



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>

УДК 624



### Исследование термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями

С. Г. Гендлер<sup>1</sup>  , М. С. Крюкова<sup>1</sup>   , Е. Л. Алферова<sup>2</sup>  

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт горного дела СО РАН им. Н. А. Чинакала, г. Новосибирск, Российская Федерация

 s215068@stud.spmi.ru

#### Аннотация

Актуальность проблемы термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитена заключается в существенной разнице температур воздуха городов России и городами зарубежных стран. Данная температурная разница определяет и закономерности формирования аэротермодинамических параметров воздушной среды, которые необходимо учитывать при выборе способов обеспечения нормативных климатических параметров воздуха. Исследование, представленное в статье, проводилось с целью установления на основе экспериментальных данных закономерностей протекания аэротермодинамических процессов для последующей разработки рекомендаций по нормированию параметров воздушной среды в тоннелях метрополитена (однопутных и двухпутных), расположенных на разной глубине заложения. Основные задачи сводятся к определению факторов, оказывающих влияние на установление распределения температур (влажностей) и закономерностей их изменения, проведение инструментальных измерений распределения температур (влажностей) воздуха по длине исследуемых участков перегонных тоннелей как при отсутствии поездов, так и при их движении с различной интенсивностью; разработке предложений по использованию выявленных закономерностей для обеспечения нормативных параметров воздушной среды. Идея статьи состоит в том, что в качестве основы для выбора технических решений по совершенствованию систем вентиляции метрополитенов следует принимать выявленные особенности формирования аэротермодинамических процессов, зависящих от конструктивных параметров перегонных тоннелей и глубины их заложения. На основе выполненных экспериментальных исследований были выявлены закономерности формирования вентиляционных и тепловых режимов однопутных, двухпутных тоннелей и участка сопряжения и предложены мероприятия по совершенствованию вентиляционного и теплового режимов, обеспечивающих нормативные климатические условия. В частности, было установлено, что в однопутных тоннелях глубокого заложения тепловой режим определяется наличием циркуляционных контуров между соседними станциями, которые возникают в результате поршневого эффекта, и тепловыделениями от движущихся поездов; отличием циркуляционных контуров, сформировавшихся в подземных сооружениях мелкого заложения однопутного типа, является наличие плотной аэродинамической связи с поверхностью. Тем самым подземные сооружения мелкого заложения насыщаются поверхностным воздухом, который поступает на станции и в тоннели по пешеходным путям и наклонным ходам; в подземных сооружениях двухпутного типа при отсутствии движения подвижных составов характер изменения температуры воздуха по длине перегона определялся количеством теплоты, которая была аккумулирована грунтом в период движения поездов. Во время движения теплота, выделяемая поездами, движущимися навстречу друг другу при практическом отсутствии поршневого эффекта, равномерно распределяется по длине перегона. Это обуславливает постоянную температуру воздуха в тоннелях за исключениями участков, непосредственно прилегающих к станции, где в период торможения и остановки поездов количество продуцируемой ими теплоты максимально, соответственно, температура тоннельного воздуха в пристанционных выработках увеличивается на 2–3 °С в сравнении с температурой на перегонах. На участках, включающих два типа подземных сооружений, возможный рост температуры воздуха на станции, прилегающей к однопутным тоннелям, связан с образованием циркуляционных контуров между участком сопряжения разных типов конструкции тоннелей и станции, прилегающей к ним. Также разработаны рекомендации по нормализации аэротермодинамического режима для рассмотренных типов тоннелей: при установленной возможности превышения в летнее время температурой воздуха нормативных параметров (значений) необходимо предусмотреть или резерв по его расходу, или его охлаждение в сбойках, прилегающих к станциям. Для повышения температуры воздуха могут быть использованы организационные, аэродинамические и теплотехнические методы.

