

УДК 624.042.12

Изменение напряженно-деформированного состояния тоннельной камеры после капитального ремонта вентиляционной шахты

А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н. Изменение напряженно-деформированного состояния тоннельной камеры после капитального ремонта вентиляционной шахты // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 462–472. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-462-472

Аннотация

Цель: выполнить оценку изменения напряженно-деформированного состояния обделки тоннельной камеры, находящейся под вентиляционной шахтой и испытывающей на себе давление пеностеклобетона — слоя конструкционного усиления и утепления шахты. **Методы:** исследование было выполнено в плоской и объемной постановках методом Метрогипротранса (Hyperstatic Reaction Method, HRM) и методом конечных элементов. **Результаты** расчета были сопоставлены между собой через соответствующие коэффициенты запаса несущей способности обделки тоннельной камеры. В результате исследования обнаружена удовлетворительная сходимость методик расчета друг с другом. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы для расчета сложных пространственных конструкций, работу которых можно свести к аркам.

Ключевые слова: тоннель, обделка, численное моделирование, метод конечных элементов, метод Метрогипротранса

Введение

При эксплуатации вентиляционных шахт метрополитена в условиях знакопеременных температур водоносные грунты в заобделочном пространстве периодически промерзают, что приводит к локальным силовым воздействиям расширяющегося льда на обделку с образованием трещин и сколов. Как правило, после длительного периода эксплуатации (30–40 лет) наступает необходимость в капитальном ремонте шахты с созданием внутреннего армированного слоя монолитного бетона (обоймы). В предыдущем исследовании [1] авторы предложили использовать в качестве такого слоя особый материал — пеностеклобетон [2], состав которого подобран как для конструкционного уси-

ления обделки шахты, так и для ее утепления. В 2021 году подобная технология была с успехом опробована при капитальном ремонте вентиляционной шахты глубиной 20 м и рекомендована как типовое решение для капитального ремонта вентиляционных шахт Петербургского метрополитена.

При разработке капитального ремонта одной из вентиляционных шахт возникла необходимость в проведении дополнительных исследований. Сложность данного случая была вызвана особым конструктивным решением шахты. Она расположена непосредственно над перегонным тоннелем и была предназначена для пуска тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК). Таким образом,

в нижней части шахты была устроена монолитная щитовая камера для монтажа ТПМК. После окончания проходческих работ шахта была переоборудована в вентиляционную. Для этого в объеме щитовой камеры была создана еще одна, тоннельная, камера, разделяющая пути передвижения поездов и воздуха.

Создание слоя пеностеклобетона (рубашки), примыкающего к обделке шахты, возможно выполнить, только оперев этот слой непосредственно на обделку тоннельной камеры. При этом сложным научным вопросом является то, какая именно часть от веса слоя пеностекла будет передана обделке тоннельной камеры, а какая воспринята обделкой шахты либо же щитовой камерой. В свою очередь, с инженерной точки зрения требовалось создать такую численную модель, которая учла бы самый неблагоприятный вариант нагружения тоннельной камеры.

Таким образом, целью исследования являлась оценка изменения напряженно-деформи-

рованного состояния тоннельной камеры при передаче на нее нагрузок от слоя пеностеклобетона обделки шахты при ее капитальном ремонте.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- создание стержневой 2D-модели тоннельной камеры и определение внутренних усилий по методу Метрогипротранса;
- создание 3D-модели всего рассматриваемого узла в грунтовом массиве методом конечных элементов и сопоставление полученных результатов с расчетом 2D-модели.

Материалы и методы

Объект исследования

Рассматриваемый объект представляет собой узел сопряжения вентиляционной шахты с перегонным тоннелем метрополитена в месте начала щитовой проходки (рис. 1). Ствол шахты выполнен с обделкой наружным диаметром 8,5 м. Размеры обделки обусловлены тем,

