

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

2025, Том 12, № 3 / 2025, Vol. 12, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS325.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS325 (<https://doi.org/10.15862/01SATS325>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 624.048

## Напряженно-деформированное состояние опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала в двухпутном перегонном тоннеле метрополитена

Сокорнов А.А., Коньков А.Н., Ледяев А.П.

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

Автор, ответственный за переписку: Сокорнов Антон Александрович, e-mail: [scarlunch@mail.ru](mailto:scarlunch@mail.ru)

**Аннотация.** Двухпутные тоннели метрополитена, пройденные туннелепроходческим комплексом большого диаметра в толще разнородных четвертичных отложений, являются актуальной темой для научных исследований как с точки зрения вопросов проектирования, так и эксплуатации. Одним из их конструктивных отличий от однопутных перегонных тоннелей метрополитена является наличие вентиляционного канала, отделенного от путевой части тоннеля монолитным железобетонным перекрытием по стальным балкам. При этом вопрос статической работы внутренних конструкций недостаточно освещается в научной литературе. Целью исследования являлась оценка напряженно-деформированного состояния опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала в двухпутном перегонном тоннеле метрополитена на участке Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена. Авторами была построена математическая объемная модель системы «грунтовый массив — тоннельная обделка — жесткое основание — перекрытие вентиляционного канала». Моделирование выполнялось методом конечных элементов с

возможностью задания отдельных этапов проходки тоннеля и монтажа внутренних конструкций. В результате исследования были разработаны критерии оценки работоспособности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала, была выполнена оценка влияния напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на напряженно-деформированное состояние опорных частей плиты перекрытия. Также была выполнена оценка работоспособности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала в случае выхода из строя отдельных опорных частей, а также при увеличении полезной нагрузки. Построенная модель может применяться при разработке технологических регламентов на ремонтные работы в пространстве вентиляционного канала ввиду возможности моделирования практически любого сценария.

**Ключевые слова:** тоннель; обделка; туннелепроходческий механизированный комплекс; метод конечных элементов; математическое моделирование; вентиляционный канал; напряженно-деформированное состояние

## Stress-strain state of the support parts of the ventilation duct slab in a double-track running tunnel of a metro

Anton A. Sokornov, Alexandr N. Konkov, Alexandr P. Ledyayev

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

Corresponding author: Anton A. Sokornov, e-mail: [scarlunch@mail.ru](mailto:scarlunch@mail.ru)

**Abstract.** Double-track metro tunnels constructed by a large-diameter tunnel boring complex in heterogeneous quaternary deposits are a relevant topic for scientific research from both the design and operation perspectives. One of their structural differences from single-track running metro tunnels is the presence of a ventilation duct, separated from the track section of the tunnel by a monolithic reinforced concrete slab supported on steel beams. However, the static behavior of internal structures is not sufficiently covered in the scientific literature. The aim of the research was to assess the stress-strain state of the support parts of the ventilation duct slab in a double-track running tunnel of the metro on a section of the Nevsko-Vasileostrovskaya Line of the Saint Petersburg Metro. The authors built a mathematical three-dimensional model of the «soil massif — tunnel lining — rigid base — ventilation duct slab» system. The modeling was performed using the finite element method with the

capability to set individual stages of tunnel driving and installation of internal structures. As a result of the research, criteria for assessing the serviceability of the support parts of the ventilation duct slab were developed, and the influence of the stress-strain state of the tunnel lining on the stress-strain state of the support parts of the slab was evaluated. An assessment of the serviceability of the support parts of the ventilation duct slab was also performed in case of failure of individual support parts, as well as with an increase in the live load. The constructed model can be applied in the development of technological regulations for repair work in the ventilation duct space due to its ability to simulate virtually any scenario.

**Keywords:** tunnel; lining; tunnel boring machine; finite element method; mathematical modeling; ventilation duct; stress-strain state

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

Двухпутные тоннели метрополитена, пройденные туннелепроходческим комплексом большого диаметра в толще разнородных четвертичных отложений, являются актуальной темой для научных исследований как с точки зрения вопросов проектирования, так и эксплуатации [1; 2]. Одним из их конструктивных отличий от однопутных перегонных тоннелей метрополитена является наличие вентиляционного канала, отделенного от путевой части тоннеля монолитным железобетонным перекрытием по стальным балкам. За последнее десятилетие именно это отличие определило целое направление научных исследований, посвященное вопросам вентиляции, термодинамики и пожарной безопасности [3–9]. При этом вопрос статической работы внутренних конструкций не освещается в научной литературе.

Балки перекрытия крепятся к обделке тоннеля через закладные детали в центральной части на трех подвесах (тяжах), а по торцам на — подвесах либо на опорных столиках. В условиях обеспечения работоспособного состояния тоннельной обделки в первом приближении можно рассматривать перекрытие и его опорные части обособленно от обделки. В то же время перекрытие, закрепленное на блоках обделки, в случае её деформации будет воспринимать новое напряженно-деформированное состояние, являясь компонентом сложной иерархической системы «грунтовой массив — тоннельная обделка — жесткое основание — перекрытие вентиляционного канала». Таким образом, актуальной задачей является математическое моделирование всей этой системы в объемной постановке для возможности детального анализа работы внутренних конструкций, а также для возможности «проигрывания» неблагоприятных сценариев выхода из строя отдельных опорных частей плиты перекрытия.

Целью настоящего исследования являлась оценка напряженно-деформированного состояния опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала в двухпутном перегонном тоннеле метрополитена на участке Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена. Для осуществления цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить построение объемной модели системы «грунтовой массив — тоннельная обделка — жесткое основание — перекрытие вентиляционного канала».
2. Разработать критерии оценки работоспособности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала.
3. Оценить влияние напряженно деформированного состояния тоннельной обделки на напряженно деформированное состояние опорных частей плиты перекрытия.

4. Выполнить оценку работоспособности плиты перекрытия вентиляционного канала в случае выхода из строя отдельных опорных частей и увеличении полезной нагрузки.

## Материалы и методы

### Materials and Methods

Двухпутный участок перегонного тоннеля метрополитена выполнен с применением высокоточной сборной железобетонной водонепроницаемой обделки наружным диаметром 10 300 мм, с толщиной блока 450 мм. Ширина кольца обделки изменяется от 1 760 до 1 840 мм для возможности поворота трассы тоннеля, как в профиле, так и в плане.

При моделировании ширина кольца принималась равной среднему значению — 1 800 мм. Кольцо обделки состоит из 7 блоков сплошного сечения: четырех нормальных, двух смежных и одного замкового.

