

УДК 624.042.5

Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена

А. А. Сокольников¹, А. Н. Коньков¹, Ю. А. Филонов¹, Е. Г. Козин²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² ГУП «Петербургский метрополитен», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 28

Для цитирования: Сокольников А. А., Коньков А. Н., Филонов Ю. А., Козин Е. Г. Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 457–469. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469

Аннотация

Цель: разработать рекомендации для выполнения теплотехнических расчетов при капитальном ремонте вентиляционных шахт с созданием внутренних теплоизоляционно-конструкционных рубашек из пеностеклобетона. **Методы:** математическое моделирование методом Метрогипротранса обделки шахтного ствола в упругой среде на заданные перемещения от расширяющегося льда; математическое моделирование методом конечных элементов системы, включающей в себя грунтовый массив, обделку шахтного ствола и нагрузку от конвекции (потока холодного воздуха). **Результаты.** Установлены критерии риска разрушения обделки вентиляционных стволов при промерзании водонасыщенного грунта в заобделочном пространстве. Установлено, что разрушение чугунной обделки от расширения льда зависит от величины отпора грунта и размеров пустот в заобделочном пространстве, но не от глубины расположения рассматриваемого сечения. Выполнена оценка влияния термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур. Установлено, что в результате весьма широкого изменения теплотехнических характеристик среды температура в заобделочном пространстве в ходе термодинамических расчетов меняется незначительно — в пределах 1 °С, и решающее значение в распределении тепла играют теплотехнические характеристики пеностеклобетонной рубашки. **Практическая значимость:** результаты исследования могут применяться во время обследования вентиляционных шахт метрополитена, а также служить алгоритмом проведения термодинамического расчета при составлении проекта капитального ремонта шахт с рубашкой из пеностеклобетона.

Ключевые слова: вентиляционные стволы, метрополитен, давление, напряжения, конвекция, грунтовый массив, метод Метрогипротранса, метод конечных элементов, пеностеклобетон.

Введение

Одна из самых острых проблем, связанная с эксплуатационной надежностью вентиляционных шахт Петербургского метрополитена — промерзание обделки. Температура воздуха в зимний период может опускаться до -25 °C и ниже, что приводит (в режиме приточной вен-

тиляции) к промерзанию как обделки, так и грунтов по ее контуру. При замерзании грунтов и воды в заобделочном пространстве обделка испытывает существенные дополнительные нагрузки. Это приводит к значительному износу конструкций вентствол, деформациям и повреждению

тубингов, вплоть до их разрушения и выпуска в ствол воды и грунтовых масс, то есть к аварийным ситуациям.

За последние годы коллективом кафедры «Тоннели и метрополитены» при участии кафедр «Инженерная химия и естествознание», «Высшая математика» ГУП «Петербургский метрополитен» были выполнены инновационные исследования в области создания конструктивно-теплоизоляционных рубашек из пеностеклобетона при капитальном ремонте вентиляционных шахт метрополитена [1–3].

При этом на данный момент не установлены критерии риска разрушения обделки, то есть не получен ответ на вопрос влияния величины пустот в заобделочном пространстве на напряженно-деформированное состояние обделки при заполнении их водой с последующим промерзанием. Также актуальным вопросом является отсутствие единого алгоритма теплотехнических расчетов при обосновании проекта капитального ремонта вентиляционных стволов.

Настоящая работа посвящена разработке рекомендаций для выполнения теплотехнических расчетов при капитальном ремонте вентиляционных шахт с созданием внутренних теплоизоляционно-конструкционных рубашек из пеностеклобетона. В процессе исследования были поставлены следующие задачи:

1) установить критерии риска разрушения обделки вентиляционных стволов при промерзании водонасыщенного грунта в заобделочном пространстве;

2) оценить влияние термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур.

Моделирование процесса превращения воды в заобделочном пространстве в лед и последующее силовое взаимодействие льда с обделкой является сложным многофакторным процессом. С учетом того, что в настоящее время не разработано стандартизированной методики моделирования деформации и разрушения льда [4, 5], учет его совместной работы с обделкой и грунтом является серьезным научным вопросом, открывающим простор для разработки гипотез и теорий. Вместе с тем можно попытаться выполнить моделирование не столько силового взаимодействия льда с обделкой, сколько последствий этого взаимодействия через совместные деформации льда и обделки. Из термодинамики известно, что при переходе в твердое состояние объем воды увеличивается примерно на 10 % (за счет образования кристаллической структуры льда). Из наблюдений установлено, что водяные линзы способны создавать давление, приводящее к смещению обделки внутрь ствола (рис. 1).



