



УДК: 624.159.11

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.10

EDN: LPZYFO



Влияние конструкции фундамента и грунтового основания на снижение уровня вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена

Илизар Т. Мирсаяпов¹, Р.Р.Хасанов¹, Д.Р.Сафин¹, Д.М. Нуриева¹
¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Строительство тоннелей метрополитена в условиях стеснённой городской застройки является источником техногенного риска для существующих и вновь проектируемых зданий и сооружений. В свою очередь, строительство новых зданий может негативно отразиться на условиях эксплуатации конструкций метрополитена. В связи с этим, при проектировании зданий и сооружений в зоне прохождения линий метро необходимо проводить комплексную оценку их взаимовлияния. Цель работы заключается в геотехническом прогнозе влияния метрополитена на проектируемое здание в г.Казани и здания на метрополитен. Задачами исследования являются: выбор наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания, позволяющего снизить уровень вибраций на поверхности фундамента от влияния движения поездов метрополитена до допустимого предела, и расчет основания фундамента проектируемого здания по деформациям с учетом вибрационного воздействия от движения поездов метрополитена.

Результаты. Подобранные расчетами конструктивное решение основания и фундамента проектируемого здания, предусматривающее устройство плитного фундамента по уплотненной подушке из щебня мощностью 1000 мм, позволяет снизить уровень вибраций от движения поездов метрополитена до допустимых пределов, предусмотренных санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что рекомендованные в данной статье подходы к расчетам и полученные результаты для конкретного сооружения могут быть использованы при разработке мероприятий, снижающих негативное взаимовлияние вновь проектируемых зданий и метрополитена.

Ключевые слова: основание, циклическая нагрузка, вибрационное воздействие, метрополитен, фундамент, щебеночная подушка

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р., Нуриева Д.М. Влияние конструкции фундамента и грунтового основания на снижение уровня вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с.96-106, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.10, EDN: LPZYFO

Influence of the foundation and soil structure on reducing the level of vibrations arising from the movement of metro trains

Iizar T. Mirsayapov¹, R.R. Khasanov¹, D.R. Safin¹, D.M. Nurieva¹
¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The metro tunnels construction in conditions of cramped urban development is a technogenic risk source for existing and newly designed buildings and structures. In turn, the construction of new buildings may negatively affect the operating conditions of metro structures. In this regard, when designing buildings and structures in the

area of metro lines, it is necessary to carry out a comprehensive assessment of their mutual influence. The purpose of the work is a geotechnical forecast of the influence of the metro on the designed building in Kazan and the influence of the building on the metro. The objectives of the study are the selection of the most optimal design of the foundation and soil base, which allows reducing the level of vibrations on the surface of the foundation from the influence of the movement of metro trains to the permissible limit, and calculation of the base of the foundation of the designed building based on deformations, taking into account the vibration impact from the movement of metro trains.

Results. The design solution for the base and foundation of the designed building, selected by calculations, providing for the installation of a slab foundation on a compacted layer of crushed stone with a thickness of 1000 mm, makes it possible to reduce the level of vibrations from the movement of metro trains to the permissible limits provided for by sanitary standards SN 2.2.4-2.1.8.566-96.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that the approaches to calculations recommended in this article and the results obtained for a specific structure can be used in the development of measures that reduce the negative mutual influence of newly designed buildings and the metro.

Keywords: base, cyclic load, vibration impact, metro, foundation, crushed stone layer

For citation: Mirsayapov Iлизар T., Khasanov R.R., Safin D.R, Nurieva D.M. Influence of the foundation and soil structure on reducing the level of vibrations arising from the movement of metro trains // News KSUAE, 2024, № 1(67), p.96-106, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.10, EDN: LPZYFO

1. Введение

На сегодняшний день отсутствует единая система учета и прогнозирования влияния микросейсмических колебаний на основания зданий, тогда как общеизвестно, что у домов, находящихся по линии метро, постепенно деформируется фундамент. Определенные подходы к решению данной задачи рассмотрены в работах [1-3]. В то же время, застройка в охранной зоне метрополитена может оказать существенное влияние на эксплуатацию подземного сооружения. Это влияние в основном выражается в дополнительных деформациях конструкций метрополитена, трещинах, повреждениях обделки тоннелей, изменении режима подземных вод и т.д. [4-6]. Для избегания указанных негативных последствий, уже на стадии проектирования зданий в охранной зоне метро необходимо выполнить геотехнический прогноз влияния нового строительства на существующие конструкции тоннелей метро, что описано в работах [7-9]. Как следует из вышеизложенного, целью проведения исследований является геотехническое прогнозирование взаимовлияния метрополитена на проектируемое здание и здания на метрополитен с учетом значений виброускорений, возникающих на поверхности фундамента.

