УДК 624.042.5

Математическое обоснование промерзания обделки шахтного ствола

Ю. Г. Барабанщиков[1], А. А. Сокорнов[2], А. Н. Коньков[2], Ю. А. Филонов[2], А. Л. Новиков[2], Е. Г. Козин[3]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
[3] ГУП «Петербургский метрополитен», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 28

Для цитирования: *Барабанщиков Ю. Г., Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Филонов Ю. А., Новиков А. Л., Козин Е. Г.* Математическое обоснование промерзания обделки шахтного ствола // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 789–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-789-800

Аннотация

Разработана конструкция утепления шахтного ствола пеностеклобетонной рубашкой, обеспечивающей непромерзание грунта в течение сезонного периода воздействия отрицательной температуры на внутреннюю поверхность пеностеклобетонной теплоизоляции. **Цель** данной статьи — получение математической зависимости температуры на наружной поверхности обделки шахтного ствола от времени действия отрицательной температуры воздуха в шахте и тепловых характеристик конструкции. **Методы:** аналитические решения задачи нестационарной теплопроводности для полубесконечного тела в комбинации с численными решениями методом конечных элементов системы, включающей в себя грунтовый массив, обделку шахтного ствола с пеностеклобетонной обоймой и нагрузку от конвекции (потока холодного воздуха). **Результаты:** получены аналитические формулы для расчета времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных или железобетонных тюбингов с рубашкой из пеностеклобетона. Построены соответствующие этим формулам номограммы для определения времени промерзания шахтных стволов в зависимости от толщины рубашки из пеностеклобетона и температуры воздуха. **Практическая значимость:** результаты исследования позволяют расширить область применения технологии капитального ремонта шахт с рубашкой из пеностеклобетона на другие регионы страны с учетом их климатических особенностей.

Ключевые слова: вентиляционные стволы, метрополитен, грунтовый массив, метод конечных элементов, пеностеклобетон

Введение

В настоящее время на линиях Петербургского метрополитена эксплуатируются 140 стволов вентиляционных шахт, 76 из которых являются станционными, остальные 64 — перегонными. Согласно имеющимся данным, 80 % всех стволов вентиляционных шахт Петербургского метрополитена находятся в режиме эксплуатации более 30 лет, из них 30 % — более 50 лет.

Вентиляционные стволы, расположенные на перегонах метрополитена, в зимний период работают в режиме притока свежего воздуха, что обуславливает одну из самых

острых проблем эксплуатации стволов вентиляционных шахт — промерзание строительной конструкции. Температура наружного воздуха в зимний период может опускаться до –25 °С и ниже, что приводит к промерзанию как обделки, так и грунтов по ее контуру.

Промерзание обводненных грунтов четвертичных отложений в заобделочном пространстве вызывает значительные дополнительные нагрузки на обделку от морозного пучения замерзающей воды. Как следствие, проявляются интенсивный износ конструкции обделки вентиляционного ствола, деформации и повреждения тюбингов вплоть до их разрушения и выпуска в ствол воды и грунтовых масс, то есть различные аварийные ситуации. Ухудшает условия работы конструкции и знакопеременный температурный режим, так как в течение зимнего периода промерзание-оттаивание обделки может проходить многократно.

Под действием знакопеременных температур разрушение обделки может происходить по-разному в зависимости от ее материала. Под действием расширяющегося льда чугунные тюбинги могут хрупко раскалываться на отдельные фрагменты, причем давление льда может быть настолько сильным, что тюбинги разрушаются не только по самому тонкому элементу конструкции (по спинке), но даже по кольцевым и радиальным бортам. Математическое обоснование этому процессу было приведено в [1]. При деформировании железобетонных тюбингов происходит разрушение бетона начиная с участков болтовых соединений, после чего куски бетона, как правило, не отделяются, а повисают на арматурном каркасе.

В результате этих процессов давление от расширяющегося льда снижается, после чего деформации обделки прекращаются или развиваются во времени циклически. Как следствие, подобные дефекты приводят к нарушению гидроизоляции обделки и к значительным водопритокам в тоннельные сооружения [2–4].

Явление промерзания заобделочного пространства с последующим обледенением существенно снижает параметры и качественные характеристики надежности и безопасности строительных конструкций. А скопления льда, образующиеся в пространстве шахты, представляют собой опасность для работников метрополитена [5–8].

В последние годы коллективом кафедры «Тоннели и метрополитены» при участии кафедр «Инженерная химия и естествознание», «Высшая математика» и ГУП «Петербургский метрополитен» были выполнены инновационные исследования в области создания конструктивно-теплоизоляционных рубашек из пеностеклобетона при капитальном ремонте вентиляционных шахт метрополитена [9–11]:

• на математических моделях определены требуемые параметры по теплопроводности и прочностным характеристикам пеностеклобетона для выполнения теплоизоляционной железобетонной рубашки (обоймы);

• произведен подбор составов пеностеклобетона, обеспечивающих функцию эффективной теплоизоляции с одновременным конструкционным усилением существующей обделки;

• на натурной физической модели исследована эффективность теплоизоляционной железобетонной рубашки и технология ее устройства;

• проведены натурные исследования (мониторинг температурного режима) комбинированной обделки ствола, обладающей теплоизоляционными свойствами, на опытном объекте — в стволе вентшахты ВШ-04.

