

## **ДЕФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЙ СТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

*А. М. Самедов, докт. техн. наук, Н. В. Зуевская, канд. техн. наук,  
Е. А. Жданова, асп., М. Заре, Х. Эбрахими, магистры (НТУУ “КПИ”)*

*Розглянуто проблеми деформування основ станцій метрополітену від динамічних впливів рухомого складу. Запропоновано методи визначення переміщень частинок ґрунту при динамічних впливах хвиль у розрідженому масиві водонасичених ґрунтів.*

*Deformations of underground stations bases due to dynamic influences of rolling stock are considered. Methods for determination of particles moving at dynamic influences of waves in running water-bearing ground mass are proposed.*

Динамические воздействия на конструкции, основания зданий и сооружений изучались многими учеными [1–9]. К сожалению, в этих трудах отсутствуют данные по перемещению грунтового массива и выпиранию грунта вследствие воздействия нагрузок от подвижного состава.

При динамических воздействиях подвижного состава метрополитена водонасыщенные грунты разжижаются. У маловлажных и влажных грунтов резко уменьшаются прочностные параметры  $c$  и  $\varphi$  ( $c$  – сила сцепления,  $\varphi$  – угол внутреннего трения), ослабляются связи между частицами, которые сдвигаются относительно друг друга. Вследствие этого происходит выпирание грунта посередине станции метрополитена.

Процессы разжижения водонасыщенных грунтов, вызванные движением подземного состава, сопровождаются кратковременными периодическими колебаниями, продолжительность которых колеблется от 10 до 30 с. В это время затухание колебаний в грунтовой среде почти не происходит, так как идет наложение на них новых колебаний.

Спектральный состав этих колебаний достаточно широк: 10...120 Гц, однако основная энергия колебаний сосредоточена в диапазоне 40...65 Гц. Скорость колебаний 0,5...1,2 мм/с, ускорение – 15...25 см/с<sup>2</sup>, частота – 10...50 Гц, наибольшая амплитуда колебаний – 2...3 мкм. При таких параметрах колебаний может происходить разжижение водонасыщенного грунтового массива, смещение и выпирание грунтов оснований под рельсовыми конструкциями метрополитена и на прилегающих участках.

Движение подвижного состава метрополитена мелкого заложения может вызвать колебания строительных конструкций жилых домов и других зданий, расположенных вблизи тоннелей метрополитена, частотой 40...75 Гц и амплитудой 0,8...1,5 мкм, что сопровождается возникновением и развитием трещин в конструкциях зданий и сооружений. Колебания и вибрация от подвижного состава часто превышают гигиенические санитарные нормы.

Человек способен ощущать весьма малые колебания с амплитудой порядка  $0,001\dots 0,0001$  мм. Чем больше частота колебаний, тем меньше амплитуда, воспринимаемая человеком. При частоте 100 колебаний в минуту человек ощущает колебания с амплитудой до 0,1 мм, при частоте 3000 колебаний в минуту – с амплитудой 0,001 мм. Систематическое и продолжительное действие повышенных колебаний, частота и амплитуда которых превышает допустимый уровень, оказывает вредное влияние на здоровье человека и в отдельных случаях может привести к заболеванию “вибрационной болезнью”.

Для оценки характера воздействия колебаний на людей в немецких нормах была введена единица измерения “пал”; вредными для здоровья человека колебаниями зданий от движущего транспорта считаются 30...40 пал ( $106\dots 116$  дБ), 60...80 пал ( $136\dots 150$  дБ) вызывают заболевание человека. При оценке колебаний в децибелах скорость принята  $5 \cdot 10^{-5}$  мм/с, уровень смещения  $8 \cdot 10^{-9}$  мм/с, ускорение  $W_0 = 3 \cdot 10^{-1}$  мм/с<sup>2</sup>.