**Ключевые слова**

метрополитен, тоннели, однопутные тоннели, двухпутные тоннели, эксплуатация тоннелей, вентиляция тоннелей, схемы проветривания тоннелей, вентиляционный режим, тепловой режим

**Для цитирования**

Gendler S. G., Kryukova M. S., Alferova E. L. Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):250–262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>

**SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Research paper

**Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels**

S. G. Gendler<sup>1</sup>  , M. S. Kryukova<sup>1</sup>   , E. L. Alferova<sup>2</sup>  

<sup>1</sup> *Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation*

<sup>2</sup> *N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

 [s215068@stud.spmi.ru](mailto:s215068@stud.spmi.ru)

**Abstract**

The study of thermodynamic parameters in the air environment of subway lines is of particular relevance due to the substantial differences in air temperatures between Russian cities and those abroad. These temperature variations influence the formation of aerothermodynamic characteristics, which must be considered when selecting methods to ensure compliance with standard climatic parameters in subway systems. The objective of the study presented in this article was to identify, based on experimental data, the patterns governing aerothermodynamic processes, with the aim of providing recommendations for the standardization of air environment parameters in subway tunnels (both single- and double-track) located at different depths. The primary tasks of the research involved identifying the factors influencing the distribution and variation of temperature and humidity, conducting instrumental measurements of temperature and humidity distribution along the length of the transit tunnel sections under investigation, both in the absence of trains and during varying intensities of train movement. Proposals were then developed to apply the identified patterns in maintaining standard air parameters. The article posits that the selection of technical solutions for improving subway ventilation systems should be based on the unique features of aerothermodynamic processes, which depend on the structural characteristics of the transit tunnels and their depth. Experimental studies revealed the patterns governing the formation of ventilation and thermal regimes in single-track and double-track tunnels, as well as at junction sections, and provided recommendations for optimizing ventilation and thermal regimes to ensure compliance with climatic standards. Specifically, the study found that in deep single-track tunnels, the thermal regime is influenced by the presence of circulation loops between adjacent stations, created by the piston effect and the heat emissions from moving trains. Circulation loops in shallow single-track tunnels, by contrast, are characterized by strong aerodynamic connections with the surface, as surface air enters the stations and tunnels via pedestrian walkways and inclined passages. In double-track underground structures, in the absence of train movement, the variation in air temperature along the length of the transit tunnel is determined by the amount of heat accumulated in the surrounding ground during periods of train operation. When trains are in motion, the heat emitted by trains moving in opposite directions is evenly distributed along the tunnel, due to the near absence of a piston effect, resulting in a stable air temperature throughout the tunnel. However, the sections adjacent to stations experience localized increases in air temperature due to the maximum heat generated during braking and train stops, with tunnel air temperatures in these sections rising by 2–3 °C compared to those in the transit sections. In sections where both single-track and double-track tunnels are present, a potential rise in air temperature at the station adjacent to single-track tunnels is associated with the formation of circulation loops between the junction of different tunnel types and the station itself. Recommendations for normalizing the aerothermodynamic regime in the various tunnel types studied include provisions for mitigating potential summer air temperature increases above the standard levels by either increasing air flow or cooling the air in cross passages adjacent to stations. Methods for increasing air temperature may include organizational, aerodynamic, and heat engineering techniques.

**Keywords**

subway, tunnels, single-track tunnels, double-track tunnels, tunnel operation, tunnel ventilation, ventilation schemes, ventilation regime, thermal regime

**For citation**

Gendler S. G., Kryukova M. S., Alferova E. L. Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):250–262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>



### Введение

В настоящее время в России работают метрополитены в семи крупных городах. Каждый из метрополитенов обладает своей спецификой с части конструктивного исполнения, технологических подходов при сооружении и эксплуатации, инженерного обеспечения функционирования, включая системы вентиляции (табл. 1).

Как следует из табл. 1, подавляющее большинство линий метрополитенов состоит из однопутных тоннелей как глубокого, так и мелкого заложения. Вместе в тем в последние годы на метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга началось сооружение двухпутных тоннелей, чему способствовало развитие современных строительных геотехнологий на основе тоннельных механизированных проходческих щитов (ТМПК) [1]. Применение ТМПК позволяет осуществлять сооружение двухпутных тоннелей даже в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга [2].

Перспективы использования двухпутных тоннелей доказаны многолетним периодом их эксплуатации во многих мегаполисах мира. Как свидетельствуют публикации [3], даже в условиях жаркого климата проектные решения по вентиляции двухпутных тоннелей дают возможность обеспечить при их эксплуатации более комфортные условия по термодинамическим параметрам воздуха по сравнению с их однопутными аналогами.