Актуальным направлением развития технологии реновации обделок шахтных стволов

с применением пеностеклобетона является нахождение математической зависимости температуры на наружной поверхности обделки шахтного ствола от времени действия отрицательной температуры воздуха в шахте и тепловых характеристик конструкции. Практическим результатом применения такой зависимости является распространение данной технологии на другие регионы страны с учетом их климатических условий.

Цель работы достигается решением следующих задач:

• вывести формулу времени промерзания обделки с пеностеклобетонной рубашкой;

• уточнить коэффициент *B* по 3D МКЭ-модели шахты в Midas GTS NX;

• построить номограммы времени промерзания по толщине рубашки и температуре воздуха;

• оценить применение формулы и номограмм для разных климатических регионов и требований к утеплению.

Построение математической зависимости

Для вывода математических зависимостей рассмотрим принципиальную схему участка ствола (рис. 1). Материал обделки — чугунные или железобетонные тюбинги.

Теплотехнические характеристики материалов представлены в табл.

Приведенные значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости неоднородного слоя определялись по формулам:

$$\lambda_{\text{пр}} = \left(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2\right) / S, \quad (1)$$

$$c\gamma_{\text{пр}} = \left(c_1\gamma_1 S_1 + c_2\gamma_2 S_2\right) / S, \quad (2)$$

где S — суммарная площадь теплообмена неоднородного слоя, состоящего из элементов:

1 — материал тюбингов;

2 — пеностеклобетон;

S_i, λ_i, c_i, γ_i — соответственно площадь, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность каждого элемента.

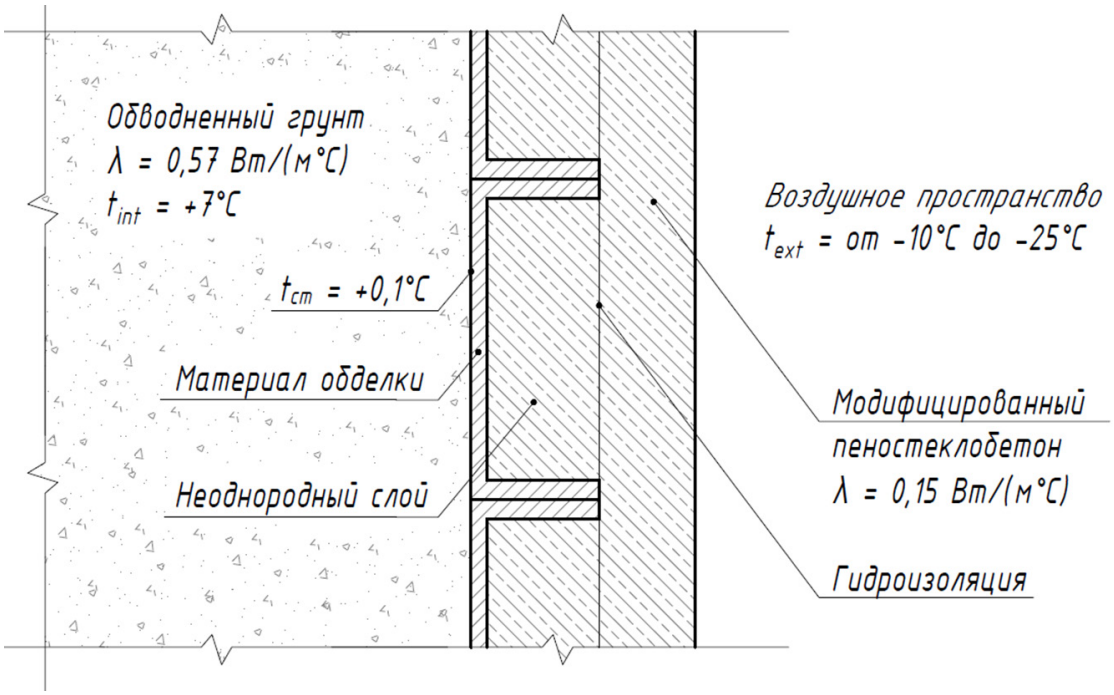


Рис. 1. Разбиение конструкции на расчетные слои

ТАБЛИЦА. Теплотехнические характеристики материалов

	Материал	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость, *c*, Дж/(кг·°С)	Плотность, γ, кг/м^3	Приведенная теплоемкость *c*γ, кДж/(м^3·°С)	Коэффициент температуропроводности материала *a*, м^2/сут.	Толщина слоя δ, м	Термическое сопротивление *R*, м^2·°С/Вт
1	Обводненный грунт (вода)	0,57	4 190	1000	4190	0,0118	–	–
2.1	Сборные чугунные тюбинги	70	540	7800	4190	1,4359	0,05	0,0007
2.2	Сборные железобетонные тюбинги	1,80	840	2500	2100	0,0741	0,17	0,09
3.1	Неоднородный слой (чугун и пеностеклобетон)	13,77	–	–	1578	0,7540	0,15	0,01
3.2	Неоднородный слой (ж/б и пеностеклобетон)	0,94	–	–	1497	0,0543	0,23	0,24
4	Гидроизоляция на основе полимочевины	0,21	120	1000	120	0,1512	0,003	0,01
5	Пеностеклобетон	0,15	840	1120	940	0,0138	0,3	2,00