Для предотвращения отрицательного влияния колебательных процессов, вызываемых движением подземного транспорта, на здоровье людей, проживающих вблизи метрополитена, предусматриваются различные виброзащитные мероприятия. Однако целесообразность и эффективность этих мероприятий следует проверить в реальных условиях.

Рассмотрим амплитудные изменения горизонтальных и вертикальных колебаний разжиженного массива вокруг тоннелей или путей подземного пространства. Поставленная задача относится к плоским задачам, так как длина тоннеля в сотни раз больше его ширины. Динамическая нагрузка от подвижного состава создает пульсирующие колебания, которые приводят массив грунта к движениям и сдвигающим деформациям (рис. 1).

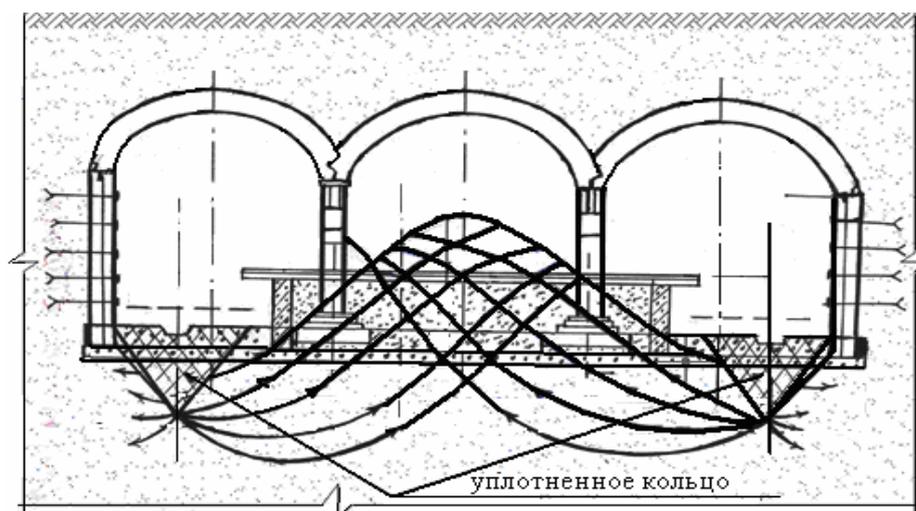


Рис. 1. Схема выпирания грунтов вследствие динамического воздействия подвижного состава на поверхность в центре платформы станции метрополитена

Для решения задачи положим, что конструкция тоннеля имеет вид жесткой крепи и получает перемещение от импульсного движения в вертикальном (рис. 2, а) и горизонтальном (рис. 2, б) направлениях.