В России тоннели с двумя путями в одном поперечном сечении благополучно эксплуатируются в Москве и Санкт-Петербурге. В будущем рассматривается проект создания двухпутных перегонов в Новосибирске и Екатеринбурге.

Данные исследований [4, 5] свидетельствуют о том, что к числу главных факторов, формирующих аэротермодинамические характеристики воздушной среды в тоннелях, относятся: метеорологические условия наружного воздуха (табл. 2); геометрические параметры трассы тоннеля, влияющие на энергетические затраты

Таблица 1

Характеристика метрополитенов России [составлено авторами]

№ п/п	Город	Количество станций, шт.	Состав линий метрополитена				Системы обеспечения НПВС	
			Линии с однопутными тоннелями		Линии с двухпутными тоннелями		Вентиляция	Прогрев (охлаждение)
			Протяженность, км	Глубина заложения, м	Протяженность, км	Глубина заложения, м		
1	Москва	306	~1010	~60	~11,57	~17–46	Да	Нет (Да)
2	Санкт-Петербург	72	~114	~70	~10,94	~10–68	Да	Нет (Да)
3	Нижний Новгород	16	~22	~10	–	–	Да	Да (Да)
4	Казань	11	~16,9	~10	–	–	Да	Нет (Нет)
5	Самара	10	~11,6	~20	–	–	Да	Да (Да)
6	Екатеринбург	9	~13,8	20	–	–	Да	Да (Да)
7	Новосибирск	13	~15,9	10	–	–	Да	Да (Да)

Таблица 2

Климатические условия в городах России, где эксплуатируется метрополитен [составлено авторами]

№ п/п	Город	Температуры атмосферного воздуха	
		Среднегодовая температура, °С	Температура ср. зимняя / ср. летняя / ср. январская / ср. июльская °С
1	Москва	7,00	–7,5 / 20,3 / –5,5 / 20,5
2	Санкт-Петербург	6,75	–6,75 / 19,17 / –4,5 / 19,5
3	Нижний Новгород	5,88	–11,75 / 19,67 / –8,5 / 20
4	Казань	5,25	–15,5 / 20 / –10 / 20,5
5	Самара	7,08	–13,25 / 7,08 / –9 / 22
6	Екатеринбург	4,08	–18,75 / 18,5 / –10,5 / 20
7	Новосибирск	2,67	–29,5 / 17,67 / –13,5 / 19
8	Мадрид	17,42	18,25 / 28 / 7 / 30,5
9	Рим	18,29	10,17 / 27,83 / 7,5 / 29
10	Лондон	13,29	13,25 / 20,16 / 6,5 / 21,5
11	Турин	13,71	10,25 / 22,67 / 5 / 24
12	Пекин	13,46	–4,25 / 26,33 / –2 / 27,5



на движение составов метрополитена; параметры движения поездов: скорость и интенсивность (парность, т.е. количество пар поездов в течение часа), глубина расположения относительно поверхности, тип перегонных тоннелей (однопутные или двухпутные), схема проветривания, наличие на перегонах между станциями дополнительных выработок (сбоек между однопутными тоннелями, вентиляционных сооружений для обеспечения подачи воздуха и т.п.).

В табл. 2 позиции 8–12 иллюстрируют разницу между температурами воздуха в городах России, где расположены метрополитены, и городами зарубежных стран, в которых этот вид транспорта получил значительное развитие.

Суровый климат России существенно влияет на характеристики аэротермодинамики атмосферного воздуха, что необходимо учитывать при разработке мер по поддержанию оптимальных климатических условий [6].

Целью данного исследования является установление на основе экспериментальных данных закономерностей протекания аэротермодинамических процессов для последующей разработки рекомендаций по нормированию параметров воздушной среды в тоннелях метрополитена (однопутных и двухпутных), расположенных на разной глубине заложения.

В работе использовалась методика экспериментальных исследований, описанная в [7]. Математический аппарат моделей для прогноза термодинамических параметров воздуха в системах подземного транспорта позволяет достаточно надежно верифицировать результаты экспериментов [8].