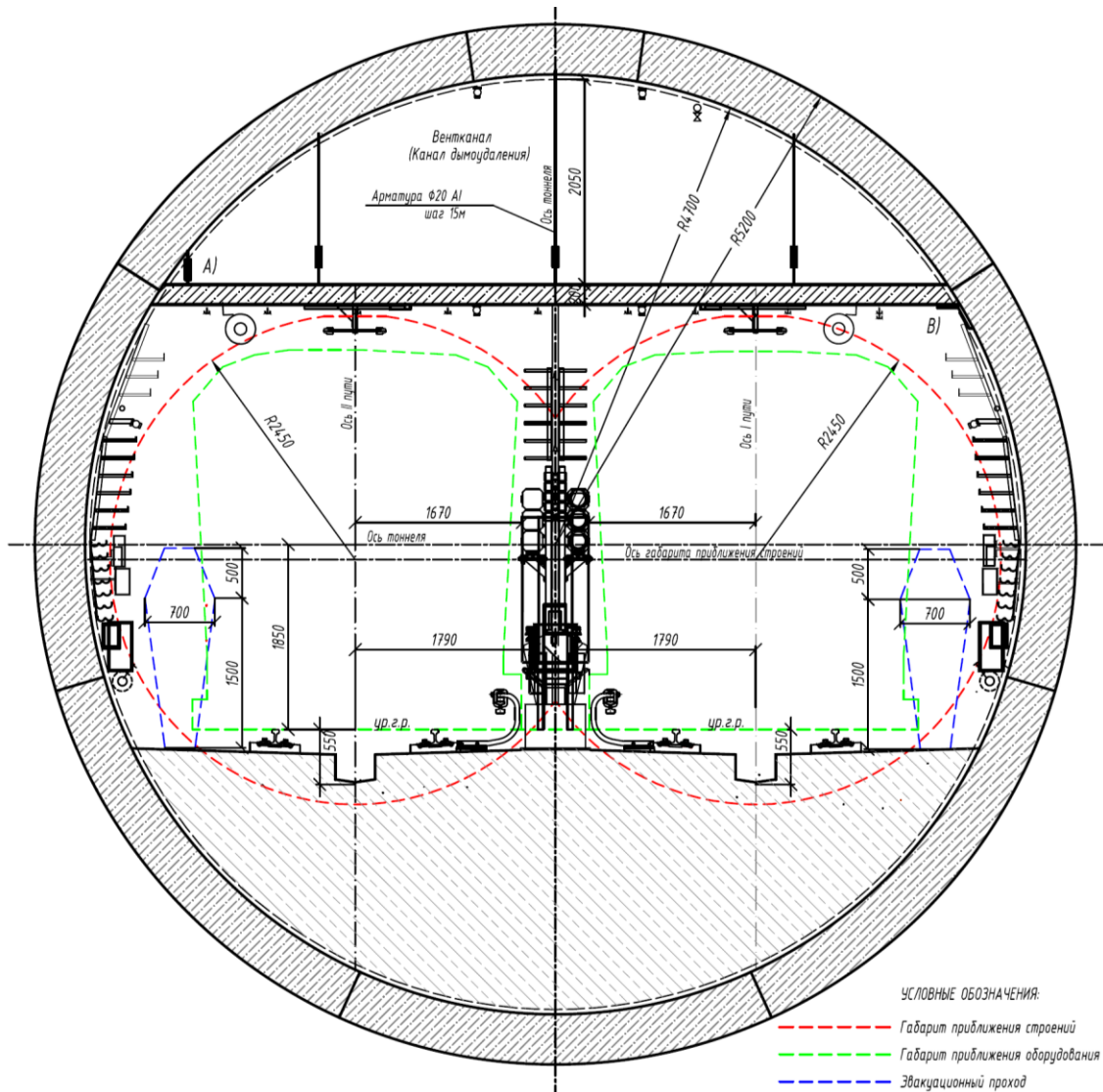
Водонепроницаемость обделки обеспечивается гидроизолирующими уплотнительными прокладками в стыках, обжимаемых при монтаже обделки и находящихся в упругосжатом состоянии в течение всего периода эксплуатации обделки.

Внутреннее пространство тоннеля разделено на два яруса — зону движения поездов и вентиляционный канал — монолитным железобетонным перекрытием толщиной 200 мм по металлическим балкам.

Балки крепятся к обделке тоннеля через закладные детали в центральной части на трех подвесах, а по краям — на подвесах либо на опорных столиках (рис. 1 А, В) соответственно). Нижняя четверть тоннеля заполнена путевым бетоном жесткого основания.

Математическое моделирование проводилось в программном комплексе *Midas GTS NX*. Данный комплекс широко распространен в научной среде и применяется в расчетах сложных систем таких как «фундамент — грунт» или «обделка — грунт», причем результаты математического моделирования в ряде исследований имели высокую сходимость с натурой [10–15].

Физико-механические свойства строительных конструкций были описаны линейно-деформируемой моделью. Модуль упругости обделки был принят как для бетона класса В40, то есть  $E = 36\,000$  МПа, а жесткого основания и плиты перекрытия — как для бетона класса В30, то есть  $E = 32\,500$  МПа. Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ , объемный вес железобетона  $\gamma = 24,5$  кН/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 1.** Поперечное сечение перегонного тоннеля Невско-Василеостровской линии: (А) крепление на подвесе; (В) крепление на опорном столике (составлено автором)

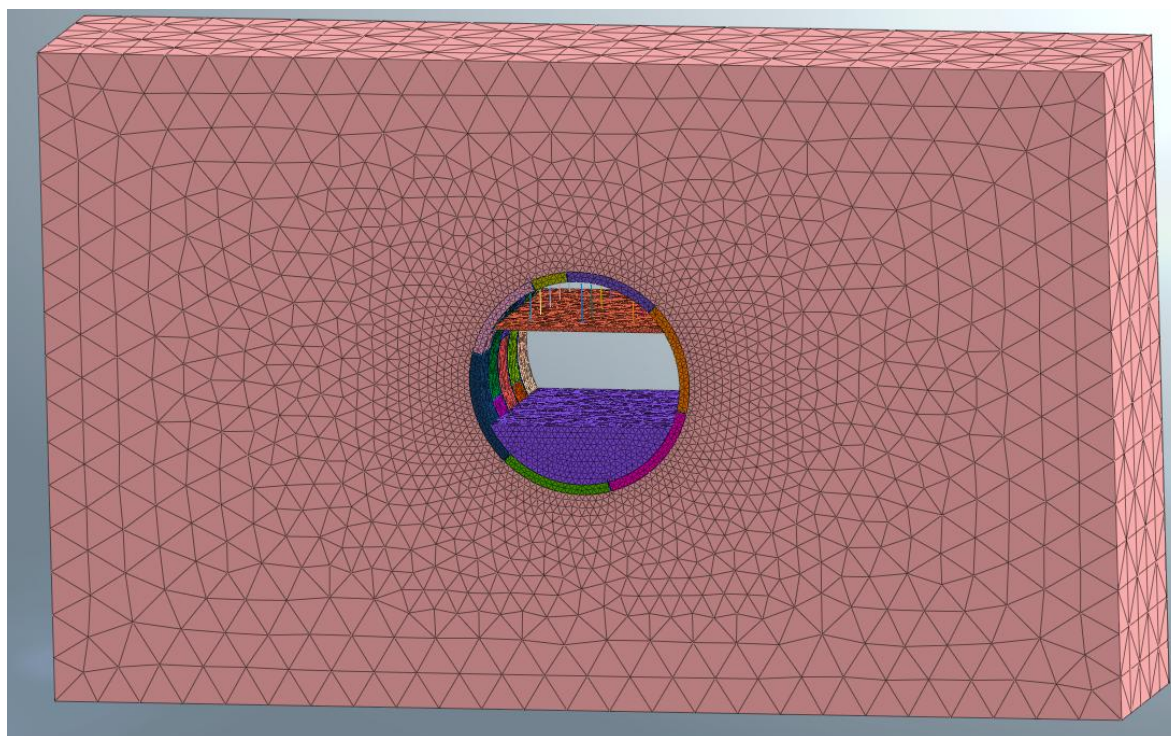
**Figure 1.** Cross-section of the running tunnel of the Nevsko-Vasileostrovskaya Line: (A) attachment on a hanger; (B) attachment on a support bracket (compiled by the author)

В качестве инженерно-геологических условий были выбраны суглинки, наиболее характерные для четвертичных отложений Санкт-Петербурга. Свойства грунта были описаны моделью Мора-Кулона, физико-механические характеристики приняты следующими:

- модуль деформации  $E = 7 \text{ МПа}$ ;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0,37$ ;
- объемный вес  $\gamma = 19 \text{ кН/м}^3$ ;
- сцепление  $C = 14 \text{ кПа}$ ;
- угол внутреннего трения  $\phi = 15^\circ$ .

