

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 1 / 2023, Vol. 10, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS123 (<https://doi.org/10.15862/05SATS123>)

Обоснование рациональных конструктивных параметров станции метрополитена без боковых посадочных платформ

Шапошников Е.А., Фролов Ю.С.

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шапошников Евгений Алексеевич, e-mail: jonhshap@yandex.ru

Аннотация. В статье изложены результаты исследования напряжённо-деформированного состояния конструкции станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона.

Исследование проводилось согласно методологии системного подхода по плану полного факторного эксперимента, с последующей обработкой результатов расчёта методами математической статистики и построением регрессионных зависимостей для создания вероятностно-статистической модели. Исходные данные для анализа были получены путем численного анализа математических моделей методом конечных элементов в программе Midas GTS NX.

В рамках исследования были выделены конструктивные параметры станции метрополитена, оказывающие наибольшее влияние на напряжённо-деформированное состояние конструкции станции и вмещающего ее грунтового массива. Был проведен многофакторный эксперимент на основе данных, полученных при математическом моделировании системы «обделка станции — грунтовый массив» методом конечных элементов. Результаты, которого позволили оценить степень влияния конструктивных параметров обделки

станции на напряжённо-деформированное состояние системы «обделка станции — грунтовый массив».

На основании результатов регрессионного анализа были выявлены закономерности влияния конструктивных параметров на напряжённо-деформированное состояние системы «обделка станции — грунтовый массив». Получены зависимости для определения рациональных конструктивных параметров станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона, которые легли в основу вероятностно-статистической модели системы.

Разработанная вероятностно-статистическая модель позволяет осуществлять прогноз статической работы конструкции станции метрополитена без боковых посадочных платформ и обосновывать рациональные параметры конструктивных элементов обделки станционных тоннелей в инженерно-геологических условиях г. Санкт-Петербург.

Ключевые слова: станция метрополитена; обделка; свод среднего станционного тоннеля; рациональные параметры; корреляционный анализ; регрессионный анализ; метод конечных элементов; вероятностно-статистическая модель

Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms

Evgenii A. Shaposhnikov, Yuri S. Frolov

Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Evgenii A. Shaposhnikov, e-mail: jonhshap@yandex.ru

Abstract. This article presents the results of a study on the stress-strain state of a metropolitan railway station structure without side railway platforms during the construction of the upper arch of the middle station tunnel using in-situ reinforced concrete. The study was conducted using a systematic approach methodology based on a full factorial experiment plan, with subsequent processing of the calculation results using mathematical statistical methods and regression analysis to create a probabilistic-statistical model. The initial data for the analysis were obtained through numerical analysis using mathematical models and the finite element method in the Midas GTS NX program.

Within the framework of the study, the design parameters of the metropolitan railway station that had the greatest impact on the stress-strain state of the station structure and the surrounding soil mass were identified. A multifactorial experiment was conducted based on the obtained data, involving the mathematical modeling of the "station lining — soil massif" system using the finite element method. The results of the modeling allowed for the assessment of the

influence of the tunnel casing design factors on the stress-strain state of the "station lining — soil mass" system.

Based on the results of the regression analysis, patterns of influence on the stress-strain state of the "station lining — soil mass" system were revealed. Relationships for determining the rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms during the construction of the upper arch of the middle station tunnel using in-situ reinforced concrete were obtained, forming the basis of a probabilistic-statistical model of the system.

The developed probabilistic-statistical model enables the prediction of the static performance of the metropolitan railway station structure without side railway platforms, and provides substantiation for the rational parameters of the station tunnel casing structural elements in the engineering-geological conditions of St. Petersburg.

Keywords: metropolitan railway station; casing; arch of the middle station tunnel; rational parameters; correlation analysis; regression analysis; finite element method; probabilistic-statistical model

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License

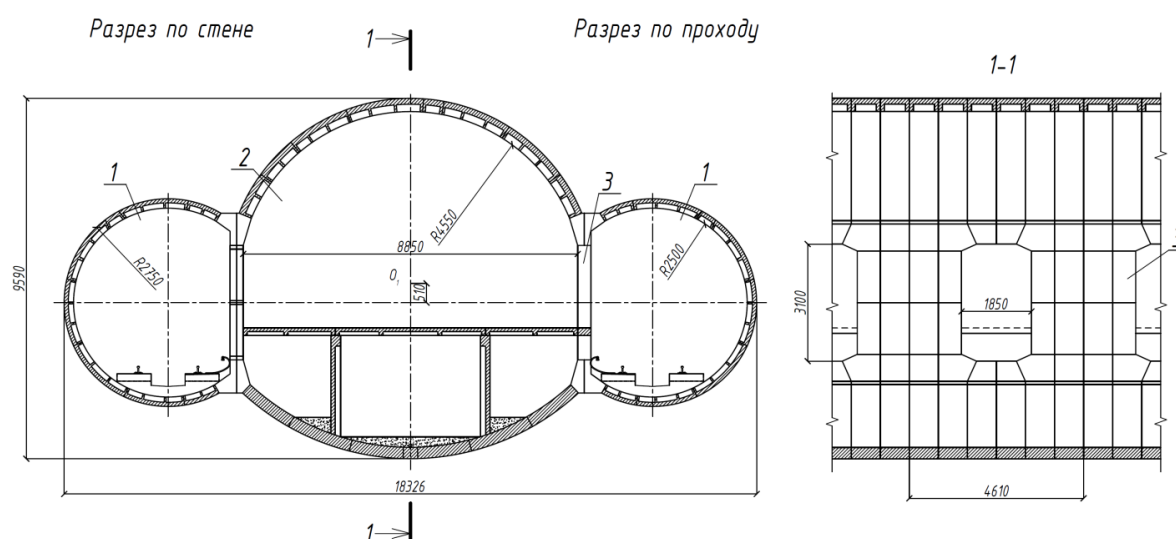


Введение

Introduction

В результате совместной работы специалистов Ленметропоекта, Ленметростроя и кафедры "Тоннели и метрополитены" ЛИИЖТа в конце пятидесятих годов прошлого столетия было разработано и исследовано принципиально новое конструктивно-технологическое решение станции глубокого заложения Ленинградского метрополитена [1; 2], которое впоследствии получило название — станция метрополитена без боковых посадочных платформ.

Отличительной особенностью станции нового типа являлось сооружение путевых тоннелей станции щитовыми комплексами перегонных тоннелей и устройство пассажирской платформы в пределах среднего станционного тоннеля. При этом разомкнутые сборные железобетонные обделки путевых станционных тоннелей, и верхний и обратный своды среднего станционного тоннеля станции опирались на внутренние несущие конструкции, выполненные в виде чугунных стен с проемами, которые совпадали с дверями подвижного состава (рис. 1).



1 — Путевые станционные тоннели с обделкой из железобетонных тюбингов; 2 — Платформенный зал станции с обделкой из железобетонных тюбингов (верхний свод) и железобетонных блоков (обратный свод); 3 — Стены с проемами из сборных элементов чугунного литья

1 — Track station tunnels with reinforced concrete liner plate casing; 2 — Station platform hall casing with reinforced concrete liner plate (upper crown) and reinforced concrete blocks (reverse crown); 3 — Walls with openings from prefabricated cast iron elements

Рисунок 1. Конструктивная схема платформенного участка станции метрополитена без боковых посадочных платформ (рисунок авторов)

Figure 1. Structural design of the metropolitan railway platform station section without side railway platforms (drawing by the authors)

Такое конструктивное решение станции позволило в значительной степени сократить объем разрабатываемого грунта, свести до минимума использование дорогостоящего чугунного литья и существенно сократить сроки строительства. Кроме того, такое решение позволило повысить безопасность пассажиров, исключая возможность их попадания на пути, что явилось шагом к реализации мировой тенденции метростроения по изоляции пассажирской зоны от зоны движения подвижного состава на линиях Ленинградского метрополитена. Конструктивный тип станции без боковых посадочных платформ был реализован при строительстве 10 станций в период с 1961 по 1972 год.