При проведении исследований решалось 2 задачи:

- динамический расчет системы «грунт-фундамент-здание» с целью выбора наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания, позволяющего снизить уровень вибраций на поверхности фундамента от влияния движения поездов метрополитена до допустимого предела;
- расчет основания фундамента проектируемого здания по деформациям с учетом вибрационного воздействия от движения поездов метрополитена и оценка влияния фундамента здания на конструкции метрополитена.

2. Материалы и методы

Проведенный анализ снижения эксплуатационной надежности подземных сооружений [1, 2] показывает острую необходимость проведения оценки взаимного влияния подземных и наземных объектов при осуществлении нового строительства. Рассматриваемый в рамках данных исследований проектируемый объект находится в г.Казани и имеет трапецевидную форму в плане размерами 14,7 × 16,4м.

Конструктивная схема здания – каркасная. Фундамент под всем зданием сплошной плитный из монолитного железобетона. Здание расположено непосредственно над действующей линией метрополитена. Характерный инженерно-геологический разрез представлен на рис.1.

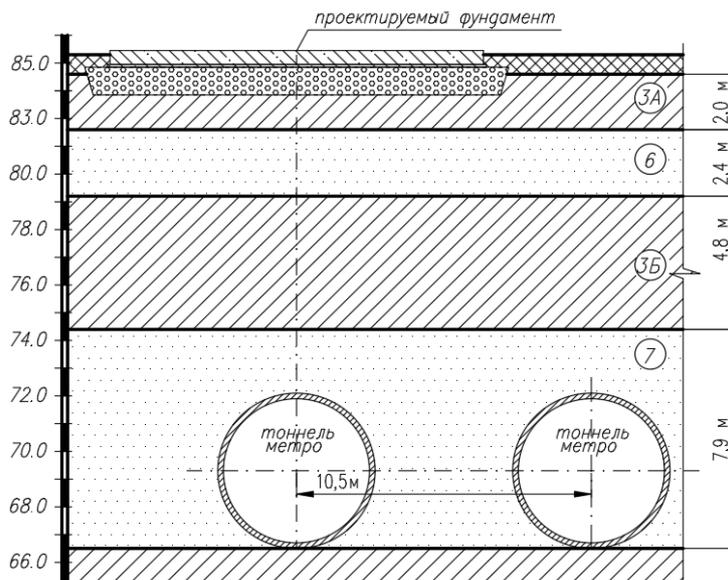


Рис.1. Характерный инженерно-геологический разрез (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Typical engineering-geological section (illustration by the authors)

Согласно результатам измерений уровня вибрации над линией метро на месте строительства объекта, уровень вибраций на поверхности земли превышает допустимые пределы, требуемые Санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96. Превышения виброускорений на поверхности земли получены в октавных полосах частот 31,5 и 63 Гц. Большой уровень вибраций отмечен на октавной полосе 63 Гц.

Характеристики грунта в основании фундаментов, принятые в расчет, представлены в табл.1.

Таблица 1

Характеристики грунтов

№№ ИГЭ	Номенклатурный вид грунта	Плотность грунта, ρ , т/см ³	Угол внутреннего трения, φ , град.	Удельное сцепление, c , кПа	Модуль деформации, E , МПа
3а	Суглинок твердый, полутвердый	1,87	22	20	13
		2,00	21	15	11
3б	Суглинок тугопластичный	1,90	20	17	10
		1,98	19	13	9
6	Песок мелкий маловлажный	1,80	30	1,8	30
		2,05	27	1,4	26
7	Песок средней крупности маловлажный	1,79	32	1,2	36
		2,09	28	0,8	34

Примечание: в таблице над чертой даны характеристики грунтов при природной влажности, под чертой – в водонасыщенном состоянии.

Максимальные значения уровня вибраций по оси Z составили 100 дБ (превышение 9 дБ), по оси Y – 99 дБ (превышение 8 дБ). Для приведения уровней вибрации до допустимых значений необходимо предусмотреть мероприятия по уменьшению колебаний фундамента проектируемого здания.

Геотехнический прогноз деформирования грунтового основания фундамента проектируемого здания при действии вибраций от движения поездов метрополитена выполнялся численным путем [6, 9, 10].