Рассматриваемая область грунтового массива должна быть достаточна, чтобы перекрыть зону влияния тоннельной выработки и, тем самым, исключить влияние границ области на величину рассчитываемых деформаций и напряжений в конструкции. Таким образом, граница влияния тоннельной выработки принята на расстоянии двух диаметров от края конструкции по ширине и одного по глубине. Глубина заложения обделки принята средней для трассы линии мелкого заложения метрополитена, то есть 10 м. Толщина модели принята равной пяти кольцам обделки, то есть  $1,8 \times 5 = 9$  м. Таким образом, размеры модели составили  $50 \times 30 \times 9$  м.

Грунтовой массив и расположенная в нем конструкция разбита на сеть объемных конечных элементов, соединенных собой в узлах. Разбивка на конечные элементы массива выполнена со сгущением сетки вблизи конструкции. Всего в модели 27 249 узлов и 146 647 конечных элементов (рис. 2).



*Рисунок 2. Общий вид модели грунтового массива и тоннеля с внутренними конструкциями (составлено автором)*

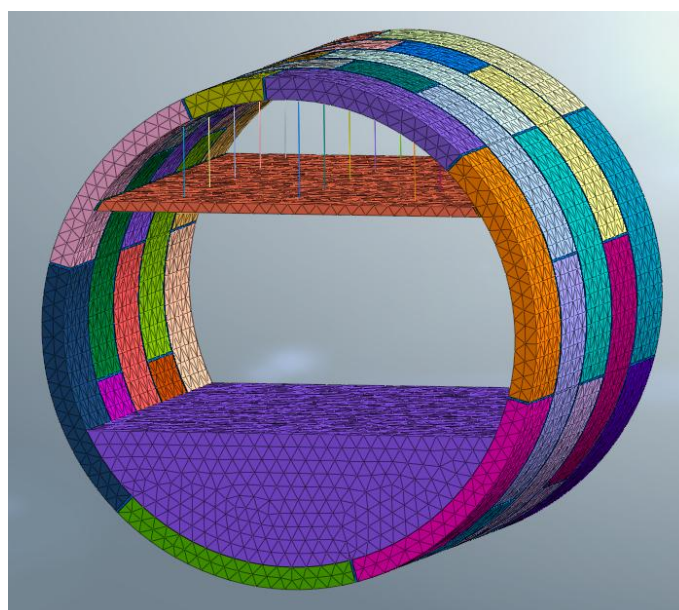
*Figure 2. General view of the soil massif and tunnel model with internal structures (compiled by the author)*

На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений.

В случае обеспечения исправной работы стыков, сборная тоннельная обделка работает практически как монолитное кольцо. В то же время при

некачественном монтаже обделки возможно возникновение раскрытия стыков, что можно отразить в модели, установив в стыки обделки прокладки толщиной 50 мм из сверхдеформативного материала между конечными элементами блоков. Сверхдеформативный материал имеет те же характеристики, что и конечные элементы блоков, за исключением модуля упругости, принятого равным 1 000 кПа. Следует отметить, что вопрос назначения характеристик материала прокладок в стыках на данный момент остается открытым. Авторами предлагается подобные размеры прокладок и значение модуля упругости, исходя из сравнительного анализа результатов деформированной схемы обделки (её эллиптичности) с натурными результатами геодезических измерений, выполненных ФГБОУ ВО ПГУПС в период с 2018 по 2023 гг. в рамках работ по эксплуатационному контролю перегонных тоннелей двухпутного участка Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена.

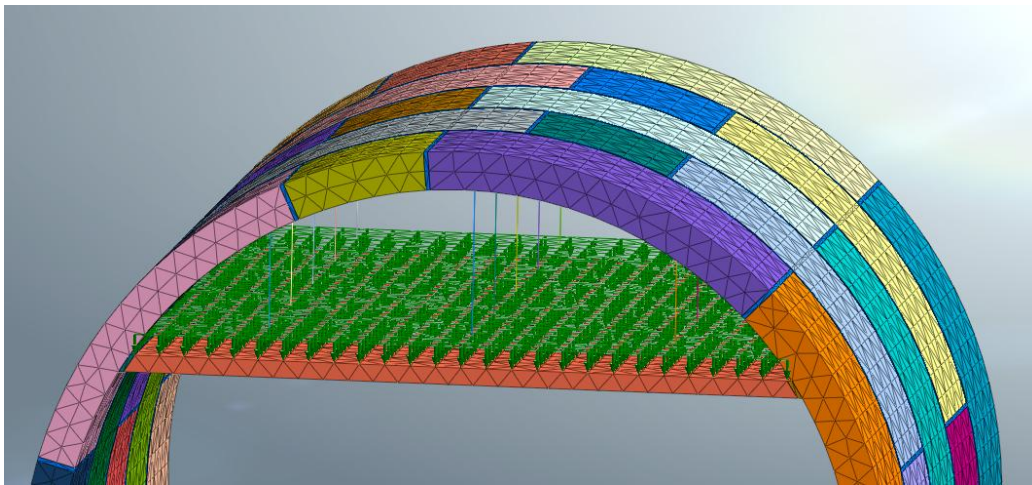
Плита перекрытия вентиляционного канала моделировалась закрепленной на тязях, которые задавались в программном комплексе стержневыми элементами *Truss*, работающими на растяжение (рис. 3). Всего было создано три ряда по пять тяжей в каждом. Характеристики материала были приняты как для стали Ст3, диаметр стержней — 24 мм. По краям плиты перекрытия установлены промежуточные конечные элементы, моделирующие наличие опорных столиков или крайних рядов тяжей. На начальном этапе моделирования было принято решение задать их характеристики как для бетона класса В30, отражая тем самым жесткое сопряжение плиты краев плиты перекрытия с обделкой.



*Рисунок 3. Общий вид модели обделки тоннеля с жестким основанием и плитой перекрытия (составлено автором)*

*Figure 3. General view of the tunnel lining model with a rigid base and the slab (compiled by the author)*

По поверхности плиты прикладывалась равномерно распределенная нагрузка в соответствии с СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия», равная 0,91 кПа (91 кг/м<sup>2</sup>) (рис. 4).



*Рисунок 4. Загрузка плиты перекрытия вентканала (составлено автором)*

*Figure 4. Loading of the ventilation duct slab (compiled by the author)*

Узлы крепления тяжей в модели задавались шарнирными, моделирующими работу болтового соединения (рис. 5).



*Рисунок 5. Узел крепления тяжа к обделке тоннеля и его схема (фото автора, составлено автором)*

*Figure 5. Node of the tie rod attachment to the tunnel lining and its diagram (author's photo, compiled by the author)*

На рисунке 5 также показана схема, из которой следует, что крепежный болт работает в узле крепления на срез. Поскольку диаметр крепежного болта меньше диаметра тяжа (20 мм и 24 мм соответственно), а прочность болта на срез примерно в пять раз меньше прочности стали на растяжение, то при расчетах несущей способности тяжей в качестве прочностного критерия принималась прочность болта на срез в узле крепления тяжа к обделке.

При двух площадках среза несущую способность болта можно рассчитать, исходя из следующего критерия прочности:

$$\frac{\pi d^2}{4} \tau_{cp} \geq \frac{N}{2},$$

где:

$d$  — диаметр болта, в нашем случае 0,02 м;

$\tau_{cp}$  — предельное сопротивление болта при срезе, для стали марки Ст3 равно 75 МПа.

Тогда предельно допустимое нормальное усилие в тяже  $N$  равно:

$$N = \frac{\pi d^2}{2} \tau_{cp} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{2} \cdot 75\,000 = 47 \text{ кН}$$

По краям плита перекрытия шарнирно подвешивается к обделке через закладные детали аналогично тяжам либо опирается на опорный столик (рис. 6).



