УДК 624.04: 531/534; 725.3

 DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2019.36.5>
Хоменко В.М.

с.н.с., ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва», м. Київ

Іващенко А.П.

начальник відділу, ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЇ В ЖИТЛОВИХ БУДИНКАХ ВІД РУХУ ПОЇЗДІВ МЕТРО МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ ТА МОЖЛИВІ ШЛЯХИ З ЇЇ ЗНИЖЕННЯ

Анотація. У статті розглянуто дослідження вібрації в існуючому житловому будинку № 38 на вулиці Васильківській, що виникає внаслідок руху поїздів метро мілкового закладання по розташованій поруч лінії Київського метрополітену. У результаті натурних досліджень виявлено, що характерний для проїзду потягів метро частотний спектр на поверхні землі між будинком та тунелем метро дорівнював 50-150 Гц, що відповідає віброприскоренню 50-55 дБ. За будинком на відстані більше 70 м від краю тунелю рівень вібрації не відрізняється від фонового. Спектр вібрації на стінах підвальних приміщень будинку складав 30-120 Гц, що відповідав 40-45 дБ, а на перекриттях будинку – 31,5-63 Гц, що більше найменшої резонансної частоти основного тону власних коливань будинку 3,57 Гц, яку було визначено за імперичними формулами. Після дослідження існуючої конструкції верхньої будови колії в тунелі проти будинку виявлено, що вони не забезпечують необхідне зниження рівнів вібрації в ньому, а реконструкція колії є досить кошовною та вимагає припинення на тривалий термін руху потягів. Тому зменшити вібрацію в будинку запропоновано на шляху її розповсюдження між будинком та лінією метро за допомогою влаштування відсічного противібраційного екрану. Для чого проти будинку побудовано два варіанти дослідного екрану: 1-й – довжиною 25 м і глибиною 20 м із двох рядів свердловин Ш0,6 м, розташованих у шаховому порядку із кроком 1 м, що заповнені гумовою крихтою, та 2-й – довжиною 37 м глибиною 10 м з одного ряду свердловин Ш 0,3 м з армованого цементу. Контрольні вимірювання вібрації поверхні ґрунту біля стіни будинку за екраном із гумової крихти показали зниження рівнів вібрації в діапазоні смуг 4-63 Гц на 5-20 дБ, а вимірювання вібрації в будівлі відділення Пошти за екраном із цементних паль показало зниження в діапазоні 40-120 Гц на 7-8 дБ.

Для оцінки ефективності виконання відсічного екрану розроблено комп'ютерну модель «будівля-ґрунт-тунелі метро» у програмному комплексі «Ліра-Сапр».

Ключові слова: вібрація, будинок, метро, вимірювання, екран.

Постановка проблеми. Лінії метрополітену мілкового закладання є джерелом підвищеного рівня вібрації і шуму в будинках, прилеглих до неї. Виявлення небезпечних резонансних динамічних коливань та вживання заходів зі зниження вібрації є метою забезпечення належної якості життя людей та стану будівель.

У житловому будинку № 38 по вул. Васильківській в м. Києві, що розташований між станціями «Васильківська» та «Виставковий центр» (Рис. 1), проведено дослідження впливу вібрації та пошук оптимального способу захисту будинку від динамічного впливу метро мілкового закладання.

Відстань у плані від габариту найближчого тунелю до зовнішньої стіни будинку – 19,5 м, що удвічі менше допустимого в ДБН [1]. Відстань від тунелю до поверхні землі змінюється від 5 до 7,2 м. Зовнішній діаметр тунелю метро – 6 м з оправою зі збірних блоків товщиною 300 мм.

Будинок із розмірами у плані 50,5х10,56 м має 9 поверхів зі збірних керамзитобетонних панелей товщиною 300 мм, стіни підвалу глибиною 1,9 м – зі збірних з/б панелей товщиною 160 мм. Фундамент – стрічковий мілкового закладання.

Основною динамічною характеристикою будинку є найменша (основна) частота власних коливань. Для панельного будинку згідно [2] з урахуванням протяжності будинку та категорії ґрунту основи за сейсмічними властивостями

$$T = 0,02 * n + 0,1 = 0,02 * 9 + 0,1 = 0,28 \text{с,}$$

Рис. 1. Будинок № 38 по вул. Васильківській по відношенню до лінії метро

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,28} = 3,57 \text{ Гц} \quad (1)$$

де $n=9$ - кількості поверхів, T – період власних коливань, f – найменша частота власних коливань.