Динамический расчет системы «грунт-фундамент-здание» и выбор конструкции фундамента и грунтового основания производился исходя из условий [5-7]:

$$a \leq a_u, \quad (1)$$

$$L_a \leq L_{a,u}, \quad (2)$$

где a – значения уровней виброускорения на поверхности фундамента (м/с^2),
 a_u – значения уровней виброускорения, допустимые требованиями Санитарных норм СН 2.2.4-2.1.8.566-96;
 L_a – логарифмический уровень виброускорения (дБ):

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{1 \cdot 10^{-6}}; \quad (3)$$

L_{au} – предельно допустимое значение уровня вибрации (в дБ).

Расчет оснований по деформациям для проектируемого здания, расположенного в зоне влияния метро, производился из условия:

$$S \leq S_u, \quad (4)$$

где S – осадка основания фундамента, определяемая численными исследованиями с учетом воздействия вибраций от работы метрополитена;
 S_u – предельное значение осадки основания фундамента.

Осадку основания фундамента представлена в виде:

$$S = S_{ст} + S_{вibr}, \quad (5)$$

где $S_{ст}$ – осадка фундамента от статических нагрузок, может быть определена методом послойного суммирования;

$S_{вibr}$ – осадка фундамента от вибрационного воздействия метрополитена.

Динамический расчет системы «грунт-фундамент-здание» проводился с целью выбора наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания, позволяющего снизить уровень вибраций на поверхности фундамента от влияния движения поездов метрополитена до допустимого предела.

Расчет производился в структуре программы ЛИРА-САПР с использованием модуля «Динамика плюс», реализующего прямое интегрирование уравнений движения во времени с применением модифицированного метода центральных разностей. Система уравнений движения (динамического равновесия) имеет вид:

$$M\ddot{\bar{y}}(t) + C\dot{\bar{y}}(t) + K\bar{y}(t) = \bar{P}(t), \quad (6)$$

где M, C, K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости системы;

$\bar{y}''(t), \bar{y}'(t), \bar{y}(t)$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений в момент времени t ;

$\bar{P}(t)$ – нагрузка, соответствующая времени t .

Используя зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{y}''(t) &= \frac{\bar{y}(t + \Delta t) - 2\bar{y}(t) + \bar{y}(t - \Delta t)}{2\Delta t^2}, \\ \bar{y}'(t) &= \frac{\bar{y}(t + \Delta t) - \bar{y}(t - \Delta t)}{2\Delta t}, \\ \bar{y}(t) &= \frac{\bar{y}(t + \Delta t) + \bar{y}(t - \Delta t)}{2}, \end{aligned} \quad (7)$$

выражение (6) приводится к разрешающему уравнению вида:

$$\left[\frac{2M}{\Delta t^2} + \frac{C}{\Delta t} + K \right] (\bar{y}(t + \Delta t) + \bar{y}(t - \Delta t)) = 2 \left(\bar{P}(t) + \frac{2M}{\Delta t^2} \bar{y}(t) + \frac{C}{\Delta t} \bar{y}(t - \Delta t) \right), \quad (8)$$

где Δt – приращение времени для каждого нового шага интегрирования.

После решения уравнения (8) определяются перемещения на каждом шаге интегрирования и, затем, используя выражения (7), вычисляются соответствующие ускорения и скорости масс системы [11-13]. На основании полученных результатов могут быть построены графики изменения перемещений, скоростей и ускорений от заданной динамической нагрузки в любой точке пространства (рис. 2) в заданном интервале времени [14,15].

Прежде чем произвести оценку уровня колебаний на поверхности фундамента проектируемого здания предварительно была создана «эталонная» расчетная модель

массива грунта строительной площадки с учетом существующих конструкций метрополитена (рис. 3). На основе этой модели была подобрана вынуждающая нагрузка от движения поездов, создающая на поверхности грунта уровни виброускорений, равные тем, что были замерены реально на площадке строительства. Превышение виброускорений на поверхности земли получены в октавных полосах частот 31,5 и 63 Гц. Большой уровень вибраций отмечен на октавной полосе 63 Гц. Так в точке замера т.1 (рис. 3) уровень вибраций по оси Z составил 100 дБ (превышение 9 дБ), по оси Y – 99 дБ (превышение 8 дБ). Эти данные были взяты в качестве «эталонных» для моделирования динамического воздействия метрополитена.