*Рисунок 6. Общий вид закрепления плиты по краю с помощью подвеса; общий вид опорного столика (фото автора)*

*Figure 6. General view of the slab attachment along the edge using a hanger; general view of the support bracket (author's photo)*

Опорный столик закрепляется в теле бетона на два анкерных болта диаметром 16 мм. Поскольку плоскость крепления столика находится под углом, то существует три возможные формы потери устойчивости соединения:

- вырывание распорных замков болтов из тела бетона;
- срыв резьбовых соединений болтов;
- срез болтов (по двум плоскостям среза).

По результатам опыта эксплуатации участка двухпутного тоннеля Фрунзенского радиуса было установлено, что в подавляющем случае отрыв столиков происходил в результате среза болтов. Тогда несущую способность опорного столика при закреплении на двух болтах (две площадки среза) можно рассчитать из следующего критерия прочности:

$$\frac{\pi d^2}{4} \tau_{cp} \geq \frac{N}{2},$$

где:

$d$  — диаметр болта, в нашем случае 0,016 м;

$\tau_{cp}$  — предельное сопротивление болта при срезе, для стали марки Ст3 равно 75 МПа.

Тогда предельно допустимое нормальное усилие по площадкам среза  $N$  равно:

$$N = \frac{\pi d^2}{2} \tau_{cp} = \frac{3,14 \cdot 0,016^2}{2} \cdot 75\,000 = 30 \text{ кН}.$$

В результате построенная объемная конечно-элементная модель позволяет выполнять расчет системы «грунтовый массив — тоннельная обделка — жесткое основание — перекрытие вентиляционного канала» по следующим этапам.

**На первом этапе** создается начальное напряженное состояние грунтового массива до проходки тоннеля. На этом этапе все группы конечных элементов имеют свойства грунта. В конце этапа расчета полученные перемещения (исторические перемещения) обнуляются.

**На втором этапе** выполняется монтаж колец обделки. На этом этапе конечные элементы грунта внутри тоннеля, а также внутренних конструкций деактивируются, а группам конечных элементов блоков и жесткого основания присваиваются характеристики бетона. Следует отметить то, что поскольку технологическая схема проходки тоннеля с помощью тоннелепроходческого механизированного комплекса предусматривает заливку путевого бетона в первые сутки проходки, то жесткое основание включается в работу совместно с обделкой.

**На третьем этапе** моделируется устройство плиты перекрытия вентиляционного канала на тяжах путем активации соответствующих групп и свойств конечных элементов. Также на плиту перекрытия прикладывается равномерно распределенная полезная нагрузка.

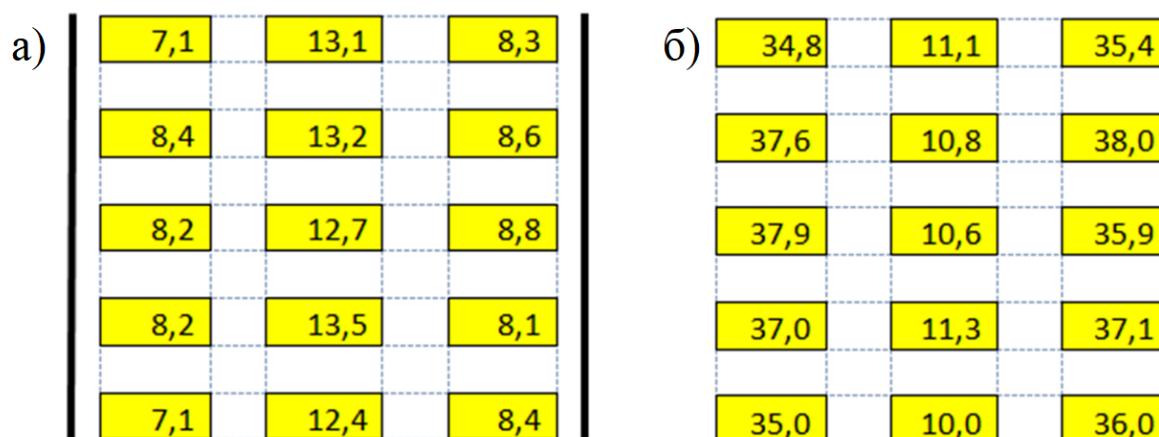
**На четвертом и пятом этапах** выполняется моделирование неблагоприятного сценария — выхода из работоспособного состояния какого-либо тяжа или опорных столиков, или и того и другого.

## Оценка несущей способности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала в случае её жесткого примыкания к обделке

### Assessment of the load-bearing capacity of the support parts of the ventilation duct slab in case of its rigid connection to the lining

Как уже было сказано ранее, первый вариант модели предполагал жесткое закрепление краев плиты перекрытия к обделке. В этом случае часть полезной нагрузки плиты перекрытия передается напрямую на стены обделки.

Результаты **третьего этапа расчета** усилий в тязях показаны на рисунке 7, а. На рисунке желтыми ячейками схематически изображены тязи, а числами в них — значения растягивающих усилий в тязях. Из результатов расчета следует, что усилия в центральном ряду тязей составляют в среднем 13 кН, в краевых — 8 кН. Разброс значений в ряду можно связать с неравномерными деформациями самих блоков в составе сборной обделки.

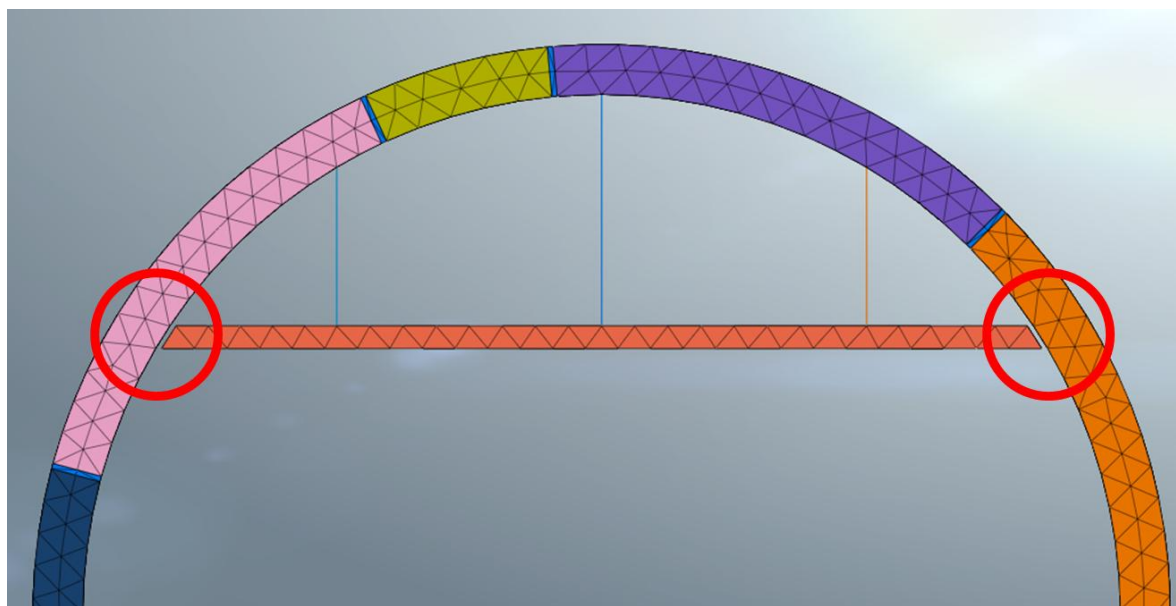


**Рисунок 7.** Значения усилий в тязях плиты перекрытия вентканала, кН: (а) при наличии опорных столиков (показаны черными линиями); (б) в случае отрыва опорных столиков (составлено автором)

**Figure 7.** Values of forces in the tie rods of the ventilation duct slab, kN: (a) in the presence of support brackets (shown by black lines); (b) in case of detachment of the support brackets (compiled by the author)

Далее на **четвертом этапе** расчета моделировалась возможный сценарий отрыва всех опорных столиков путем отключения краевых конечных элементов плиты перекрытия (рис. 8). Такой сценарий теоретически возможен, поскольку несущая способность опорного столика ниже, чем у тязя.