Однако несовершенство автоматики, управляющей открытием/закрытием дверей и автоматической системы, обеспечивающей остановку поезда строго в створе проемов в стенах путевых тоннелей, снижало пропускную способность станции и, как следствие, всей линии, что повышало эксплуатационные затраты. Это в итоге привело к отказу от сооружения станций такого типа.

Однако длительный опыт эксплуатации станций без боковых посадочных платформ, совершенствование автоматизированных систем управления движением поездов и автоматического режима работы дверей в стенах путевых тоннелей и в вагонах поезда определили возможность и целесообразность вернуться к этому типу станционных сооружений на линиях Петербургского метрополитена. В немалой степени этому способствовали требования минимизации осадок земной поверхности при строительстве подземных объектов метрополитена.

В настоящее время активно исследуются пути совершенствования конструктивно-технологических решений станций без боковых посадочных платформ в различных инженерно-геологических условиях [3–8]. Так раздел по совершенствованию конструктивно-технологических решений станции без боковых посадочных платформ включен в «Комплексную программу совершенствования технологий сооружения и постоянных конструкций Петербургского метрополитена».

Новая технология предлагает после проходки путевых станционных тоннелей механизированными щитами перегонных тоннелей производить разработку грунта в калотте среднего тоннеля станции на полное сечение под защитой опережающей крепи кровли и лба забоя с устройством комбинированной временной крепи из набрызг-бетона и металлических арок. Постоянную обделку верхнего свода сооружать из монолитного железобетона, стены с проемами монтировать из металло-бетонных сборных блоков. После разработки грунта уступа и демонтажа тубингов временного заполнения дорабатывать лоток и производить монтаж

сборного обратного свода с обжатием на грунт для включения конструкции станции в работу.

Предлагаемое конструктивное решение, реализуемое по технологии сооружения свода среднего зала станции из монолитного железобетона и стен путевых тоннелей из сталежелезобетонных блоков [9; 10], представлено на рисунке 2.

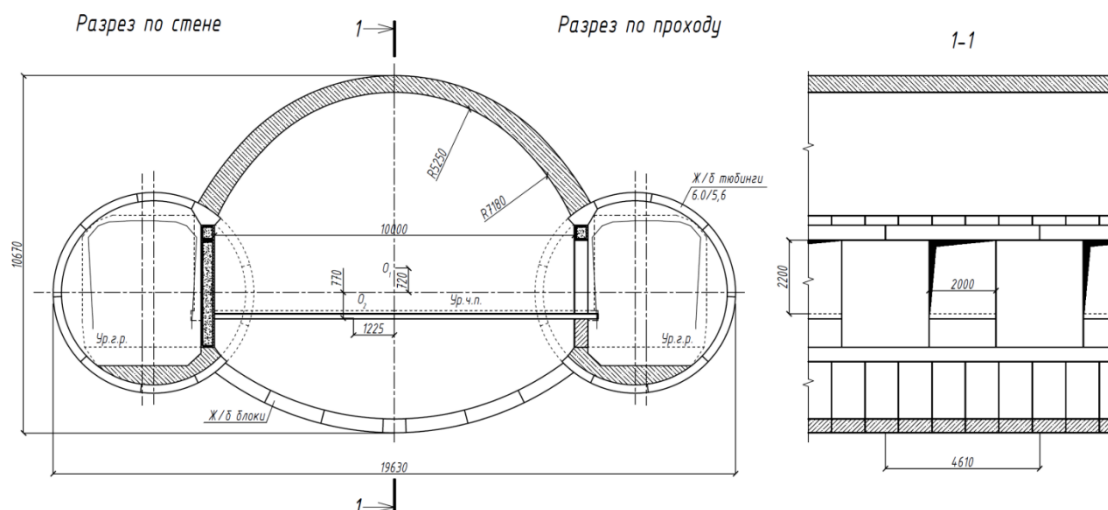


Рисунок 2. Принципиальная схема конструктивного решения станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона. Примечание: Крепь калотты не показана (рисунок авторов)

Figure 2. Structural scheme of metropolitan railway station constructive solution the without side railway platforms during the construction of the middle station tunnel upper crown from in-situ reinforced concrete. Note: The calotte immediate support is not shown (drawing by the authors)

Возможность и целесообразность проходки выработки с опережающей крепью кровли и лба забоя в протерозойских глинах и сооружения обделки из монолитного железобетона с целью минимизации осадок земной поверхности была обоснована при сооружении руддвора вентиляционной шахты № 620 на линии метрополитена Санкт-Петербурга [11–14].

Конструкция станции со сводом большого пролета, основанием которого служат полые опоры из разомкнутых колец обделки путевых тоннелей замкнутых на продольные стены, чрезвычайно чувствительна (с точки зрения статической работы) к любым изменениям ее геометрических параметров: ширины платформы, высоты прохода в разомкнутых кольцах путевых тоннелей, формы и стрелы подъема верхнего и обратного сводов, условий опирания сводов на обделки, а также соотношение жесткостей отдельных элементов станционной обделки. Очевидно также, что на характере формирования напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) конструкции не

может не сказаться и технология сооружения с нетрадиционной схемой ведения проходческих работ и приемами крепления выработки.

Отсюда следует, что прогноз НДС элементов системы «обделка станции — грунтовый массив» может быть решен только на основе глубокого научного анализа причинно-следственных связей силового взаимодействия элементов этой системы. Все вышеизложенное определило направленность и содержание поэтапно проводимых исследований.

Целью первого этапа исследований явилось обоснование рациональных конструктивных параметров верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор значимых конструктивных параметров станции метрополитена без боковых посадочных платформ и оценка степени их влияния на НДС системы «обделка станции — грунтовый массив».
2. Выявление закономерности влияния конструктивных параметров на НДС системы «обделка станции — грунтовый массив» и получение зависимостей для определения рациональных конструктивных параметров станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона.

Методы

Methods

Решение поставленных задач на первом этапе исследований проводилось с привлечением методологии системного подхода, изложенной в работах [15–17].

Для решения подобных задач удобно использовать построение вероятностно-статистических моделей [18]. Такие модели позволяют оценить степень влияния независимых параметров (факторов) на работу конструкции и выявить зависимость изменения НДС конструкции при изменении этих факторов.

Эта зависимость описывается следующей функцией:

$$y = f(x_1; x_1; \dots; x_n), \quad (1)$$

где y — функция переменной (отклик); $x_1; x_1; \dots; x_n$ — факторы (независимые параметры).

В случае исследования конструктивных параметров станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона наиболее значимыми, с точки зрения формирования НДС конструкции станции, являются параметры свода. Среди этих параметров были выделены следующие: пролет верхнего свода, стрела подъёма верхнего свода, толщина верхнего свода в замковом сечении и тип опирания пят верхнего свода на конструкцию путевых тоннелей.

В соответствии с теорией планирования эксперимента исследования проводились по плану полного факторного эксперимента, с последующей обработкой результатов расчёта методами математической статистики с построением регрессионных зависимостей для создания вероятностно-статистической модели.

Для полного факторного эксперимента при исследовании всех возможных сочетаний факторов должен включать минимально три уровня варьирования для каждого фактора (минимум, максимум и медианное значение) [19]. Количество расчетов в этом случае может быть определено по формуле:

$$N = 3^p, \quad (2)$$

где N — необходимое число опытов; p — количество независимых параметров (факторов).