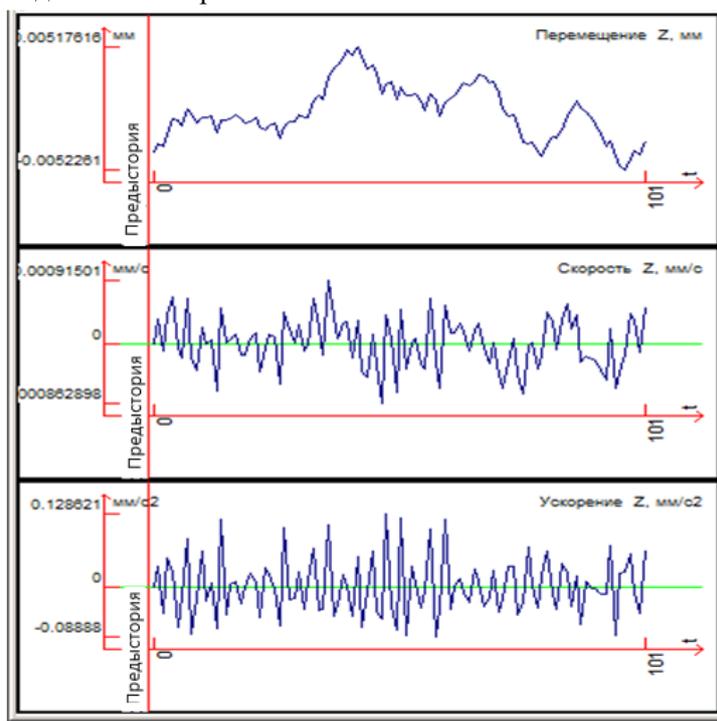


Рис. 2. Характерные графики изменения перемещений, скоростей и ускорений (иллюстрация авторов).

Fig. 2. Typical graphs of changes in displacements, speeds and accelerations (illustration by the authors)

Динамическая нагрузка от движения поездов метрополитена была задана в виде сосредоточенных сил, изменяющихся по гармоническому закону:

$$P(t) = P_0 \sin \theta \cdot t, \tag{9}$$

где P_0 – максимальное амплитудное значение вибрационной нагрузки;

θ – круговая частота вынуждающей нагрузки принималась равной 395,64 рад/сек, что соответствует октавной частоте 63 Гц.

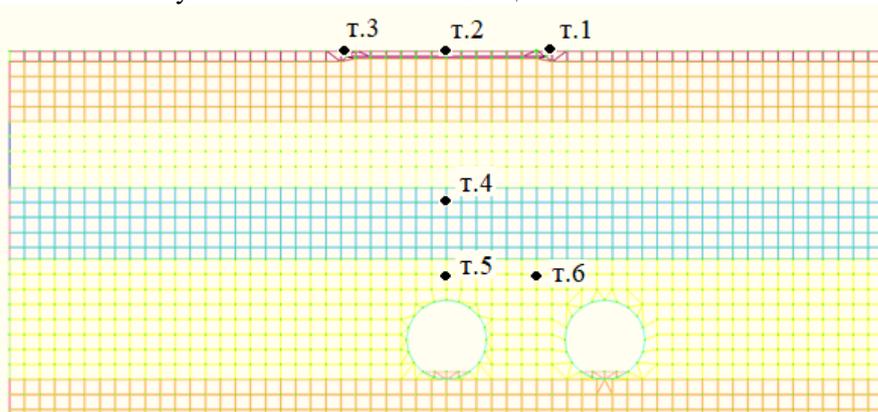


Рис. 3. Схема расположения расчетных точек (иллюстрация авторов).

Fig. 3. Layout of design points (illustration by the authors)

Динамические силы прикладывались в точках расположения рельсовых путей метрополитена. При этом рассматривался наиболее неблагоприятный случай одновременного воздействия двух встречных составов [1]. Время воздействия нагрузки на участок шириной 1 м принят равным 3,5 сек, исходя из средней скорости поезда метрополитена $72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с}$ и длины состава 70 м.

При действии динамических нагрузок вибрационного характера наблюдается линейная зависимость между динамическими силами, приложенными к системе, и ее динамическими перемещениями. Поэтому в расчетной модели грунт рассматривался как упругая среда. Демпфирующие свойства грунтов учитывались коэффициентом поглощения энергии, принятым согласно рекомендациям СП 23-105-2004 и [7, 9].

Максимальные расчетные ускорения колебаний грунта приводятся для точки т. 1:

– по оси Z: $y_z^{\text{max}} = 0,1 \text{ м/с}^2$ (100 дБ) (фактические значения по результатам замеров $0,1 \text{ м/с}^2$);

– по оси X: $y_x^{\text{max}} = 0,08 \text{ м/с}^2$ (98,06 дБ) (фактические значения по результатам замеров $0,079 \text{ м/с}^2$).