В этом случае происходит перераспределение усилий в тязях. Так значения усилий в краевых тязях возрастают до 35–38 кН, что, тем не менее, не превышает предельного значения в 47 кН (рис. 7 б).



*Рисунок 8. Отрыв опорных столиков (составлено автором)*

*Figure 8. Detachment of the support brackets (compiled by the author)*

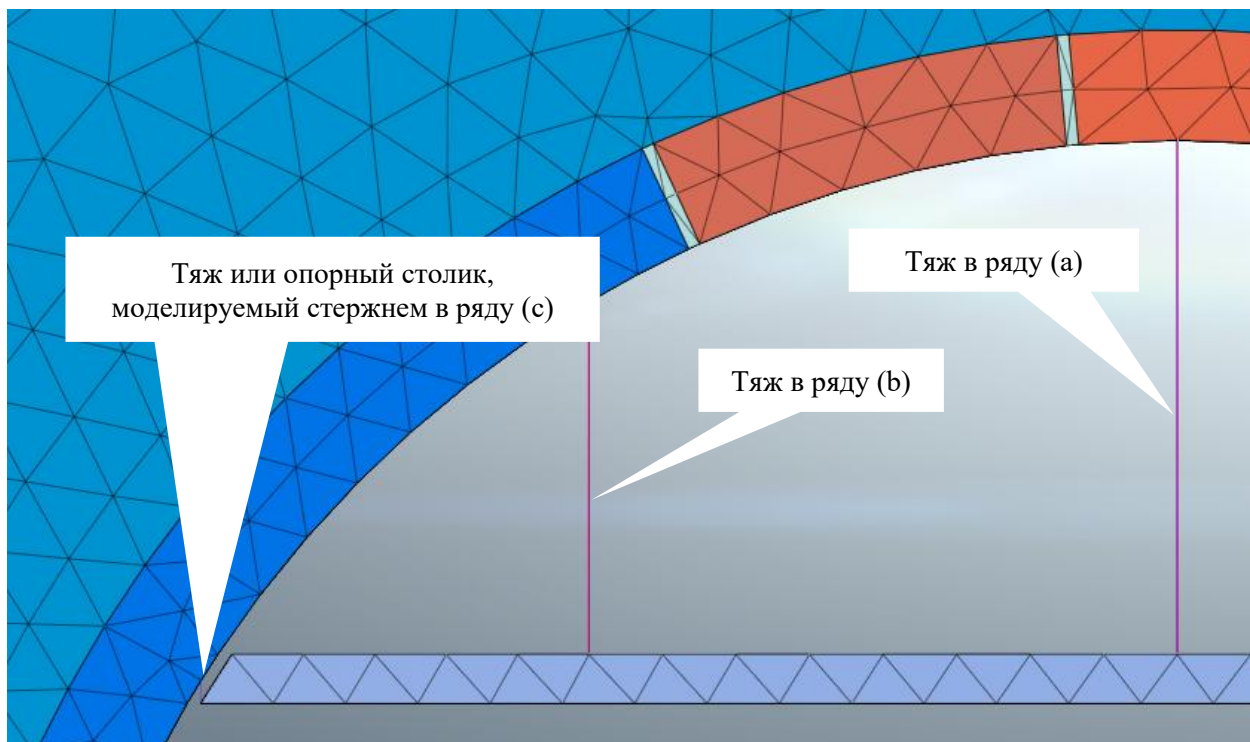
## **Оценка несущей способности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала в случае её шарнирного примыкания к обделке**

### **Assessment of the load-bearing capacity of the support parts of the ventilation duct slab in case of its hinged connection to the lining**

Главный недостаток первого варианта расчетной схемы — жесткое примыкание плиты перекрытия вентиляционного канала к обделке. В реальности в силу геометрии конструкции в этом узле допускается свободный отрыв плиты перекрытия при утрате связей. В этом случае изгибающий момент плиты перекрытия не передается обделке.

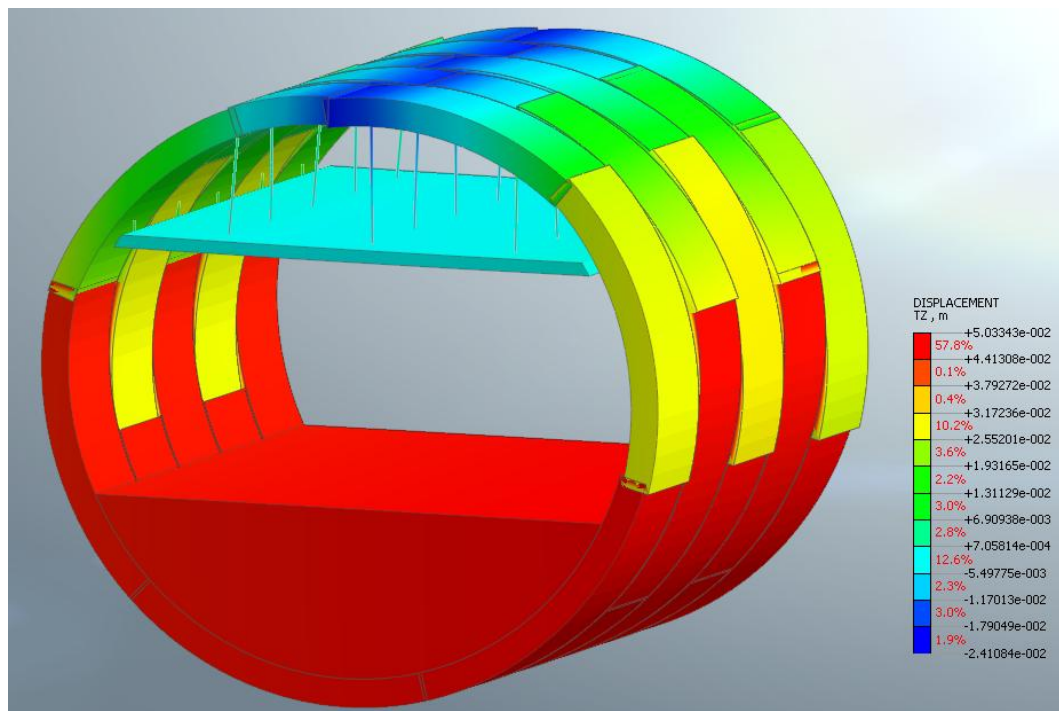
Во втором варианте математической модели крепление края плиты перекрытия вентиляционного канала было задано стержнями, предельное усилие в которых может сравниваться с предельно допустимым усилием на срез для тяжа или для опорного столика (рис. 9). Также для удобства последующего анализа результатов рядом тяжей были присвоены индексы (a), (b) и (c).

Такое изменение расчетной схемы модели позволило оценить влияние на напряженно-деформированное состояние опорных частей перекрытия вентиляционного канала так называемого «клавишного эффекта» тоннельной обделки, когда кольца деформируются друг относительно друга в разных направлениях. При этом жесткое основание препятствует развитию неравномерных деформаций в нижней половине обделки, что не устраняет «клавишный эффект» в сводовой части (рис. 10).