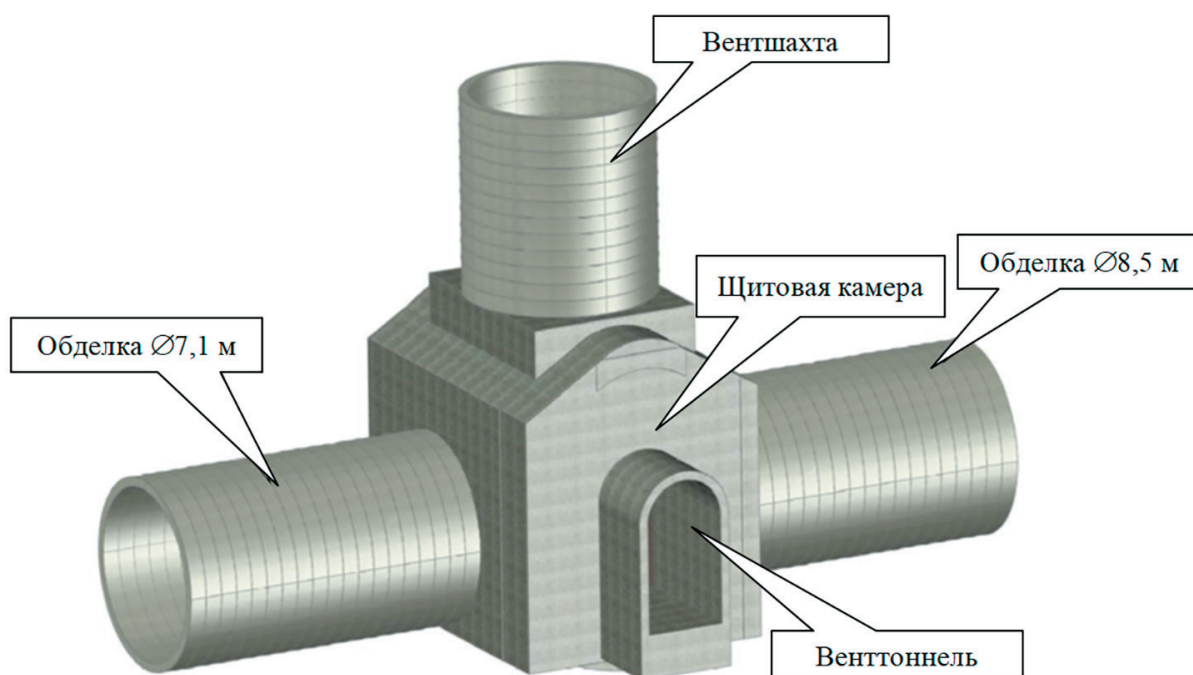


Рис. 1. Схема сопряжения шахты и перегонного тоннеля

что для начала щитовой проходки по стволу осуществлялся спуск элементов ТПК в щитовую камеру, которая размещена непосредственно под стволом шахты. Таким образом, с одной стороны к щитовой камере примыкает обделка из железобетонных тубингов диаметром 8,5 м, а с другой стороны — обделка новой трассы, выполненная из высокоточных блоков диаметром 7,1 м.

Перед пуском в эксплуатацию перегонного тоннеля шахта была переоборудована в вентиляционную. Для этого в монтажной камере возвели монолитную ограждающую конструкцию (тоннельную камеру), которая разделила внутренний объем монтажной камеры на два: зону движения поездов и вентиляционный канал (рис. 2).

Конструкция обделки шахты состоит из 67 железобетонных колец шириной 0,75 м (общая высота ствола ~ 50 м). Каждое кольцо со-

стоит из 15 железобетонных тубингов. Через каждые 10 колец за контуром обделки устроены опорные «башмаки» для предотвращения скольжения обделки по грунту.

В нижней части шахта сопряжена со щитовой камерой. Щитовая камера сооружалась горным способом в твердых протерозойских глинах с монолитной бетонной обделкой. Внутренние габариты камеры обусловлены размерами монтируемого щита и требованиями размещения подъемных и монтажных устройств и составляют ~ 11,5 × 13,5 × 15,5 м.

Проект капитального ремонта шахты предусматривает создание слоя из пеностеклобетона (рубашки), армированного циркониевой фиброй (рис. 3). Толщина рубашки (без учета заполнения тубингов) составляет 300 мм. Как было показано в [1], такая толщина пеностеклобетона обеспечивает теплоизоляцию грунтов в заобделочном пространстве в зимний