Рис. 1. Разрушение обделок стволов вследствие замерзания воды за обделкой

Математическая модель, позволяющая описать этот процесс, была создана в программном комплексе РК-6 (учебная версия) [6], основанном на методе Метрогипротранса (другие названия: Hyperstatic Reaction Method, HRM). Этот метод относится к классу численных методов анализа, в которых напряженное состояние конструкции, представляемой в виде одномерных стержневых элементов, может быть определено через интегральные показатели. 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 Δx_i , Δy_i , $\Delta \varphi_i$ и узловых нагрузок p_i и q_i . В матричной форме уравнения метода принимают вид:

$$RV + P = 0,$$

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. Подробно суть метода изложена в [7, 8]. Метод Метрогипротранса доказал свою эффективность при расчете обделок тоннелей кругового очертания, в том числе и шахт метрополитена.

В исследовании была построена стержневая модель тубинговой обделки шахт-

ного ствола наружным диаметром 6 м. Поперечные сечения обделки задавались приведенными прямоугольными, согласно методике, изложенной в [9]. Обделка шахтного ствола находится в условиях равностороннего горизонтального горного давления. Для создания несимметричного нагружения (максимально невыгодного расчетного случая) в обделке задавалось смещение одного из узлов модели (рис. 2). В модели была выполнена серия расчетов на разную величину смещения: 5, 10, 15 и 20 мм для линз льда толщиной 50, 100, 150 и 200 мм соответственно. Эти расчеты были выполнены при трех значениях коэффициента упругого отпора грунта в заобделочном пространстве: 20 000, 10 000 и 5000 т/м³, что соответствует характеристикам твердых протерозойских глин, моренных отложений и слабых водонасыщенных ледниковых отложений.

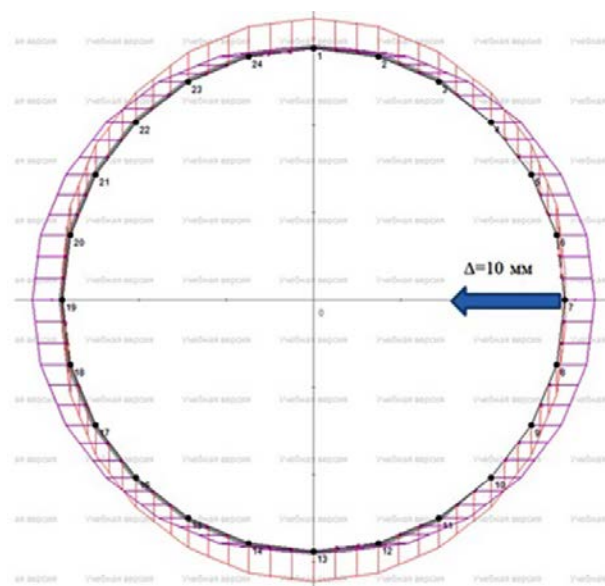


Рис. 2. Расчетная схема обделки шахтного ствола в программном комплексе РК-6 (учебная версия)

В качестве примера в таблице 1 представлены результаты расчета в программе РК-6 «Учебная версия» на смещение 10 мм (от линзы льда за обделкой толщиной 100 мм) при коэффициенте упругого отпора грунта 20 000 т/м³.

ТАБЛИЦА 1. Эпюры внутренних усилий и перемещений

<p>Изгибающие моменты; $M_{\max} = 84,39 \text{ тм}$</p>	<p>Нормальные силы; $N_{\max} = 175,65 \text{ т}$</p>
<p>Поперечные силы; $Q_{\max} = 78,66 \text{ т}$</p>	<p>Перемещения; $U_{\max} = 0,010 \text{ м}$</p>

В результате каждого расчета были определены максимальные значения, возникающих в обделке напряжений по следующей формуле:

$$\sigma = \left(\frac{M}{W} + \frac{N}{A} \right) \cdot k_k,$$

где σ — максимальные напряжения в тюбинговой обделке;

M и N — максимальный изгибающий момент и максимальная нормальная сила в приведенном сечении соответственно;

W и A — момент сопротивления и площадь поперечного сечения приведенного сечения соответственно;

k_k — коэффициент концентрации напряжений в тюбинговой обделке, принимаемый равным 2 [9].