**Рисунок 9.** Моделирование шарнирного примыкания плиты перекрытия к обделке (составлено автором)

**Figure 9.** Modeling of the hinged connection of the slab to the lining (compiled by the author)



**Рисунок 10.** Деформированная схема тоннеля (значения деформаций увеличены в 10 раз) (составлено автором)

**Figure 10.** Deformed scheme of the tunnel (deformation values are increased by 10 times) (compiled by the author)

Было установлено, что **на третьем этапе расчета** именно краевые узлы крепления плиты перекрытия сильнее всего реагируют на «клавишный эффект» тоннельной обделки. На рисунке 11 показано, что в ряду (а) усилия в тязях не превышают 14,5 кН, что в целом совпадает с расчетами модели с жестким сопряжением плиты перекрытия и обделки (рис. 7 а). Но при этом остальные усилия сильно отличается: в ряду тяжей (b) усилия составляют 18–24 кН, а в ряду (с) — от нуля до 31 кН, причем минимальные и максимальные значения расположены в шахматном порядке по сторонам тоннеля, в чем и наблюдается влияние «клавишного эффекта».

В случае крепления края плиты перекрытия на подвес, в нем не возникает предельно допустимого усилия. Но в случае крепления перекрытия на опорный столик — возможен его отрыв, что показано на рисунке 11 красным цветом. Это частично объясняет реально зафиксированные случаи отрыва опорных столиков в двухпутном перегонном тоннеле Фрунзенского радиуса в первые годы эксплуатации.

с)	б)	а)	б)	с)
4,8	21,7	13,3	18,9	20,1
31,0	18,6	13,7	23,9	0,0
0,0	22,2	14,2	19,1	29,5
31,8	19,4	14,5	24,2	0,0
4,2	20,9	13,2	18,1	21,3

**Рисунок 11.** Значения усилий в тязях плиты перекрытия вентканала при «податливых» стыках обделки (составлено автором)

**Figure 11.** Values of forces in the tie rods of the ventilation duct slab with «compliant» lining joints (compiled by the author)

с)	б)	а)	б)	с)
9,9	20,2	22,6	20,6	9,9
10,4	20,3	22,7	20,6	9,8
10,0	20,4	22,8	20,7	10,3
10,6	20,3	22,7	20,7	9,9
9,7	20,2	22,7	20,6	9,9

**Рисунок 12.** Значения усилий в тязях плиты перекрытия вентканала при «жестких» стыках обделки (составлено автором)

**Figure 12.** Values of forces in the tie rods of the ventilation duct slab with «rigid» lining joints (compiled by the author)

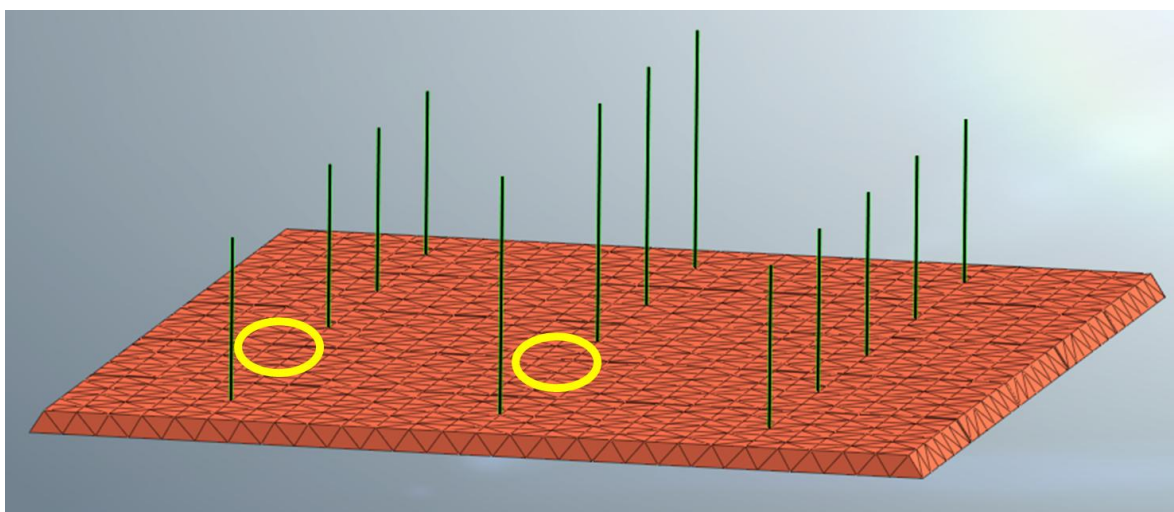
При увеличении модуля упругости прокладок, моделирующих стыки сборной обделки, на два порядка, то есть при рассмотрении случая исправной работы «жестких» стыков обделки, усилия в ряду тяжей (а) не превышают 22,8 кН, в тяжах (b) — около 20 кН, а в крайевых тяжах (с) — около 10 кН (рис. 12).

## Оценка несущей способности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала при отрыве столиков и демонтаже отдельных тяжей

**Assessment of the load-bearing capacity of the support parts of the ventilation duct slab upon detachment of the brackets and dismantling of individual tie rods**

Если отрыв опорных столиков возможен в силу их меньшей несущей способности по сравнению с несущей способностью тяжей, то выход из строя какого-либо центрального тяжа наиболее вероятен в случае его целенаправленного демонтажа, например, в процессе ремонтных работ.

В этом случае **на пятом этапе** расчета выполнялась оценка напряженного состояния тяжей при возможном демонтаже какого-либо тяжа при условии отрыва всех опорных столиков (рис. 13).



*Рисунок 13. Расчетный случай демонтажа двух тяжей — в крайевом и центральном ряду (составлено автором)*

*Figure 13. Design case of dismantling two tie rods — in the edge and central rows (compiled by the author)*

Было установлено, что демонтаж всего лишь одного тяжа в крайевом ряду вызывает перераспределение усилий в соседних тяжах и выход из строя ближайших крайевых тяжей (рис. 14), что в свою очередь приведет к непредсказуемому обрушению всего перекрытия.

39,9	11,4	34,3
49,8	12,3	37,6
	13,3	35,6
49,4	12,7	36,7
40,0	10,4	34,9

**Рисунок 14.** Значения усилий в тяжах плиты перекрытия вентканала при демонтаже одного краевого тяжа (показано черным цветом) (составлено автором)

**Figure 14.** Values of forces in the tie rods of the ventilation duct slab upon dismantling one edge tie rod (shown in black) (compiled by the author)

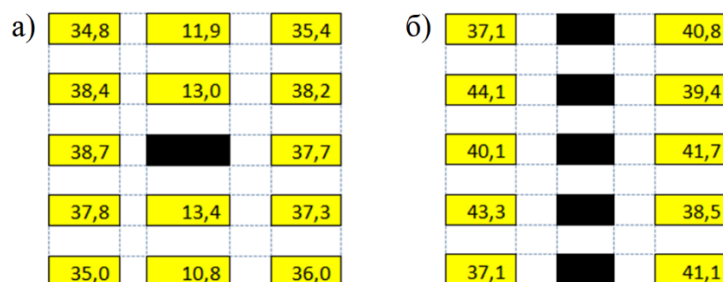
Здесь стоит уточнить, что в реальности обрушению плиты перекрытия будут препятствовать установленные в транспортной зоне тоннеля стальные стойки каркаса под кабельное хозяйство, которые не были учтены в настоящей модели (рис. 15).



**Рисунок 15.** Ряд стальных колонн в транспортной зоне тоннеля (фото автора)

**Figure 15.** A row of steel columns in the transport zone of the tunnel (author's photo)

Также было установлено, что при демонтаже одного или даже всех центральных тяжей выхода из строя соседних с ними тяжей не наблюдается (рис. 16).