Примечание: коэффициенты температуропроводности рассчитаны по формуле (7) с учетом суточного масштаба времени.

Согласно теории теплопроводности зависимость относительной избыточной температуры $\theta_{ст}$ на контакте «обделка — грунт» от времени в безразмерном виде:

$$\theta_{ст} = \theta_0 - B \cdot \sqrt{F_0}, \quad (3)$$

где θ_0 — относительная избыточная температура на контакте «обделка — грунт» в начальный момент времени $T_0 = 0$ сут, определяемая по формуле:

$$\theta_0 = 1/\alpha_{int} / \left(\Sigma R_i + 1/\alpha_{int} + 1/\alpha_{ext}\right), \quad (4)$$

где α_{int} — коэффициент теплоотдачи для условий грунта и свободной конвекции грунтовой воды, принят равным 60 Вт/(м^2·°С);

α_{ext} — коэффициент теплоотдачи на границе «воздух — пеностеклобетон», принят по СП 50.13330.2024 равным 23 Вт/(м²·ºС);

ΣR_i — суммарное термическое сопротивление всех слоев без учета внутреннего и наружного теплообмена, (м²·ºС)/Вт, при этом

$$R_i = \delta_i / \lambda_i, \quad (5)$$

где δ_i — толщина слоя конструкции, м;

λ_i — теплопроводность слоя конструкции, Вт/(м·ºС);

B — коэффициент теплообмена;

F_0 — безразмерный критерий Фурье, определяемый в общем виде по формуле:

$$F_0 = \alpha_т T / \delta^2, \quad (6)$$

где $\alpha_т$ — коэффициент температуропроводности конструкции (м²/сут.), который будем определять по материалу тюбинга, то есть:

$$\alpha_т = 86\,400 \cdot \lambda / (c\gamma), \quad (7)$$

где 86 400 — переводной коэффициент масштаба времени (количество секунд в одних сутках);

λ, c, γ — соответственно теплопроводность (Вт/(м·ºС)), удельная теплоемкость (Дж/(кг·ºС)) и плотность (кг/м³) слоя конструкции, расположенного со стороны грунта, то есть чугунного или железобетонного тюбинга;

T — время промерзания, сут;

δ — толщина конструкции, которая может быть представлена в виде эквивалентной толщины $\delta_{экв}$, то есть толщины эквивалентного однородного слоя, имеющего сопротивление теплопередаче, равного многослойной конструкции:

$$\delta_{экв} = \lambda \Sigma R_i. \quad (8)$$

После подстановки α и δ в формулу (6) форма критерия Фурье становится следующей:

$$F_0 = \frac{T}{\lambda c \gamma \left(\Sigma R_i\right)^2}. \quad (9)$$

В то же время относительная избыточная температура θ_0 на внутренней поверхности конструкции на момент ее остывания до температуры $t_{ст}$ = 0,1 ºС при времени T:

$$\theta_{ст} = \frac{\left(t_{ст} - t_{int}\right)}{\left(t_{int} - t_{ext}\right)}, \quad (10)$$

где t_{int} — расчетная температура обводненного грунта, равная +7 °С;

t_{ext} — расчетная температура наружного воздуха, принимаемая в расчетах переменной, — от –10 до –25 °С.

Выражая время промерзания в явном виде, после преобразования получаем итоговую формулу для построения номограммы:

$$T = \left(\left(\theta_0 - \theta_{ст}\right) / B\right)^2 \cdot \lambda c \gamma \left(\Sigma R_i\right)^2. \quad (11)$$

Формула (11) является инженерной интерпретацией классического решения задачи нестационарной теплопроводности для полубесконечного тела [12–14]. Единственным неопределенным параметром в формуле (11) является коэффициент B.

Найдем его с помощью экспериментов над численными моделями шахтных стволов с чугунной и железобетонной обделками.

Численные модели созданы в геотехническом программном комплексе Midas GTS NX. Объемные конечно-элементные модели включают в себя грунтовый массив, обделку из чугунных или железобетонных тюбингов (участок высотой 3 м) с заполнением ячеек пеностеклобетоном и монолитную пеностеклобетонную рубашку толщиной 300 мм.

Общий вид модели показан на рис. 2.

