

УДК: 624.159.11

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.4

EDN: DGXOYN



Прогнозирование деформаций основания фундамента с учетом влияния движения подземного транспорта

И.Т.Мирсаяпов¹, Д.М.Нуриева¹, Д.Р.Сафин¹, Р.Р.Хасанов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* При эксплуатации зданий и сооружений в зоне влияния метрополитена, деформации грунтов основания протекают в условиях дополнительного вибрационного воздействия, связанного с движением подземных поездов. Процессы виброползучести грунта при этом приводят к существенному увеличению величины осадки основания, и неучет указанного фактора может приводить к негативным последствиям. Кроме того, строительство новых объектов может неблагоприятно отразиться на условиях эксплуатации конструкций метрополитена, и при проектировании зданий и сооружений в зоне прохождения линий метро возникает задача комплексной оценки их взаимного влияния.

Целью работы является исследование влияния вибрационного воздействия, обусловленного движением поездов метрополитена, на фундамент и грунтовое основание проектируемого в г. Казани здания, а также обоснование проектных решений, обеспечивающих нормативные уровни вибрации, допустимые осадки с учетом виброползучести грунта и безопасность конструкций тоннелей метро. В основные задачи вошли: выбор конструктивного решения фундамента и грунтового основания, обеспечивающего снижение уровней вибрации до нормативных значений; прогноз ожидаемых осадок основания рассматриваемого здания с учетом деформаций виброползучести и оценка влияния строительства здания на конструкции тоннелей метро; анализ напряженно-деформированного состояния фундамента от совокупности воздействий.

Результаты. Проведенные исследования показали, что при принятом конструктивном решении фундамента и основания прогнозные деформации основания с учетом вибрационного воздействия не превышают установленной предельной величины.

Выводы. Практическая значимость исследований, проведенных для конкретного сооружения, заключается в возможности применения предложенных методов расчета и подходов к конструированию оснований и фундаментов при проектировании аналогичных объектов, подверженных вибрационному воздействию, связанному с движением подземного транспорта.

Ключевые слова: грунтовое основание, щебеночная подготовка, воздействие вибрации, метрополитен, осадка, фундамент

Для цитирования: Мирсаяпов И.Т., Нуриева Д.М., Сафин Д.Р., Хасанов Р.Р. Прогнозирование деформаций основания фундамента с учетом влияния движения подземного транспорта // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 39-50, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.4, EDN: DGXOYN

Prediction of the foundation deformations taking into account the influence of underground transport movement

I.T. Mirsayapov¹, D.M. Nurieva¹, D.R. Safin¹, R.R. Khasanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* During the operation of buildings and structures in the metro's influence zone, soil deformations occur under additional vibrational influences associated with the movement of underground trains. Soil creep processes lead to a significant increase in foundation settlement, and failure to take this factor into account can have negative consequences. Furthermore, the construction of new facilities can adversely affect the operating conditions of metro structures, and when designing buildings and structures in metro line zones, a comprehensive assessment of their mutual influence is required.

The aim of this work is to study the impact of vibration caused by the movement of metro trains on the foundation and soil base of a building being designed in Kazan, as well as to substantiate design solutions that ensure regulatory vibration levels, permissible settlements taking into account soil creep, and the safety of metro tunnel structures. The main tasks included: selecting a foundation and subgrade design that would reduce vibration levels to regulatory limits; forecasting expected foundation settlements for the building in question, taking into account vibration creep deformations; and assessing the impact of the building's construction on the metro tunnel structures; and analyzing the stress-strain state of the foundation under a combination of impacts.

Results. The conducted studies have shown that with the adopted design solution for the foundation and base, the predicted deformations of the base, taking into account the vibration impact, do not exceed the established limit value.

Conclusions. The practical significance of the research conducted for a specific structure lies in the possibility of applying the proposed calculation methods and approaches to the design of foundations and bases when designing similar objects subjected to vibration effects associated with the movement of underground transport.

Keywords: soil base, crushed stone preparation, exposure to vibration, metro, settlement, foundation

For citation: Mirsayapov I.T., Nurieva D.M., Safin D.R., Khasanov R.R. Prediction of the foundation deformations taking into account the influence of underground transport movement// News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 39-50, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.4, EDN: DGXOYN

1. Введение

Строительство Казанского метрополитена началось в 2000 г. Оно активно производилось в 2003-2005 годах, и к 1000-летию Казани в августе 2005 г. была открыта первая линия метрополитена «Кремлевская» – «Горки». Станции сооружались открытым способом, а для проходки тоннелей использовались специальные проходческие щиты [1-2].