Однако при сопоставлении композиционных планов эксперимента можно уменьшить количество проводимых расчетов, так как один из факторов имеет 2 уровня варьирования — жесткое/шарнирное опирание пят верхнего свода. В этом случае количество расчетов может быть определено по формуле:

$$N = 3^p - 3^{p-1} = 3^4 - 3^{4-1} = 81 - 27 = 54, \quad (3)$$

где N — необходимое число опытов; p — количество независимых параметров (факторов).

Независимые параметры с определенными уровнями варьирования были сведены в таблицу 1. Графическая интерпретация уровней варьирования независимых параметров представлена на рисунке 3.

В качестве зависимых параметров (откликов), позволяющих оценить изменения НДС системы «обделка станции — грунтовых массив», были выделены: горизонтальное перемещение пят верхнего свода среднего станционного тоннеля, вертикальное перемещение замкового сечения верхнего свода, изгибающие моменты в замковом сечении верхнего свода и стене и продольные силы в замковом сечении верхнего свода и стене. Эти параметры были сведены в таблицу 2.

Таблица 1 / Table 1

Уровни варьирования независимых параметров (факторов)

Variation levels of independent parameters (factors)

Независимый параметр (фактор) Independent parameter (factor)	Обозначение параметра, размерность Parameter label, dimension	Обозначение переменной Variable name	Уровень варьирования Variation level		
			нижний lower (-)	средний medium (0)	верхний upper (+)
Пролет верхнего свода Span of the upper crown	L, м	X_1	9	10	11
Стрела подъёма верхнего свода Camber of the upper crown	f, м	X_2	3	4	5
Толщина верхнего свода в замковом сечении The thickness of the upper crown in the lock section	t, м	X_3	0,5	0,6	0,7
Тип опирания пят верхнего свода Type of support of the upper crown skew back	-	X_4	Жесткое опирание Rigid support	-	Шарнирное опирание Pinned support

Составлено авторами / Compiled by the authors

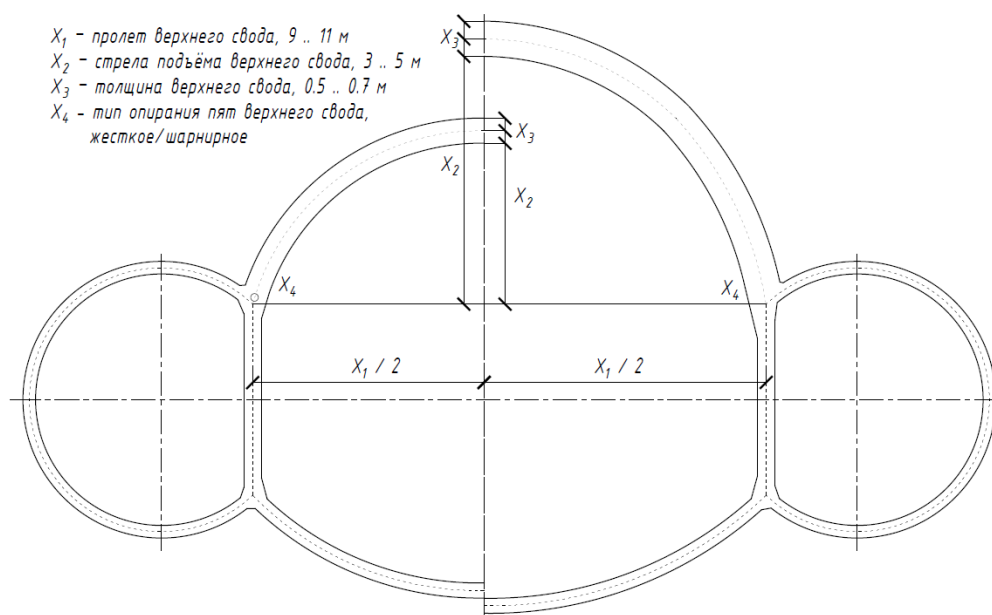


Рисунок 3. Схема граничных значений независимых параметров конструкции станции метрополитена (рисунок авторов)

Figure 3. Boundary values scheme of the independent parameters of the metropolitan railway station design (figure by the authors)

При этом существенного влияния на изменения НДС обделок путевых тоннелей выявлено не было.

Исходные данные для построения вероятностно-статистической модели были получены путем численного анализа математических моделей методом конечных элементов в программе Midas GTS NX, который в настоящее время широко применяется для решения подобных

задач [20–22]. Всего было построено и проанализировано 54 расчетные модели с различными комбинациями факторов, выявленных на первом этапе исследования.

Таблица 2 / Table 2

Зависимые параметры (отклики)

Dependent parameters (responses)

Зависимые параметры (отклики) Dependent parameters (responses)	Обозначение параметра, размерность Parameter designation, dimension	Обозначение переменной Variable notation
Горизонтальное перемещение пяты свода Horizontal movement of the crown skew back	δ , м	Y_1
Вертикальное перемещение верхнего свода в замковом сечении Vertical movement of the upper crown in the lock section	Δ , м	Y_2
Изгибающий момент в замковом сечении свода Bending moment in the crown lock section	$M_{ш}$, тм	Y_3
Продольная сила в замковом сечении свода Longitudinal force in the crown lock section	$N_{ш}$, т	Y_4
Изгибающий момент в стене Bending moment in the wall	M_c , тм	Y_5
Продольная сила в стене Longitudinal force in the wall	N_c , т	Y_6

Составлено авторами / Compiled by the authors

Исходя из задач исследования, было принято решение о создании математических моделей в 2D пространстве, то есть плоских конечно-элементных моделей. Общий вид модели представлен на рисунке 4.

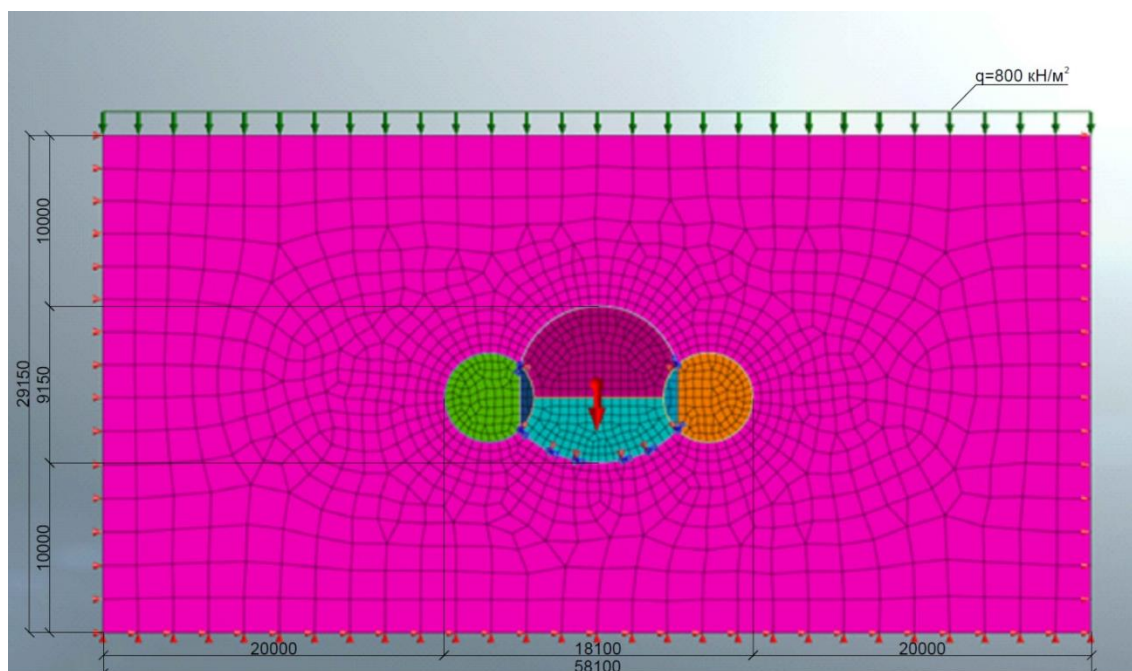


Рисунок 4. Общий вид конечно-элементной модели (рисунок авторов)

Figure 4. General view of the finite element model (drawing by the authors)

Каждая модель представляла собой сетку конечных элементов, которая имела сгущение вблизи конструкции станции. Грунтовый массив моделировался плоскими 2D элементами, обделки перегонных тоннелей, разделительные стены и обделки верхнего и обратного сводов среднего станционного тоннеля 1D элементами. Граничные условия моделировались запретами перемещений по боковым граням массива.