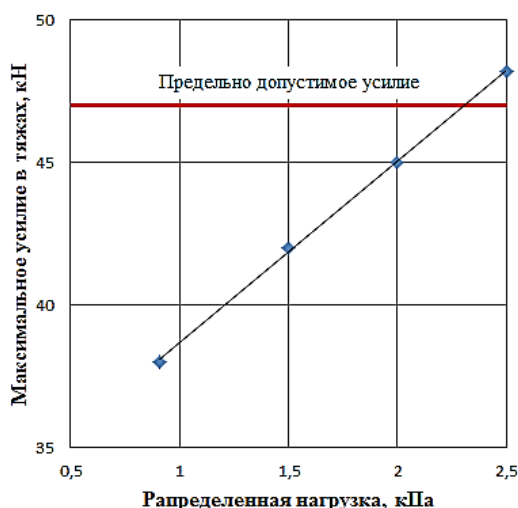
**Рисунок 16.** Значения усилий в тяжах плиты перекрытия вентканала: (а) при демонтаже одного центрального тяжа; (б) при демонтаже всех центральных тяжей (составлено автором)

**Figure 16.** Values of forces in the tie rods of the ventilation duct slab: (a) upon dismantling one central tie rod; (b) upon dismantling all central tie rods (compiled by the author)

## Оценка несущей способности опорных частей плиты перекрытия вентиляционного канала при превышении полезной нагрузки

### Assessment of the load-bearing capacity of the support parts of the ventilation duct slab when the live load is exceeded

При ремонтных работах в пространстве вентиляционного канала может потребоваться необходимость в увеличении полезной нагрузки на плиту перекрытия. **На четвертом этапе** расчета была выполнена оценка максимальных усилий в тяжах при увеличении равномерно распределенной нагрузки и отсутствии опорных столиков.



**Рисунок 17.** Значения усилий в тяжах плиты перекрытия при увеличении равномерно распределенной нагрузки (составлено автором)

**Figure 17.** Values of forces in the tie rods of the slab with an increase in the uniformly distributed load (compiled by the author)

Было установлено, что при более чем двукратном увеличении нагрузки (до значения 2 кПа или 200 кг/м<sup>2</sup>) предельно допустимые усилия на срез в узле крепления тяжей не возникают (рис. 17).

Разумеется, эти результаты дают лишь качественное представление о запасе по прочности опорных частей перекрытия вентиляционного канала. Более детально выполнить оценку напряженно-деформированного состояния опорных частей перекрытия можно только при конкретной схеме организации ремонтных работ со всеми имеющимися весами оборудования и их расположению на плите. Вместе с тем, построенная модель может применяться при разработке технологических регламентов на ремонт в виду возможности моделирования практически любого сценария.

## Заключение

### Conclusion

1. В случае жесткого примыкания плиты перекрытия вентиляционного канала к тоннельной обделке, тяжи воспринимают усилия более чем с трехкратным запасом по прочности. Наиболее слабое место — узел крепления тяжей к закладным деталям блоков обделки и балок перекрытия.

2. В случае отрыва опорных столиков значения усилий в краевых тяжах значительно возрастают, но не превышают предельного значения.

3. В случае шарнирного примыкания плиты перекрытия вентиляционного канала к тоннельной обделке большое значение на напряженно-деформированное состояние опорных частей начинает оказывать так называемый «клавишный эффект» обделки, когда кольца деформируются друг относительно друга в разных направлениях при недостаточно качественном монтаже блоков.

4. В случае исправной работы стыков обделки, при шарнирном примыкании плиты перекрытия опорные столики воспринимают усилия с двукратным запасом.

5. Наиболее неблагоприятным является случай выхода из строя одного из краевого тяжей при полном отрыве опорных столиков. Такой сценарий наиболее вероятен в случае целенаправленного демонтажа тяжа в процессе ремонтных работ. Установлено, что демонтаж всего лишь одного тяжа в краевом ряду вызывает перераспределение усилий в соседних тяжах и выход из строя ближайших краевых тяжей, что в свою очередь приведет к непредсказуемому обрушению всего перекрытия. При этом при демонтаже одного или даже всех центральных тяжей выхода из строя соседних с ними тяжей не наблюдается.

6. Установлено, что даже при отрыве опорных столиков при более чем двукратном увеличении нагрузки предельно допустимые усилия на срез в узлах крепления тяжей не возникают.

7. Построенная модель может применяться при разработке технологических регламентов на ремонтные работы в пространстве вентиляционного канала ввиду возможности моделирования практически любого сценария.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Александров, Н.В.** Итоги сооружения двухпутного тоннеля Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена / Н.В. Александров, А.Ю. Старков // Метро и тоннели. — 2017. — № 5-6. — С. 8–10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32278395> EDN: [YLSNYO](https://elibrary.ru/item.asp?id=32278395) (дата обращения: 02.06.2025).
2. **Козин, Е.Г.** Анализ процессов сдвижения земной поверхности при сооружении новых линий метрополитена в дельте р. Невы Санкт-Петербурга / Е.Г. Козин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 4(59). — С. 101–107. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47421608> DOI: [10.52170/1815-9265\\_2021\\_59\\_101](https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_59_101) EDN: [DNVEEO](https://elibrary.ru/item.asp?id=47421608) (дата обращения: 02.06.2025).
3. **Алферова, Е.Л.** Определение требуемого воздухообмена на линии метрополитена с двухпутным тоннелем / Е.Л. Алферова // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Том 2. — № 3. — С. 101–108. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49418090> DOI: [10.33764/2618-981x-2022-2-3-101-108](https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-2-3-101-108) EDN: [LABBUK](https://elibrary.ru/item.asp?id=49418090) (дата обращения: 02.06.2025).
4. **Гендлер, С.Г.** Проблемы эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями в условиях холодного климата / С.Г. Гендлер, М.С. Крюкова // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. — 2022. — № 2. — С. 77–87. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49204386> DOI: [10.46689/2218-5194-2022-2-1-77-87](https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-2-1-77-87) EDN: [YGKZZD](https://elibrary.ru/item.asp?id=49204386) (дата обращения: 02.06.2025).
5. **Алферова, Е.Л.** Определение аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети метрополитена с двухпутным тоннелем / Е.Л. Алферова // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2023. — Том 2. — № 1. — С. 56–62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54620757> DOI: [10.33764/2618-981x-2023-2-1-56-62](https://doi.org/10.33764/2618-981x-2023-2-1-56-62) EDN: [ROVZBP](https://elibrary.ru/item.asp?id=54620757) (дата обращения: 02.06.2025).
6. **Кияница, Л.А.** Обоснование рабочих параметров системы раздельной вентиляции станции закрытого типа метрополитена мелкого заложения с двухпутным тоннелем / Л.А. Кияница, И.В. Лугин // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СИБТРИН). — 2018. — Том 21. — № 3(69). — С. 90–105. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36460347> EDN: [YOHNKH](https://elibrary.ru/item.asp?id=36460347) (дата обращения: 02.06.2025).
7. **Лугин, И.В.** Комплексный анализ эффективности схем вентиляции для метрополитена с двухпутным тоннелем / И.В. Лугин, Е.Л. Алферова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Том 5. — № 1. — С. 268–273. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36816902> EDN: [YUNUZN](https://elibrary.ru/item.asp?id=36816902) (дата обращения: 02.06.2025).
8. **Кияница, Л.А.** К вопросу определения расчетных расходов воздуха для проветривания станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем / Л.А. Кияница // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Том 4. — № 1. — С. 107–112. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29773372> EDN: [ZBNUMX](https://elibrary.ru/item.asp?id=29773372) (дата обращения: 02.06.2025).
9. **Абашкин, А.А.** Пожарная опасность двухпутных тоннелей метрополитенов / А.А. Абашкин // Актуальные вопросы пожарной безопасности. — 2024. — № 1(19). — С. 10–15. URL: [https://archive.avbvniipo.ru/2024\\_1\\_19/10-15.pdf](https://archive.avbvniipo.ru/2024_1_19/10-15.pdf) DOI: [10.37657/vniipo.avpb.2024.63.73.002](https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.63.73.002) EDN: [MWPWWH](https://archive.avbvniipo.ru/2024_1_19/10-15.pdf) (дата обращения: 02.06.2025).