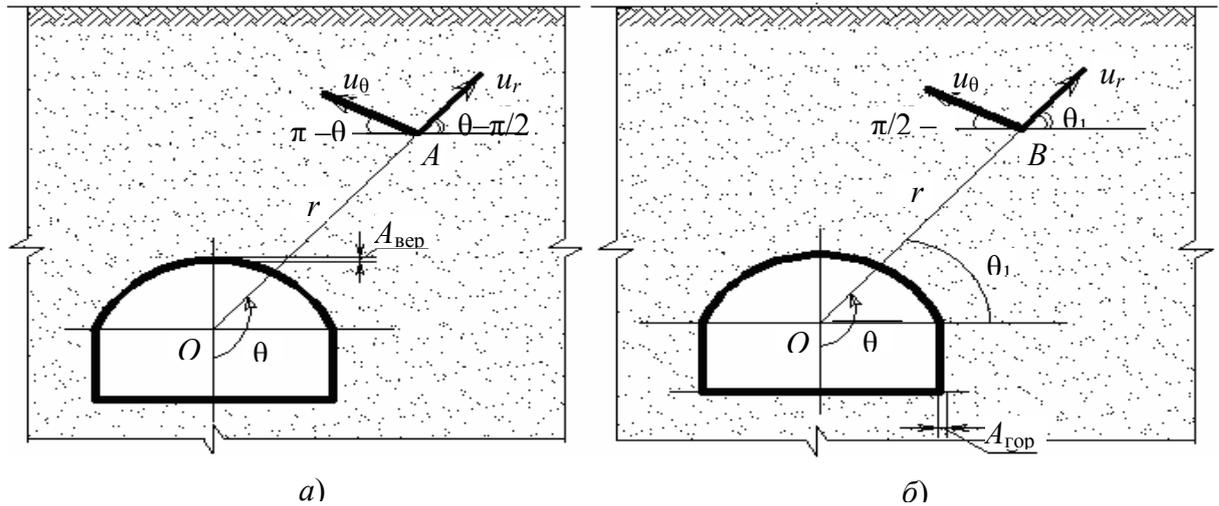


Рис. 2. Перемещения в изотропной упругой полуплоскости водонасыщенного массива грунта, вызванные заданным гармоническим движением конструкции тоннеля при движении поездов: *а* – от вертикальных; *б* – от горизонтальных колебаний

От перемещения конструкции тоннеля в любых точках водонасыщенного массива грунта, например в точках *A* и *B* (см. рис. 2), происходит перемещение частиц грунта, которое приводит к разжижению массива или выпиранию мало-влажного или влажного грунта посередине платформы станции метрополитена.

Перемещение точек в грунтовом массиве при выпирании или разжижении в упругой плоскости в полярной системе координат  $r$  и  $\theta$  в точках *A* и *B* (см. рис. 2) определяем по следующим формулам.

Перемещение точек по координатам  $r$  и  $\theta$ :

$$\left. \begin{aligned} u_\theta &= \frac{ARm_1 \cdot \sin \theta}{C^2 + D^2} \sqrt{T^2 + U^2} \cos(\omega t - \varphi_\theta); \\ u_r &= \frac{ARm_1 \cdot \cos \theta}{C^2 + D^2} \sqrt{P^2 + S^2} \cos(\omega t - \varphi_r). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Обозначим параметры, входящие в формулы:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{B}{rm_2} \cdot J_0(m_2 r) + QJ_0^1(m_1 r) + \frac{M}{rm_2} Y_0(m_2 r) + NY_0^1(m_1 r); \\ S &= \frac{M}{rm_2} \cdot J_0(m_2 r) + NJ_0^1(m_1 r) - \frac{B}{rm_2} Y_0(m_2 r) - QY_0^1(k_1 r); \\ T &= \frac{Q}{rm_1} \cdot J_0(m_1 r) + BJ_0^1(m_2 r) + \frac{N}{rm_1} Y_0(m_1 r) + MY_0^1(k_2 r); \\ U &= \frac{N}{rm_1} \cdot J_1(m_1 r) + MJ_1^1(m_2 r) - \frac{Q}{rm_1} Y_0(m_1 r) - BY_0^1(m_2 r); \\ B &= LJ_1(m_1 R) + DY_0(m_1 R); M = DJ_1(m_1 R) - LY_0(m_1 R); \\ Q &= MJ_1(m_2 R) + DY_0(m_2 R); N = DJ_1(m_2 R) - MY_0(m_2 R); \\ C &= Rk_1 J_1^1(k_2 R) J_2(k_1 R) - Rk_1 Y_1^1(k_2 R) Y_2(k_1 R) + J_2(k_2 R) J_1(k_1 R) - Y_2(k_2 R) J_1(k_1 R); \\ D &= Rm_1 J_1(m_1 R) Y_0^1(m_2 R) + Rm_1 J_0^1(m_2 R) Y_0(m_1 R) + \\ &+ J_0(m_1 R) Y_0(m_2 R) + J_1(m_2 R) Y_0(m_1 R); \\ \operatorname{tg} \varphi_r &= -\frac{S}{P}; \operatorname{tg} \varphi_\theta = -\frac{U}{T}; m_1 = \frac{\omega}{c_1}; m_2 = \frac{\omega}{c_2}; r_1 = m_1 r; r_2 = m_2 r, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – скорости продольных и поперечных волн в грунтовом массиве или в упругой среде;  $R$ ,  $\omega$ ,  $A$  – соответственно радиус, угловая частота, амплитуда колебаний конструкции тоннеля;  $r$  – радиус-вектор точки, в которой определяют перемещение частиц грунта;  $t$  – время;  $J_0(x)$ ,  $J_1(x)$  – функции Бесселя;  $J_0^1(x)$  и  $J_1^1(x)$  – производные функции Бесселя;  $Y_0(x)$  – функция Неймана;  $Y_0^1(x)$  – производная функции Неймана.