Аналіз останніх досліджень. З аналізу літератури видно, що можливими шляхами зменшення вібрації є амортизуючі підрейкові прокладки; безшпальне спираєння рейок, за якого рейки прилягають за всією довжиною до основи шляху, що забезпечує його постійну вертикальну жорсткість; динамічне гасіння в лотковій частині тунелю у вигляді «плаваючої» залізобетонної плити, по

периметру якої влаштовують акустичний шов, що заповнюється пружними матеріалами (Рис. 2).

Недоліком даного способу є необхідність реконструкції наявної верхньої будови із припиненням на тривалий термін руху потягів.

Під час огляду тунелю виявлено, що на ділянці від см. м. «Васильківська» до будинку застосовуються різні конструкції колії (рис. 3), а саме:

А. Колія на дерев'яних шпалах. Під рейками укладено щільні гумові прокладки товщиною 10 мм та два шари фанери товщиною по 5 мм.

Б. Колія на рейкових блокових опорах EBS. Блоки розміром 420x470 мм втоплені в амортизуючий гумовий шар та розташовані з кроком 610 мм.

В. Колія на з/б лежневих блоках розміром 2200x570 мм висотою 200 мм, що спираються на гумові клини (від станції «Голосіївська» до ПК45+80).

Із перелічених конструкцій протівібраційними є колії на опорах EBS та на лежневих блоках.

Було виконано дослідження вібрації між будинком та тунелем та всередині будинку.

Коливальний процес можливо описати за допомогою трьох величин: переміщення, швидкість та прискорення коливань. Як правило, частотний спектр коливань від руху поїздів метрополітену знаходиться в межах низьких та середніх частот. Відомо, що в області більш низьких частот більш вираженим є спектр вібропереміщення, але після пробних вимірювань на поверхні землі, виявлено його низький рівень на рівні власних шумів приладу. В якості основного параметру вимірювання вібрації було обрано віброприскорення, а саме його середньоквадратичне значення, виражене в децибелах в октавних смугах та широкосмуговому спектрі.

Вібрація оцінювалась через спектральний аналіз за допомогою цифрового аналізатора, що складний коли-

вальний процес представляє як суму простих синусоїдальних коливань. Спектральний аналіз здійснювався в широкосмуговому спектрі, на якому в реальному часі було видно весь діапазон коливань.

В якості основного приладу застосовувався цифровий аналізатор спектру коливань «DC-2111» із датчиком, чутливим до віброприскорення «Брюль і К'єр – 4370», та цифровий октавний віброметр «Октава-101А» із датчиком «Global test - AP».

Під час визначення параметрів вібрації ґрунту між будинком та тунелем датчики встановлювалися на бетонні плити пішохідних доріжок або на спеціальний металевий штир, що занурювався у ґрунт. У підвальних приміщеннях датчики встановлювалися на найближчі до лінії метро зовнішні стіни, в житлових приміщеннях квартир – на підлогу (Рис. 4). Для проведення вимірювань обрано найбільш навантажений період доби руху поїздів – з 7:30 до 10:30 ранку. Середня тривалість реєстрації проїзду потягу становила 10-15 с, що було достатньо для виділення характерного для руху потягу спектру.

В якості результату заміру на поверхні землі та в підвальних приміщеннях прийнято максимальні (пікові) значення віброприскорення [3], а в квартирах будинків – середньоквадратичні значення рівнів вібрації, дБ в октавних смугах із частотами від 1 до 63 Гц, що додатково порівнювалися з гігієнічними нормативами [2]. У кожній точці вібрація заміряна в трьох ортогональних напрямках.

Результати дослідження вібрації між будинком та тунелем. За характером спектру вібрація – широкосмугова. За тимчасовими характеристиками вібрація є непостійною, тому що згідно з [3] рівень віброприскорення за 10-хвилинний період часу змінюється більше ніж на 6 дБ.

Із трьох напрямків вимірювання на поверхні землі переважала горизонтальна вібрація з характерним для

Рис. 2. Схема віброізоляційної конструкції шляху з «плаваючою» плитою: 1 – рейка; 2 – залізобетонна «плаваюча» плита; 3 – прокладки з еластичного матеріалу; 4 – акустичний шов; 5 – бетон лотка; 6 – залізобетонна оправа тунелю

проїзду потягів метро частотним спектром на поверхні землі від 50 до 150 Гц (Рис. 5). Максимальні пікові значення віброприскорення зафіксовано над тунелем на рівні 50-55 дБ на частотах 82,5-130 Гц, біля стіни будинку на рівні 46-50 дБ.