Расчет проводился на основное сочетание нагрузок: от собственного веса и пригруза, моделирующего вышележащие слои грунтового массива, изучение НДС которого в рамках данной задачи не проводилось. Для описания физико-механических свойств материалов обделок и стен применялась упругая линейно деформируемая модель, грунтового массива — модель Мора-Кулона. Сечения обделок и стен задавались прямоугольными эквивалентной жесткости [23; 24].

При моделировании помимо конструктивных решений также была учтена стадийность сооружения станции метрополитена, оказывающая влияние на напряженно-деформированное состояние системы «станция — грунтовый массив». На I этапе моделировался только грунтовый массив для создания начального поля напряжений и учета «исторических» деформаций грунтового массива, с последующим обнулением этих перемещений. На II и III этапах моделировалась проходка левого и правого боковых станционных тоннелей соответственно, с одновременным монтажом обделок этих тоннелей. На IV этапе осуществлялся монтаж стен с проемами внутри боковых станционных тоннелей. На V этапе моделировалась проходка верхней калоттной части среднего станционного тоннеля с устройством монолитного верхнего свода. На VI этапе, который являлся завершающим, происходила разработка нижней части среднего станционного тоннеля — штрассы с монтажом обратного блочного свода и демонтажом тубингов временного заполнения боковых станционных тоннелей.

Плоская конечно-элементная модель грунтового массива, вмещающая конструкцию станции, имела ширину 60 м (назначена исходя из пролета станции около 20 м) и высоту 30 м (назначена исходя из высоты станции около 10 м и технологического слоя грунта в кровле выработки, который по опыту проектирования был принят 10 м).

Глубина заложения станции равная 50 м была принята исходя из усредненных инженерно-геологических условий г. Санкт-Петербург.

Грунтовый массив сложен верхнекотлинскими глинами с характеристиками: модуль деформации $E = 200000$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; объемный вес $\gamma = 21$ кН/м³; сцепление $C = 80$ кПа и угол внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$. Для железобетонных элементов конструкции станции: верхнего свода, обратного свода и обделок боковых станционных

тоннелей были приняты характеристики, соответствующие бетону класса В30 (модуль упругости $E = 325\,000\,000$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$; объемный вес $\gamma = 24$ кН/м³). Для стальных стен с проемами коробчатого сечения были приняты следующие характеристики: модуль упругости $E = 210\,000\,000$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; объемный вес $\gamma = 78$ кН/м³).

Результаты

Results

В качестве примера, иллюстрирующего результаты моделирования методом конечных элементов, на рисунке 5 приведены изополя перемещений и эпюры внутренних усилий для варианта конструктивного решения с пролетом верхнего свода 9 м, стрелой подъёма свода 3 м, толщиной свода в замковом сечении 0,5 м и шарнирным опиранием пят верхнего свода.

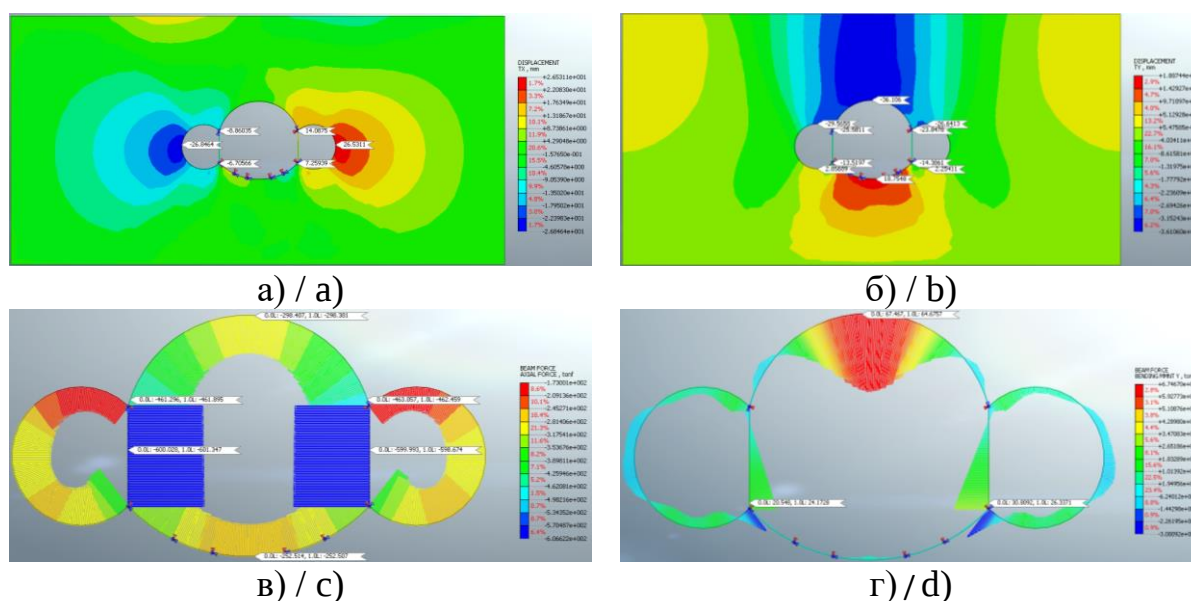


Рисунок 5. Результаты расчета методом конечных элементов: а) изополя горизонтальных перемещений, мм; б) изополя вертикальных перемещений, мм в) эпюра продольных сил, т; г) эпюра изгибающих моментов, тм (рисунок авторов)

Figure 5. Calculation results by the finite element method: a) isofields of horizontal displacements, mm; b) isofields of vertical displacements, mm; c) longitudinal force diagram, t; d) diagram of bending moments, tm (drawing by the authors)

Подобные результаты были получены для каждого из 54 вариантов сочетаний конструктивных параметров. Максимальные и минимальные значения зависимых параметров (откликов), полученные в ходе моделирования системы «обделка станции — грунтовый массив» с различными комбинациями конструктивных параметров станции представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Максимальные и минимальные значения зависимых параметров (откликов)

Maximum and minimum values of dependent parameters (responses)

	Горизонтальное перемещение пяты верхнего свода, мм Horizontal movement of the upper crown skew back, mm	Вертикальное перемещение свода в замковом сечении, мм Vertical movement of the crown in the lock section, mm	Изгибающий момент в замковом сечении свода, тм Bending moment in the crown locking section, tm	Продольная сила в замковом сечении свода, т Longitudinal force in the crown lock section, t	Изгибающий момент в стене, тм Bending moment in the wall, tm	Продольная сила в стене, т Longitudinal force in the wall, t
Min	3	22	14,4	278,5	19,2	599,7
Max	24	59	160,2	354,4	142,3	688

Составлено авторами / Compiled by the authors

По результатам серии расчетов были составлены номограммы, показывающие зависимость выходных параметров (откликов) от изменения входных параметров (рис. 6).

Данные серии расчетов были проанализированы методом корреляционного анализа, что позволило оценить степень взаимосвязи независимых параметров и их комбинаций и влияния их на зависимые переменные.

Степень влияния определялась коэффициентами парной корреляции r . Связь между параметрами может быть сильная, слабая, отрицательная (обратная связь) или положительная (прямая связь). Если коэффициент парной корреляции $r \approx 0$, то это означает отсутствие связи между параметрами, если $r > 0.85$, то считается, что параметры дублируют друг друга и один из них может быть исключен из статистической обработки. Корреляционная матрица приведена в таблице 4.