На сегодняшний день Казанский метрополитен имеет одну линию длиной почти 17 км, включающую 11 станций, проходящую через весь город от Авиастроительного района до района «Горки-2» (рис.1), и его инфраструктура продолжает развиваться. На данный момент ведется строительство второй ветки метро, первый участок которой включает 4 станции: «100-летие ТАССР» (ул. Фучика), «Академическая» (пересечение улиц Фучика и Завойского), «Зилант» (пересечение улиц Фучика и Ломжинской), «Тулпар» (пересечение проспекта Победы и улицы Сахарова). Дальнейшее развитие этой ветки предполагает объединить 5 районов города: Приволжский, Советский, Ново-Савиновский, Московский и Кировский.

Особенность станций Казанского метрополитена заключается в том, что все они залегают приблизительно на одном уровне – на глубине 16 м. Надземная станция «Аметьево» также располагается на одной линии с другими подземными остановками. Из-за особенностей рельефа она оказалась над землей, но при этом у тоннелей нет резких подъёмов. Один из участков длиной в 2 километра (от «Кремлёвской» до «Козьей слободы») проходит под р. Казанкой. Расстояние от поверхности воды до обделки тоннеля составляет 32 метра.

На карте города (рис. 1) видно, что линия метрополитена, проходя от северной (промышленной) зоны города через центр к юго-восточным жилым районам, находится в зоне плотной городской застройки. И здесь, как отмечается в работах [3,4], возникает проблема негативного вибрационного воздействия, вызванного движением подземных поездов на существующие здания. Вибрации от поездов метро распространяются через тоннельную обделку и грунтовый массив к фундаментам строений, вызывая рост их осадок, неравномерные деформации и крены, что в последующем проявляется трещинообразованием и дополнительными повреждениями в элементах надземных конструкций, снижением их эксплуатационных свойств, а также, что немаловажно, вызывая ухудшение условий пребывания в них людей. Люди могут ощущать дискомфорт, чувство беспокойства, нарушение сна. Подчёркивается, что эти воздействия должны учитываться в рамках действующих норм РФ и концепции виброзащиты при проектировании и мониторинге застройки в зоне влияния метро. В работе [5] отмечается, что наиболее опасными и способными привести к превышению нормируемых санитарными нормами параметров вибраций в планируемых к возведению вблизи линии метрополитена зданиях, чаще всего является уровень виброускорений на поверхности земли в октавных полосах 31,5 и 63 Гц.

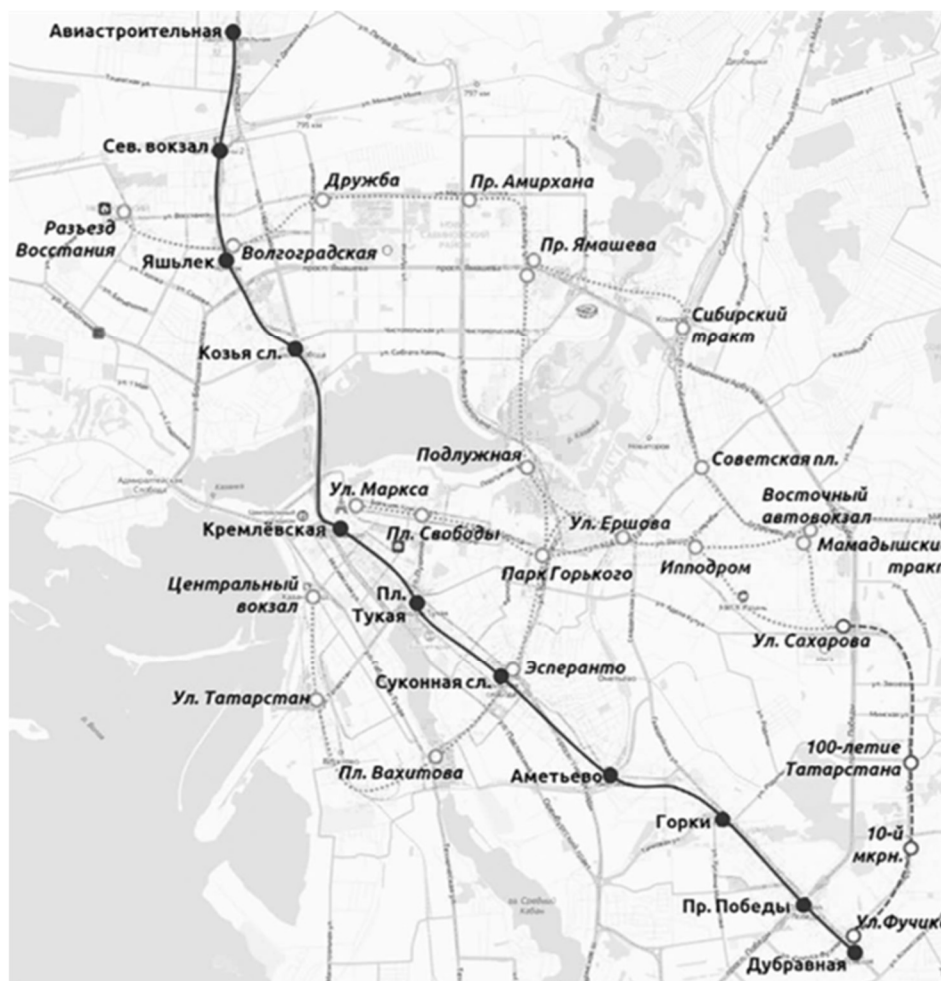


Рис. 1. Схема Казанского метрополитена (www.k-metro.ru)