Диаграмма зависимости максимальных напряжений в обделке от толщины линзы воды за обделкой представлены на рисунке 3. На этом же рисунке горизонтальными линиями показаны предельные значения напряжений для серого чугуна марок СЧ20, СЧ25 и СЧ30 (в соответствии с ГОСТ 1412-85).

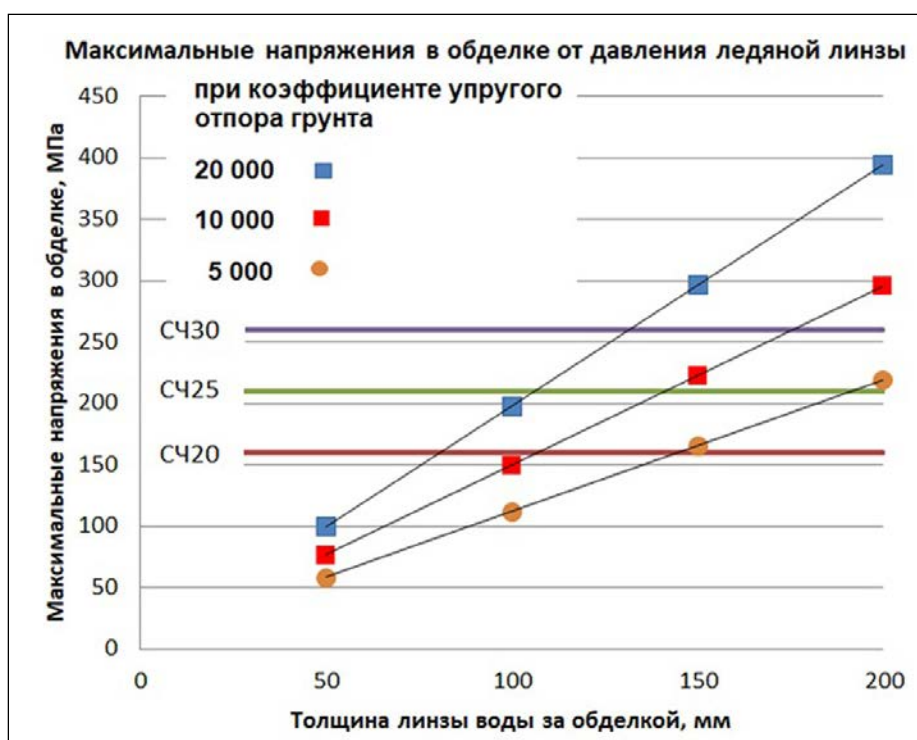


Рис. 3. Диаграмма зависимости максимальных напряжений в обделке от толщины линзы воды за обделкой

На диаграмме хорошо видны линейные зависимости между напряжениями и толщинами водяных линз. Также можно сделать вывод, что при уменьшении упругого отпора грунта также уменьшаются и максимальные напряжения в месте заданного перемещения обдел-

ки. И если в условиях протерозойских глин линзы воды толщиной 150 мм в заобделочном пространстве представляют опасность даже для чугуна марки СЧ30, то в слабых грунтах четвертичных отложений образование льда из водяной линзы толщиной 200 мм не вызовет

разрушения обделки из чугуна этой же марки. Представленные результаты могут служить критериями для анализа риска при обнаружении пустот в заобделочном пространстве и указывать на необходимость выполнения ремонтных работ с нагнетанием цементных составов за обделку либо с устройством теплоизоляционной рубашки.

Важно отметить, что расчеты на данной модели были выполнены и при разных величинах горизонтального горного давления: 30, 50 и 70 т/м², соответствующих заложению рассматриваемого сечения обделки на глубине 30, 50 и 70 м при коэффициенте бокового давления 0,5 и усредненном объемном весе грунта 2 т/м³. При этом вклад такого существенного изменения равностороннего обжатия обделки на ее максимальные напряжения, вызванные воздействием льда, оказался в пределах 2%. Это означает, что разрушения обделки от давления льда в заобделочном пространстве могут проявляться на любой глубине и будут зависеть в первую очередь от величины отпора грунта.