В результате анализа была выявлена мультиколлинеарность сочетаний независимых параметров $X_1, X_4, X_1^2, X_2^2, X_3^2, X_4^2$, т. е. дублирование факторов и их сочетаний. Это означает, что с точки зрения статистики, эти комбинации были учтены в других факторах и их сочетаниях. Поэтому эти сочетания были исключены из статистической обработки результатов.

Также была оценена степень влияния параметров конструкции на зависимые переменные, характеризующие НДС системы «обделка станции — грунтовый массив». Наиболее значимыми, с точки зрения влияния на НДС системы в целом, оказались факторы: пролет верхнего свода и стрела подъема верхнего свода. В тоже время тип опирания пят верхнего свода оказал значительное влияние на величину изгибающих моментов только в стенах станции, а толщина верхнего свода станции в замковом сечении на величину изгибающих моментов в замковом сечении свода. Степень влияния этих факторов характеризуется приведенными в таблице 4 коэффициентами парной корреляции.

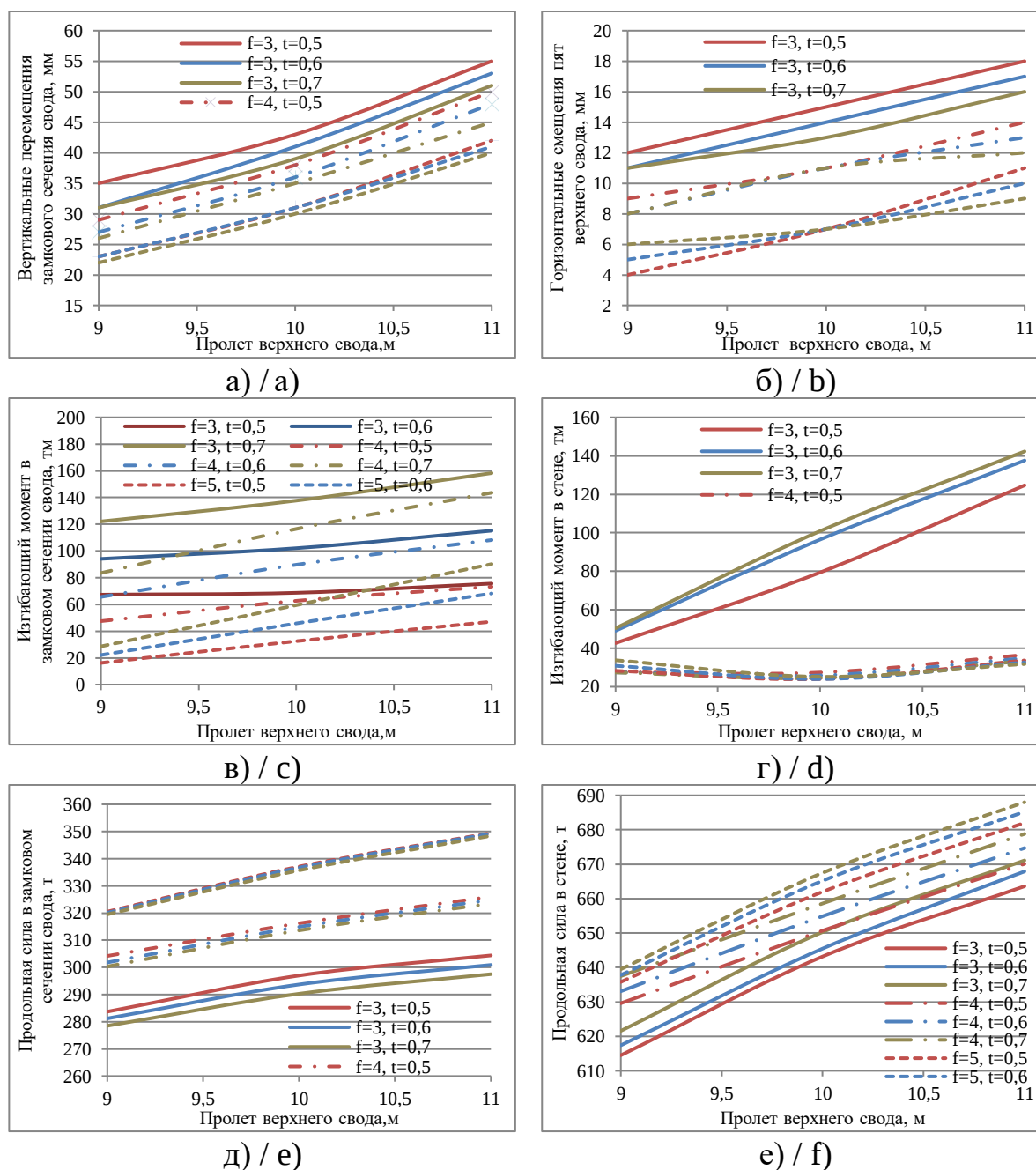


Рисунок 6. Номограммы зависимостей зависимых параметров (откликов) от независимых параметров (L -пролет верхнего свода среднего станционного тоннеля, f -стрела подъема верхнего свода, t -толщина верхнего свода в замковом сечении): а) вертикальных перемещений в замковом сечении свода, мм; б) горизонтальных перемещений пят верхнего свода, мм; в) изгибающих моментов в замковом сечении свода, тм; г) изгибающих моментов в стене, тм; д) продольных сил в замковом сечении свода, т; е) продольных сил в стене, т (рисунок авторов)

Figure 6. Dependences nomograph of dependent parameters (responses) on independent parameters (L -span of the upper crown of the middle station tunnel, f -boom of the upper crown, t -thickness of the upper crown in the lock section): а) vertical displacements in the lock section of the crown, mm; б) horizontal movements of the skew back of the upper crown, mm; в) bending moments in the locking section of the crown, tm; д) bending moments in the wall, tm; е) longitudinal forces in the lock section of the crown, t; ф) longitudinal forces in the wall, t (drawing by the authors)

Таблица 3 / Table 3

Корреляционная матрица независимых параметров и их сочетаний и зависимых параметров

Correlation matrix of independent parameters and their combinations and dependent parameters

		Независимые параметры (факторы) и их сочетания Independent parameters (factors) and their combinations													
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	X ₄ ²
Независимые параметры (факторы) и их сочетания Independent parameters (factors) and their combinations	X ₁	1	0	0	0	0,82	0,84	0,98	0	0	0	1	0	0	0
	X ₂	0	1	0	0	0,08	0	0	0,37	0,51	0	0	1	0	0
	X ₃	0	0	1	0	0	0,2	0	0,83	0	0,83	0	0	1	0
	X ₄	0	0	0	1	1	0	0,13	0	0,84	0,55	0	0	0	1
	X ₁ X ₂	0,82	0,08	0	1	1	0,87	0,98	0,03	0,04	0	0,99	0,08	0	0
	X ₁ X ₃	0,84	0	0,2	0	0,87	1	0,94	0,18	0	0,16	0,96	0	0,2	0
	X ₁ X ₄	0,98	0	0	0,13	0,98	0,94	1	0	0,11	0,07	0,98	0	0	0,13
	X ₂ X ₃	0	0,37	0,83	0	0,03	0,18	0	1	0,19	0,77	0	0,37	0,92	0
	X ₂ X ₄	0	0,51	0	0,84	0,04	0	0,11	0,19	1	0,47	0	0,51	0	0,85
	X ₃ X ₄	0	0	0,83	0,55	0	0,16	0,07	0,77	0,47	1	0	0	0,82	0,55
	X ₁ ²	1	0	0	0	0,99	0,96	0,98	0	0	0	1	0	0	0
	X ₂ ²	0	1	0	0	0,08	0	0	0,37	0,51	0	0	1	0	0
	X ₃ ²	0	0	1	0	0	0,2	0	0,83	0	0,83	0	0	1	0
	X ₄ ²	0	0	0	1	0	0	0,13	0	0,84	0,55	0	0	0	1
Зависимые параметры (отклики) Dependent parameters (responses)	Y ₁	0,1	0,84	-0,5	-0,11	0,17	-0,01	0,09	-0,15	0,34	-0,47	0,1	0,85	-0,5	-0,11
	Y ₂	0,1	0,55	-0,78	-0,07	0,15	-0,1	0,09	-0,52	0,22	-0,67	0,1	0,55	-0,77	-0,06
	Y ₃	0,02	0,38	-0,64	0,57	0,05	-0,11	0,11	-0,45	0,69	-0,24	0,02	0,38	-0,65	0,57
	Y ₄	0,05	0,54	0,73	-0,05	0,39	0,45	0,34	0,87	0,24	0,58	0,35	0,54	0,73	-0,05
	Y ₅	-0,29	0,38	-0,55	0,04	-0,27	-0,32	-0,29	-0,38	0,23	-0,43	-0,29	0,38	-0,52	0,04
	Y ₆	-0,12	0,85	0,38	0,1	-0,05	-0,04	-0,11	0,68	0,55	0,37	-0,12	0,89	0,38	0,1

