

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst688483>

Труды I Международной научно-практической конференции
«Экономика высоких скоростей: технологии будущего»

© Е.Г. Козин¹, А.П. Ледяев², Д.Л. Бурин¹

¹ Петербургский метрополитен

² Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕНОВАЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛОВ ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Обоснование. Сокращение продолжительности, трудоемкости и стоимости работ при капитальном ремонте и реконструкции стволов шахтной вентиляции.

Цель. Усовершенствование методов ремонта для усиления и теплоизоляции обделок стволов шахтной вентиляции.

Материалы и методы. Представлены результаты расчетно-теоретических исследований и экспериментальных исследований на физической модели участка вентиляционного ствола. Подтверждена эффективность применения пеностеклобетона для капитального ремонта и реконструкции стволов шахтной вентиляции. Экспериментально доказано, что при использовании данной технологии промораживания тела рубашки не происходит, а температура на контакте обделки и грунта не опускается до температуры замерзания воды.

Результаты. Описано внедрение разработанной технологии на действующем стволе вентиляционной шахты метрополитена, включая монтаж системы мониторинга температур. Результаты мониторинга подтвердили заявленные характеристики материала и конструкции. Для повышения теплоизоляционной эффективности и увеличения скорости возведения конструкционно-теплоизоляционной рубашки заменен арматурный каркас на дисперсное армирование с применением фибры.

Заключение. Разработанная конструкционно-теплоизоляционная рубашка на основе модифицированного пеностеклобетона с применением фибры способна эффективно защищать обделку стволов вентиляционных шахт от промерзания, обеспечивая их долговечность и безопасную эксплуатацию.

Ключевые слова: вентиляционные стволы; промерзание; обделка; метрополитен; теплоизоляция.

Как цитировать:

Козин Е.Г., Ледяев А.П., Бурин Д.Л. Эффективные методы реновации эксплуатируемых вентиляционных стволов Петербургского метрополитена // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 422–433. doi: 10.17816/transsyst688483

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© E.G. Kozin¹, A.P. Ledyayev², D.L. Burin¹

¹ Petersburg Metro

² Emperor Alexander I. St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

EFFECTIVE RENOVATION METHODS OF THE VENTILATION SHAFTS IN THE ST. PETERSBURG METRO SYSTEM

BACKGROUND: Reducing the duration, labor intensity, and cost of work during major repairs and reconstruction of ventilation shafts.

AIM: The work aimed to improve repair methods for reinforcing and thermal insulation of the ventilation shaft lining.

METHODS: The study presents the theoretical and experimental research on a physical model of a ventilation shaft section. The study proved that foamed glass concrete is effective for major repairs and reconstruction of ventilation shafts. It has been experimentally proven that this technology prevents freezing of the insulation body and the temperature at the point where the insulation contacts the ground does not drop to the ice point.

RESULTS: We described the implementation of the developed technology in an operating ventilation shaft of the metro system, including the installation of a temperature monitoring system. The monitoring confirmed the stated properties of the material and design. To improve thermal insulation efficiency and speed up the construction of the structural thermal insulation, the reinforcement frame was replaced with fiber-based dispersed reinforcement.

CONCLUSION: The developed structural thermal insulation based on modified foamed glass concrete with added fiber can effectively protect the lining of ventilation shafts from freezing, ensuring their durability and safe operation.

Keywords: ventilation shafts; freezing; lining; metro; thermal insulation.

To cite this article:

Kozin EG, Ledyayev AP, Burin DL. Effective renovation methods of the ventilation shafts in the St. Petersburg metro system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(3):422–433. doi: 10.17816/transsyst688483

ВВЕДЕНИЕ

Стволы вентиляционных шахт на любом объекте транспортной или горнодобывающей промышленности являются особо важными объектами инфраструктуры, обеспечивающими подачу свежего воздуха в сети выработок, станционных комплексов и тоннельных сооружений. В горнодобывающей промышленности шахтные стволы обеспечивают гораздо более широкий комплекс функций, связанный с спуском и подъемом работников, полезных

ископаемых, материалов и оборудования [1]. В этой связи, обеспечение безопасной и длительной эксплуатации строительных конструкций объектов инфраструктуры метрополитена [2–4], равно как и шахтных стволов, является важной задачей, а решение проблемы промерзания конструкций стволов при проникновении воды, содержащейся в массиве пород – особо важной для регионов с низкими, циклично изменяющимися в течение зимнего периода температурами. Обделка (постоянная крепь) шахтных стволов должна обладать повышенной прочностью и водонепроницаемостью, способностью не изменять свои физико-механические свойства при замораживании и оттаивании, стойкостью по отношению к разрушающему воздействию агрессивных подземных вод.