При использовании созданной расчетной модели (с заданными характеристиками грунта, граничными условиями и условиями приложения нагрузки) в расчетной точке т. 1 получены виброускорения, на 100 % совпадающие с результатами фактических замеров, что позволяет сделать вывод о возможности использования разработанной «эталонной» модели в дальнейших исследованиях для выбора наиболее оптимального вида фундамента и основания проектируемого здания.

3. Результаты и обсуждение

При проведении численных исследований были рассмотрены следующие варианты устройства фундамента и основания проектируемого здания:

1. Плитный фундамент толщиной 500 мм на естественном основании.
2. Плитный фундамент толщиной 500 мм с устройством демпфирующей подушки из щебня толщиной 500 мм.
3. Плитный фундамент толщиной 500 мм с устройством комбинированной демпфирующей подушки (500 мм щебня и 500 мм песка средней крупности).
4. Плитный фундамент толщиной 500 мм с устройством демпфирующей подушки только из щебня толщиной 1000 мм.

Выбор конструктивного решения осуществлялся исходя из выполнения условий (1) и (2). Предельно допустимые значения виброускорений на поверхности фундамента для октавной полосы 63 Гц приняты согласно СН 2.2.4-2.1.8.566-96 и составляют $0,035 \text{ м/с}^2$ (91 дБ).

Вибрационная нагрузка от движения поездов метрополитена задана в виде гармоника в октавной полосе 63 Гц (395 рад/сек), принятой на основе «эталонной» модели.

Для учета сил затухания, возникающих в системе «здание-фундамент-основание», в расчете были учтены коэффициенты демпфирования c :

$$c_i = o \cdot 2m_i \cdot \omega, \quad (10)$$

где ξ – параметр затухания, принимаемый равным $\xi = \delta / 2\pi$;

δ – логарифмический декремент колебаний: принимается для железобетонных конструкций (плитного фундамента) равным 0,3; для грунтов – $\delta = \psi / 2$,

где ψ – коэффициент поглощения энергии: для подушки из щебня и песка средней крупности принят равным 0,1;

m_i – масса сосредоточенная в i -ом узле;

ω – частота собственных колебаний системы.

При оценке горизонтальных колебаний грунта в качестве расчетной принималась частота $\omega_1 = 17,648 \text{ рад/сек}$. Соответственно, коэффициенты демпфирования:

– для фундамента из железобетона $\xi = 0,048$ и $c_i = 1,694m_i$;

– для подушки из щебня и песка $\xi = 0,00796$ и $c_i = 0,28m_i$.

При оценке вертикальных колебаний грунта в качестве расчетной принималась частота $\omega_2 = 141,395$ рад/сек (получены расчетом на собственные колебания в расчетном комплексе). Соответственно, коэффициенты демпфирования:

- для фундамента из железобетона $\xi = 0,048$ и $c_i = 13,57m_i$;
- для подушки из щебня и песка $\xi = 0,00796$ и $c_i = 2,251m_i$.

Результаты численных исследований влияния конструктивного решения фундамента и основания проектируемого здания на уровень вибраций приведены для расчетов в октавной полосе частот 63 Гц.

Максимальные значения виброускорений по вертикали $y_z^{n\max}$ для вариантных решений 1÷3 составили $0,0361 \div 0,0588$ м/с² (91,15÷95,4 дБ), что превышает предельное значение 91 дБ и не удовлетворяет требованиям норм.

В конструктивном решении 4 приняты следующие характеристики материалов фундамента и демпфирующей подушки:

- плитный фундамент толщиной 500 мм, бетон класса В20;
- бетонная подготовка 100 мм класса В7,5;
- подушка из щебня толщиной 1000 мм (в уплотненном состоянии модуль деформации не менее $E = 50$ МПа, плотность не менее 2 т/м³, коэффициент Пуассона 0,3).

График изменения ускорений для данного конструктивного решения в точке т.1 представлен на рис. 4.

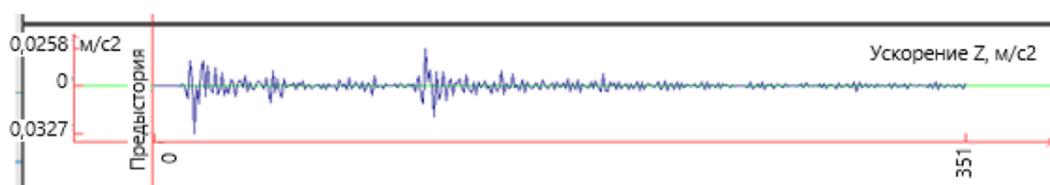


Рис. 4. График виброускорений на поверхности фундамента по оси Z (иллюстрация авторов).