Составлено авторами / Compiled by the authors

Результаты моделирования были обработаны с помощью методов нелинейной регрессии, что позволило установить зависимость между независимыми (факторами) и зависимыми параметрами (откликами).

Эта зависимость описывается полиномиальной функцией вида:

$$Y_j(X_i) = A_0 + \sum_i A_i X_i + \sum_{i,m} A_{i,m} X_i X_m + \sum_i A_i X_i^2 + \sum_{i,m} A_{i,m} X_i^2 X_m + \dots, \quad (4)$$

где $Y_j(X_i)$ — выходной параметр (отклик); $X_{i,m}$ — выходной параметр(переменный фактор); $A_{0,i,m}$ — числовые коэффициенты.

Для построения вероятностно-статистической модели системы была произведена серия преобразований типа $X_i \rightarrow Y_j$. Модель включает в себя шесть полиномов, по количеству независимых параметров (откликов).

$$\begin{cases} Y_1 = -57,51 + 11,94X_2 + 0,43X_1X_3 - 0,46X_2X_3 - 2,74X_3X_4; R^2 = 99,1\% \\ Y_2 = -14 + 3,86X_2 + 1,1X_1X_2 - 2,52X_1X_3 - 0,29X_2X_3 - 0,79X_3X_4; R^2 = 97,2\% \\ Y_3 = 344,38 - 59,21X_2 - 38,62X_3 + 8X_1X_2 + 74,95X_2X_4 - 119,84X_3X_4; R^2 = 95,8\% \\ Y_4 = 119,14 + 10,96X_2 + 22,6X_3 + 4,23X_1X_2 - 7,16X_1X_3 - 2,24X_3X_4; R^2 = 97,5\% \\ Y_5 = -458,76 + 57,46X_2 + 94,3X_3 - 2,91X_1X_3 - 11,13X_2X_3; R^2 = 86,3\% \\ Y_6 = 267,9 + 34,08X_2 + 30,57X_3 - 0,56X_1X_2 - 1,97X_2X_3; R^2 = 95,9\% \end{cases}$$

Критерием адекватности полученных функциональных зависимостей служила величина доверительной аппроксимации R^2 . Если величина доверительной аппроксимации R^2 не ниже 85 %, то можно судить о достаточной точности функции. Если выше 95 %, то функциональная зависимость является точной. Все полученные функции вероятностно-статистической модели удовлетворяют этим требованиям, что делает ее значимой с точки зрения прогнозирования поведения конструкции в зависимости от изменения ее параметров.

При использовании данной вероятностно-статистической модели, зная лишь один независимый параметр (фактор) при ограничении значений зависимых параметров (откликов), возможно подобрать рациональные значения остальных параметров, осуществляя прогноз работы конструкции в целом.

Например, согласно п. 5.4.1.4 СП 120.13330.2012¹, минимальная ширина платформы для станций без боковых посадочных платформ (закрытого типа) равняется 10 м, при этом пролет верхнего свода среднего станционного тоннеля по нейтральной оси получится равным 9,6 м.

Наиболее значимыми зависимыми параметрами, относительно которых требуется минимизация, являются: горизонтальные смещения пят верхнего свода и изгибающие моменты в стенах станции, так как эти параметры косвенно характеризуют неравенство распоров от сводов среднего станционного и путевых тоннелей, которое может влиять на стабильность узла сопряжения сводов и стены.

Подставляя соответствующие значения в систему уравнений, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} -57,51 + 11,94X_2 + 0,43 \cdot 9,6 \cdot X_3 - 0,46X_2X_3 - 2,74X_3X_4 \rightarrow \text{Min} \\ -14 + 3,86X_2 + 1,1 \cdot 9,6 \cdot X_2 - 2,52 \cdot 9,6 \cdot X_3 - 0,29X_2X_3 - 0,79X_3X_4 = (22..59) \\ 344,38 - 59,21X_2 - 38,62X_3 + 8 \cdot 9,6 \cdot X_2 + 74,95X_2X_4 - 119,84X_3X_4 = (14,4..160,2) \\ 119,14 + 10,96X_2 + 22,6X_3 + 4,23 \cdot 9,6 \cdot X_2 - 7,16 \cdot 9,6 \cdot X_3 - 2,24X_3X_4 = (278,5..354,4)^* \\ -458,76 + 57,46X_2 + 94,3X_3 - 2,91 \cdot 9,6 \cdot X_3 - 11,13X_2X_3 \rightarrow \text{Min} \\ 267,9 + 34,08X_2 + 30,57X_3 - 0,56 \cdot 9,6 \cdot X_2 - 1,97X_2X_3 = (599,7..688) \end{array} \right.$$

Путем решения системы получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_2 = 4,2 \\ X_3 = 0,62. \\ X_4 = 0 \end{array} \right.$$

Соответственно рациональными конструктивными параметрами станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из

¹ СП 120.13330.2012 Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095542> (дата обращения: 02.02.2023).

монолитного железобетона, с точки зрения обеспечения стабильности узла сопряжения сводов и стены, при выполнении требований СП 120.13330.2012, являются: пролет верхнего свода среднего станционного тоннеля 9,6 м, стрела подъёма верхнего свода 4,2 м, толщина верхнего свода в замковом сечении 0,62 м и жесткое опирание пят верхнего свода.

Данный вариант был смоделирован методом конечных элементов в Midas GTS NX. При этом значения зависимых параметров (откликов), полученные из решения системы, имели сходимость в пределах 6 % с результатами математического моделирования конструктивного решения с параметрами, указанными выше.

Обсуждение

Discussion

1. Значимыми конструктивными параметрами станции метрополитена без боковых посадочных платформ, оказывающими влияние на НДС системы «обделка станции — грунтовый массив» являются: пролет верхнего свода среднего станционного тоннеля, стрела подъёма верхнего свода, толщина верхнего свода в замковом сечении и тип опирания пят верхнего свода. Проведенный корреляционный анализ позволил выявить степень влияния каждого из этих параметров на НДС системы «обделка станции — грунтовый массив». Значительное влияние на рассмотренные в ходе исследования параметры НДС конструкции оказывают пролет и стрела подъёма верхнего свода среднего станционного тоннеля (до 85 % от общего независимых влияния параметров). В тоже время тип опирания пят верхнего свода оказывает существенное влияние на величину изгибающих моментов в стенах станции (до 30 % от влияния независимых параметров). А толщина верхнего свода станции в замковом сечении существенно влияет только на величину изгибающих моментов в замковом сечении верхнего свода (до 55 % от влияния независимых параметров), при отсутствии влияния на другие параметры НДС конструкции, рассмотренные в рамках исследования.