Fig. 1. Kazan Metro Map (www.k-metro.ru)

В работе [6] выделены основные факторы, часто приводящие здания в зоне действия метро в аварийное состояние. Главным является образование мульды сдвижения и деформации поверхностных слоев пород из-за непосредственных выработок метрополитена. Размеры и форма мульды зависят от глубины заложения тоннелей, их диаметра, типа грунта и технологии проходки.

В настоящее время существуют апробированные методы защиты зданий от вибраций. Среди наиболее действенных, как отмечается в работе [7] является устройство однослойных или двухслойных пустотных экранов по периметру здания, обеспечивающих отражение волн, создаваемых подземными транспортными источниками. В отличие от однослойных стенок, снижающих вибрации в два и более раз, двухслойные экраны с воздушной прослойкой обладают большей эффективностью. Однако они применяются достаточно редко, поскольку их свойства нарушаются при попадании внутрь воды или грунта. В работе [8] предлагается вариант устройства защитного барьера для здания, проектируемого в зоне метрополитена, в виде ряда свай. Параметры барьера (шаг свай, их материал и длина) подбираются таким образом, что бы создать зону устойчивого гашения колебаний в интервале 30-80 Гц, характерном для метро. Отмечается, что барьер эффективно снижает уровень в диапазоне свыше 12 Гц, причем эффект изоляции нарастает с увеличением этажности здания.

В работах [4,7] выделяют еще один способ защиты зданий – это устройство виброизоляторов из специальных прокладок на основе металлорезины или эластомеров под фундаментами. Они позволяют значительно снизить вибрации, однако, как отмечается в работе [7], несмотря на высокую эффективность, в определенных ситуациях могут вызывать рост амплитуд колебаний и смещений, что ограничивает их применение в условиях стесненной застройки. В качестве альтернативы авторы приводят вибродемпфирование, основанное на диссипации энергии колебаний в сыпучей среде. Его суть заключается в пропускании вибраций через демпфирующую прослойку из сыпучего материала. В качестве такой прослойки могут выступать засыпки из песка или щебня. Данный способ показал себя более экономичным по сравнению с вышеописанными вариантами виброзащиты и одновременно эффективным.

Транспортные воздействия носят циклический характер. В работах [9,10] отмечается, что при действии такого рода динамических нагрузок, происходит увеличение сжимаемости (виброкомпрессия) и накопление сдвиговых и объемных деформаций (виброползучесть) в грунте. Указанные явления могут приводить к значительному увеличению осадок фундаментов и создавать риск как для оснований зданий и сооружений, так и для подземных конструкций метрополитена. Аналогично в работах [11,12] отмечается, что строительство новых зданий может негативно отразиться на условиях эксплуатации конструкций подземного железнодорожного транспорта. И при проектировании зданий и сооружений в зоне прохождения линий метро возникает задача комплексной оценки их взаимного влияния. Так работа [12] посвящена исследованию влияния строительства комплекса зданий, объединенных одним общим подземным объемом, на участок Сокольнической линии метро в г. Москва. Для уменьшения влияния на окружающую застройку и сооружения метрополитена при разработке котлована комплекса предусматривалось устройство ограждения в виде монолитной железобетонной «стены в грунте» и дополнительного защитного геотехнического барьера из цементогрунта, что позволило минимизировать возникновение дополнительных деформаций конструкций тоннелей метро до допустимых значений. В работе [11] рассматриваются методы оценки технического состояния сооружений московского метрополитена, находящихся в зоне влияния нового строительства. Автор анализирует факторы риска, методы мониторинга и способы обеспечения безопасности конструкций метро при воздействии нового строительства.

В настоящей статье излагаются результаты геотехнического анализа взаимного влияния проектируемого здания и действующей линии метрополитена в г. Казани.

Цель исследований: оценка вибрационного воздействия, обусловленного движением поездов метрополитена, на фундамент и грунтовое основание проектируемого здания, и обоснование проектных решений, обеспечивающих соблюдение требований санитарно-гигиенических норм по уровню вибраций,

допустимые осадки с учетом деформаций виброползучести грунта и безопасность эксплуатации существующих конструкций тоннелей метро.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Выбор наиболее оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания проектируемого здания, позволяющей обеспечить непревышение допустимого уровня вибраций на поверхности фундамента, вызванного движением поездов метрополитена.