Інститутом «Київгео» в 2011 виконано оцінку вібрації конструкцій тунелю на ділянці з лежневою конструкцією шляху (гумові клини) та з конструкцією шляху на блокових опорах EBS та виявлено, що в діапазоні частотних смуг від 31,5 до 100 Гц більш ефективно зниження рівня вібрації (до 7 дБ) між рейкою та оправою тунелю відбувається на лежневій конструкції шляху. Цей діапазон приблизно співпадає з виявленим діапазоном спектру горизонтальних коливань поверхні землі (40-150 Гц), що передаються на будинок № 38. Тому на частотах, що викликають коливання поверхні ґрунту, більш ефективним є застосування лежневої конструкції шляху.

Результати досліджень вібрації в будинку. Найбільші показники мала вертикальна вібрація в діапазонах 31,5 та 63 Гц – 10-20 дБ, що не перевищувало допустимі рівні. У кількох точках у смузі 16 Гц перевищення допустимого рівня складало 2-8 дБ. Спектр на стінах підвальних приміщень складав 30-120 Гц, а пікові значення – 40-45 дБ на частотах 80-105 Гц. Інтенсивність вібрації зменшується по мірі віддалення від тунелю через поглинання енергії коливань ґрунтовою породою та будинком. За будинком №3 8 на відстані 70 м від краю тунелю рівні віброприскорення суттєво не відрізняються від фонового (Рис. 6).

Існуючі конструкції верхньої будови колії на ділянці тунелю, що напроти будинку, не забезпечують необхідне зниження рівнів вібрації в будинку, тому зменшити вібрацію в будинку запропоновано на шляху її

Рис. 3. Конструкції колії в тунелі: 1 – шпала; 2 – гумова підрейкова прокладка товщиною 10 мм; 3- з/б блок; 4 – гумовий шар; 5 – гумові клини; А – Колія на на дерев'яних шпалах; Б – колія на рейкових блокових опорах EBS; В – колія на лежневих блокових опорах із клинами

Рис. 4. Вимірювання вібрації: А – на поверхні ґрунту; Б – на стіні підвалу; 1 – аналізатор спектру «DC-2111»; 2 – віброметр «Октава-101А»; 3 – датчик «Брюль і К'єр- 4370»; 4 – датчик «Global test – AP»; 5 – металевий штир; 6 – стіна підвалу

розповсюдження за допомогою влаштування **відсічного противібраційного екрану**.

Суть даного способу полягає у введенні в ґрунтовий масив суттєвої неоднорідності, яка в системі передачі вібрації позбавляє ґрунт жорсткої передаточної ланки. Щоб ефективно послабити вібрацію, оголовок та дно траншеї не повинні мати жорсткої передаточної ланки, так званого «акустичного містка», а траншея повинна бути достатньо глибокою і огинати будинки.

Для визначення геометричних параметрів такого екрану було проведено розрахунки динамічних характеристик ґрунтів основи. Вібрація тунелю викликає в оточуючому ґрунті коливання часток ґрунту, що розповсюджуються у вигляді механічних хвиль зі швидкостями, що залежать від щільності та пружних властивостей ґрунту. У товщі ґрунту виникають глибинні повздовжні (р-хвилі) та поперечні (s-хвилі). Хвилі, що досягають поверхні землі, розповсюджуються по ній. У результаті цього на поверхні виникають поверхневі (релеєвські) L-хвилі.

Екран влаштовується в ґрунті на глибину від поверхні землі, що дорівнює подвійній величині довжини поверх-

невої (релеєвської) хвилі, але не меншу ніж нижня точка габариту тунелю на ділянці між будинками, що складає 13,2 м. Довжина хвилі (λ) – відстань, на яку поширюється хвиля за час, що дорівнює періоду коливань

$$\lambda = \frac{cL}{f} = \frac{187,7 \frac{M}{c}}{50 \frac{1}{c}} = 3,75M \quad H = 2 * \lambda, \quad H \geq h,$$

$$H = 2 * 3,75M = 7,5M \quad (2)$$

$$c_L \approx 0,93 \cdot c_S = 0,93 * 293,3 \frac{M}{c} = 272,8 \frac{M}{c} \quad (3)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{2gG}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 * 10 \frac{M}{c^2} * 73,1 * 10^2 \frac{m}{M^2}}{1,7 \frac{m}{M^3}}} = 293,3 \frac{M}{c} \quad (4)$$