При решении многих задач в математической физике и механике применяются функции Бесселя в следующем виде:

$$x^2 y'' + xy' + (x^2 - \nu^2)y = 0, \quad (3)$$

где  $\nu$  – постоянная;  $x$ ,  $y$  – координатные оси;  $y'$  и  $y''$  – производные от  $y$ .

Поскольку уравнение (3) имеет особую точку при  $x = 0$ , то его частное решение следует искать в виде обобщенного степенного ряда:

$$y = x^p \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k, \quad (a_0 \neq 0). \quad (4)$$

Общее решение уравнения (а) может быть представлено в виде

$$y = C_1 J_\nu(x) + C_2 Y_0(x), \quad (5)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные.

Функции Бесселя принимаем в виде:

$$J_\nu(x) = J_0(x) + J_1(x). \quad (6)$$

В таком случае эти функции представляются следующими рядами:

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} - \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots; \quad (7)$$

$$J_1(x) = \frac{x}{2} \left( 1 - \frac{x^2}{2 \cdot 4} + \frac{x^4}{2 \cdot 4^2 \cdot 6} - \frac{x^6}{2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8} + \dots \right). \quad (8)$$

Функция Неймана  $Y_0(x)$  зависит от функции Бесселя и определяется по формуле

$$Y_0(x) = \frac{J_\nu(x) \cdot \cos x\pi}{\sin x\pi}. \quad (9)$$

Графики функций  $J_0(x)$ ,  $J_1(x)$  и  $Y_0(x)$  приведены на рис. 3.

Функции Бесселя зависят от безразмерных координат  $\eta = \rho/L_0$  (где  $\rho$  – произвольный отрезок,  $L_0$  – длина перемещений частиц грунта). При различных величинах  $\eta$  значения функции Бесселя  $J_0(x)$  и Неймана  $Y_0(x)$  могут быть взяты из табл. 1, доп. III [12, с. 471] или из математических справочников.

Теперь можно определить амплитуды горизонтальных колебаний точек упругой среды в разжиженном массиве или перемещение при выпирании грунта, вызванное вертикальными колебаниями от движущегося подвижного состава, которые передаются через жесткие подземные крепи. При этом перемещение частиц грунта или разжижение массива происходит за пределами тоннеля.