Для оценки влияния термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур была построена конечноэлементная модель в расчетном 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 [10–14].

Грунтовый массив и расположенная в нем конструкция были разбиты на сеть объемных конечных элементов, соединенных между собой в узлах. На боковых границах массива были установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений. На рисунках 4 и 5 представлены элементы модели: чугунная тубинговая обделка шахтного ствола и рубашка из пеностеклобетона.

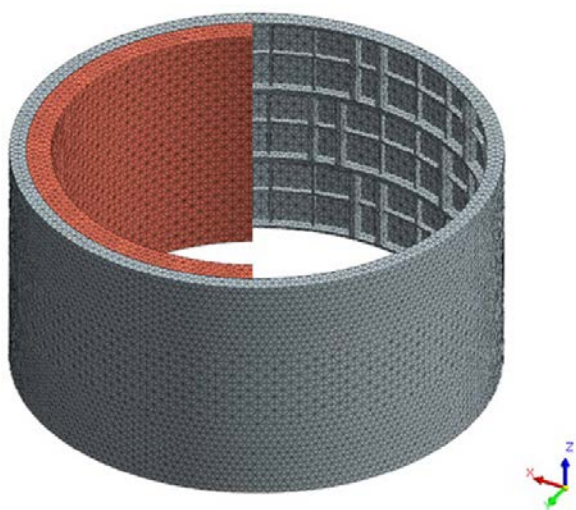


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной модели чугунной тубинговой обделки шахтного ствола с рубашкой из пеностеклобетона

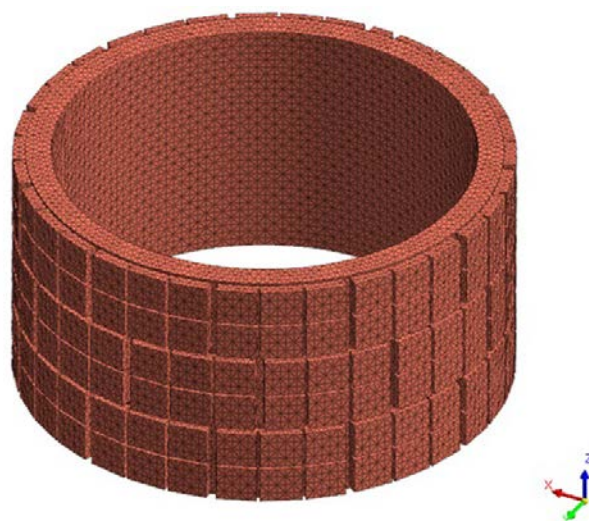


Рис. 5. Общий вид конечно-элементной модели рубашки из пеностеклобетона

Стадийность расчета задавалась включением в работу температурных нагрузок. На первом этапе расчета всем элементам системы присваивалось начальное значение температуры $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующее температуре обводненного грунта в заобделочном пространстве. На втором этапе по внутренней грани пеностеклобетонной обделки активировалась конвекционная нагрузка (обдув), которая характеризуется суммарным коэффициентом теплоотдачи на границе «воздух — поверхность тела» в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и принимается равным $\alpha = 23\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

Интенсивность конвекционной нагрузки задавалась переменной во времени,

для чего был построен график перепадов температуры воздуха. Анализ температур воздуха в Санкт-Петербурге за период с 2005 по 2017 год [15] показал, что в течении зимних месяцев температура может понизиться до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ на период до одной недели, а в весенний период до 3–4 раз иметь знакопеременный режим. Поэтому на графике (рисунок 6) был смоделирован следующий перепад температуры:

- 1–4-е сутки: повышение температуры от $+7$ до $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 4–10-е сутки: плавное, а затем резкое похолодание до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 10–17-е сутки: продолжительные заморозки при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 17–20-е сутки: оттепель до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