Расчетная температура обводненного грунта t_{int} = +7 °С задана инструментом Prescribed Temperature. Поток воздуха по внутренней

поверхности шахтного ствола с температурой t_{ext} от –10 до –25 °С задан инструментом Convection.

В численных моделях отражена фактическая конфигурация тюбингов для обделки наружным диаметром 6,0 м (типовая обделка шахтных стволов) для случая чугунных или железобетонных тюбингов. На рис. 3 показан общий вид групп конечных элементов, моделирующих тюбинги и рубашку.

Теплотехнические расчеты моделей запускались при установленной инструментом Convection температуре t_{ext} на период времени до 25 суток. Критерием промерзания являлось достижение температуры $t_{ст}$ = 0,1 ºС. На рис. 4 показаны изополя распределения температуры грунта на контакте с обделкой на 19-е сутки эксперимента с обделкой из чугунных тюбингов. Время промерзания T определено интерполяцией и составило 18,78 суток.

На основании последовательно выполняемых расчетов при разных значениях температуры удалось подобрать коэффициенты B в формуле (11) для случая обделки шахтных стволов из чугунных и железобетонных тюбингов.

Окончательные формулы для расчета времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных (12) или железобетонных (13) тюбингов с рубашкой из пеностеклобетона:

$$T = \left(\left(\theta_0 - \theta_{ст}\right)/6{,}1\right)^2 \cdot c_ч \gamma_ч \lambda_ч \left(\Sigma R_i\right)^2, \quad (12)$$

$$T = \left(\left(\theta_0 - \theta_{ст}\right)/0{,}9\right)^2 \cdot c_{жб} \gamma_{жб} \lambda_{жб} \left(\Sigma R_i\right)^2, \quad (13)$$

$$\theta_0 = 1/\alpha_{int} / \left(\Sigma R_i + 1/\alpha_{int} + 1/\alpha_{ext}\right),$$

$$R_i = \delta_i / \lambda_i.$$

По этим формулам были составлены номограммы для определения времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных (рис. 5) или железобетонных (рис. 6) тюбингов, в зависимости от толщины рубашки из пеностеклобетона и температуры воздуха.

Верификация математических зависимостей

Как видно из номограмм, для полного промерзания комбинированных обделок с толщиной рубашки из пеностеклобетона 300 мм требуется от 15 до 19 дней непрерывного

