортного руху, а тим більше від руху метрополітену, істотно відрізняються як один від одного, так і від інших типів техногенних впливів, що дає підставу розглядати їх як самостійний клас зовнішніх зусиль.

Проекти новозведених в радіусі дії вібрації метрополітену будівель і споруд повинні виконуватися з урахуванням властивостей ґрунтів, та в залежності від оцінки частотних характеристик ґрунтового середовища, приймати рішення щодо влаштування основ та фундаментів.

Слід зазначити практичну відсутність нормативів на допустимі рівні вібрації ґрунту і споруд від динамічних впливів метрополітену. Орієнтуватися в даному випадку на санітарні норми слід дуже обережно, оскільки для людини і будівельних конструкцій вібрації в різних діапазонах частот мають різні ступені небезпеки.

В рівній мірі дуже проблематичне поширення на транспортну вібрацію нормативів сейсмостійкого будівництва, які самі в ряді випадків мають досить проблематичний характер.

Література

1. Vogiatzis K. Environmental ground borne noise and vibration protection of sensitive cultural receptors along the Athens Metro Extension to Piraeu / Konstantinos Vogiatzis., 2011. – (WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT). – (Issue 11). – С. 359 – 370.
2. СП 23-105-2004. Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена. – М.: Госстрой России, 2004. – 42 с.
3. Kun M. Influence of the fault zone in shallow tunneling: A case study of Izmir Metro Tunnel / M. Kun, T. Onargan, 2013. – (Tunnelling and Underground Space Technology). – (33). – С. 34–45.
4. Борисов Е.К. Экспериментальная динамика сооружений: мониторинг транспортной вибрации / Е.К. Борисов, С.Г. Алимов, А.Г. Усов. – Петропавловск-Камчатский, 2007. – (КамчатГТУ). – С. 128.
5. Динамический расчет зданий и сооружений: справочник проектировщика / [М.Ф. Барштейн, В.А. Ильичев, Б.Г. Коренев и др.]; под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
6. Дубровская Т.В. О выборе конструктивного решения здания, расположенного над линией метрополитена / Т.В. Дубровская, В.М. Пятецкий, И.И. Файнберг // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений». – Л., 1986. – (Госстрой СССР). – С. 119–120.
7. Ишанходжаев А.А. О проблеме защиты сооружений от вибраций, возникающих при прохождении поездов метрополитена / А.А. Ишанходжаев // Тез. докл. VI Всесоюз. конф. «Эксперим. исслед. инж. сооружений». – Л., 1986. – (Госстрой СССР). – С. 122–123.
8. Ковальчук О.А. Особенности динамической реакции здания повышенной этажности на вибрации, возбуждаемые движением поездов метрополитена / О.А. Ковальчук, М.А. Дашевский // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 4. – С. 24, 25.
9. Барабаш М.С. Численное моделирование воздействия динамических нагрузок метрополитена на близстоящие здания / М.С. Барабаш, Ю.В. Гензерський, В. Овчарова // Містобудування та територіальне планування: Наук-техн. Збірник, 2013. – К.: КНУБА. – Вип. 48. – С. 46–52.
10. Барабаш М.С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш. – К. : Изд-во «Сталь», 2014. – 301 с.

Стаття надійшла 23.11.2016