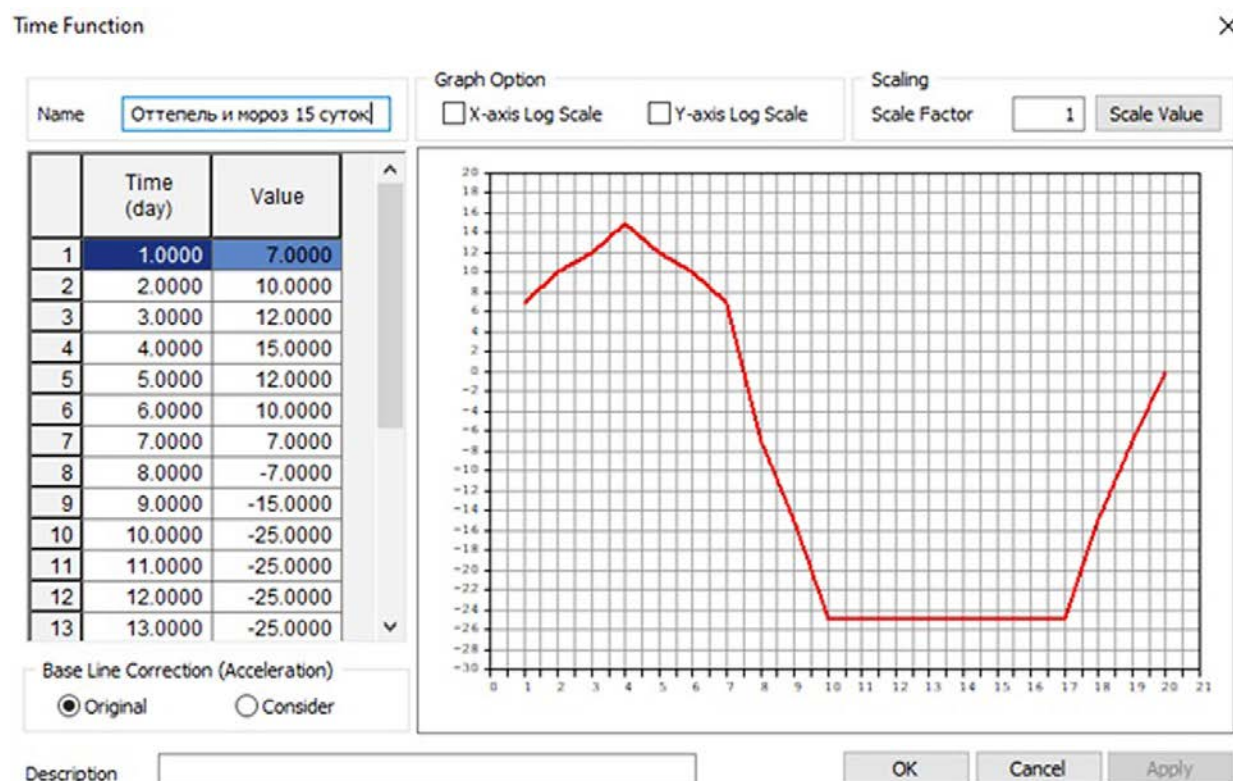


Рис. 6. График перепада температуры воздуха

Для выполнения термодинамических расчетов конечным элементам системы присваивались две характеристики: коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), и удельная теплоемкость C , Дж/(т·°С).

Теплотехнические характеристики чугуна:

— коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 70 \text{ Вт/(м·°С)};$$

— удельная теплоемкость,

$$C = 540\,000 \text{ Дж/(т·°С)}.$$

Теплотехнические характеристики модифицированного пеностеклобетона (принимались для двух составов):

— коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м·°С)} \text{ и } \lambda = 0,2 \text{ Вт/(м·°С)};$$

— удельная теплоемкость,

$$C = 840\,000 \text{ Дж/(т·°С)}.$$

Теплотехнические характеристики грунта принимались разными. Всего было выполнено три эксперимента с разными значениями коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости заобделочной среды.

В эксперименте № 1 материалу за обделкой ствола присваивались теплотехнические характеристики воды в соответствии с ОДМ 218.2.061-2015 «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов». Таким образом, рассматривался случай, при котором за обделкой образуются

пустоты, заполненные водой. Вода обладает низкой теплопроводностью, но большой теплоемкостью. Минимальная температура на контакте «обделка — грунт» была зафиксирована на 18-е сутки эксперимента (табл. 2) и составила от +1,51 до –0,07 °С в зависимости от теплопроводности пеностеклобетона. Можно сделать вывод, что промерзания среды заобделочного пространства не наступило, поскольку критическая температура среды составляет –1 °С [15].