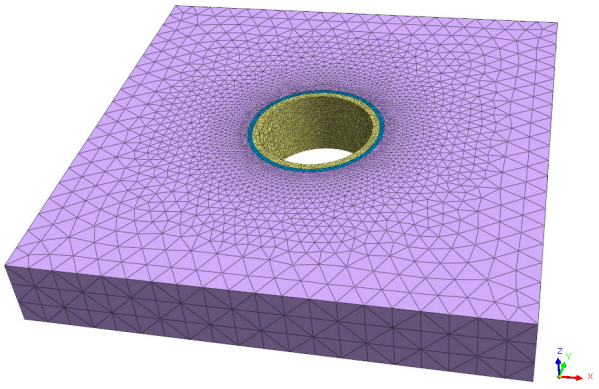


Рис. 2. Общий вид численной модели

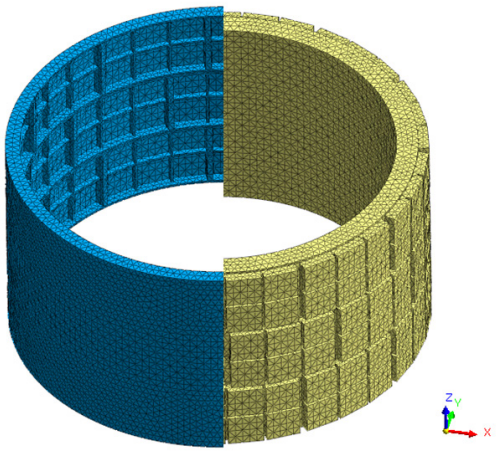


Рис. 3. Общий вид модели тюбингов и рубашки из пеностеклобетона

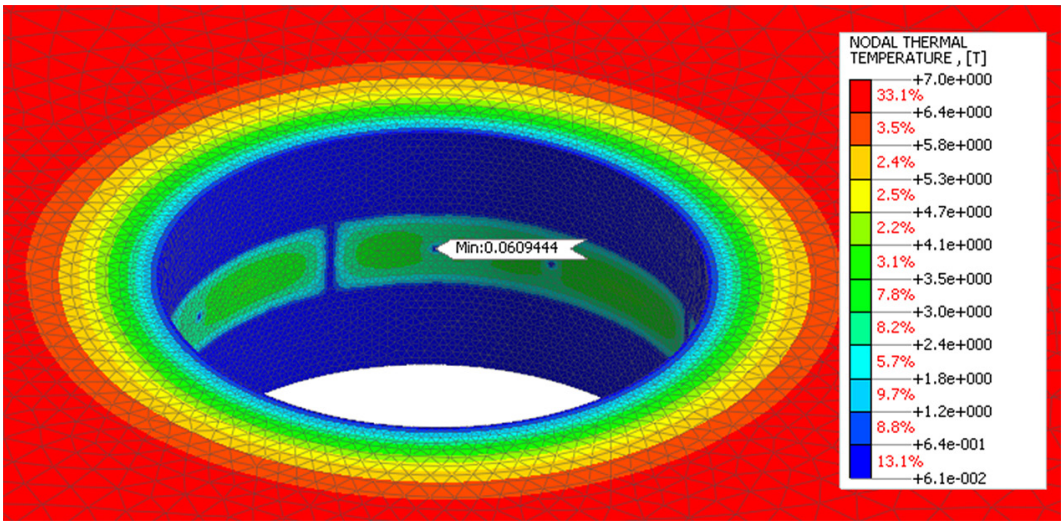


Рис. 4. Температура грунта на контакте с обделкой на 19-е сутки эксперимента с обделкой из чугунных тюбингов. Время промерзания $T = 18{,}78$ суток

заморозка с температурой –25 °С, что является статистически маловероятным для условий Санкт-Петербурга.

Построенные математические зависимости подтверждаются экспериментом, выполненном в 2017 году на физической модели участка ствола с чугунной обделкой и рубашкой из пеностеклобетона толщиной 300 мм. Если реализовать интерполяцию графика опускания температуры на контакте «обделка — грунт» (рис. 7), то полное промерзание ствола будет достигнуто примерно на 18–19-е сутки эксперимента, что соответствует номограмме, приведенной на рис. 5.

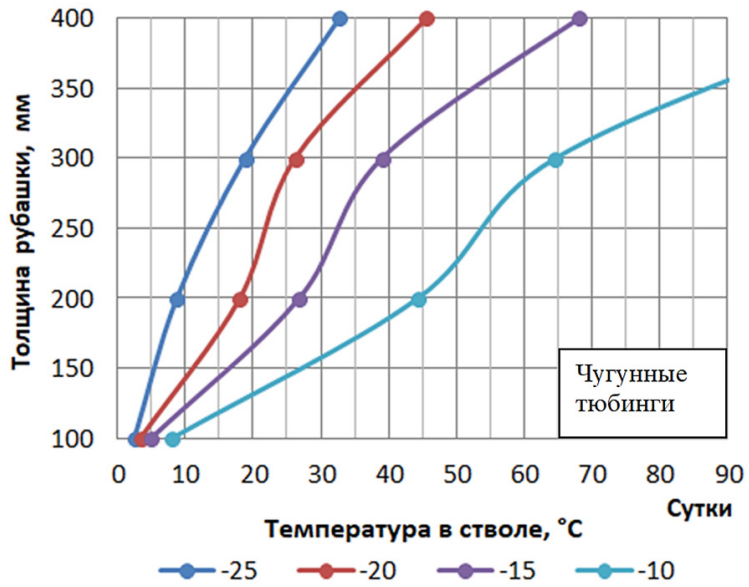


Рис. 5. Номограмма для определения времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из чугунных тюбингов

Также построенные математические зависимости подтверждаются результатами мониторинга реального объекта — вентиляционной шахты № 4 (ВШ-04), оснащенной системой мониторинга инженерных конструкций (СМИК). На рис. 8 показана диаграмма изменения температуры в стволе ВШ-04 за период с 03.12.2021 по 14.01.2022. Эта диаграмма была выбрана по причине относительно стабильной отрицательной температуры воздуха, составляющей в среднем –7 °С. Из диаграммы видно, что за указанный период температура на контакте

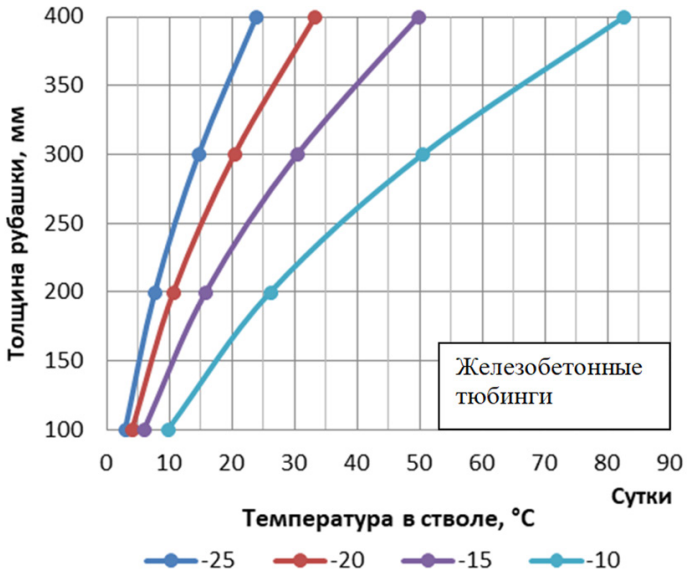


Рис. 6. Номограмма для определения времени промерзания шахтных стволов, выполненных с обделкой из железобетонных тюбингов