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ

Основными задачами системы вентиляции в метрополитене являются: удаление вредностей в виде газовых выделений (преимущественно углекислого газа), снижение уровней влажности и пыли, избыточного тепла, а также поддержание нормальных условий воздушной среды и микроклимата подземных сооружений. Вентиляционные стволы (расположенные у станций и на перегонах между ними), вентиляционные выработки и оборудование обеспечивают дымоудаление при возгораниях и задымлениях при пожарах, могут выполнять функции эвакуационных выходов (в случае наличия лестничных спусков в пространстве ствола) для пассажиров и работников метрополитена при чрезвычайных ситуациях.

В зимний период времени вентиляционные стволы, функционирующие в режиме приточной вентиляции, подвергаются воздействию низких температур воздуха, достигающих значений -25°C и ниже. Следствием этого является интенсивное промерзание обделки ствола и прилегающих грунтов, что усугубляется проникновением влаги через дефекты гидроизоляции. Строительные конструкции и оборудование вентиляционных стволов также подвергаются периодическому замерзанию и оттаиванию, что приводит к прогрессирующему износу строительных конструкций.

Вентиляционные выработки, как правило, залегают в плотных сухих глинах, тогда как вентиляционный ствол пересекает все слои грунтов инженерно-геологического разреза, в том числе толщу слабых обводненных грунтов четвертичных отложений [5–7]. В процессе эксплуатации это оказывает существенное влияние на техническое состояние обделки сооружения [8, 9].

Наличие водоносных горизонтов в четвертичных отложениях и фильтрующих грунтов оказывает негативное влияние на тампонажные растворы, приводя к нарушению их структуры и последующему вымыванию, что способствует аккумуляции воды непосредственно за обделкой ствола. В условиях знакопеременных температур вода в образовавшихся полостях замерзает, увеличиваясь в объеме. Присутствующие за обделкой грунтовые воды оказывают негативное воздействие на тампонажный раствор, приводя к нарушению его структуры, последующему вымыванию. Данный процесс приводит к прогрессирующему во времени скоплению воды непосредственно

за обделкой [10–12]. В период действия отрицательных температур наружного воздуха вода, находящаяся в образовавшихся полостях за обделкой ствола, замерзает и расширяется в объеме. С учетом наличия отпора грунта, а также с учетом его возможного промораживания, расширение проявляется в виде деформации обделки внутрь ствола. Для обделки из чугунных тубингов характерно хрупкое их разрушение с отделением (откалыванием) фрагментов тубинга и падением внутрь ствола (Рис. 1).



Рис. 1. Разрушение ребра тубинга со смещением

Fig. 1. Failure and displacement of a tunnel vault rib

Циклическое повышение давления со стороны грунтового массива вызывает износ конструкций, повреждение обделки (крепи) и, как следствие, потенциально аварийные ситуации, характеризующиеся поступлением воды и грунтовых масс в ствол. Знакопеременный температурный режим с многократными циклами промерзания-оттаивания усугубляет условия эксплуатации конструкций. Данная проблема характерна для вентиляционных выработок, работающих на приток воздуха в холодное время года, не только в Северо-Западном регионе России (в частности, в Санкт-Петербурге), но и в других регионах с устойчивыми отрицательными температурами ниже -25°C .

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время для ремонта и усиления обделок существующих стволов шахтной вентиляции в Петербургском метрополитене используется технология устройства железобетонных рубашек, основанная на применении стандартных методов строительства. Данный метод предполагает устройство высокопрочной внутренней рубашки из монолитного железобетона с гидроизоляцией. К недостаткам такого решения следует отнести значительное количество технологических операций, длительные сроки выполнения работ, высокую

стоимость гидроизоляционных работ и отсутствие теплоизоляции, что может привести к повреждению железобетонной рубашки при промерзании обделки и повторного появления дефектов.