В эксперименте № 2 материалу за обделкой ствола присваивались теплотехнические характеристики влажного суглинка в соответствии с СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». В сравнении с водой теплопроводность влажного грунта так же высока, как и низка его теплоемкость. Минимальная температура на контакте «обделка — грунт» на 18-е сутки эксперимента (табл. 2) составила от +2,19 до +0,78 °С. Результаты экспериментов № 1 и 2 при разных значениях коэффициента теплопроводности пеностеклобетона отличаются между собой на схожую величину ~0,7 °С, что можно считать несущественным. Допустимо сделать вывод, что для проведения термодинамических расчетов принципиальная разница в выборе материала (грунт или вода) отсутствует.

ТАБЛИЦА 2. Результаты термодинамических экспериментов

№	Материал заобделочной среды	Коэффициент теплопроводности среды λ , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость среды C , Дж/(т·°С)	Температура в среде на контакте с обделкой (°С) при коэффициенте $\lambda_{п}$ теплопроводности пеностеклобетона $\lambda_{п}$, Вт/(м·°С)	
				$\lambda_{п} = 0,15$	$\lambda_{п} = 0,2$
1	Вода	0,57	4 190 000	+1,51	–0,07
2	Влажный суглинок	1,57	1 760 000	+2,19	+0,78
3	Средние значения	1,00	3 000 000	+2,06	+0,61

В эксперименте № 3 выбор средних значений привел к увеличению температуры в заобделочном пространстве примерно на 0,5 °С по сравнению с экспериментом № 1.

Эксперименты показали, что в результате весьма широкого изменения теплотехнических характеристик среды температура в заобделочном пространстве меняется несущественно, в пределах 1 °С. Таким образом, решающее значение в распределении тепла играют теплотехнические характеристики пеностеклобетонной рубашки.

На рисунках 7–9 представлены типовые изополя распределения температур в пеностеклобетонной рубашке, обделке и грунтовом массиве на 17–18-е сутки эксперимента. Следует отметить тот факт, что наибольшие потери тепла из массива происходят на контакте с бортами обделки, где имеется наибольшая концентрация чугуна, который очень хорошо проводит тепло. Вместе с тем интенсивность такой теплопотери составляет всего 0,3 °С (рис. 9).

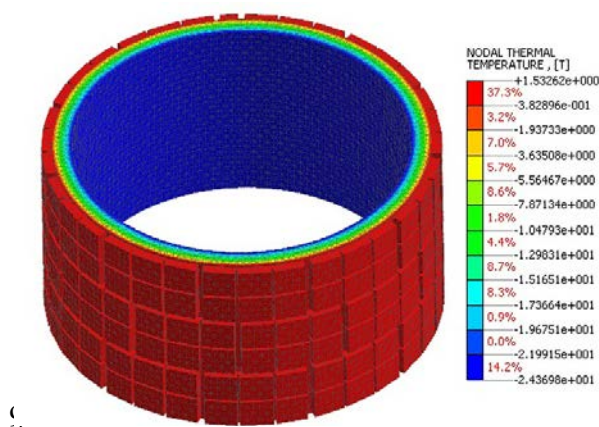


Рис. 7. Изополя распределения температуры в пеностеклобетонной рубашке на 17-е сутки эксперимента (от -24,37 до +1,53 °С)

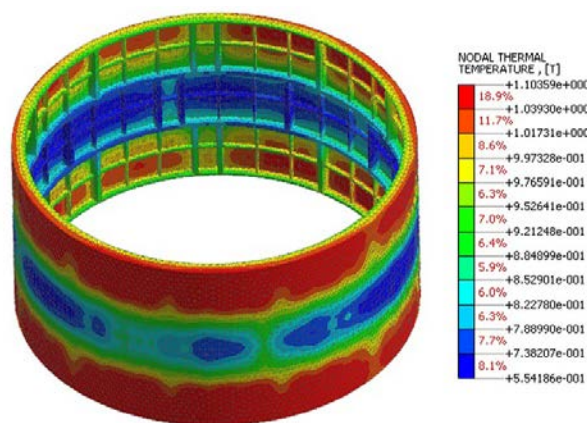


Рис. 8. Изополя распределения температуры в чугунной обделке на 18-е сутки эксперимента (от +0,55 до +1,10 °С)