Экспериментальные исследования проводились в разных тоннельных сооружениях. В однопутных и двухпутных тоннелях глубокого и мелкого заложения метрополитена Санкт-Петербурга и в однопутных тоннелях мелкого заложения метрополитена Новосибирска.

Основные задачи, решаемые в ходе осуществления исследований, сводятся к следующему:

1. Инструментальные измерения распределения температур (влажностей) воздуха по длине исследуемых участков перегонных тоннелей как при отсутствии поездов, так и при их движении с различной интенсивностью (измеряемой количеством пар поездов в час, пар/ч);

2. Определение основных факторов, оказывающих влияние на установленные распределения температур (влажностей);

3. Установление закономерностей изменения температур и влажностей;

4. Разработка предложений по использованию выявленных закономерностей для обеспечения нормативных параметров воздушной среды.

Идея статьи состоит в том, что в качестве основы для выбора технических решений по совершенствованию систем вентиляции метрополитенов следует принимать выявленные особенности формирования аэротермодинамических процессов, зависящих от конструктивных параметров перегонных тоннелей и глубины их заложения.

## Вентиляционные и тепловые режимы однопутных тоннелей глубокого заложения

Как следует из табл.1, основные линии метрополитенов Санкт-Петербурга включают однопутные тоннели, глубина заложения которых более 50 м.

Сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета совместно с ГУП «Петербургский метрополитен» в течение летнего периода 2023 г. были выполнены натурные измерения температуры и относительной влажности тоннельного воздуха на участке третьей Невско-Василеостровской линии (перегоны между станциями «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор»).

Измерения температуры в периоды движения и отсутствия поездов осуществлялись термографами iButton Temperature Loggers, имеющими погрешность  $\pm 0,5$  °C. Термографы были размещены по длине вышеуказанных перегонов (рис. 1).

В вентиляционных каналах термографы крепились на вертикальных тросах, в транспортных зонах – прикреплялись к обделке тоннелей. Измерения проводились с интервалом 120 с в течение семи дней, а их значения сохранялись в запоминающем устройстве термографа. Раз в неделю датчики снимались, а информация переносилась на электронный носитель (персональный компьютер) через специальное устройство приема.

Регистрация значений температуры поверхности обделки и относительной влажности выполнялась в периоды отсутствия движения поездов и осуществлялась соответственно инфракрасным пирометром и гигрометром (TESTO 625).

Проветривание тоннелей на перегонах «Приморская» – «Василеостровская» и «Василеостровская» – «Гостиный двор» во время проведения замеров при отсутствии и движении поездов осуществлялось соответственно по схемам, предусматривающим подачу наружного воздуха на станции и близлежащие сбойки с последующим удалением воздуха по шахтам на перегоне, и при подаче наружного воздуха через станционную и перегонную шахты с удалением исходящей струи со станции «Гостиный двор».

На выбранном участке, в частности «Приморская» – «Василеостровская», в режиме притока/вытяжки работали вентиляционные агрегаты при 100%-ной мощности: BOM-24P, FTDA-REV-200 с расходами воздуха  $\sim 46\text{--}56,4$  м<sup>3</sup>/с и скоростью воздуха  $\sim 4,6\text{--}5,64$  м/с при депрессии вентиляторов  $\sim 922\text{--}1100$  Па.

На перегоне «Василеостровская» – «Гостиный двор» – BOM-18P, BOM-18-01, FTDA-REV-180, FTDA-REV-200. Расходы воздуха  $\sim 48,6\text{--}74,8$  м<sup>3</sup>/с (скорость  $\sim 4,86\text{--}7,48$  м/с) при депрессии вентиляторов  $\sim 990\text{--}1520$  Па.

Результаты замеров представлены на рис. 2, 3.

На рис. 2 показан график распределения температуры воздуха, поверхности обделки и влажности в тоннелях на перегонах «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при отсутствии движения поездов.

Изменение распределения температуры воздуха в тоннеле по длине перегонов имеет немонотонный характер. Максимальное значение наблюдается в районе станции, а минимальное в серединной части перегона. Это связано с особенностями использования разных схем вентиляции в разное время суток.