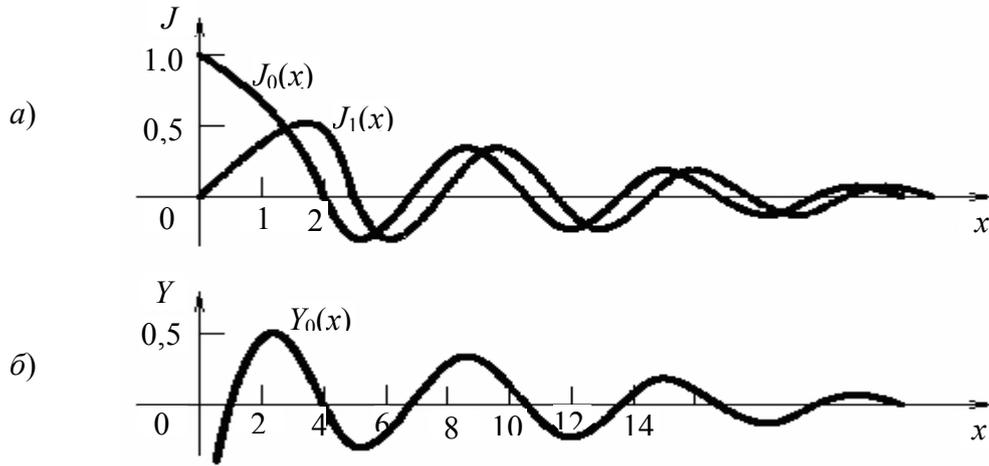


Рис. 3. Графики функций: а – Бесселя; б – Неймана

В качестве расчетной модели грунта под фундаментами подвижного состава принимаем однородную изотропную упругую среду, внутри которой действует некоторый источник колебаний, параметры которого известны (приведены выше). Необходимо определить перемещение в упругой среде, которое соответствует перемещению частиц грунта при выпирании или разжижении массива.

Амплитуды горизонтальных колебаний точек упругой среды за пределами тоннеля, вызванных вертикальными колебаниями крепи (рис. 4) вычисляем по формуле

$$u_{\text{гор}}^I = A_{\text{вер}} \frac{Rk_1}{C^2 + D^2} \sin\theta \cos\theta \sqrt{(P-T)^2 + (S-U)^2} \cos(\omega t - \varphi_{\text{вер}}^I); \quad (10)$$

$$\text{tg}\varphi_{\text{гор}}^I = -\frac{S-U}{P-T}.$$

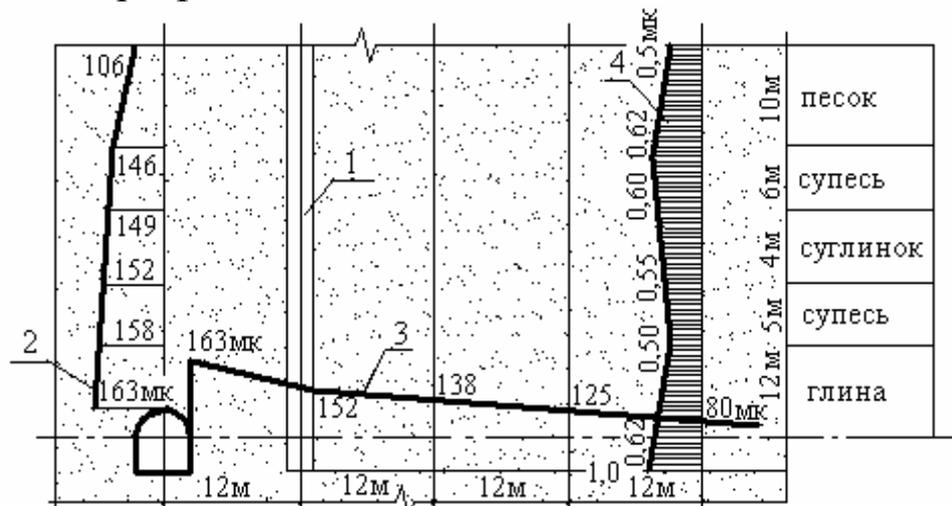


Рис. 4. Графики функций распределения  $u_0$  и  $u_r$  и изменения амплитуд горизонтальных колебаний грунта вдоль вертикальной оси, проходящей на расстоянии 4...12 радиусов тоннеля от его центра: 1 – вентиляционный ствол для проведения экспериментальных исследований; 2 и 3 – графики функций распределения горизонтальных колебаний  $u_0$  и  $u_r$ ; 4 – суммарная амплитуда колебаний на расстоянии 36 м