2. На основании результатов регрессионного анализа были выявлены закономерности влияния конструктивных параметров на НДС системы «обделка станции — грунтовый массив» и получены зависимости для определения рациональных конструктивных параметров станции метрополитена без боковых посадочных платформ при сооружении верхнего свода среднего станционного тоннеля из монолитного железобетона, которые легли в основу вероятностно-статистической модели системы.

Разработанная вероятностно-статистической модель позволяет осуществлять прогноз статической работы конструкции станции метрополитена без боковых посадочных платформ и обосновывать рациональные параметры конструктивных элементов станции в условиях г. Санкт-Петербург.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Богородецкий, А.А.** Станция нового типа Ленинградского метрополитена имени В.И. Ленина / А.А. Богородецкий, С.С. Казанцев // Тоннели и метрополитены. — 1963. — № 202. — С. 8–15.
2. **Лиманов, Ю.А.** Исследование методом эквивалентных материалов статической работы станции нового типа Ленинградского метрополитена / Ю.А. Лиманов // Тоннели и метрополитены. — 1963. — № 202. — С. 21–26.
3. **Деменков, П.А.** Совершенствование конструкций, геомеханическое обоснование и разработка технологии строительства колонной станции закрытого типа метрополитена глубокого заложения / П.А. Деменков, А.А. Шубин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2016 — № 1. — С. 131–139. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25829369>. — EDN VTFVGR. (дата обращения: 10.02.2023).
4. **Деменков, П.А.** Сравнительный анализ колонной станции без боковых платформ с чугунными и железобетонными разделительными стенами / П.А. Деменков, Д.Н. Петров, В.Н. Очнев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2010 — № 2. — С. 218–224. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16758202>. — EDN OCSSKH. (дата обращения: 10.02.2023).
5. **Liu, J.** Enlarging a large-diameter shield tunnel using the Pile-Beam-Arch method to create a metro station / J. Liu, F. Wang, S. He, E. Wang, H. Zhou. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.006> // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2015. — Т 49. — С. 130–143. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0886779815000620?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2023).
6. **Zhang, M.** Performance of constructing a double-deck subway station by combining the shield method and cavern-pile method / M. Zhang, Y. Liu, L. Fan, P. Li. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.002> // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2017. — Т 67. — С. 120–131. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088677981730007X?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2023).
7. **Cao, L.** Subway station construction using combined shield and shallow tunnelling method: Case study of Gaojiayuan station in Beijing / Cao L., Fang Q., Zhang D., Chen T. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.010> // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2018. — Т 82. — С. 627–635. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088677981730826X?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2023).
8. **Петров, Д.Н.** Численное моделирование напряженного состояния в обделке колонных станций без боковых платформ / Д.Н. Петров, П.А. Деменков, Д.А. Потемкин // Записки Горного института. — 2010. — Т 185. — С. 166–170. — URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/6795>. — EDN RENSMT. (дата обращения: 10.02.2023).
9. **Шапошников, Е.А.** К вопросу применения опережающей крепи при сооружении станций метрополитена без боковых посадочных платформ / Е.А. Шапошников, Ю.С. Фролов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 17–24 апреля 2017 года. / Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. — С. 138–142. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30524805>. — EDN ZRZIJR. (дата обращения: 10.02.2023).

10. **Фролов, Ю.С.** Опережающая крепь при сооружении станций метрополитена без боковых посадочных платформ в Санкт-Петербурге / Ю.С. Фролов, Е.А. Шапошников // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2017 / Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. — С. 266–273.
11. **Безродный, К.П.** Реализация новых конструкций и технологий при строительстве Петербургского метрополитена / К.П. Безродный, М.О. Лебедев // Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения: Сборник статей / Под редакцией М.О. Лебедева Москва: Издательство "Перо", 2021. — С. 38–45. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48163161>. — EDN JXUEIV. (дата обращения: 10.02.2023).
12. **Маслак, В.А.** Малоосадочные технологии при строительстве метро в историческом центре Санкт-Петербурга / В.А. Маслак, К.П. Безродный, М.О. Лебедев [и др.] // Метро и тоннели. — 2012 — № 6. — С. 26–29. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24108308>. — EDN UHOPUD. (дата обращения: 10.02.2023).
13. **Безродный, К.П.** Практика внедрения безосадочных технологий при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена / К.П. Безродный, А.И. Салан, В.А. Маслак [и др.] // Записки Горного института. — 2012. — Т 199. — С. 190–195. — URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5843>. — EDN QLIGFX. (дата обращения: 10.02.2023).
14. **Фролов, Ю.С.** Устойчивость выработки, пройденной с опережающей крепью кровли и лба забоя в протерозойских глинах / Ю.С. Фролов, А.А. Ларионов // Метро и тоннели. — 2008 — № 2. — С. 24–26. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24289883>. — EDN ULNXUR. (дата обращения: 10.02.2023).
15. **Гарбер, В.А.** Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения / В.А. Гарбер. — Москва: НИЦ «Тоннели и метрополитены» АО «ЦНИИС», 1996. — 169 с.
16. **Фролов, Ю.С.** Системный анализ конструкции колонной станции полузакрытого способа работ / Ю.С. Фролов // Метро. — 1994. — № 2. — С. 30–34.
17. **Свитин, В.В.** Системное проектирование в подземном строительстве / В.В. Свитин // Метро. — 1994. — № 5-6. — С. 33–36.
18. **Шапошников, Е.А.** Многофакторный анализ конструктивных параметров станций метрополитена без боковых посадочных платформ / Е.А. Шапошников, Д.М. Жемчугов-Гитман, Ю.С. Фролов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: Сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 16–23 апреля 2018 года / Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. — С. 110–113. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35627935&pff=1>. — EDN UZTOII. (дата обращения: 10.02.2023).
19. **Бенин, А.В.** Планирование эксперимента / А.В. Бенин, В.В. Гарбарук. — СПб.: ПГУПС, 2010. — 89 с.
20. **Kavkazskiy, V.** Feasibility of a Pylon Station Construction from Monolithic Reinforced Concrete in the Engineering and Geological Conditions of St. Petersburg / V. Kavkazskiy, D. Olenich, A. Benin, K. Korolev. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_100 // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021 / Кам: Springer, 2022. — p. 915–924. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4_100 (дата обращения: 10.02.2023).
21. **Сокорнов, А.А.** Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов / А.А. Сокорнов, А.Н. Коньков // Путевой навигатор. — 2022 — № 50. — С. 68–75. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48202393>. — EDN FUBYIS. (дата обращения: 10.02.2023).
22. **Кавказский, В.Н.** Экспериментально-теоретическое обоснование целесообразности сооружения пилонной станции из монолитного железобетона в инженерно-геологических условиях г. Санкт-Петербург / В.Н. Кавказский, Д.М. Оленич // Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения: Сборник статей / Под редакцией М.О. Лебедева Москва: Издательство "Перо", 2021. — С. 130–143. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48163169>. — EDN YAXUQH. (дата обращения: 10.02.2023).

23. **Коньков, А.Н.** Анализ результатов математического моделирования тубинговых тоннельных обделок при использовании приведенных сечений / А.Н. Коньков, А.А. Сокольников // III Бетанкуровский международный инженерный форум: Сборник трудов, Санкт-Петербург, 02–03 декабря 2021 года. Том 1. / Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 207–209. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47931013&pff=1>. — EDN RTCSNA. (дата обращения: 10.02.2023).
24. **Konkov, A.** The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections / A. Konkov, A. Sokornov, K. Korolev. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_62 // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021 / Кам: Springer, 2021. — p. 568–576. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4_62. (дата обращения: 10.02.2023).