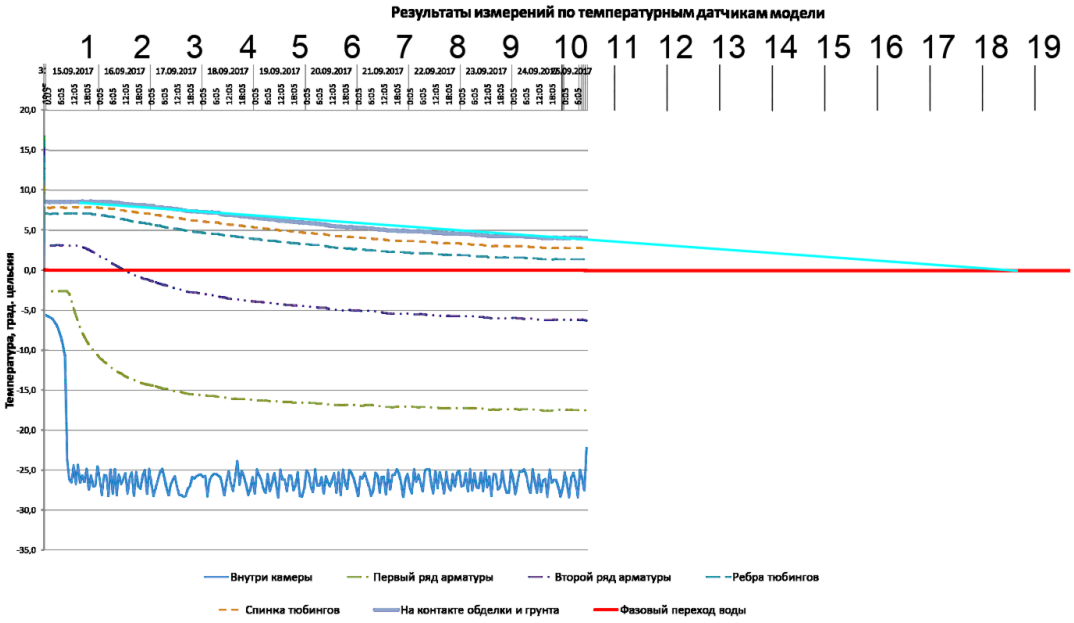


Рис. 7. Интерполяция графика опускания температуры на контакте «обделка — грунт» в физической модели 2017 года

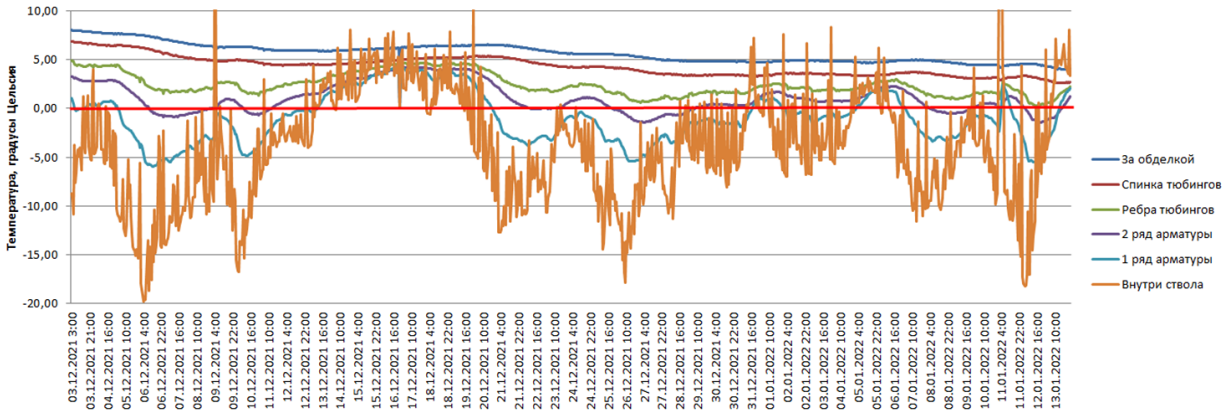


Рис. 8. Диаграмма изменения температуры в стволе ВШ-04 за период с 03.12.2021 по 14.01.2022

«обделка — грунт» опустилась примерно на 2 °С. Таким образом, полное промерзание ствола было бы достигнуто примерно через три месяца стабильного похолодания с данной температурой, что соответствует расчету по формуле (12) (94,6 суток) и тем самым подтверждает ее предсказательную способность.

Заключение

Разработана и подтверждена математическая зависимость температуры на наружной поверхности обделки шахтного ствола от времени действия отрицательной температуры воздуха в шахте и тепловых характеристик конструкции. Практическим результатом применения такой зависимости является распространение данной технологии на другие регионы страны с учетом их климатических условий.

Список источников

1. Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена / А. А. Сокорнов [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 2. С. 457–469.