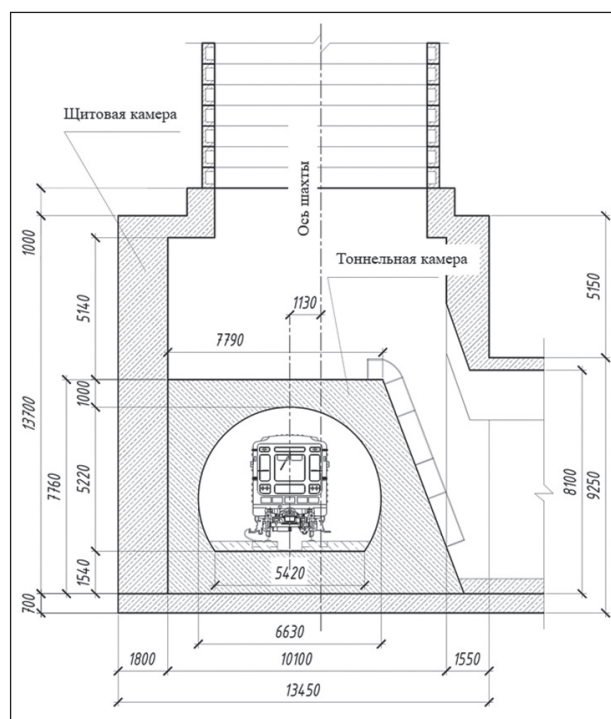


Рис. 2. Устройство тоннельной камеры внутри щитовой камеры

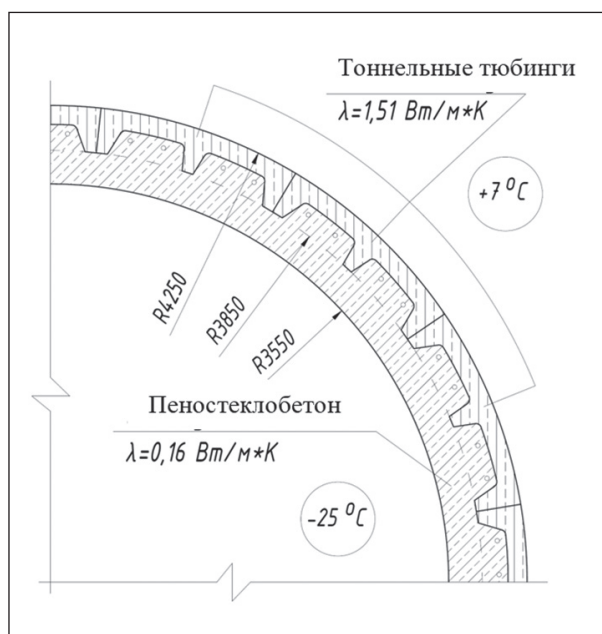


Рис. 3. Схема утепления с одновременным усилением обделки шахты слоем пеностеклобетона, армированного циркониевой фиброй

период эксплуатации шахты. Своим нижним торцом слой пеностеклобетона опирается на верхнюю часть тоннельной камеры.

Метод Метрогипротранса

Метод Метрогипротранса (другое название Hyperstatic Reaction Method, HRM) относится к классу численных методов анализа, в которых напряженное состояние обделки, представляемой в виде одномерных стержневых элементов, может быть определено через интегральные показатели. Метод Метрогипротранса доказал свою эффективность при расчете обделок тоннелей кругового [2, 4] и арочного очертания [5].

Подробно суть метода изложена в [2, 4]. Сплошная нейтральная ось обделки заменяется системой стержней, соединенных между собой в узлах. Граничные условия и нагрузки сосредотачиваются в узлах системы, таким образом, каждый узел находится в равновесии под воздействием усилий, возникающих в нем от узловых смещений $\square x_i$, $\square y_i$, $\square \varphi_i$ и узловых нагрузок p_i и q_i . В матричной форме уравнения метода принимают вид:

$$RV + P = 0, \quad (1)$$

где R — матрица реакций на единичные смещения узлов;

V — вектор узловых перемещений;

P — вектор реакций на заданные активные нагрузки.

В результате решения системы уравнений находят неизвестные перемещения узлов Δx_i , Δy_i , $\Delta \varphi_i$. Зная перемещения концов стержней, определяют внутренние усилия в стержнях: изгибающий момент в начале и в конце стержня, нормальные и поперечные силы.

Метод конечных элементов

Исследования выполнялись на численных моделях, построенных в расчетном комплек-

се Midas GTS NX, основанном на методе конечных элементов. 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 [6–9].

Грунтовый массив и расположенная в нем конструкция разбиты на сеть объемных конечных элементов, соединенных между собой в узлах. На боковых границах массива установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений. Равномерно распределенная нагрузка, приложенная к верхней грани модели, определялась как вес вышележащих грунтов и составила:

$$q = \gamma H = 20 \cdot 50 = 1000 \text{ кПа},$$

где H — расстояние от верхней грани модели до «дневной поверхности», м (принята равной 50 м);

γ — средний объемный вес вышележащих грунтов, кН/м³ (принят равным 20 кН/м³).

Стадийность расчета задавалась включением в работу определенных конечных элементов, нагрузок или граничных условий.

На первом этапе расчета рассматривался однородный грунтовый массив для создания начального поля напряжений. При этом конечным элементам, моделирующим обделки, присваивались характеристики грунта. По результатам расчета первого этапа все перемещения обнулялись. На втором этапе расчета моделировалось сооружение шахты и щитовой камеры. На третьем этапе — сооружение тоннельной камеры внутри щитовой. На четвертом — устройство слоя пеностеклобетона (рубашки) внутри шахты путем передачи дополнительной нагрузки на верх тоннельной камеры.

Физико-механические характеристики грунтов и материалов

Для описания физико-механических свойств конечных элементов, моделирующих грунтовой массив, применялась модель Мора — Кулона. Приняты следующие характеристики, как для верхнекотлинских глин:

- секущий модуль упругости $E_{50} = 200$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,23$;
- объемный вес $\gamma = 21,5$ кН/м³;
- сцепление $C = 80$ кПа;
- угол внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$.

Для описания физико-механических свойств конечных элементов, моделирующих обделки подземных сооружений, применялась линейно деформируемая модель. Сборная тубинговая обделка шахты моделировалась приведенными прямоугольными сечениями в соответствии с [10]. Характеристики материалов обделок приняты следующими:

- модули упругости тубинговой обделки шахты $E = 34\,500$ МПа и монолитной обделки камер $E = 30\,000$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$;
- объемный вес бетона $\gamma = 24,5$ кН/м³;
- расчетное сопротивление бетона монолитной обделки камер на сжатие – 14,5 МПа.