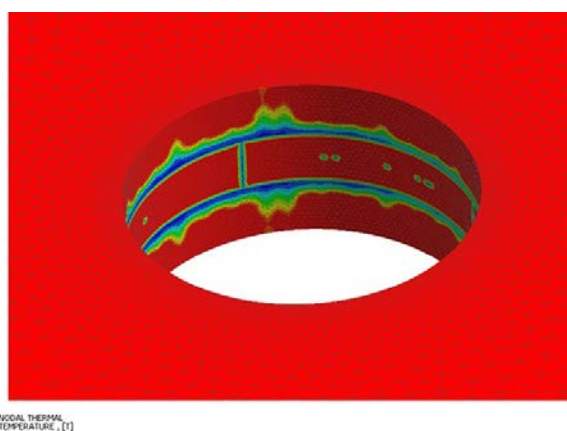


Рис. 9. Изополя распределения температуры в грунтовом массиве на 18-е сутки эксперимента (от -0,78 до > +1,0 °С)

В результате выполненного исследования были установлены критерии риска разрушения обделки вентиляционных стволов при промерзании водонасыщенного грунта в заобделочном пространстве. Было установлено, что разрушение чугунной обделки от расширения льда зависит от величины отпора грунта и размеров пустот в заобделочном пространстве, но не от глубины расположения рассматриваемого сечения.

Также была выполнена оценка влияния термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур. Было установлено, что в результате весьма широкого изменения теплотехнических характеристик среды температура в заобделочном пространстве в ходе термодинамических расчетов меняется несущественно, в пределах 1 °С, и решающее значение в распределении тепла играют теплотехнические характеристики пеностеклобетонной рубашки.

Библиографический список

1. Kozin E. G., Burin D. L., Ledyayev A. P., et al. Ventilation shafts freezing protection under the influence of negative temperatures // *Transportation soil engineering in cold regions. Proceedings of transoilcold 2019*. 2020. P. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53.
2. Коньков А. Н., Филонов Ю. А., Новиков А. Л. и др. Реновация вентиляционных стволов с устройством конструктивно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона // *Подземные горизонты*. 2019. № 22. С. 56–58.
3. Бурин Д. Л., Новиков А. Л., Филонов Ю. А. Защита от промерзания вентиляционных стволов метрополитена с устройством конструктивно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона // *Метро и тоннели*. 2021. № 4. С. 21–23.
4. Гриневич Д. В., Бузник В. М., Нужный Г. А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-chislennyh-metodov-dlya-modelirovaniya-deformatsii-i-razrusheniya-lda>.
5. Сорокин К. Э., Бывальцев П. М., Аксенов А. А. и др. Численное моделирование обледенения в программном комплексе FlowVision // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12, вып. 1. С. 83–96. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-83-96
6. Лянда А. А. Мичурина Т. А., Назарова Т. В. Программа РК-6 (учебная версия), раздел «Справка» [Программа для ЭВМ]. СПб.: Ленметрогипротранс, 2000.
7. 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. P. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002
8. Do N. A., Dias D., Oreste P., 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. P. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583
9. 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*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 568–576.
10. Ledyayev A., Kavkazskiy 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*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 28–37.
11. Osvaldo P. M. Vitali, Tarcisio B. Celestino, Antonio Bobet. Construction strategies for a NATM

tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002

12. 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 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123

13. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B. et al. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahiti, Finland // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119770>

14. Gang Wei, Feifan Feng, Chengbao Hu, 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. P. 1547–1564. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010

15. Ледяев А. П., Филонов Ю. А., Коньков А. Н. и др. Подготовка и проведение научно-исследовательских работ по технологии реновации обделок вентстволов с применением пеностеклобетона: технический отчет, СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017.

Дата поступления: 13.04.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

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

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент; ankonkov@yandex.ru

ФИЛОНОВ Юрий Александрович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией кафедры «Тоннели и метрополитены»; parad11@mail.ru

КОЗИН Евгений Германович — канд. техн. наук, начальник ГУП «Петербургский метрополитен»; kegleev@gmail.ru

Mathematical modeling of thermodynamic processes in subway ventilation shafts

A. A. Sokornov¹, A. N. Konkov¹, Yu. A. Filonov¹, E. G. Kozin²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² St. Petersburg Metro SUE, 28, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

For citation: Sokornov A. A., Konkov A. N., Filonov Yu. A., Kozin E. G. Mathematical modeling of thermodynamic processes in subway ventilation shafts // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2, P. 457–469. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469

Abstract

Objective: To develop recommendations for performing thermal engineering calculations during the ventilation shafts renovation with the creation of internal thermal insulation made of foam glass concrete. **Methods:** Mathematical modeling by the Metrogiprotrans method of the shaft lining in an elastic medium for specified movements from expanding ice; mathematical modeling by the finite elements method of a system including a ground massive, shaft lining and a load from convection (cold air flow). **Results:** The criteria for the risk of the ventilation shafts lining destruction during freezing of water-saturated soil behind the lining have been established. It has been established that the destruction of cast-iron lining from the ice expansion depends on the amount of soil resistance and the size of voids behind the lining, but not on the depth of the location of the section under consideration.