2. Расчет проектируемого фундамента здания по второй группе предельных состояний, выявление области развития деформаций под подошвой фундамента с учетом виброползучести и исключение влияния нового объекта строительства на конструкции тоннелей метро.

3. Оценка напряженно-деформированного состояния фундамента от всех видов воздействий.

2. Материалы и методы

Объектом исследования является здание общественного питания, проектируемое по ул. Даурская в г. Казани (участок между станциями «Аметьево» и «Горки») (рис. 1), характеризующееся каркасной конструктивной системой. В качестве фундамента выступает сплошная железобетонная плита монолитного исполнения, размещаемая непосредственно над трассой тоннелей действующего метро. Натурные измерения вибрационного фона на площадке строительства, проведенные в дневное время, в период активной работы транспорта, выявили превышение допустимых уровней виброускорений в октавных полосах частот 31,5 и 63 Гц.

Для обеспечения соответствия вибрационных воздействий нормативным требованиям была разработана и обоснована мера по виброизоляции здания. Для этого был произведен динамический расчет системы «здание – фундамент – грунт – тоннели метро» путем прямого интегрирования уравнений движения во времени с применением модифицированного метода центральных разностей [14]. При этом были учтены инженерно-геологические условия площадки строительства и особенности источника вибрации (железнодорожного подземного транспорта). Динамическое воздействие от движения поездов метрополитена моделировалось в виде переменных во времени сосредоточенных сил, изменяющихся по гармоническому закону:

$$P(t) = P_0 \sin \theta \cdot t, \quad (1)$$

где θ и P_0 – круговая частота (рад/сек) и максимальная амплитуда (кН) вибрационной нагрузки;

Динамические силы прикладывались в точках расположения рельсовых путей метрополитена и моделировали одновременное воздействие двух встречных составов. Частота вынуждающей нагрузки при этом принималась исходя из наиболее опасного для здания воздействия вибраций в октавных полосах 31,5 и 63 Гц.

Выбор оптимальной конструкции фундамента и грунтового основания производился исходя из условий:

$$a \leq a_u, \quad (2)$$

$$L_a \leq L_{a,u}, \quad (3)$$

где a – расчетные значения виброускорения на поверхности фундамента (были получены расчетом);

a_u – предельно допустимые значения виброускорения, определяемые на основании санитарных норм СН 2.2.4-2.1.8.566-96;

$L_{a,u}$ – предельно допустимый уровень вибрации;

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{1 \cdot 10^{-6}}. \quad (4)$$

Для удовлетворения условий (2) и (3) было принято устройство под фундаментной плитой толщиной 500 мм слоя щебня (сыпучего материала) толщиной 1000 мм, обладающего высокими демпфирующими свойствами. Между плитой и щебнем была предусмотрена подготовка из бетона класса В7,5. Как показали численные исследования, реализация данного конструктивного решения обеспечила снижение максимальных

уровней виброускорения на поверхности фундамента до требуемых значений. Полученные величины составили:

– для вертикальной компоненты: $y_z^{n\max} = 0,0327 \text{ м/с}^2 (90,3 \text{ дБ})$;

– для горизонтальной компоненты: $y_x^{n\max} = 0,0082 \text{ м/с}^2 (79 \text{ дБ})$.

Указанные значения находятся в пределах, регламентированных действующими санитарными нормами, согласно которым допускаемое значение составляет 91 дБ.

Оценка деформативности грунтового основания проектируемого здания, находящегося в зоне динамического влияния метрополитена, по второй группе предельных состояний выполнялась на основе следующего условия:

$$S \leq S_u \quad (5)$$

где S – осадка основания фундамента (совместная дополнительная деформация основания и сооружения), определяемая с учетом воздействия вибраций от работы метрополитена, м;

S_u – предельное значение осадки основания фундаментов, м.

Общая осадка основания фундамента представлена в виде суммы осадки фундамента от статических нагрузок S_{cm} и осадки фундамента от вибрационного воздействия метрополитена S_{vibr} .

Величина осадки фундамента от статических нагрузок S_{cm} при условии устройства щебеночного основания определялась расчетным методом:

$$S_{cm} = S_{f1} + S_{f2} + S_{f3}, \quad (6)$$

где S_{f1} – осадка от передаваемой фундаментом нагрузки, определялась методом послойного суммирования, м;

S_{f2} – осадка от самоуплотнения щебеночного основания, м;

S_{f3} – осадка за счет уплотнения подстилающих слоев от веса насыпи, м.