Сведения об авторах:

Шапошников Евгений Алексеевич — ассистент кафедры «Тоннели и метрополитены» факультета «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: jonhshap@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9467-4951>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1008683
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57216629292>

Фролов Юрий Степанович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Тоннели и метрополитены» факультета «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: fus.frolov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3240-0140>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=463095
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57194551760>

Статья получена: 21.02.2023. Принята к публикации: 10.04.2023. Опубликовано онлайн: 24.04.2023.

REFERENCES

1. Bogorodetskiy A.A., Kazantsev S.S. Stantsiya novogo tipa Leningradskogo metropolitena imeni V.I. Lenina [Station of a new type of the Leningrad Metro named after V.I. Lenin]. *Tonneli i metropoliteny* [Tunnels and subways]. 1963; (202): 8–15. (In Russ.).
2. Limanov Yu.A. Issledovaniye metodom ekvivalentnykh materialov staticheskoy raboty stantsii novogo tipa Leningradskogo metropolitena [Equivalent Materials Study of the Static Operation of a New Type Station of the Leningrad Metro]. *Tonneli i metropoliteny* [Tunnels and subways]. 1963; (202): 21–26. (In Russ.).
3. Demenkov P.A., Shubin A.A. Improvement of Design, Geomechanical Substantiation and Development of Construction Technologies for The Closed Column Station Type of The Deep-Laid Subway. *Izvestiya Tula State University*. 2016; (1): 131–139. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25829369> (accessed 10th February 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Demenkov P., Petrov D., Ochnev V. Comparative Analysis of Column Station Without Side Platforms with Cast Iron and Reinforced Concrete Separation Walls. *Izvestiya Tula State University*. 2010; (2): 218–224. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16758202> (accessed 10th February 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Liu J., Wang F., He S., Wang E., Zhou H. Enlarging a large-diameter shield tunnel using the Pile-Beam-Arch method to create a metro station. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015; 49: 130–143. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.04.006>.
6. Zhang M., Liu Y., Fan L., Li P. Performance of constructing a double-deck subway station by combining the shield method and cavern-pile method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017; 67: 120–131. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.05.002>.

7. Cao L., Fang Q., Zhang D., Chen T. Subway station construction using combined shield and shallow tunnelling method: Case study of Gaojiayuan station in Beijing. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018; 82: 627–635. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.010>.
8. Petrov D.N., Demenkov P.A., Potemkin D.A. Numerical modelling of the lining stress state of column stations without lateral platforms. *Journal of Mining Institute*. 2010; 185: 166–170. Available at: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/6795> (accessed 10th February 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Shaposhnikov E.A., Frolov Yu.S. [On the issue of using advanced support in the construction of metro stations without side boarding platforms]. In: [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXVII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, April 17–24, 2017]. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2017. p. 138–142. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30524805> (accessed 10th February 2023). (In Russ.).
10. Frolov Yu.S., Shaposhnikov E.A. Operezhayushchaya krep' pri sooruzhenii stantsiy metropoliteny bez bokovykh posadochnykh platform v Sankt-Peterburge [Leading support during the construction of metro stations without side boarding platforms in St. Petersburg]. In: Problemy prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte: Sbornik trudov X Mezhdunarodnoy konferentsii po problemam prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte, Sankt-Peterburg, 23–25 maya 2017 goda [Problems of the strength of materials and structures in transport: Proceedings of the X International Conference on the problems of the strength of materials and structures in transport, St. Petersburg, May 23–25, 2017]. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2018. p. 266–273. Available at: (accessed). (In Russ.).
11. Bezrodny K.P., Lebedev M.O. Implementation of New Structures and Technologies in The Construction of The Saint-Petersburg Metro. In: Lebedev M.O. (ed.). [Design, construction and operation of underground structures for transport purposes: Collection of articles]. Moscow: Publishing house "Pero"; 2021. p. 38–45. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48163161> (accessed 10th February 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Maslak V.A., Bezrodny K.P., Lebedev M.O. et al. [Low-draft technologies in the construction of the metro in the historical center of St. Petersburg]. *Metro and tunnels*. 2012; (6): 26–29. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24108308> (accessed 10th February 2023). (In Russ.).
13. Bezrodny K.P., Salan A.I., Maslak V.A. et al. Settlement-free technologies in the construction of the Saint Petersburg subway. *Journal of Mining Institute*. 2012; 199: 190–195. Available at: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5843> (accessed 10th February 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Frolov Yu.S. [Stability of a working, passed with a leading lining of the roof and forehead of the face in Proterozoic clays]. *Metro and tunnels*. 2008; (2): 24–26. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24289883> (accessed 10th February 2023). (In Russ.).
15. Garber V.A. Nauchnyye osnovy proyektirovaniya tunnel'nykh konstruktsiy s uchetom tekhnologii ikh sooruzheniya [Scientific basis for the design of tunnel structures, taking into account the technology of their construction]. Moscow: NITs «Tonneli i metropoliteny» AO «TsNIIS»; 1996. (In Russ.).
16. Frolov Yu.S. Sistemnyy analiz konstruktsii kolonnoy stantsii poluzakrytogo sposoba rabot [System analysis of the design of the column station of the semi-closed method of work]. *Metro [Subway]*. 1994; (2): 30–34. (In Russ.).
17. Svitin V.V. Sistemnoye proyektirovaniye v podzemnom stroitel'stve [Systems engineering in underground construction]. *Metro [Subway]*. 1994; (5-6): 33–36. (In Russ.).
18. Shaposhnikov E.A., Zhemchugov-Gitman D.M., Frolov Yu.S. [Multivariate Analysis of Design Parameters of Metro Stations Without Side Boarding Platforms]. In: [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, April 16–23, 2018]. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2018. p. 110–113. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35627935&pff=1> (accessed 10th February 2023). (In Russ.).
19. Benin A.V., Garbaruk V.V. Planirovaniye eksperimenta [Experiment planning]. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2010. (In Russ.).

20. Kavkazskiy, V., Olenich, D., Benin, A., Korolev, K. Feasibility of a Pylon Station Construction from Monolithic Reinforced Concrete in the Engineering and Geological Conditions of St. Petersburg. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021*. Cham: Springer; 2022. p. 915–924. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4_100 (accessed 10th February 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_100.
21. Sokornov A.A., Kon'kov A.N. [Simulation of deep tunneling in the finite element method]. *Putevoi Navigator*. 2022; (50): 68–75. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48202393> (accessed 10th February 2023). (In Russ.).
22. Kavkazsky V.N., Olenich D.M. Experimental and Theoretical Substantiation of The Feasibility of Building a Pylon Station from Monolithic Reinforced Concrete in The Engineering and Geological Conditions of St. Petersburg. In: Lebedev M.O. (ed.). [*Design, construction and operation of underground structures for transport purposes: Collection of articles*]. Moscow: Publishing house "Pero"; 2021. p. 130–143. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48163169> (accessed 10th February 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
23. Kon'kov A.N., Sokornov A.A. [Analysis of the results of mathematical modeling of tubing tunnel linings using reduced sections]. In: [*III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings, St. Petersburg, December 02–03, 2021. Volume 1*]. Saint Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2021. p. 207–209. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47931013&pff=1> (accessed 10th February 2023). (In Russ.).
24. Konkov, A., Sokornov, A., Korolev, K. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021*. Cham: Springer; 2021. p. 568–576. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4_62 (accessed 10th February 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_62.

Information about the authors:

Evgenii A. Shaposhnikov — Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: jonhshap@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9467-4951>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1008683
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57216629292>

Yuri S. Frolov — Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: fus.frolov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3240-0140>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=463095
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57194551760>

Submitted: 21st February 2023. Revised: 10th April 2023. Published online: 24th April 2023.