An influence assessment of the soil thermodynamic characteristics during the ventilation shafts operation in conditions of alternating temperatures has been performed. It was found that as a result of a very wide change in the thermal characteristics of the medium, the temperature behind the lining during thermodynamic calculations changes insignificantly — within 1 °C, and the thermal characteristics of the foam glass concrete layer play a decisive role in heat distribution. **Practical importance:** The results of the study can be used during the inspection of subway ventilation shafts, as well as an algorithm for conducting thermodynamic calculations for projecting shafts renovation with an insulation made of foam glass concrete.

Keywords: ventilation shafts, subway, pressure, stresses, convection, ground massive, Metrogiprotrans method, finite element method, foam glass concrete.

References

1. Kozin E. G., Burin D. L., Ledyayev A. P., et al. Ventilation shafts freezing protection under the influence of negative temperatures // *Transportation soil engineering in cold regions. Proceedings of transoilcold 2019*. 2020. P. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53.
2. Kon'kov A. N., Filonov Ju. A., Novikov A. L. i dr. Renovacija ventiljacionnyh stvolov s ustrojstvom konstruktivno-teploizoljacionnoj rubashki iz penosteklobetona // *Podzemnye gorizonty*. 2019. № 22. S. 56–58. (In Russian)
3. Burin D. L., Novikov A. L., Filonov Ju. A. Zashchita ot promerzaniya ventiljacionnyh stvolov metropolitena s ustrojstvom konstrukcionno-teploizoljacionnoj rubashki iz penosteklobetona // *Metro i tonneli*. 2021. № 4. S. 21–23. (In Russian)
4. Grinevich D. V., Buznik V. M., Nuzhnyj G. A. Obzor primeneniya chislennyh metodov dlja modelirovaniya deformacii i razrusheniya l'da // *Trudy VIAM*. 2020. № 8 (90). [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-chislennyh-metodov-dlya-modelirovaniya-deformatsii-i-razrusheniya-lda>. (In Russian)
5. Sorokin K. Je., Byval'cev P. M., Aksenov A. A. i dr. Chislennoe modelirovanie obledeneniya v programmnom komplekse FlowVision // *Komp'yuternye issledovanija i modelirovanie*. 2020. T. 12, vyp. 1. S. 83–96. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-83-96 (In Russian)
6. Ljanda A. A. Michurina T. A., Nazarova T. V. Programma RK-6 (uchebnaja versija), razdel «Spravka» [Programma dlja JeVM]. SPb.: Lenmetrogirotrans, 2000. (In Russian)
7. 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. P. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002
8. Do N. A., Dias D., Oreste P., 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. P. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583
9. 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*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 568–576.
10. Ledyayev A., Kavkazskiy 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*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 28–37.
11. Osvaldo P. M. Vitali, Tarcisio B. Celestino, Antonio Bobet. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002
12. 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 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123

13. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B. et al. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119770>

14. Gang Wei, Feifan Feng, Chengbao Hu, 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. P. 1547–1564. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010

15. Ledjaev A. P., Filonov Ju. A., Kon'kov A. N. i dr. Podgotovka i provedenie nauchno-issledovatel'skih rabot po tehnologii renovacii obdelok ventstvolov s primeneniem penosteklobetona: tehničeskij otčet, SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2017. (In Russian)

Received: 13.04.2024

Accepted: 13.05.2024

Author's information:

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

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering,
Associate Professor;
ankonkov@yandex.ru

Yury A. FILONOV — PhD in Engineering,
Head of “Tunnels and Subways”
department laboratory;

parad11@mail.ru

Evgeniy G. KOZIN — PhD in Engineering,
Head of St. Petersburg Metro SUE;

kegleev@gmail.ru