10. **Константинов, В.Д.** Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра / В.Д. Константинов, А.Л. Новиков, А.А. Сокольников // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21, вып. 3. — С. 609–621. URL: <https://izvestiapgups.editorum.ru/en/nauka/article/89084/view> DOI: [10.20295/1815-588X-2024-03-609-621](https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-03-609-621) EDN: [BDXGZT](https://edn.ru/BDXGZT) (дата обращения: 02.06.2025).
11. **Ledyayev, A.** Examination of the Stress-Strain State of Service Tunnels at the Airport "Domodedovo" / A. Ledyayev, V. Kavkazskiy, E. Davidenko // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-96380-4_4) DOI: [10.1007/978-3-030-96380-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_4) (дата обращения: 18.06.2025).
12. **Vitali, O.P.M.** Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / O.P.M. Vitali, T.B. Celestino, A. Bobet // Underground Space. — 2022. — Vol. 7, Issue 1. — P. 1–18. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2467967421000301> DOI: [10.1016/j.undsp.2021.04.002](https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.04.002) (дата обращения: 18.06.2025).
13. **Shaposhnikov, E.A.** Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms / E.A. Shaposhnikov, Yu.S. Frolov // Russian Journal of Transport Engineering. — 2023. — Vol. 10. — № 1. URL: <https://t-s.today/05SAT5123.html> DOI: [10.15862/05SAT5123](https://doi.org/10.15862/05SAT5123) EDN: [VVZMCO](https://edn.ru/VVZMCO) (дата обращения: 18.06.2025).
14. **Mohyla, M.** Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland / M. Mohyla, E. Hrubesova, B. Martinkauppi, A. Mäkiranta, V. Tuomi // Renewable Energy. — 2024. — Vol. 221. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123016853> DOI: [10.1016/j.renene.2023.119770](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119770) EDN: [MPEKCR](https://edn.ru/MPEKCR) (дата обращения: 18.06.2025).
15. **Wei, G.** Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / G. Wei, F. Feng, C. Hu, J. Zhu, X. Wang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2023. — Vol. 15, Issue 6. — P. 1547–1564. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775522001974> DOI: [10.1016/j.jrmge.2022.08.010](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010) EDN: [SMMSQQ](https://edn.ru/SMMSQQ) (дата обращения: 18.06.2025).

#### Сведения об авторах:

**Сокольников Антон Александрович** — старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [scarlunch@mail.ru](mailto:scarlunch@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8516-0465>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1065765](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1065765)

**Коньков Александр Николаевич** — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [ankonkov@pgupstm.ru](mailto:ankonkov@pgupstm.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6198-9962>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=350187](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=350187)

**Ледяев Александр Петрович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, профессор, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: [ledyaev@pgupstm.ru](mailto:ledyaev@pgupstm.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2906-5145>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=366670](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=366670)

Статья получена: 08.07.2025. Принята к публикации: 16.09.2025. Опубликована онлайн: 30.09.2025.

## REFERENCES

1. Aleksandrov N.V., Starkov A.Y. Final results of two-lane tunnel construction for Nevsko-Vasileostrovskaya line in Saint Petersburg metropolitan. *Metro and Tunnels*. 2017;(5-6):8–10. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32278395> (accessed 2nd June 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Kozin E.G. Analysis of surface movement during construction of new subway lines in the Neva delta, Saint Petersburg. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;4(59):101–107. DOI: [10.52170/1815-9265\\_2021\\_59\\_101](https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_59_101). (In Russ., abstract in Eng.).

3. Alferova E.L. Determination of the required air exchange on a metro line with a double-track tunnel. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;2(3):101–108. DOI: [10.33764/2618-981x-2022-2-3-101-108](https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-2-3-101-108). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Gendler S.G., Kryukova M.S. Problems of operation of metro lines with double-track tunnels in a cold climate. *Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):77–87. DOI: [10.46689/2218-5194-2022-2-1-77-87](https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-2-1-77-87). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Alferova E.L. Definition of aerodynamic resistances of elements of the ventilation network of the metro with a double-track tunnel. *Interexpo GEO-Siberia*. 2023;2(1):56–62. DOI: [10.33764/2618-981x-2023-2-1-56-62](https://doi.org/10.33764/2618-981x-2023-2-1-56-62). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Kiyanitsa L.A., Lugin I.V. [Justification of the operating parameters of the separate ventilation system of a closed-type shallow metro station with a double-track tunnel]. *Works of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN)*. 2018;21(3(69)):90–105. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36460347> (accessed 2nd June 2025). (In Russ.).
7. Lugin I.V., Alferova E.L. The comprehensive analysis of efficiency of ventilation schemes for double-line subway tunnel. *Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*. 2018;5(1):268–273. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36816902> (accessed 2nd June 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Kiyanitsa L.A. To the question of determining air calculation expenses for testing the station of a closed type of metropolitene with a two-way tunnel. *Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences*. 2017;4(1):107–112. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29773372> (accessed 2nd June 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Abashkin A.A. Fire danger of double-track underground tunnels. *Aktual'nye Voprosy Pozharnoi Bezopasnosti — Current Fire Safety Issues*. 2024;1(19):10–15. DOI: [10.37657/vniipo.avpb.2024.63.73.002](https://doi.org/10.37657/vniipo.avpb.2024.63.73.002). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Konstantinov V., Novikov A., Sokornov A. The key-segment extrusion during the construction of large-diameter transport tunnels. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024;21(3):609–621. DOI: [10.20295/1815-588X-2024-03-609-621](https://doi.org/10.20295/1815-588X-2024-03-609-621). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the Stress-Strain State of Service Tunnels at the Airport "Domodedovo". In: \*International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. Lecture Notes in Networks and Systems\*. 2022;402. DOI: [10.1007/978-3-030-96380-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_4). (In Eng.).
12. Vitali O.P.M., Celestino T.B., Bobet A. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil. *Underground Space*. 2022;7(1):1–18. DOI: [10.1016/j.undsp.2021.04.002](https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.04.002). (In Eng.).
13. Shaposhnikov E.A., Frolov Yu.S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023;10(1). DOI: [10.15862/05SATS123](https://doi.org/10.15862/05SATS123). (In Eng.).
14. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B., Mäkiranta A., Tuomi V. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in SuviLahti, Finland. *Renewable Energy*. 2024;221. DOI: [10.1016/j.renene.2023.119770](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119770). (In Eng.).
15. Wei G., Feng F., Hu C., Zhu J., Wang X. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(6):1547–1564. DOI: [10.1016/j.jrmge.2022.08.010](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010). (In Eng.).

#### Information about the authors:

**Anton A. Sokornov** — Emperor Alexandr I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: [scarlunch@mail.ru](mailto:scarlunch@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8516-0465>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1065765](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1065765)

**Alexandr N. Konkov** — Emperor Alexandr I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: [ankonkov@pgupstm.ru](mailto:ankonkov@pgupstm.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6198-9962>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=350187](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=350187)

**Alexandr P. Ledyayev** — Emperor Alexandr I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: [ledyaev@pgupstm.ru](mailto:ledyaev@pgupstm.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2906-5145>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=366670](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=366670)

Submitted: 8th July 2025. Revised: 16th September 2025. Published online: 30th September 2025.