Пеностеклобетон в моделях не задавался в явном виде, а рассматривался в качестве дополнительной равномерно распределенной нагрузки.

Результаты

2D-модель

Обделка тоннельной камеры в плоской постановке была сведена к арке. Расчеты были выполнены в программном комплексе RK-6 (учебная версия). Построение расчетной схемы производилось на основе следующих допущений:

- плавное очертание нейтральной оси арки заменяется вписанным в нее стержневым многоугольником;

- жесткость арки на протяжении каждого стержня остается постоянной, но может меняться от стержня к стержню;
- граничные условия задачи представлены запретом вертикальных и горизонтальных перемещений пят арки, а также запретом их поворота;
- наличие примыкающей к арке стены щитовой камеры моделировалось запретом горизонтальных перемещений соответствующих узлов.

Расчетная схема представлена на рис.4 в виде несимметричной стержневой системы, состоящей из 17 узлов и 16 стержней.

Нагрузка от веса пеностеклобетона представлена равномерно распределенной нагрузкой, то есть $11,5 \cdot 60 \cdot 0,3 = 207$ кПа. Коэффициент 0,3 — это ширина полосы нагрузки, приложенной в плоскости модели (толщина слоя пеностеклобетона). Таким образом, в расчете рассмотрен случай, когда вся нагрузка от пеностеклобетона воспринимается верхом обделки тоннельной камеры. Суммарная расчетная вертикальная нагрузка определялась

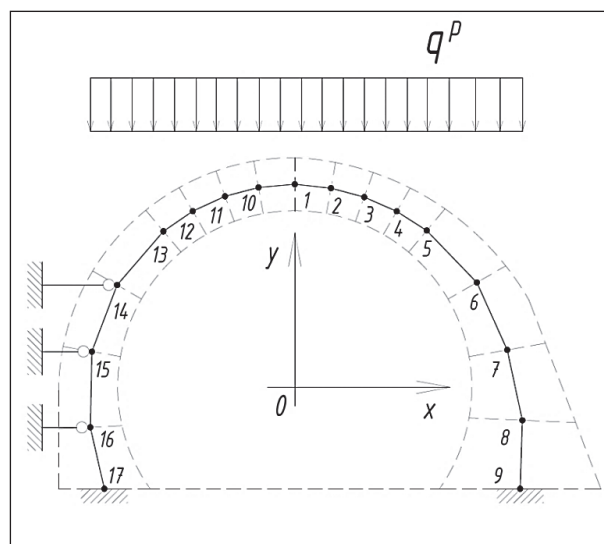


Рис. 4. Расчетная схема по методу Метрогипротранса

с учетом собственного веса свода арки и составила 231,5 кПа.

В результате расчета были определены усилия в сечениях конструкции: изгибающие моменты M и нормальные силы N (рис. 5).

Эксцентриситет приложения нормальной силы в четверти свода арки (в месте наибольшего значения изгибающего момента):

$$e_0 = M / N = 336,4 / 977,1 = 0,34 < 0,5 h.$$

Поскольку значение эксцентриситета меньше половины высоты расчетного сечения, равного $h = 1,4$ м, то прочность внецентренно сжатого бетонного элемента проверяется из условия:

$$N \leq m_1 \cdot \gamma_{b2} \cdot R_b \cdot b \cdot (h - 2e_0), \quad (2)$$

где m_1 — поправочный коэффициент, учитывающий неточность в назначении расчетной схемы, равный 0,9;

γ_{b2} — коэффициент условия работы, учитывающий длительное действие нагрузки, равный 0,9;

R_b — расчетное сопротивление бетона сжатию, МПа, равное 14500 кПа;

b и h — ширина и высота расчетного сечения, в нашем случае 1 м и 1,4 м соответственно.

Тогда

$$N = 977,1 \text{ кН} < 0,9 \cdot 0,9 \cdot 14500 \cdot 1 \times \\ \times (1,4 - 2 \cdot 0,34) = 8355,8 \text{ кН}.$$

Условие прочности выполнено с коэффициентом запаса 8,6.

3D-модель

Из опыта проектирования границы модели приняты на расстоянии двух пролетов щитовой камеры от края конструкции по ширине модели и одного пролета по глубине. Таким образом, размеры модели составили $\sim 50 \times 50 \times 30$ м. Узел сопряжения конструкций показан на рис. 6.