Fig. 4. Graph of vibration accelerations on the foundation surface along the Z axis (illustration by the authors)

Максимальные значения виброускорений на поверхности фундамента по вертикали и горизонтали составили $y_z^{n\max} = 0,0327$ м/с² (90,3 дБ), $y_x^{n\max} = 0,0082$ м/с² (79 дБ), что не превышает допустимых пределов (91 дБ). Конструктивное решение удовлетворяет требованиям санитарных норм.

Проверка конструктивного решения 4 расчетом также была выполнена для вибраций в октавной полосе частот 31,5 Гц. Полученные значения виброускорений колебаний грунта по вертикали и горизонтали не превысили допустимых пределов (91 дБ).

Осадка грунтового основания на действие вибрационной нагрузки от воздействия метрополитена принималась в виде циклической нагрузки, передаваемой от плитного фундамента на грунты основания. Максимальное количество циклов нагружения было принято $2 \cdot 10^6$. Вибрационная нагрузка в пределах одного цикла нагружения принималась равной:

$$P_{\text{вibr}} = p_{\text{ср}} \frac{y''}{g}, \quad (11)$$

где $p_{\text{ср}}$ – среднее давление под подошвой фундамента.

Минимальная нагрузка цикла: $P_{\text{min}} = p_{\text{ср}}$, Максимальная нагрузка цикла: $P_{\text{max}} = P_{\text{min}} + P_{\text{вibr}}$.

Расчет осадок грунтового основания на действие вибрационной нагрузки от воздействия метро производился с учетом деформаций виброползучести грунта [6, 13, 15, 16]. Деформация виброползучести грунта на i -ом цикле нагружения определялась по формуле:

$$\varepsilon_{pi} = P_{\text{max}} \frac{1}{E_0} f(N_i), \quad (12)$$

где $f(N_i)$ – функция роста деформаций виброползучести для i -го цикла нагружения в момент времени t (сут):

$$f(N_i) = 1 - e^{-\gamma(t_i - t_0)}, \quad (13)$$

где γ – коэффициент скорости затухания деформаций ползучести: для грунта принят $\gamma=0,004$.

Осадка от действия вибрационной нагрузки на i -ом цикле нагружения с учетом накопленных деформаций виброползучести грунта:

$$S_{\text{вibr}_i} = \varepsilon_{pl_i} \cdot H_c, \quad (14)$$

где H_c – мощность сжимаемой толщи грунта от нагрузки P_{max} .

Как показали результаты расчетов, общая осадка основания фундаментов с учетом действия вибрационной нагрузки не превышает предельно допустимых значений. Мощность сжимаемой толщи грунтов от уровня низа подушки из щебня составляет не более 5,45 м. Граница сжимаемой толщи грунтов расположена на глубине 6,9 м относительно поверхности земли.

Дополнительно были проведены численные исследования деформаций грунтового основания в программном комплексе ЛИРА с использованием модуля «Монтаж», позволяющего учесть историю нагружения площадки строительства, включая стадии разработки котлована, устройства щебеночной подушки, устройства фундамента, передачи нагрузки от здания и вибрации метрополитена.

Характерная картина деформирования массива грунта от заданных нагрузок, полученная расчетом, показана на рис. 5.

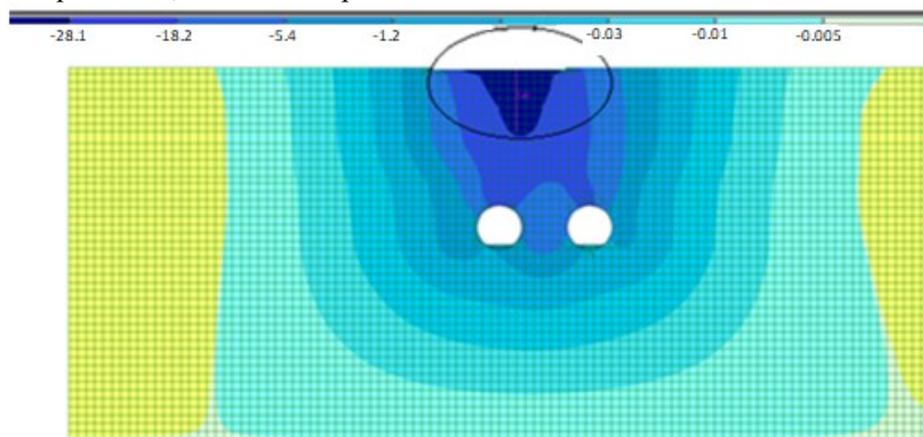


Рис. 5. Вертикальные перемещения по Z, мм (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Vertical movements along Z, mm (illustration by the authors)