Амплитуда горизонтальных колебаний, вызванных горизонтальными колебаниями тоннеля (см. рис. 4), равна

$$u_{\text{гор}}^{\text{II}} = A_{\text{гор}} \frac{Rk_1}{C^2 + D^2} \sqrt{\left(P \cos^2 \theta_1 + T \sin^2 \theta_1\right)^2 + \left(S \cos^2 \theta_1 + U \sin^2 \theta_1\right)^2} \cos(\omega t - \varphi_{\text{гор}}^{\text{II}}), \quad (11)$$

$$\text{tg} \varphi_{\text{гор}}^{\text{II}} = -\frac{S \cos^2 \theta_1 + U \sin^2 \theta_1}{P \cos^2 \theta_1 + T \sin^2 \theta_1}; \quad \theta_1 = \theta - \frac{\pi}{2}.$$

Угол  $\theta$  в формулах (10) и (11) отсчитывают от вертикальной оси тоннеля, направленной вниз; радиус  $r$  принимают от центра подземного тоннеля до точки, которая определяет смещение частиц грунта. Амплитуды колебаний разжиженного грунта могут изменяться скачкообразно по мере удаления от тоннеля.

Если принять радиус тоннеля  $R = 3$  м, то колебания в массиве доходят до 48 м, при  $R = 4$  м колебания будут значительно больше.

Учитывая, что бесселевы функции могут обладать асимптотическими разложениями, формулы для определения перемещений при выпирании грунта можно упростить:

$$\left. \begin{aligned} u_r &\approx \frac{ARm_1 \sqrt{N^2 + Q^2} \sqrt{2} \cos \theta}{(C^2 + D^2) \sqrt{\pi} \sqrt{m_1 r}} \cos(\omega t - \varphi_r); \\ u_\theta &\approx -\frac{ARm_1 \sqrt{B^2 + M^2} \sqrt{2} \sin \theta}{(C^2 + D^2) \sqrt{\pi} \sqrt{m_2 r}} \cos(\omega t - \varphi_\theta). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

На рис. 4 представлены графики функций  $u_r$  и  $u_\theta$ , построенные по формулам (2), а также графики изменения амплитуд горизонтальных колебаний грунта вдоль вертикальной прямой, проходящей на расстоянии 4...12 радиусов тоннеля от его центра.

Рассмотрим на примерах процесс выпирания грунта вокруг тоннеля, вызванный движением подземного транспорта, в виде смещения точек.

**Пример.** Исходные данные: радиус тоннеля  $R = 3$  м, амплитуда вертикальных колебаний тоннеля  $A_{\text{вер}} = 0,8$  мкм (80 мк), амплитуда горизонтальных колебаний  $A_{\text{гор}} = 1,63$  мкм (163 мк), частоту колебаний в обоих направлениях принимаем одинаковой и равной 56 Герц. Скорость продольных волн в грунте  $c_1 = 1600$  м/с (что соответствует плотным глинам). Скорость поперечных волн  $c_2 = 680$  м/с. Колебания и перемещения точек внутри массива можно измерить с помощью датчиков, установленных в готовых шахтных вентиляционных стволах. При этом датчики измерений можно размещать послойно в горизонтально пробуренных шпурах за пределами стенки ствола; в случае использования тоннеля датчики размещаются в горизонтальных и вертикальных шпурах.

Следует отметить, что для супесей  $c_1 = 600$  м/с,  $c_2 = 300$  м/с; для песков  $c_1 = 300...400$  м/с,  $c_2 = 150...200$  м/с. Коэффициенты Пуассона  $\mu = 0,4$  для суглинка и глины;  $\mu = 0,35$  для супесей;  $\mu = 0,25$  для песков. Параметры  $m_1 = 2,1$

и  $m_2 = 5,2$  для суглинков и глины. Параметры  $m_1$  и  $m_2$  можно вычислить по формулам

$$m_1 = \frac{\omega}{S_1}, \quad m_2 = \frac{\omega}{S_2}.$$

Для некоторых частот  $f$  можно принять следующие величины  $c_1$  и  $c_2$ :

$f$ , Гц	35	40	45	50	55	60
$c_1$ , м/с	1000	1143	1286	1429	1571	1714
$c_2$ , м/с	425	468	546	607	668	729

Зная частоту колебаний  $f = 40 \dots 60$  Гц, можно вычислить  $\omega$ . Например, для  $f = 50$  Гц  $\omega = 314$  рад/с;  $A_{\text{вер}} = 1,8$  мкм;  $A_{\text{гор}} = 3,2$  мкм.