В расчете, так же как и в 2D-постановке, рассматривался случай полной передачи нагрузки от слоя пеностеклобетона на верхнюю часть тоннельной камеры, то есть $11,5 \cdot 60 = 690$ кПа. Тот же принцип был рассмотрен и в отношении нагрузки на свод щитовой камеры: полная передача нагрузки от веса тубингов шахты без учета частичной передачи нагрузки на грунт через

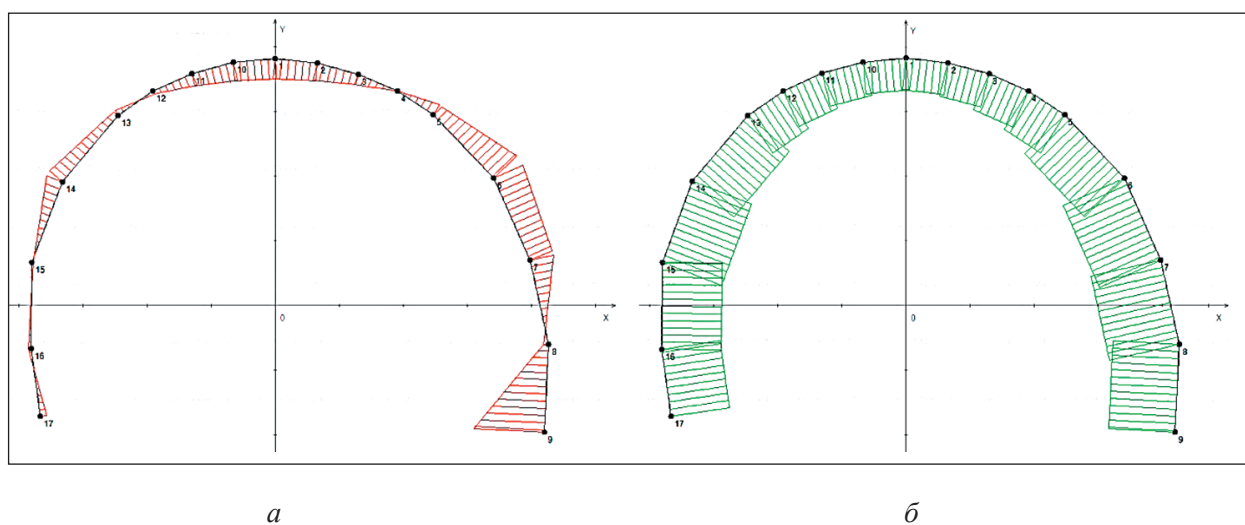


Рис. 5. Эпюры внутренних усилий: *a* — изгибающих моментов (максимальный момент в четверти свода 336,4 кНм); *б* — нормальных сил (максимальная нормальная сила в четверти свода 977,1 кН)

опорные башмаки, то есть $24,5 \cdot 50 = 1225$ кПа. Также к верхней грани обделки тоннельной камеры была приложена нагрузка от бетонного заполнения сзади слоя пеностеклобетона, принятая равной 150 кПа. Общая схема приложения нагрузки на обделку тоннельной камеры показана на рис. 7.

По результатам расчета были получены изополя напряжений в обделках по глобальной оси Z (максимальные вертикальные составляющие сжимающих и растягивающих напряжений). Максимальные напряжения в обделке щитовой камеры на третьем этапе расчета составили 13,79 МПа, а на четвертом — 13,83 МПа, то есть увеличились незначительно, на 0,3%, (рис. 8), и при этом не превысили предельно допустимых значений, равных 14,5 МПа (коэффициент запаса 1,05). Следует отметить, что

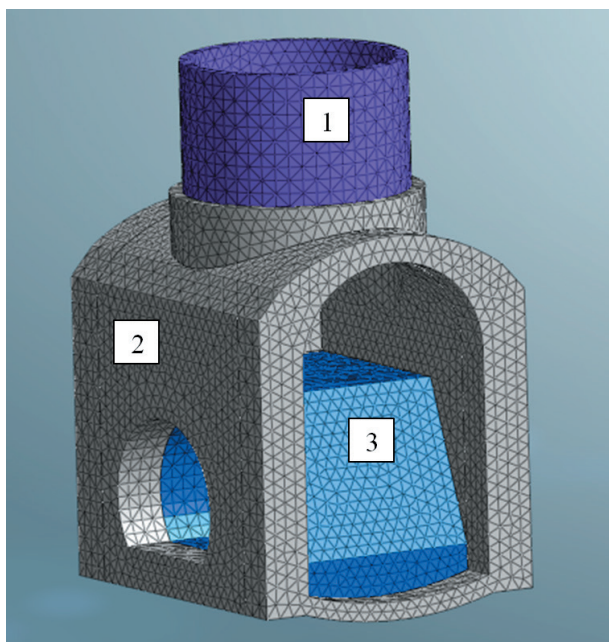


Рис. 6. Моделирование участка сопряжения шахты со щитовой камерой (грунтовой массив и передняя стена щитовой камеры не показаны): 1 — участок вентиляционной шахты, 2 — щитовая камера, 3 — тоннельная камера

эти напряжения зафиксированы в местах концентрации напряжений — в проеме перегонного тоннеля, а сжимающие напряжения в своде камеры не превышают значения 8,7 МПа (коэффициент запаса 1,7).

Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения в обделке тоннельной камеры на третьем и четвертом этапе расчета поменяли места своих концентраций (рис. 9). Максимальные сжимающие напряжения на третьем этапе расчета составили 0,39 МПа, а на четвертом — 0,57 МПа при расчетном сопротивлении бетона на сжатие 14,5 МПа (коэффициент запаса 25); растягивающие напряжения на третьем этапе — 0,04 МПа, на четвертом — 0,10 МПа при расчетном сопротивлении бетона на растяжение 1,05 МПа (коэффициент запаса 10,5). То есть как по сжимающим, так и по растягивающим напряжениям в обделке путевой камеры имеется существенный запас по прочности.

Обсуждение / Анализ результатов

Метод Метрогипротранса и метод конечных элементов сложно сопоставить между собой, если рассматривается какая-то массивная

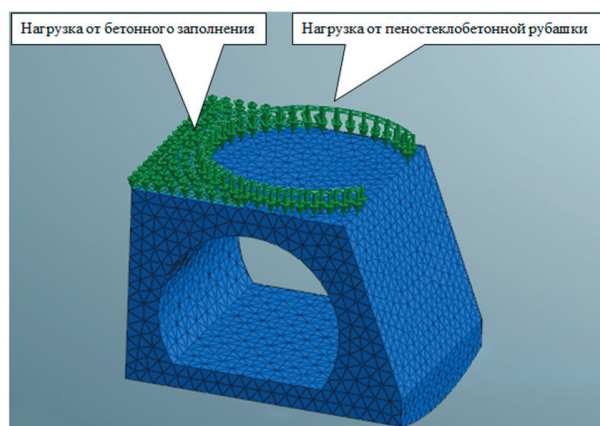


Рис. 7. Приложение нагрузки от пеностеклобетонной рубашки на верх тоннельной камеры

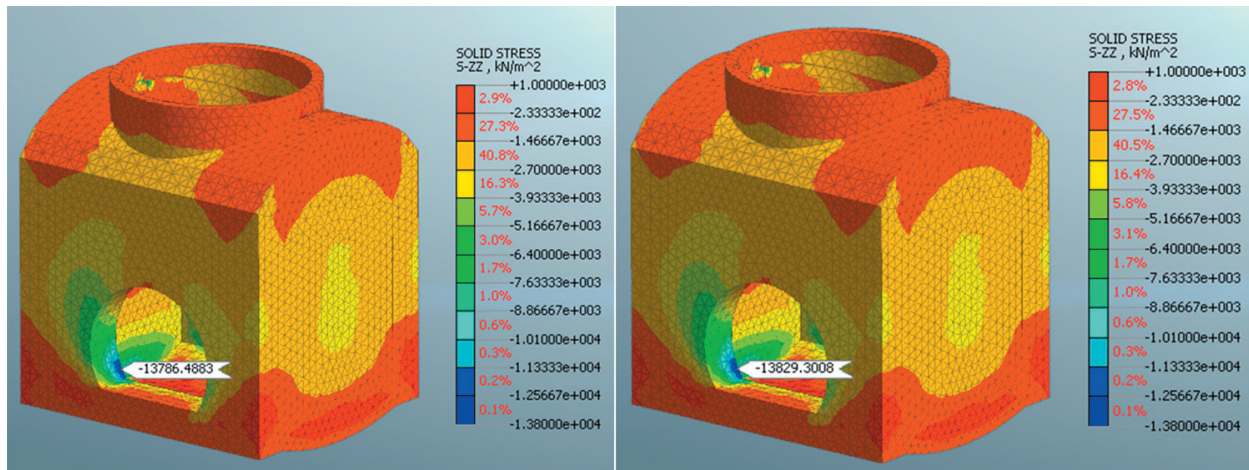


Рис. 8. Изополя напряжений в обделке щитовой камеры по глобальной оси Z на третьем и четвертом этапах расчета