Анализ результатов расчета показал, что мощность сжимаемой толщи грунтов от веса проектируемого здания с учетом подушки из щебня не превышает 7,5 м, что близко к значениям, полученным ручным методом (6,9 м), а также достаточно хорошо согласуется с результатами исследований других авторов [1, 6, 8, 17]. Таким образом, по результатам расчетов тоннели метро расположены за пределами сжимаемой толщи и не попадают в зону влияния здания.

Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с данными, приведенными в работах авторов в данной области [1 - 3, 5]. Полученные данные являются подтверждением того, что конструкция фундаментов и искусственного основания оказывают существенное влияние на уровень вибраций, возникающих от движения поездов метрополитена, за счет своих демпфирующих способностей.

4. Заключение

На основании выполненных исследований по геотехническому прогнозу можно сделать следующие общие выводы:

1. Конструктивное решение основания и фундамента проектируемого здания, предусматривающее устройство плитного фундамента толщиной 500 мм из бетона класса В20 с устройством бетонной подготовки толщиной 100 мм и уплотненной подушки из щебня мощностью 1000 мм, позволяет снизить уровень вибраций от движения поездов

метрополитена до допустимых пределов, предусмотренных санитарными нормами СН 2.2.4-2.1.8.566-96. Максимальные значения виброускорений колебаний грунта в октавной полосе частот 31,5 Гц, полученные расчетом с учетом коэффициента запаса по нагрузке от движения поездов метрополитена 1,2, составляют 84,86 дБ и не превышают допустимого значения 85 дБ (СН 2.2.4-2.1.8.566-96). Максимальные значения виброускорений колебаний грунта в октавной полосе частот 63 Гц составляют 90,3 дБ и также не превышают предельно допустимого значения 91 дБ.

2. Выполненные расчеты деформаций грунтового основания фундаментов исследуемого здания показали, что его максимальные прогнозные деформации с учетом вибрационного воздействия поездов метрополитена при применении уплотненной подушки из щебня мощностью 1000 мм составляют 0,077 м, что существенно меньше предельной величины $S_u=0,15$ м. Следовательно, влияние метро на прогнозную величину деформаций грунтового основания фундамента проектируемого здания не превышает допустимых пределов.

3. Выполненные расчеты деформаций грунтового основания фундамента проектируемого здания показывают, что мощность сжимаемой толщи грунтов от уровня низа щебеночной подушки составляет не более 5,45 м. Граница сжимаемой толщи грунтов расположена на глубине 6,9 м относительно поверхности земли. Тоннели метрополитена расположены ниже границы сжимаемой толщи грунтов основания и не попадают в зону влияния проектируемого здания.

Список литературы/ References

1. Лебедев М.О., Романевич К.В., Басов А.Д. Оценка взаимного влияния подземных сооружений метрополитена при строительстве и эксплуатации // “Геотехника”. 2018. Т. X. № 1-2/2018. С.82-89. EDN URPUAW [Lebedev M.O., Romanovich K.V., Basov A.D. Assessment of the mutual influence of underground metro structures during construction and operation // “Geotechnics”. 2018. No. 1-2/2018. P.82-89. EDN URPUAW].
2. Панжин А.А., Панжина Н.А. Деформационный мониторинг воздействия строительства метрополитена на здания и сооружения // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды VI Международной конференции, – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 4-10. – EDN PDXMRK [Panzhin A.A., Panzhina N.A. Deformation monitoring of the impact of subway construction on buildings and structures // Design, construction and operation of complexes of underground structures: Proceedings of the VI International Conference, - Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2019. - P. 4-10. – EDN PDXMRK].
3. Khuziakhmetov R., Nurieva D. Determination of the Reasons for the Fall of Pile Driving Machine Main Technical Near the Slope of the Foundation Pit IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Kazan, Russia, 2020. V. 890 № 162304. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012136
4. Mirsayapov I.T., Khasanov R.R., Safin D.R. Ensuring the stability of the deep pit enclosure and foundation bases in the conditions of reconstruction of the architectural monument in the city of Kazan: 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021) – E3S Web of Conferences Volume 274 (2021), Kazan, 21–28 April 2021. Vol. 274. P. 3022. DOI 10.1051/e3sconf/202127403022.
5. Yuldashev Sh.S., Karabaeva M.U. Soil surface vibrations in the training of metro trains in parallel tunnels // Theoretical & Applied Science. – 2020. – No. 5(85). – P. 117-121. – DOI 10.15863/TAS.2020.05.85.24. – EDN FNNYQW.
6. Анфилатов Н. А. Аспекты негативного воздействия вибрации на здания и сооружения и людей, находящихся в них // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т. 2. – С. 17-21. – EDN FYATCC [Anfilatov N. A. Aspects of the negative impact of vibration on buildings and structures and the people in them // Chemistry. Ecology. Urbanism. – 2019. – Vol. 2. – P. 17-21. –EDN FYATCC].