Для защиты обделки вертикальных выработок от промерзания применяются различные способы теплоизоляции, которые характеризуются многооперационностью, существенным уменьшением полезного сечения выработки и высокой стоимостью, такие как:

- установка устройств или оборудования принудительного обогрева (например, тепловентиляторы, греющие кабели и панели, инфракрасные источники);
- установка защитных устройств внутри стволов (конструктивное решение – съемные панели и несъемная опалубка);
- применение защитных (теплоизолирующих) материалов при ремонте стволов (растворы, смеси, напыляемые материалы).

Эксплуатационная надежность и безопасность объектов инфраструктуры метрополитена является приоритетной задачей, требующей постоянного внимания [2–4]. Не менее важным является увеличение продолжительности эксплуатации объектов в межремонтные периоды и снижение затрат на ремонт и эксплуатацию. Для решения указанных задач и минимизации негативного воздействия отрицательных температур на обделку вентиляционных стволов, с 2016 года Петербургским метрополитеном совместно с кафедрами «Тоннели и метрополитены» и «Инженерная химия и естествознание» Петербургского государственного университета путей сообщения проводятся исследования конструктивно-технологических решений по реновации вентиляционных стволов с использованием конструкционно-теплоизоляционных рубашек. Концепция предлагаемого конструктивно-технологического решения заключается в объединении функций усиления (железобетонная рубашка) и теплоизоляции в единую конструкцию на основе специальных видов бетона. Бетонирование рубашки осуществляется с одновременным заполнением ячеек тюбингов, что исключает трудоемкую и продолжительную операцию предварительного заполнения ячеек [12, 13]. Напыляемая гидроизоляция наносится на поверхность тюбингов до начала бетонирования.

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ многочисленных способов и вариантов расчетных схем [14, 15], а также применения различных видов бетонов, обладающих теплоизолирующими свойствами, позволил установить, что наиболее приемлемым вариантом является применение пеностеклобетона. При этом, необходимые параметры по теплоизоляционным свойствам рубашки из пеностеклобетона подбирались на основе расчетной математической модели (Рис. 2).

Расчетно-теоретические исследования показали, что для формирования теплоизоляционной обоймы внутри вентиляционных стволов метрополитена (для условий Санкт-Петербурга), необходимо применение материала со следующими

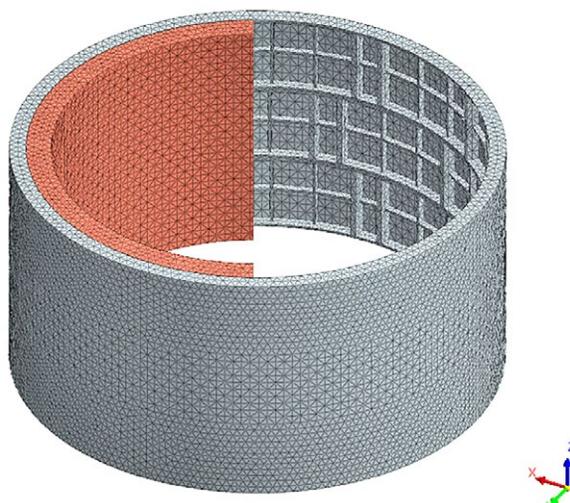


Рис. 2. Общий вид математической модели тубингов обделки с пеностеклобетонной рубашкой

Fig. 2. General view of the mathematical model of lining plates with foamed glass concrete insulation

техническими характеристиками: прочность на сжатие не менее 7,5 МПа; морозостойкость не менее F100; теплопроводность не более 0,2 Вт/(м·К); водонепроницаемость не менее W6.

В ходе дальнейшей работы был произведен подбор состава пеностеклобетона, удовлетворяющего приведенным выше показателям, и появилась возможность произвести экспериментальные исследования.

Процесс опытного заполнения теплоизоляционной обоймы и оценка теплоизоляционной способности выбранного состава пеностеклобетона проводились на специальной физической модели, изготовленной в натуральную величину. Моделировался участок вентиляционного ствола из чугунных тубингов наружным диаметром 5,49 м, на внутреннюю поверхность которых наносился слой напыляемой гидроизоляции, и в последующем осуществлялась установка арматурного каркаса. После монтажа температурных датчиков производилось бетонирование обоймы из пеностеклобетона.