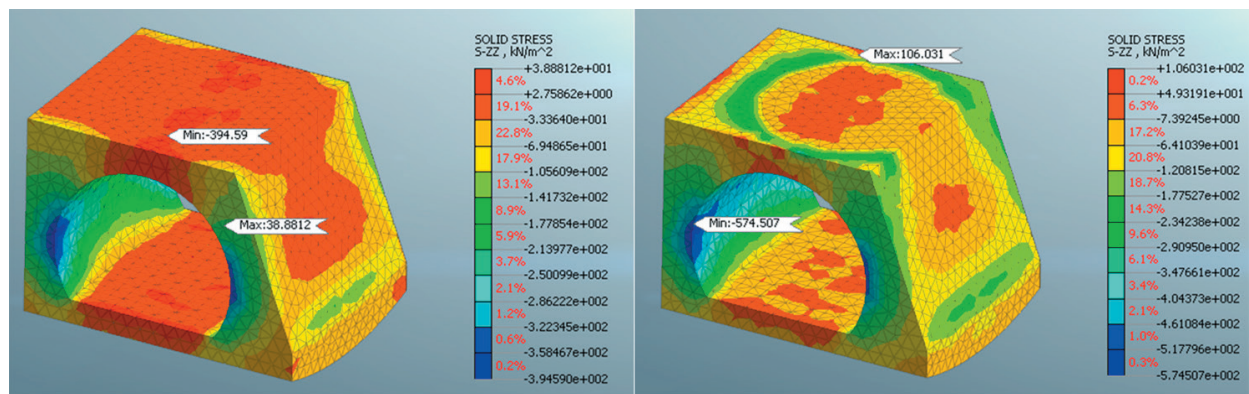


Рис. 9. Изополя напряжений в обделке тоннельной камеры по глобальной оси Z на третьем и четвертом этапах расчета

конструкция. Если такая конструкция имеет сложное очертание в пространстве, а нагрузка приложена к ней также по сложной траектории, то свести ее расчетную схему к плоской задаче становится затруднительным.

Тем не менее в рассмотренном случае пространственная конструкция тоннельной камеры с массивным сводом, стенами и лотковой плитой в первом приближении была сведена к арке. А нагрузка, приходящая на верхнюю часть камеры по круговой траектории, была представлена полосовой нагрузкой.

Результаты расчета по двум разным методикам можно сравнить косвенно — через коэффициенты запаса по несущей способности. И в этом случае результаты оказываются весьма близкими: 8,6 по методу Метрогипротранса и 10,5 по методу конечных элементов. Разница составляет 22%, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости методов расчета.

Необходимо отметить, что в мировой и отечественной практике отсутствует унифицированная шкала оценки сходимости инженерных расчетов. Имеются лишь данные

о расхождениях 2D/3D-моделирования тоннелей [11–14], достигающих 50%. Полученные в исследовании расхождения подтверждают целесообразность разработки практической шкалы верификации:

- 0–10% — высокая надежность;
- 10–25% — умеренная надежность;
- 25–50% — низкая надежность.

Исходя из предложенной шкалы оценки и полученных значений коэффициента запаса, полученные результаты можно признать надежными для практического инженерного анализа тоннельных конструкций при верификации программного обеспечения.

Заключение

1. В результате исследования статическая работа пространственной конструкции тоннельной камеры была сведена к работе плоской арки. Результатом такого представления явилась стержневая 2D-модель, в которой были определены внутренние усилия по методу Метрогипротранса и выполнен расчет для наиболее опасного сечения.

2. При расчете 3D-модели методом конечных элементов было зафиксировано перераспределение начальных напряжений в тоннельной камере. Косвенное сопоставление результатов расчета двух методов по коэффициентам запаса показал их удовлетворительную сходимость.

В целом установлено, что обделка тоннельной камеры воспринимает дополнительную нагрузку от бетонирования обоймы в шахте с большим запасом, даже с учетом полного веса пеностеклобетона (без учета трения по обделке шахты).

Список источников

1. Ventilation Shafts Freezing Protection Under the Influence of Negative Temperatures / E.G. Kozin

[et al.] // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of Transoilcold-2019*. 2020. Pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53

2. Analysis of Existing Technological Solutions of Foam Glass Production / G. V. Sopegin [et al.] // *Vestnik MGSU*. 2019. No. 14 (12). Pp. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609

3. Oreste P. A. Numerical Approach to the Hyperstatic Reaction Method for the Dimensioning of Tunnel Supports // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007. Vol. 22, iss. 2. Pp. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002

4. The Behaviour of the Segmental Tunnel Lining Studied by the Hyperstatic Reaction Method / N. A. Do [et al.] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014. Vol. 18, iss. 4. Pp. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583

5. Karasev M.A., Tien Tai Nguyen. Method for Predicting the Stress State of the Lining of Underground Structures of Quasi-Rectangular and Arched Forms // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. Pp. 807–821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17

6. Ledyayev A., Kavkazskij V., Davidenko E. Examination of the Stress-Strain State of Service Tunnels at the Airport “Domodedovo” // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 402. Springer, Cham, 2022. Pp. 28–37.

7. Construction Strategies for A NATM Tunnel in São Paulo, Brazil, in Residual Soil / P. M. Osvaldo [et al.] // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002

8. 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. Vol. 10, no. 1. DOI: 10.15862/05SATS123

9. Mechanical Performances of Shield Tunnel Segments Under Asymmetric Unloading Induced by Pit Excavation / Gang Wei [et al.] // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

2023. Vol. 15, iss. 6. Pp. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010

10. Konkov A., Sokornov A., Korolev K. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 402. Springer, Cham, 2022. Pp. 568–576.