На рис. 4 представлено поперечное сечение тоннеля вертикальной плоскостью, проходящей через ось вентиляционной шахты в мергельной глине, и примерные графики изменения амплитуд горизонтальных колебаний упругой среды.

Из результатов вычислений следует, что увеличение амплитуды горизонтальных колебаний, выпирание и разжижение грунта при динамических воздействиях подземного транспорта возможно на расстоянии более 25...40 м от тоннеля.

Для расчета принимаем частотный диапазон 35...60 Гц. Амплитуды колебаний тоннеля принимаем примерно 1,5...5 мкм. Однако, в зависимости от состояния ходовой части и колес подвижного состава, возможно увеличение амплитуд колебаний в 3...5 раз. Таким образом, при заданных величинах частотного диапазона подвижного состава метрополитена можно вычислить амплитудные параметры и смещение частиц грунта, которые могут привести к выпиранию грунта или разжижению массива.

Результаты вычислений подтверждаются наблюдениями за состоянием девятиэтажного жилого панельного дома, построенного на песчаном основании на Оболонском проспекте г. Киева, который находится на расстоянии более 60 м от вертикальной оси тоннеля метрополитена. Тоннель заложен в твердом глинистом грунте на глубине более 20 м. Наружные и внутренние несущие стены этого дома покрыты горизонтальными и вертикальными трещинами шириной до 3...5 мм. Трещины продолжают расширяться, местами вокруг них наблюдаются отколы.

Как видно из натурных наблюдений, динамическое воздействие на грунт движущегося подземного подвижного состава не только вызывает выпирание грунта в середине платформы станции, но и приводит к деформации зданий и сооружений, расположенных вблизи тоннеля метрополитена.

## Выводы

Динамическая нагрузка от подвижного состава в метрополитенах мелкого заложения создает колебания в грунтовом массиве, способствует разжижению

и выпиранию маловлажных и влажных грунтов в середине платформы станции и приводит к возникновению и развитию трещин в конструкциях наземных зданий и сооружений, расположенных вблизи метрополитена.

Предложены методы расчета для определения перемещений в разжиженном массиве и выпирания маловлажных и влажных грунтов посередине платформы метрополитена мелкого заложения.

1. Баранов В. А. О расчете вынужденных колебаний заглубленного фундамента // Вопросы динамики и прочности. – Рига, 1967. – Вып. 14. – С. 84–90.

2. Ильичев В. А. Динамическое взаимодействие сооружений с основанием и передача колебаний через грунт [промышленная сейсмика]: Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 114–128.

3. Ляхов Г. М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. М.: Стройиздат, 1964. – 230 с.

4. Корнев Б. Г., Резников Л. М. О колебаниях конструкций с динамическими гасителями при стационарных случайных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. – М., 1969. – № 4.

5. Санитарные нормы допустимых вибраций в жилых зданиях: СН 1304–75. – М., 1975.

6. Самедов А. М., Кравець В. Г., Ваннічна В. В. Розрідження пилуватих пісків, супісків та суглинків при вібраційних впливах // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ. – 2004, № 2. – С. 47–49.

7. Самедов А. М., Зуєвська Н. В., Чирагов Д. Математичне моделювання розповсюдження плоских хвиль у розрідженому масиві при короткочасно діючих динамічних навантаженнях // Вісник Житомирського технологічного університету. Технічні науки. – 2006. – Вип. 111(38). – С. 155–161.

8. Самедов А. М. Расчет и проектирование оснований и фундамента: Учебник для вузов (на азерб. языке). – Баку: Маариф, 1992. – 496 с.

9. Филиппов А. П., Кохманюк С. С., Воробьев Ю. С. Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций. – К.: Наукова думка, 1974. – 176 с.