2. Инструкция по устройству гидроизоляции сборных железобетонных и чугунных обделок тоннелей метрополитена закрытого способа работ / ЦНИИС, Метрогипротранс, Мосметрострой, Главтоннельметрострой (утверждена 25.12.1984). М., 1984. 77 с.

3. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. М.: Студент, 2012. 543 с.

4. Пиянзин В. Я., Дианов В. М. Опыт восстановления гидроизоляции автодорожного тоннеля // Транспорт Российской Федерации. СПб., 2008. № 2 (15). С. 60–61.

5. Инструкция по безопасной эксплуатации оснований и строительных конструкций объектов инфраструктуры Петербургского метрополитена // ГУП «Петербургский метрополитен». СПб., 2020. 146 с.

6. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Свод правил по проектированию и строительству (дата введения: 21.08.2003) // ФГУП «КТБ ЖБ». М.: Госстрой России, 2004. 26 с.

7. ГОСТ Р 57208-2016. Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации: межгосударственный стандарт (дата введения: 02.11.2016) / АО «Кодекс». М.: Стандартинформ, 2017. 31 с.

8. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: межгосударственный стандарт (дата введения: 10.04.2024) // АО «Кодекс». М.: Стандартинформ, 2024. 69 с.

9. 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

10. Реновация вентиляционных стволов с устройством конструктивно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона / А. Н. Коньков [и др.] // Подземные горизонты. 2019. № 22. С. 56–58.

11. Бурин Д. Л., Новиков А. Л., Филонов Ю. А. Защита от промерзания вентиляционных стволов метрополитена с устройством конструкционно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона // Метро и тоннели. 2021. № 4. С. 21–23.

12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

13. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. М.: Наука, 1964. 488 с.

14. Кошмаров Ю. А., Башкирцев М. П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле: учебник. М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. 445 с.

Дата поступления: 16.06.2026
Решение о публикации: 11.07.2026

Контактная информация:
БАРАБАНЩИКОВ Юрий Германович — доктор техн. наук, профессор; ugb@mail.ru
СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru
КОНЬКОВ Александр Николаевич — кандидат техн. наук, доцент; anlonkov@pgupstm.ru
НОВИКОВ Анатолий Леонидович — старший преподаватель; snoval@yandex.ru
ФИЛОНОВ Юрий Александрович — кандидат техн. наук, заведующий лабораторией; parad11@mail.ru
КОЗИН Евгений Германович — кандидат техн. наук, начальник ГУП «Петербургский метрополитен»; kegleeev@gmail.ru

Mathematical Justification of the Mine Shaft Lining Freezing

Yu. G. Barabanshchikov[1], A. A. Sokornov[2], A. N. Konkov[2], A. L. Novikov[2], Yu. A. Filonov[2], E. G. Kozin[3]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia
[2] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia
[3] St. Petersburg Metro SUE, 28 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190013, Russia

For citation: *Barabanshchikov Yu. G., Sokornov A. A., Konkov A. N., Novikov A. L., Filonov Yu. A., Kozin E. G.* Mathematical Justification of the Mine Shaft Lining Freezing // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 789–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-789-800 (In Russian)

Abstract

A design has been developed for insulating the shaft with a foam-reinforced concrete jacket, which ensures that the soil does not freeze during the seasonal period of exposure to negative temperatures on the inner surface of the foam-reinforced concrete insulation. **The objective** of this article is to obtain a mathematical dependence of the temperature on the outer surface of the mine shaft lining on the duration of negative

air temperature in the mine and the thermal characteristics of the structure. **Methods:** analytical solutions to the problem of unsteady thermal conductivity for a semi-infinite body in combination with numerical solutions by the finite element method of a system that includes a ground massive, a mine shaft lining with a foam-glass jacket and a load from convection (cold air flow). **Results:** analytical formulas have been obtained for calculating the freezing time of mine shafts lined with cast iron or reinforced concrete tubings with a jacket made of foam glass concrete. Nomograms corresponding to these formulas have been constructed to determine the freezing time of mine shafts, depending on the foam-reinforced concrete jacket thickness and the air temperature. **Practical significance:** the results of the study make it possible to expand the scope of the technology of capital repairs of mines with a foam-reinforced concrete jacket to other regions of the country, taking into account their climatic characteristics.