Для исследований была разработана специальная климатическая установка (Рис. 3), позволяющая поддерживать температуру воздуха с внутренней стороны рубашки в диапазоне $-25...-30^{\circ}\text{C}$. Температура модели при различных уровнях температурных воздействий фиксировалась в разных точках по глубине – на внутренней поверхности рубашки, в уровне первого и второго ряда арматуры, в уровне ребер и спинки тубингов и за обделкой в грунтовом массиве.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

- 1) При задании температуры внутри камеры в пределах $-25...-30^{\circ}\text{C}$ промораживания тела рубашки не произошло при продолжительности воздействия 24 дня. Температура на контакте наружного контура обделки и обводненного грунта не опускалась до температуры замерзания воды.

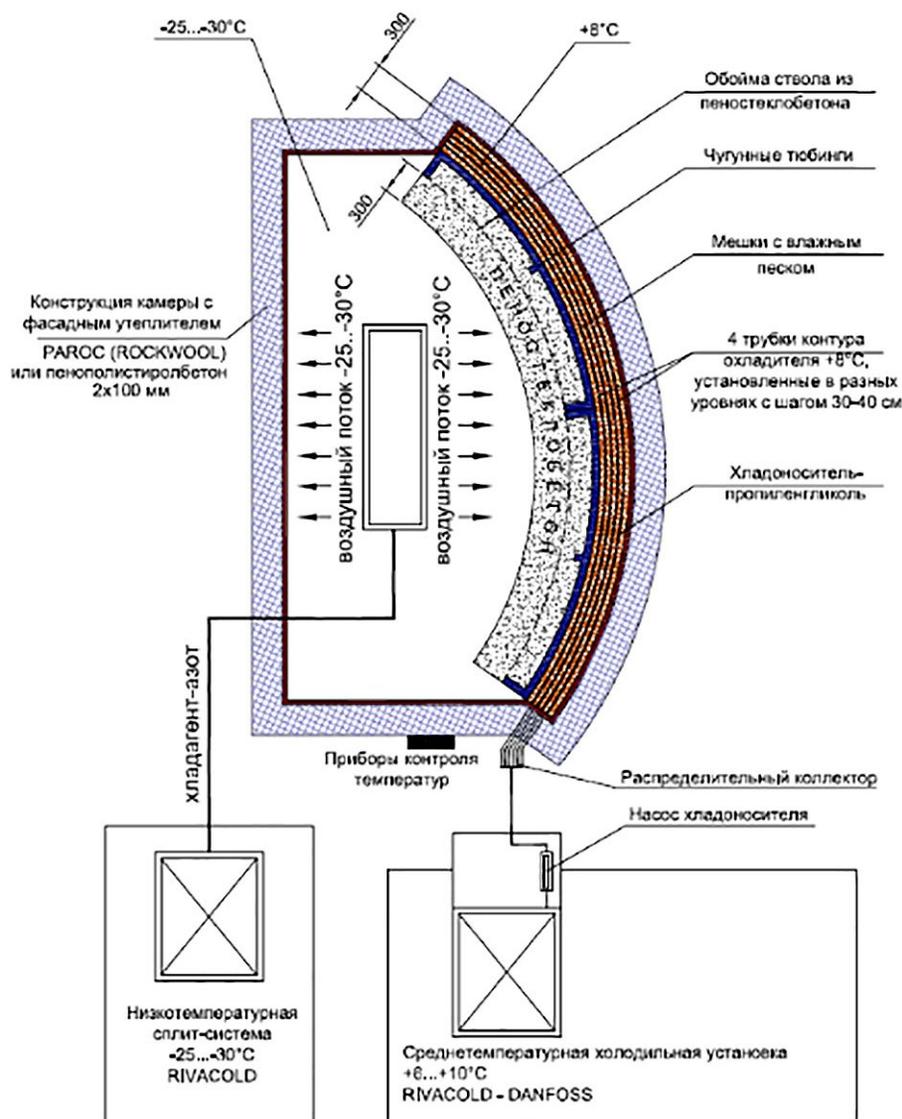


Рис. 3. План-схема размещения холодильных установок

Fig. 3. Layout of refrigeration units

- 2) Наиболее важным этапом в процессе решения задачи об исключении промораживания обделки вентиляционных стволов после ремонта стало внедрение технологии на действующем стволе вентиляционной шахты метрополитена.