Осадку от самоуплотнения щебеночного основания S_{f3} определялась по формуле:

$$S_{f3} = \gamma_{c1} \cdot \beta \cdot h / E \quad (7)$$

где γ_{c1} – коэффициент уплотняемости;

β – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

h – толщина слоя насыпного грунта под фундаментом, м;

E – среднее значение модуля деформации насыпного грунта, кПа.

Осадку за счет уплотнения подстилающих слоев от веса насыпи S_{f2} определялась методом послойного суммирования от давления щебеночной подсыпки, приложенного на кровлю подстилающего слоя.

При расчете осадки S_{vibr} воздействие метрополитена принималось в виде циклической нагрузки, передаваемой от плитного фундамента на грунты основания. Для ее определения использовались данные измерений вибраций, согласно которым максимальный уровень виброускорений составил 85 дБ и 91 дБ для октавных частот, соответственно, 31,5 и 63 Гц. Максимальное количество циклов нагружения было принято $2 \cdot 10^6$.

Вибрационная нагрузка в пределах одного цикла нагружения принималась равной:

$$P_{vibr} = p_{cp} \frac{y''}{g}, \quad (8)$$

где p_{cp} – среднее давление под подошвой фундамента.

Минимальная нагрузка цикла: $P_{\min} = p_{cp}$, максимальная нагрузка цикла: $P_{\max} = P_{\min} + P_{vibr}$.

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

$$\varepsilon_{Pl_i} = P_{\max} \frac{1}{E_0} f(N_i), \quad (9)$$

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

$$f(N_i) = 1 - e^{-\gamma(t_i - t_0)}, \quad (10)$$

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

Величина осадки на i -м цикле нагружения от вибрационного воздействия определялась выражением:

$$S_{\text{вibr}_i} = \varepsilon_{Pl_i} \cdot H_c, \quad (11)$$

где H_c – мощность сжимаемой толщи грунта, формируемая при действии максимальной нагрузки цикла P_{max} , м.

Расчет напряженно-деформированного состояния плитного фундамента проектируемого здания производился в среде расчетного комплекса Лира-САПР. При этом плитный фундамент рассматривался как плита на упругом основании.

Учитывая условия нагружения конструкции, рассматривалось 2 расчетных случая:

- предусматривалась работа плитного фундамента только в условиях статических нагрузок, включая вес проектируемого здания и временных нагрузок (случай 1);
- предусматривалась работа фундамента в условиях дополнительного вибрационного воздействия от движения поездов метрополитена (случай 2).

В представленных исследованиях упругоподатливые свойства грунта учитывались с помощью коэффициентов постели. В расчетном случае 1, при учете только статических нагрузок, коэффициенты вычислялись на основании метода Пастернака [15]:

$$c_1 = \frac{E_{zp}}{H_c(1 - 2\mu_{zp}^2)}, \quad (12)$$

$$c_2 = \frac{c_1 \cdot H_c^2(1 - 2\mu_{zp}^2)}{6(1 + \mu_{zp})}, \quad (13)$$

где c_1 – коэффициент сжатия, отражающий зависимость между интенсивностью вертикального отпора грунта и его осадкой, кН/м³;

c_2 – коэффициент сдвига, отражающий наличие вертикальных сил сопротивления сдвигу в сыпучих и малосвязных грунтах, обусловленных зацеплением и внутренним трением частиц, кН/м;

H_c – мощность сжимаемой толщи грунтового массива под подошвой фундамента, м.

В расчетном случае 2, коэффициент сжатия c_1 определялся по формуле О.А. Савинова для фундаментов прямоугольной формы в плане [16]:

$$c_1 = c_{zp,0} \left(1 + \frac{2(l+b)}{\Delta lb} \sqrt{\frac{q}{p_0}} \right), \quad (14)$$

где p_0 – давление под подошвой опытного штампа, равное 20 кН/м²;

q – среднее давление под подошвой фундамента прямоугольной формы, кН/м²;

Δ – константа упругости основания, равная единице в 1/м;

$c_{zp,0}$ – усредненный коэффициент жесткости грунтового основания, определяемый по формуле:

$$c_{zp,0} = \frac{\sum_{i=1}^n c_{0i} h_i}{H_c}, \quad (15)$$

где h_i и c_{0i} – мощность (м) и жесткость i -го слоя грунта (кН/м³);

n – количество слоев в пределах мощности сжимаемой толщи H_c .

Коэффициент сдвига c_2 вычислялся по формуле (13).

Параметры подушки из щебня, используемой в конструктивных решениях с целью гашения колебаний, были приняты на основании СП 23-105-2004 «Оценка вибрации при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов метрополитена»:

- модуль деформации $E = 50$ МПа;
- плотность в уплотненном состоянии $\rho = 2$ т/м³;
- коэффициент Пуассона – 0,3;
- коэффициент поглощения энергии $-\Psi = 0,1$;
- коэффициент жесткости – 20 000 кН/м³.