Рис. 5. Характерний діапазон частот горизонтальних коливань на поверхні ґрунту біля тунелю під час проїзду поїзду напроти будинку

Рис. 6. Ізолінії поширення вібрації у смузі 63 Гц в районі будинку № 38

$$c_p = \sqrt{\frac{2g(1-\nu)G}{\rho(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \cdot \frac{m}{c^2} (1-0,3) \cdot 73,1 \cdot 10^2 \frac{m}{m^2}}{1,7 \cdot \frac{m}{m^3} (1-2 \cdot 0,3)}} = 387,9 \frac{m}{c} \quad (5)$$

$$G = \frac{E_D}{2(1+\nu)} = \frac{190}{2(1+0,3)} = 73,1 \text{ МПа} \quad (6)$$

де λ – довжина хвилі, H – глибина влаштування екрану, $h = 13,2$ м – нижня точка габариту тунелю, c_L – швидкість розповсюдження поверхневої (релєвської) хвилі, c_S – швидкість розповсюдження поперечної хвилі [4], c_P – швидкість розповсюдження повздовжньої хвилі [4], $f = 50$ Гц – частота спектру коливань на поверхні землі, з якої починається спектральна крива.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ – модуль зсування ґрунту,}$$

ρ – щільність ґрунту,

$\nu = 0,3$ – к-т Пуасона для пісків,

$$g = 10 \text{ м/с}^2,$$

Рис. 8. Графік зв'язку динамічного модуля пружності E_D і модуля деформації $E_{деф}$ для неводонасичених ґрунтів: 2 – піски рф В.І. Бондарєв, 3 – піски за В.Н. Агєєвим

Рис. 9. План та розріз розташування дослідної ділянки віброізоляційного екрану: 1 – екран із паль із гумової крихти; 2 – екран з армованих цементних паль; 3 – точки контрольних вимірів

E_d – динамічний модуль пружності, який визначається в залежності від модуля деформації $E_{\text{деф}}$ за лінійною залежністю за графіком (Рис. 8).

Під час динамічного стиску відбувається збільшення пружних властивостей ґрунту, тому динамічний модуль пружності більший за статичний.

Відповідно до інженерно-геологічних досліджень ділянки забудови в основі фундаментів залягає пісок мілкий пілуватий, середньої щільності, маловологий та вологий, в якому прокладено тунелі метрополітену. Приймаємо глибину влаштування екрану з урахуванням затухання коливань по мірі заглиблення – 20 м. Достатня ширина екрану повинна бути не менше $1/6$ довжини повздовжньої хвилі

$$\lambda_p = \frac{c_p}{f} = \frac{387,9 \frac{m}{c}}{50 \frac{1}{c}} = 7,8 m, \quad b = \frac{1}{6} * 7,8 m = 1,3 m$$

та не менше $1/3$ довжини поперечної хвилі,

$$\lambda_s = \frac{c_s}{f} = \frac{293,3 \frac{m}{c}}{50 \frac{1}{c}} = 5,9 m, \quad b = \frac{1}{3} * 5,9 m = 2 m \quad (7)$$

де b – ширина екрану, λ_p – довжина повздовжньої хвилі, λ_s – довжина поперечної хвилі.

Екран влаштовується у вигляді траншеї, внутрішній простір якої заповнений суцільним або гранульованим матеріалом із низьким модулем пружності. Такі матеріали мають свої переваги та недоліки.

Між будинком та лінією метро за проектом ДП «Проектний інститут Укрметротунельпроект» побудовано дослідну ділянку екрану довжиною 25 м глибиною 20 м із двох рядів свердловин III 0,6 м, розташованих у шаховому порядку із кроком 1 м, що заповнені гумовою крихтою (Рис. 9).

Виконано контрольні вимірювання вібрації на поверхні ґрунту біля стіни будинку за дослідним екраном та виявлено наявність за екраном зниження рівнів вібрації в діапазоні смуг 4-63 Гц на 5-20 дБ.

Висновки. У статті розглянуто дослідження вібрації в існуючому житловому будинку № 38 по вулиці Васильківській, що виникає внаслідок руху поїздів метро мілкого закладання по розташованій поруч лінії київського метрополітену.

Характерний для проїзду потягів метро частотний спектр на поверхні землі між будинком та тунелем метро дорівнював 50-150 Гц, що відповідає віброприскоренню 50-55 дБ. За будинком на відстані більше 70 м від краю тунелю рівень вібрації не відрізняється від фонового.