На выбранном объекте, согласно, плану капитального ремонта, была создана конструкционно-теплоизоляционная рубашка из пеностеклобетона, смонтирована система мониторинга температур внутри ствола, за обделкой и в различных уровнях по глубине теплоизоляционной усиливающей рубашки.

Выполненные экспериментальные исследования, капитальный ремонт действующего опытного ствола и довольно продолжительный период мониторинга (более 3 лет) позволили подтвердить эффективность принятых конструктивно-технологических решений и сформулировать ряд требований

к производству работ по устройству теплоизоляционной рубашки. В частности, для повышения теплоизоляционной эффективности и увеличения скорости возведения конструкционно-теплоизоляционной рубашки – заменить арматурный каркас на дисперсное армирование с применением фибры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам дальнейших исследований разработан модифицированный состав пеностеклобетона с введенной в него щелочестойкой и огнестойкой фиброй на основе диоксида циркония. Состав защищен патентом № 2823634 Российской Федерации «Теплоизоляционный бетон» от 09.01.2024 [16]. Прочностные характеристики состава представлены в Табл.

Таблица. Прочностные характеристики модифицированного пеностеклобетона

Table. Strength parameters of modified foamed glass concrete

Средняя плотность бетона, кг/м ³	800–900
Прочность на сжатие, МПа:	
- через 24 часа	≥ 4,0
- через 48 часов	≥ 6,5
- через 72 часа	≥ 8,5
- через 7 суток	≥ 18,0
- через 28 суток	≥ 26,0
Класс по прочности на сжатие	≥ В20
Прочность на растяжение при изгибе, МПа:	
- через 28 суток	≥ 3,3
Морозостойкость, марка F ₁	≥ 300
Водонепроницаемость, марка W	≥ 6
Коэффициент теплопроводности λ, Вт/м·°С	≤ 0,15

Для подтверждения теплоизоляционных свойств пеностеклобетонной рубашки был выполнен термодинамический расчет, по результатам которого установлено, что промораживания чугунной обделки и грунта в заобделочном пространстве не происходит.

Конструктивно-технологическое решение перехода к без арматурной технологии с использованием модифицированного пеностеклобетона с фиброй, позволяет:

- 1) Сократить сроки выполнения работ по реновации вентиляционных шахт (в связи с отсутствием необходимости монтажа арматурного каркаса).
- 2) Улучшить теплоизоляционные характеристики обоймы (отрицательные температуры не передаются по стержням арматуры).

С учетом усовершенствованного состава пеностеклобетона и доработки технологии производства ремонтных работ, было начато проектирование капитального ремонта одной из действующих шахт метрополитена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных расчетно-аналитических исследований и реализованных работ в рамках реновации действующего ствола шахтной вентиляции Петербургского метрополитена удалось добиться исключения промерзания обделки. Разработанная конструкция усиливающей теплоизоляционной обоймы (теплоизоляционной рубашки) на основе пеностеклобетона способна полноценно выполнять заявленные функции и защищать обделку стволов вентиляционных шахт от промерзания. В свою очередь, с учетом качеств ремонтного материала, задача обеспечения долговечности и безопасной, бесперебойной эксплуатации объектов, задействованных в системе вентиляции подземных сооружений в условиях знакопеременных и экстремально низких температур, может быть решена не только на территории Северо-Западных регионов России.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудничная вентиляция: Справочник / под ред. К.З. Ушакова. М.: Недра, 1988.
2. Федеральный закон Российской Федерации № 384-ФЗ от 30 ноября 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Дата обращения: 25.05.2025. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902192610>
3. Федеральный закон Российской Федерации № 442-ФЗ от 29 декабря 2017 г. «О внеуличном транспорте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Дата обращения: 25.05.2025. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/556184650>
4. Постановление Правительства Санкт-Петербурга № 775 от 29 сентября 2020 г. «Об утверждении Правил технической эксплуатации Петербургского метрополитена». Дата обращения: 25.05.2025. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565880011>
5. Дашко Р.Э., Котюков П.В., Шидловская А.В. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 9–16. EDN: OUPFEZ
6. Дашко Р.Э., Котюков П.В. Инженерно-геологическое обеспечение эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 71–77. EDN: ROWCVD
7. Александрова О.Ю., Шидловская А.В. Влияние инженерно-геологических и геоэкологических условий на особенности деформаций и коррозионных