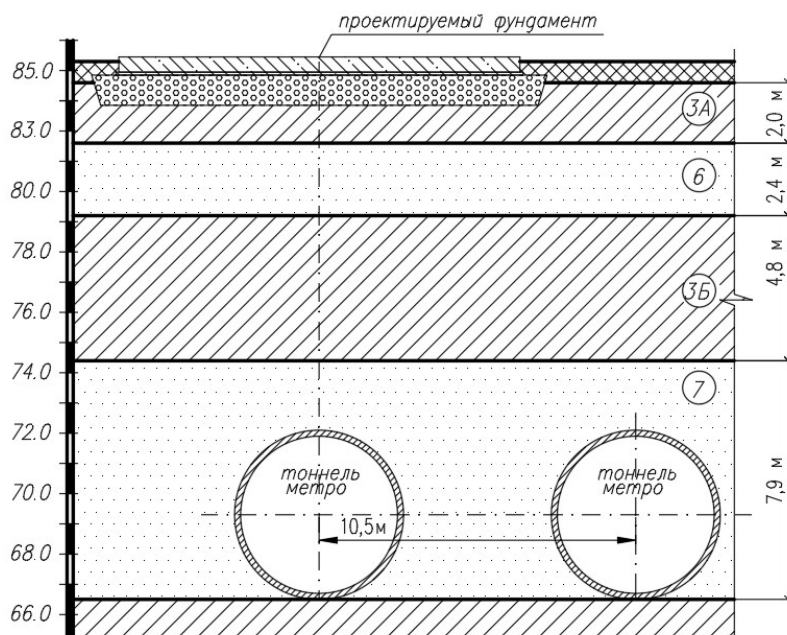


Рис.2. Схематический инженерно-геологический разрез (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Schematic engineering-geological section (illustration by the authors)

Инженерно-геологический разрез основания здания с привязкой плитного фундамента и тоннелей метро приведен на рис. 2.

В расчетах использовались характеристики грунта основания, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики грунтов

№№ ИГЭ	Номенклатурный вид грунта	Плотность грунта, ρ , т/м ³	Угол внутреннего трения, ϕ , град.	Удельное сцепление, c , кПа	Модуль деформации, E , МПа	Коэффициент жесткости C_0 , кН/м ³
3а	Суглинок твердый, полутвердый	<u>1,87</u> 2,00	<u>22</u> 21	<u>20</u> 15	<u>13</u> 11	20000
3б	Суглинок тугопластичный	<u>1,90</u> 1,98	<u>20</u> 19	<u>17</u> 13	<u>10</u> 9	12000
6	Песок мелкий маловлажный	<u>1,80</u> 2,05	<u>30</u> 27	<u>1,8</u> 1,4	<u>30</u> 26	10000
7	Песок средней крупности маловлажный	<u>1,79</u> 2,09	<u>32</u> 28	<u>1,2</u> 0,8	<u>36</u> 34	15000

Примечание: значения над чертой соответствуют характеристикам грунта естественной влажности, под чертой – в водонасыщенном состоянии.

3. Результаты и обсуждение

Как показали результаты расчетов, большие по величине деформации наблюдаются в диапазоне октавной полосы частот 31,5 Гц. При этом в расчетах учтены: время одного полного цикла колебаний $T = 0,0317$ сек, количество циклов колебаний $N_d = 2 \cdot 10^6$. Мощность сжимаемой толщи грунта получена равной $H_c = 5,45$ м. Результаты расчета осадок проектируемого фундамента от совокупности действующих нагрузок представлены в таблице 2.

Анализ показал, что вклад вибрационного воздействия от движения поездов метрополитена в общую прогнозируемую осадку составляет около 15%. Суммарная величина осадки не превышает предельно допустимого значения. Нижняя граница сжимаемой толщи грунтов расположена на отметке 6,9 м от дневной поверхности и не достигает конструкций обделки существующих тоннелей метрополитена.

Таблица 2

Сводная таблица расчетных осадок плитного фундамента

Осадки	Обозначение	При природной влажности грунта	В водонасыщенном состоянии грунта
Осадка от статической нагрузки, м	$S_{ст}$	0,056	0,067
Осадка от вибрационной нагрузки, м	$S_{вibr}$	0,008	0,010
Суммарная осадка, м	S	0,064	0,077

В ходе настоящего исследования деформации основания были также проанализированы методом конечных элементов в программном комплексе «Лира-САПР» с применением специализированного модуля «Монтаж». Данный подход позволил поэтапно смоделировать полную историю нагружения строительной площадки, включая следующие технологические стадии: разработку котлована, устройство щебеночной подготовки, возведение плитного фундамента, приложение статической нагрузки от сооружения и последующее динамическое воздействие от движения поездов метро.