Спектр вібрації на стінах підвальных приміщень будинку складав 30-120 Гц, що відповідав 40-45 дБ, а на перекриттях будинку – 31,5-63 Гц, що більше найменшої резонансної частоти основного тону власних коливань будинку 3,57 Гц.

Існуючі конструкції верхньої будови колії в тунелі напроти будинку не забезпечують необхідне зниження рівнів вібрації в ньому, а реконструкція колії є досить коштовною та вимагає припинення на тривалий термін руху потягів, тому зменшити вібрацію в будинку запропоновано на шляху її розповсюдження між будинком та лінією метро за допомогою влаштування відсічного противібраційного екрану.

Побудовано два варіанти дослідного екрану: 1-й – довжиною 25 м і глибиною 20 м із двох рядів свердловин III 0,6 м, розташованих у шаховому порядку із кроком 1 м, що заповнені гумовою крихтою, та 2-й – довжиною 37 м глибиною 10 м з одного ряду свердловин III 0,3 м з армованого цементу.

Контрольні вимірювання вібрації поверхні ґрунту біля стіни будинку за екраном із гумової крихти показали зниження рівнів вібрації в діапазоні смуг 4-63 Гц на 5-20 дБ, а вимірювання вібрації в будівлі відділення Пошти за екраном із цементних паль показало зниження в діапазоні 40-120 Гц на 7-8 дБ.

Для оцінки ефективності виконання відсічного екрану розроблено комп'ютерну модель «будівля-ґрунт-тунелі метро» у програмному комплексі «Ліра-Сапр».

Література

- 1 ДБН В.2.3-7-2003 Споруди транспорту. Метрополітени.
- 2 Коренев Б.Г. Динамический расчет зданий на специальные воздействия.
- 3 ДБН В.1.1-12:2006 Будівництво в сейсмічних районах України.
- 4 МР 2957-84 Методические рекомендации по измерению и гигиенической оценке вибрации в жилых помещениях.

References

1. DBN B.2.3-7-2003 Transport facilities. Subways.
2. Korenev B.G. Dynamic calculation of buildings for special effects.
3. DBN V.1.1-12: 2006 Budivnitstvo in seismic regions of Ukraine.
4. MP 2957-84 Guidelines for the measurement and hygienic assessment of vibration in residential premises.

RESEARCH OF VIBRATION IN RESIDENTIAL BUILDINGS FROM MOVEMENT OF SUBWAY TRAINS AND POSSIBLE WAYS OF IT REDUCEING

Abstract. The article deals with the study of vibration in the existing apartment building # 38 down Vasylkivska Street, which results from the movement of subway trains along the Kiev underground line. As a result of field studies, it is found that the frequency spectrum of the subway train on the surface of the earth between the house and the subway tunnel was 50-150 Hz, which corresponds to a vibration acceleration of 50-55 dB. Behind a house more than 70 m from the edge of the tunnel, the vibration level does not differ from the background. The vibration spectrum on the walls of the basements of the house was 30-120 Hz, which corresponded to 40-45 dB, and on the floors of the house 31,5-63 Hz, which is greater than the smallest resonant frequency of the fundamental tone of the house's own oscillations of 3,57 Hz, which was determined by imperial formulas. After examining the existing structure of the upper structure of the track in the tunnel opposite the house, it was found that they do not provide the necessary reduction of the levels of vibration in it, and the reconstruction of the track is quite expensive and requires suspension for a long period of train movement. Therefore, it is suggested to reduce vibration in the house by extending it between the house and the metro line by means of an anti-vibration screen. For what's opposite the house two variants of the test screen

were constructed: 1st – 25 m long 20 m deep from two rows of wells III 0,6 m staggered in 1 m increments, filled with a rubber crumb and 2nd – 37 m deep 10 m from one row of wells III 0,3 m from reinforced cement. Control measurements of the vibration of the soil surface near the wall of the house behind the screen of a rubber crumb showed a decrease in vibration levels in the band of 4-63 Hz by 5-20 dB, and the measurement of vibration in the building of the Post Office screen of cement piles showed a decrease in the range of 40-120 Hz 7-8 dB. To evaluate the efficiency of the cut-off screen, a computer model “subway building-tunnels” in the software complex “Lira-Sapr” was developed.

Key words: vibration, house, subway, measurement, screen.

Khomenko V.M.

Senior Researcher, “Scientific Research Institute of Building Production”, Kyiv

Ivashchenko A.P.

Department head, “Ukrmetrteststandart”, Kyiv