- процессов в транспортных тоннелях в Санкт-Петербурге // Записки Горного института. 2007. Т. 172. С. 74–77. EDN: ICJUKP
8. Шашкин А.Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. М.: Академическая наука – Геомаркетинг, 2014.
 9. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Подземные сооружения в условиях городской застройки на слабых грунтах // Развитие городов и геотехническое строительство. 2010. № 1. С. 1–10. EDN: SYGPQF
 10. Козин Е.Г., Тулина Н.В., Николаева Т.Н., Корвет Н.Г. Особенности инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации сооружений Санкт-Петербургского метрополитена. В кн.: Тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии в условиях рыночной экономики России. XI Толстихинские чтения. Тезисы докладов научно-методической конференции; Ноябрь 30 – декабрь 1, 2004; Санкт-Петербург. Санкт-Петербург, 2004.
 11. Бурин Д.Л., Козин Е.Г. Обеспечение безопасной эксплуатации обделки стволов вентиляционных шахт Петербургского метрополитена. В кн.: Межрегиональная научно-практическая конференция «Транспорт. Взгляд в будущее – TFV-24»; Ноябрь 7-8, 2024; Санкт-Петербург. Санкт-Петербург, 2024. С. 197–200. EDN: TJBATZ
 12. Konkov A., Sokornov A., Korolev K. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced section. In: International scientific Siberian transport forum TransSiberia–2021. Lecture Notes in Networks and Systems; 2022 March; Springer, Cham; 2022. doi: 10.1007/978-3-030-96380-4_62
 13. Патент РФ № 2655712 / 29.05.2018. Ледяев А.П., Кавказский В.Н., Чумов М.В., Сокорнов А.А. Способ реконструкции шахтного ствола с тубинговой крепью. EDN: KQYSIY
 14. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., и др. Численное исследование несущей способности слоистого материала // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 3. С. 16–21. doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-3-16-21 EDN: ZALLGP
 15. Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А. Обзор применения численных методов для моделирования и разрушения льда // Труды ВИАМ. 2020. № 8(90). С. 109–122. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122 EDN: WQNHTP
 16. Патент РФ № 2823634 / 26.07.2024. Соловьева В.Я., Степанова И.В., Соловьев Д.В., и др. Теплоизоляционный бетон. EDN: YIBVNW

REFERENCES

1. Ushakov KZ, editor. *Rudnichnaja ventiljacija: Spravochnik*. Moscow: Nedra; 1988. (In Russ.)
2. Federal Law of Russian Federation № 384-F3 of 30 November 2009. “Tehnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij”. Accessed: 25.05.2025. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/902192610> (In Russ.)
3. Federal Law of Russian Federation № 442-FZ of 29 December 2017 “O vneulichnom transporte i o vnesenii izmenenij v otdel’nye zakonodatel’nye akty Rossijskoj