Картина деформирования массива грунта, полученная численным методом, представлена на рис.3. Мощность сжимаемой толщи при этом составила $H_c = 7,5$ м. Таким образом, тоннели метро расположены за пределами сжимаемой толщи и не попадают в зону влияния здания.

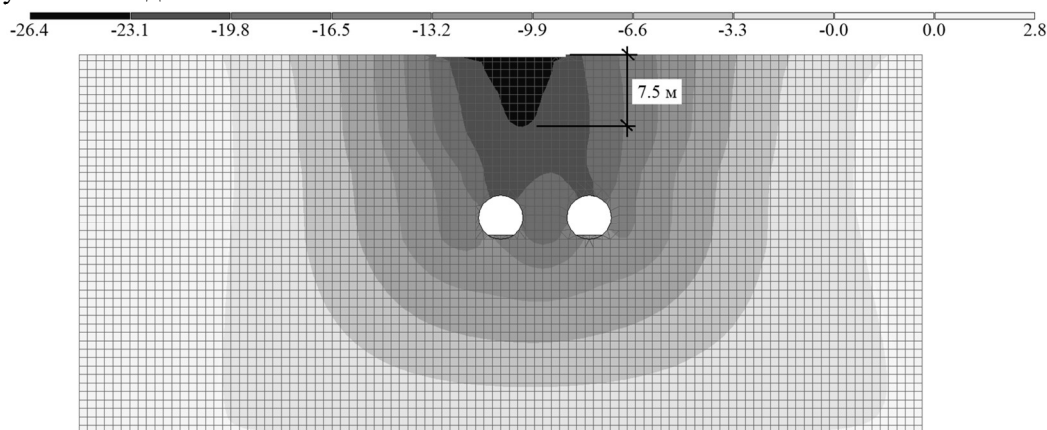


Рис. 3. Вертикальные перемещения по оси Z, мм и м (иллюстрация авторов).

Fig. 3. Vertical movements along Z-axis, mm (illustration by the authors)

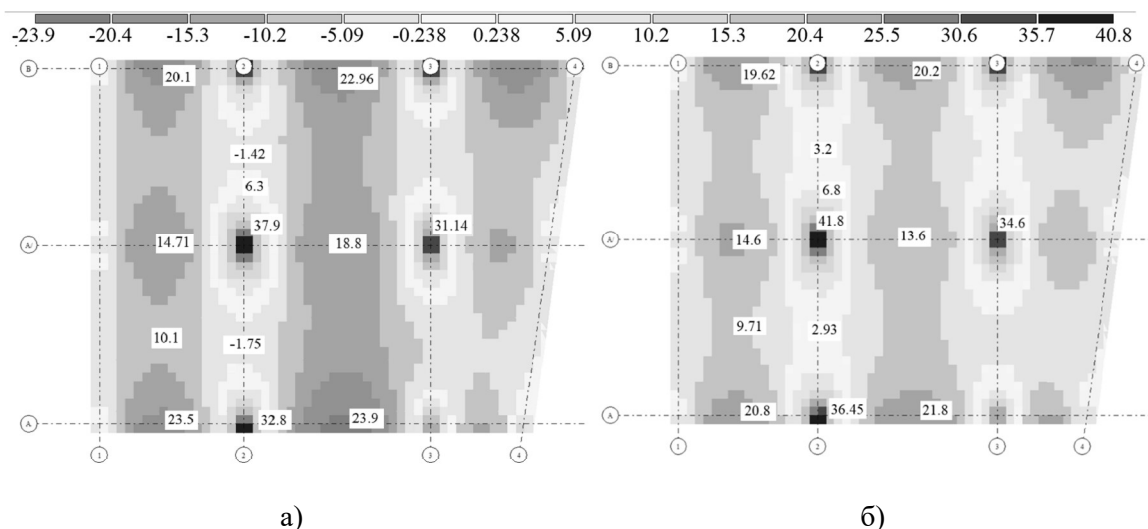


Рис.4. Фрагменты мозаики изгибающих моментов по оси X при статических нагрузках (а) и с учетом вибрационного воздействия (б) (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Fragments of a mosaic of bending moments along the X-axis under static loads (a) and taking into account vibration effects (b) (illustration by the authors)

Оценка напряженно-деформированного состояния плитного фундамента здания показала, что при учете вибрационного воздействия качественная картина распределения изгибающих моментов в плите несколько изменяется относительно статического нагружения (рис. 4), причем в наиболее нагруженных зонах наблюдается увеличение значений изгибающих моментов на 10-15%. Аналогичные результаты были получены в работе [17].