11. Svoboda T. Comparison of Displacement Field Predicted by 2D and 3D Finite Element Modelling of Shallow NATM Tunnels in Clays // Geomechanics and Tunnelling. 2011. 29 p. DOI: 10.1002/geot.201000009

12. Maraš-Dragojević S. Use of Finite Element Method for 2D and 3D Analyses of Tunnelling Induced Settlements // Građevinar. 2020. No. 8. Pp. 673–680. DOI: 10.14256/JCE.2119.2017

13. Üçer S. Comparison of 2D and 3D Finite Element Models of Tunnel Advance in Soft Ground: A Case Study on Bolu Tunnels. Ankara: Middle East Technical University, 2006. 116 p.

14. Behavior of the Vault in Column-Free Large-Span Metro Stations Under Asymmetric Loading / J.-L. Zhang [et al.] // Appl. Sci. 2025. No. 15 (20). P. 10944.

Дата поступления: 05.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — кандидат техн. наук, доцент; anlonkov@pgupstm.ru

Stress-Strain State of the Tunnel Chamber After Renovation of the Ventilation Shaft

A. A. Sokornov, A. N. Kon'kov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Sokornov A. A., Kon'kov A. N. Stress-Strain State of the Tunnel Chamber After Renovation of the Ventilation Shaft // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 462–472. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-462-472 (In Russian)

Abstract

Objective: to evaluate changes in the stress-strain state of the chamber tunnel lining located under the ventilation shaft and experiencing the pressure of foam-reinforced concrete, a layer of structural reinforcement and insulation of the shaft. **Methods:** the study was performed in two- and three-dimensional formulations using different methods – the Hyperstatic Reaction Method (HRM) and the finite element method. The calculation results were compared with each other through the corresponding coefficients of the bearing capacity of the tunnel chamber lining. As a result of the study, satisfactory convergence of calculation methods with each other was found. **Practical significance:** the results of the study can be used to calculate complex spatial structures, the work of which can be reduced to arches.

Keywords: tunnel, lining, mathematical modeling, finite element method, hyperstatic reaction method

References

1. Kozin E.G., et al. Ventilation Shafts Freezing Protection Under the Influence of Negative Temperatures, *Transportation Soil Engineering in Cold Regions. Proceedings of Transoilcold-2019*, 2020, pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53
2. Sopegin G.V., et al. Analysis of Existing Technological Solutions of Foam Glass Production, *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 2019, no. 14 (12), pp. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609
3. Oreste P. A Numerical Approach to the Hyperstatic Reaction Method for the Dimensioning of Tunnel Supports, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22, iss. 2, pp. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002
4. Do N.A., et al. The Behaviour of the Segmental Tunnel Lining Studied by the Hyperstatic Reaction Method, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014, vol. 18, iss. 4, pp. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583
5. Karasev M.A., Tien Tai Nguyen. Method for Predicting the Stress State of the Lining of Underground Structures of Quasi-Rectangular and Arched Forms, *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 257, pp. 807–821. DOI: 10.31897/PMI.2022.17
6. Ledyayev A., Kavkazskij V., Davidenko E. Examination of the Stress-Strain State of Service Tunnels at the Airport “Domodedovo”, *International Scientific Siberian Transport Forum Transsiberia-2021, Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 402, Springer, Cham, 2022, pp. 28–37.
7. P. M. Osvaldo, et al. Construction Strategies for A NATM Tunnel in São Paulo, Brazil, In Residual Soil, *Underground Space*, 2022, vol. 7, iss. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.
8. 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, vol. 10, no. 1. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123
9. Gang Wei, et al. Mechanical Performances of Shield Tunnel Segments Under Asymmetric Unloading Induced by Pit Excavation, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, vol. 15, iss. 6, pp. 1547–1564. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010
10. Kon'kov A., Sokornov A., Korolev K. The Results Analysis of the Tubing Tunnel Facing Mathematical Modeling Using the Reduced Sections, *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 402, Springer, Cham, 2022, pp. 568–576.
11. Svoboda T. Comparison of Displacement Field Predicted by 2D and 3D Finite Element Modelling of Shallow NATM Tunnels in Clays, *Geomechanics and Tunnelling*, 2011, 29 p. URL: <https://web.natur.cuni.cz/uhigug/masin/download/SM-Geotechnik2011-pp.pdf>, DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201000009>
12. Maraš-Dragojević S. Use of Finite Element Method for 2D And 3D Analyses of Tunnelling Induced Settlements, *Građevinar*, 2020, no. 8, pp. 673–680. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.2119.2017>
13. Ůčer S. Comparison of 2D and 3D Finite Element Models of Tunnel Advance in Soft Ground: A Case Study on Bolu Tunnels, *Ankara: Middle East Technical University*, 2006, 116 p. URL: <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12607172/index.pdf> (дата обращения: 11.02.2026).
14. Zhang J.-L., et al. Behavior of the Vault in Column-Free Large-Span Metro Stations Under Asymmetric Loading, *Appl. Sci.*, 2025, no. 15 (20), 10944.

Received: February 05, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KON'KOV – PhD in Engineering,
Associate Professor; ankonkov@pgupstm.ru