- Federacii”. Accessed: 25.05.2025. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/556184650> (In Russ.)
4. Resolution of the Government of St. Petersburg № 775 of 29 September 2020 “Ob utverzhdenii Pravil tehniceskoi jekspluatacii Peterburgskogo metropolitena”. Accessed: 25.05.2025. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/565880011> (In Russ.)
 5. Dashko RE, Kotyukov PV, Shidlovskaya AV. Hydrogeological conditions effect on safety of underground space expansion during transport tunnel construction. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012;199:9–16. Accessed: 25.05.2025. Available from: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5812/3696> (In Russ.) EDN: OUPFEZ
 6. Dashko RE, Kotyukov PV. The engineering geological control of underground transport tunnels exploitation reliability in Saint Petersburg. *Zapiski Gornogo instituta*. 2011;190:71–77. (In Russ.) EDN: ROWCVD
 7. Aleksandrova OY, Shidlovskaya AV. Influence of engineering, geological and geo-ecological conditions on deformation and corrosion processes in transportation tunnels in St. Petersburg. *Zapiski Gornogo instituta*. 2007;172:74–77. (In Russ.) EDN: ICJUKP
 8. Shashkin AG. *Design of buildings and underground structures in complex engineering and geological conditions of St. Petersburg*. Moscow: Akademicheskaja nauka – Geomarketing; 2014. Accessed: 25.05.2025. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://geo-bookstore.ru/files/Shashkin-Moscow.pdf> (In Russ.)
 9. Ulickij VM, Shashkin AG. Underground structures in urban development conditions on soft soils. *Razvitie gorodov i geotehnicheskoe stroitel'stvo*. 2010;(1):1–10. (In Russ.) EDN: SYGPQF
 10. Kozin EG, Tulina NV, Nikolaeva TN, Korvet NG. Peculiarities of engineering and geological services in the construction and operation of the Saint Petersburg metropolitan area. In: *Trends and prospects for the development of hydrogeology and engineering geology in the spheres of the Russian market economy. XI Tolstihin lectures. Abstracts of the scientific and methodological conference; 2004 Nov 30 – Dec 1; St. Petersburg*. St. Petersburg, 2004. (In Russ.)
 11. Burin DL, Kozin EG. Obespechenie bezopasnoj jekspluatacii obdelki stvolov ventiljacionnyh shaht Peterburgskogo metropolitena. Mezhhregional'naja nauchno-prakticheskaja konferencija “Transport. Vzgljad v budushhee – TFV-24”; 2024 Nov 7-8; St. Petersburg. (In Russ.) St. Petersburg; 2024:197–200. EDN: TJBATZ
 12. Konkov A, Sokornov A, Korolev K. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced section. International scientific Siberian transport forum TransSiberia – 2021. Lecture Notes in Networks and Systems; 2022 March; Springer, Cham; 2022. doi: 10.1007/978-3-030-96380-4_62
 13. Patent RUS №2655712/ 29.05.2018. Ledjaev AP, Kavkazskij VN, Chumov MV, Sokornov AA. *Sposob rekonstrukcii shahtnogo stvola s tjubingovoj krep'ju*. (In Russ.) EDN: KQYSIY
 14. Oreshko EI, Erasov VS, Lashov OA, Podzhivotov NJu, Kachan DV. Numerical investigation of load-carrying capability of laminated material.

- Vse materialy. Jenciklopedicheskiy spravocnik. 2019;(3):16–21. (In Russ.)*
doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-3-16-21 EDN: ZALLGP
15. Grinevich DV, Buznik VM, Nuzhnyj GA. Review of numerical methods for simulation of the ice deformation and fracture. *Trudy VIAM. 2020;(8(90)):109–122. (In Russ.)* doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122 EDN: WQNHTP
16. Patent RUS №2823634/ 26.07.2024. Solov'eva VJa, Stepanova IV, Solov'ev DV, Filonov JuA, Kon'kov AN, Sokornov AA, Kozin EG. *Teploizoljacionnyj beton. (In Russ.)* EDN: YIBVNW

Сведения об авторах:

Козин Евгений Германович, канд. техн. наук, начальник;

eLibrary SPIN: 1576-6514;

E-mail: ns@metro.spb.ru

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор;

eLibrary SPIN: 5165-9488; Scopus ID: 57211346525;

E-mail: tunnels@pgups.ru

Бурин Дмитрий Леонидович, заместитель начальника;

E-mail: Burin.D@metro.spb.ru

Information about the authors:

Evgenii G. Kozin, Cand. Sci. (Engineering), Head;

eLibrary SPIN: 1576-6514;

E-mail: ns@metro.spb.ru

Aleksandr P. Ledjaev, Dr. Sci. (Engineering), professor;

eLibrary SPIN: 5165-9488; Scopus ID: 57211346525;

E-mail: tunnels@pgups.ru

Dmitrij L. Burin, Deputy Chief;

E-mail: Burin.D@metro.spb.ru