7. Дашевский М.А., Мондрус В.Л., Моторин В.В. Концепция виброзащиты зданий и сооружений в поле строительных нормативов РФ // Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 109-115. – DOI 10.22337/2077-9038-2018-4-109-115. – EDN SRBZAD [Dashevsky M.A., Mondrus V.L., Motorin V.V. The concept of vibration protection of buildings and structures in the field of construction standards of the Russian Federation // Academia. Architecture and construction. – 2018. – No. 4. – P. 109-115. – DOI 10.22337/2077-9038-2018-4-109-115. – EDN SRBZAD].
8. Павлов П.Д. Общие тенденции в освоении подземного пространства городов. Методы уменьшения влияния от строительства в условиях плотной существующей застройки // Метро и тоннели. – 2021. – № 1. – С. 38-41. – EDN AHSKBW [Pavlov P.D. General trends in the development of underground space in cities. Methods for reducing the impact of construction in conditions of dense existing buildings // Metro and tunnels. – 2021. – No. 1. – P. 38-41. – EDN AHSKBW].
9. Мондрус В. Л., Митрошин В. А. Воздействие движения поездов метрополитена неглубокого заложения на городскую застройку // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 9. – С. 14-20. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.14-20. – EDN MQTYKD [Mondrus V.L., Mitroshin V.A. Impact of shallow subway train traffic on urban development // Industrial and Civil Construction. – 2020. – No. 9. – P. 14-20. – DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.14-20. – EDN MQTYKD].
10. Кузина Е.С. Оценка технического состояния сооружений московского метрополитена, попадающих в зону влияния строительства // Университетская наука. – 2016. – № 1(1). – С. 78-82. – EDN WAWTKV [Kuzina E.S. Assessment of the technical condition of Moscow metro structures falling within the zone of influence of construction // University Science. – 2016. – No. 1(1). – P. 78-82. – EDN WAWTKV].
11. Dong Y., Burd H. J., Houlsby G. T. Finite element study of deep excavation construction processes // Soils and Foundations. 2017. № 6 (57). P. 965–979.
12. Boudaa S., Khalfallah S., Bilotta E. Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation // International Journal of Advanced Structural Engineering. 2019. № 1 (11). P. 21–30.
13. Liang R. Simplified analytical method for evaluating the effects of overcrossing tunneling on existing shield tunnels using the nonlinear Pasternak foundation model // Soils and Foundations. 2019. 6(59) P. 1711-1727.
14. Zhao L., Zujiang L., Chenghua X., Jinzhong T. 3D fluid-solid full coupling numerical simulation of soil deformation induced by shield tunnelling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. V. 90. P. 174–182.
15. Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Clay Soil Deformations Under Regime Long-Term Triaxial Compression Taking into Account Initial Defects // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. № 291. P. 99–108.
16. Shakirov, I. Bearing capacity of piles in a reinforced by pressure cementation soil massif / I. Shakirov // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, April, 21–28, 2021. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3023. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403023. – EDN VXLBAT.
17. Siraziev, L. Experimental studies of the various soils bedding influence on the stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation / L. Siraziev, D. Sergeev // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, April, 21–28, 2021. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3021. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403021. – EDN XXKBPC.

Информация об авторах

Мирсаяпов Илизар Талгатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Хасанов Рубис Раисович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

Сафин Даниль Ринафович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: d.safin@list.ru

Нуриева Дания Мансуровна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: danm_n@mail.ru

Information about the authors

Иizar T. Mirsayapov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Rubis R. Khasanov, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

Danil R. Safin, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: d.safin@list.ru

Daniya M. Nurieva, candidate of the technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: danm_n@mail.ru