4. Заключение

На основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Конструктивное решение с применением под фундаментом проектируемого здания демпфирующей прослойки из сыпучего материала в виде щебня толщиной 1000 мм позволило снизить уровень виброускорений от влияния подземного транспорта до допустимых пределов.

2. Численные исследования показали, что при действии вибрационной нагрузки от движения поездов метрополитена происходит увеличение осадки фундамента рассматриваемого здания. Доля осадки от вибрационного воздействия составляет порядка 15% от общей прогнозируемой осадки. При этом полученные деформации грунтового основания с учетом виброползучести не превышают предельно допустимых значений, установленных действующими нормативными документами.

3. Нижняя граница сжимаемой толщи находится на глубине 6,9 м от поверхности и не достигает конструкций обделки тоннелей метро. Следовательно, конструкции метрополитена не попадают в зону влияния проектируемого здания.

4. При учете вибрационного воздействия наблюдается увеличение значений изгибающих моментов в наиболее нагруженных зонах плитного фундамента на 10-15%.

Список литературы/ References

1. Жданов В.А. Особенности строительства Казанского метрополитена// Тоннели и метро, №3, 2004.С. 10-13.
Zhdanov V.A. Features of the construction of the Kazan metro// Tunnels and metro, No. 3, 2004. P. 10-13.
2. 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.
3. 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. – V. 2. – P. 17-21. – EDN FYATCC.
4. 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. – EDNSRBZAD
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.
5. 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. – EDNMQTYKD
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. – EDNMQTYKD.

6. 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. – EDNPDXMRK
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. – EDNPDXMRK.
7. Козлова Н.А., Мишина В.М. О методах виброзащиты фундаментов зданий в условиях города// Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ. Сборник статей — М. : МАРХИ, 2022. – С. 208 - 209.
Kozlova N.A., Mishina V.M. About methods of vibration protection of the buildings' foundations in a city// Science, education, and experimental design. Proceedings of MARCHI. Collection of articles. Moscow: MARCHI, 2022. – P. 208–209.
8. Liu W. Effect of periodic pile row in subway vibration isolation / W. Liu, X. Zhou, Y. Wang // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 199. – P. 302-309.
9. Mirsayapov I.T. Settlement of the base of clay soil under regime weighting / I. T. Mirsayapov, D. D. Sabirzyanov // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 of April – 15 of May, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012068. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012068. – EDN ITWAWC.
10. Мирсаяпов И. Т. Несущая способность и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагружениях / И. Т. Мирсаяпов, Х. М. А. Шараф // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 5. – С. 789-799. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799. – EDNKEKBGI.
Mirsayapov I. T. Bearing capacity and settlements of clay foundations under block cyclic loading / I. T. Mirsayapov, H. M. A. Sharaf // Bulletin of MGSU. - 2024. - Vol. 19, No. 5. - P. 789-799. - DOI 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799. - EDN KEKBGI.
11. 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., Romanevich K.V., Basov A.D. Assessment of the mutual influence of underground metro structures during construction and operation // “Geotechnics”. 2018. T. X. No. 1-2/2018. P.82-89. EDN URPUAW.
12. 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 densely located existing buildings // Metro and tunnels. – 2021. – No. 1. – P. 38-41. – EDNAHSKBW.
13. 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 construction impact zone // University Science. – 2016. – No. 1(1). – P. 78-82. –EDN WAWTKV.
14. Newmark, N. M. A method of computation for structural dynamics / N. M. Newmark // Transactions of the American Society of Civil Engineers. — 1962. — Vol. 127, No. 1. — P. 1406–1433.
15. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. – М.: Госстройиздат, 1954. – 56 с.
Pasternak P.L. Fundamentals of a new calculation method on an elastic foundation using two bedding coefficients. – Moscow: Gosstroyizdat, 1954. – 56 p.

16. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. – Л.: Стройиздат, 1979. – 200 с.
Savinov O.A. Modern designs of foundations for machines and their calculation. – L.: Stroyizdat, 1979. – 200 p.
17. 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. No. 1 (11). P. 21–30.

Информация об авторах

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

E-mail: mirsayapov1@mail.ru, ORCID:0000-0002-6193-0928

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

E-mail: danm_n@mail.ru, ORCID:0000-0001-5110-2347

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

E-mail: d.safin@list.ru, ORCID: 0000-0003-2871-0808

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

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4109-9399

Information about the authors

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

E-mail: mirsayapov1@mail.ru, ORCID:0000-0002-6193-0928

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, ORCID:0000-0001-5110-2347

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, ORCID: 0000-0003-2871-0808

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, ORCID: 0000-0002-4109-9399

Дата поступления: 19.10.2025

Дата принятия: 27.04.2026