Keywords: ventilation shafts, underground, ground massive, finite element method, foam glass concrete

References

1. Sokornov A. A., et al. Matematicheskoe modelirovanie termodinamicheskikh protsessov v ventilyatsionnykh shakhtakh metropolitena [Mathematical Modeling of Thermodynamic Processes in Ventilation Shafts of the Metro], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg Transport University]*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 457–469. (In Russian)

2. Instruktsiya po ustroystvu gidroizolyatsii sbornykh zhelezobetonnykh i chugunnykh obdelok tonneley metropolitena zakrytogo sposoba rabot [Instruction on the Installation of Waterproofing for Prefabricated Reinforced Concrete and Cast-Iron Linings of Metro Tunnels Constructed by the Closed Method], approved on December 25, 1984, Moscow, TsNIIS [Central Research Institute of Transport Construction], Metrogiprotrans [Metrogiprotrans Institute], Mosmetrostroy [Moscow Metro Construction], Glavtonnelmetrostroy [Main Directorate for Tunnel and Metro Construction], 1984, 77 p. (In Russian)

3. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mekhanika podzemnykh sooruzheniy i konstruktsiy krepey [Mechanics of Underground Structures and Support Systems], Moscow, Student, 2012, 543 p. (In Russian)

4. Piyanzin V. Ya., Dianov V. M. Opyt vosstanovleniya gidroizolyatsii avtodorozhnogo tonnelya [Experience in Restoring Waterproofing of a Highway Tunnel], *Transport Rossijskoj Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, St. Petersburg, 2008, no. 2 (15), pp. 60–61. (In Russian)

5. Instruktsiya po bezopasnoy ekspluatatsii osnovaniy i stroitelnykh konstruktsiy obyektov infrastruktury Peterburgskogo metropolitena [Instruction on the Safe Operation of Foundations and Building Structures of Infrastructure Facilities of the Petersburg Metro], St. Petersburg, GUP “Peterburgskiy metropoliten” [State Unitary Enterprise “Petersburg Metro”], 2020, 146 p. (In Russian)

6. SP 13-102-2003. Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitelnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu [Rules for the Inspection of Load-Bearing Building Structures of Buildings and Facilities. Set of Rules for Design and Construction]. Effective from August 21, 2003. Moscow, FGUP “KTB ZhB” [Federal State Unitary Enterprise “Scientific and Technical Bureau for Reinforced Concrete”], Gosstroy Rossii [State Committee for Construction of the Russian Federation], 2004, 26 p. (In Russian)

7. GOST R 57208-2016. Tonneli i metropoliteny. Pravila obsledovaniya i ustraneniya defektov i povrezhdeniy pri ekspluatatsii: mezhgosudarstvennyj standart [Tunnels and Metros. Rules for Inspection and Elimination of Defects and Damages during Operation: Interstate Standard]. Effective from November 2, 2016. Moscow, AO “Kodeks” [JSC Kodeks], Standartinform, 2017, 31 p. (In Russian)

8. GOST 31937-2024. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya: mezhgosudarstvennyj standart [Buildings and Structures. Rules for Inspection and Monitoring

of Technical Condition: Interstate Standard]. Effective from April 10, 2024. Moscow, AO “Kodeks” [JSC “Kodeks”], Standartinform, 2024, 69 p. (In Russian)

9. 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.

10. Kon'kov A. N., et al. Renovatsiya ventilyatsionnykh stvolov s ustroystvom konstruktivno-teploizolyatsionnoy rubashki iz penosteklobetona [Renovation of Ventilation Shafts with the Installation of a Structural and Thermal Insulation Jacket Made of Foam Glass Concrete], *Podzemnye gorizonty [Underground Horizons]*, 2019, no. 22, pp. 56–58. (In Russian)

11. Burin D. L., Novikov A. L., Filonov Yu. A. Zashchita ot promerzaniya ventilyatsionnykh stvolov metropolitena s ustroystvom konstruktsionno-teploizolyatsionnoy rubashki iz penosteklobetona [Protection against Freezing of Metro Ventilation Shafts with the Installation of a Structural and Thermal Insulation Jacket Made of Foam Glass Concrete], *Metro i tonneli [Metro and Tunnels]*, 2021, no. 4, pp. 21–23. (In Russian)

12. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of Thermal Conductivity], Moscow, Vysshaya shkola [Higher School], 1967, 600 p. (In Russian)

13. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Teploprovodnost' tverdykh tel [Conduction of Heat in Solids] (translated from English), Moscow, Nauka, 1964, 488 p. (In Russian)

14. Koshmarov Yu. A., Bashkirtsev M. P. Termodinamika i teploperedacha v pozharnom dele: uchebnik [Thermodynamics and Heat Transfer in Fire Engineering: A Textbook], Moscow, Vysshaya inzhenernaya pozharno-tekhnicheskaya shkola MVD SSSR [Higher Engineering Fire-Technical School of the USSR Ministry of Internal Affairs], 1987, 445 p. (In Russian)

Received: June 16, 2026
Accepted: July 11, 2026

Author’s information:
Yurij G. BARABANSHCHIKOV — PhD in Engineering, Professor, ugb@mail.ru
Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer; scarlunch@mail.ru
Alexander N. KONʹKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; anlonkov@pgupstm.ru
Anatoly L. NOVIKOV — Senior Lecturer; snoval@yandex.ru
Yurij A. FILONOV — PhD in Engineering, Head of the Laboratory; parad11@mail.ru
Evgenij G. KOZIN — PhD in Engineering, Head of the St. Petersburg Metro SUE; kegleeev@gmail.ru