Следует отметить, что температура воздуха имеет более низкие значения, чем температура поверхности обделки тоннеля, из-за прогрева грунта в дневной период, когда движение поездов является дополнительным источником тепла. Относительная влажность воздуха варьируется в интервале 60–70 %.

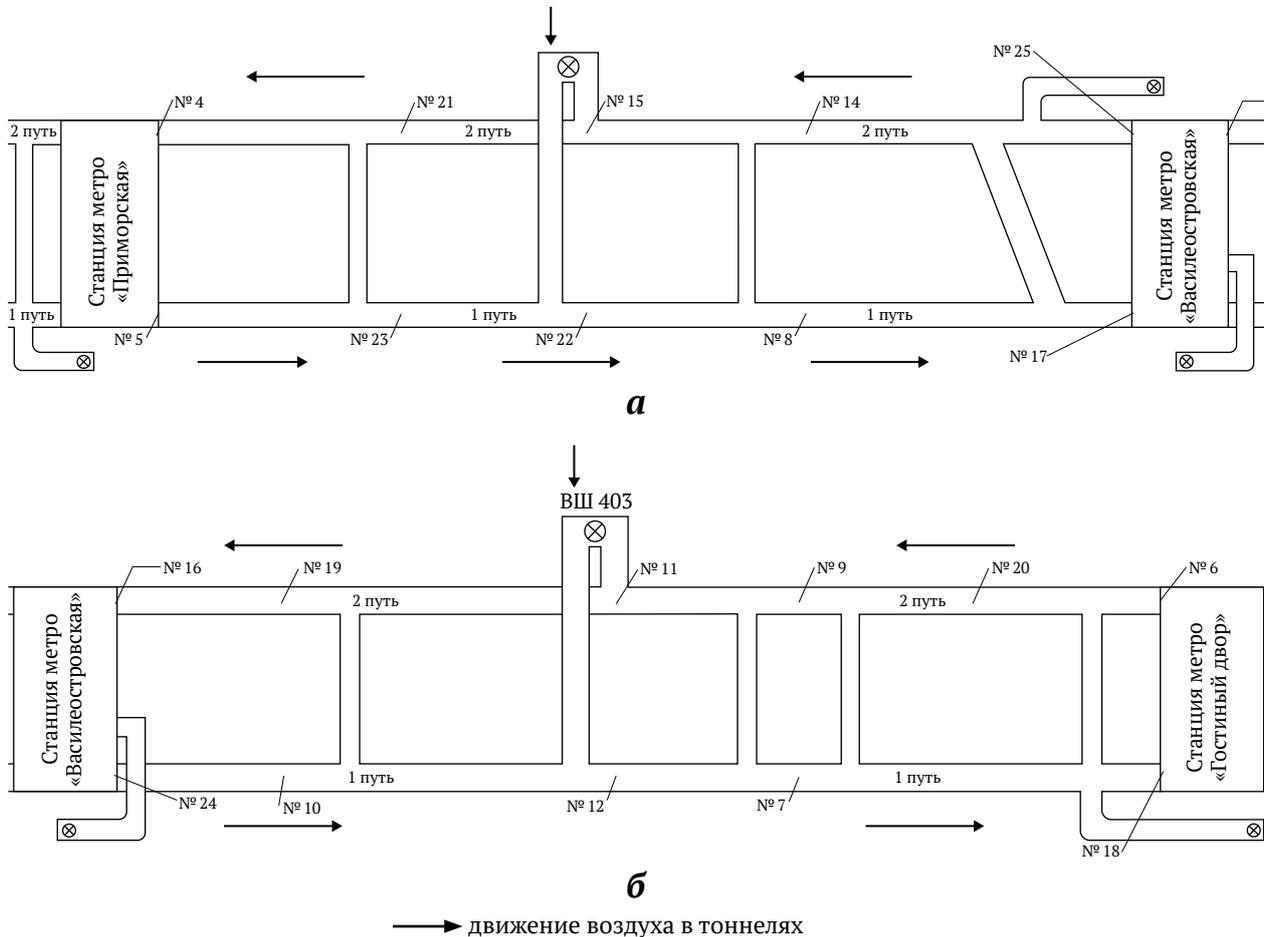


Рис. 1. Схема расположения датчиков для измерения температуры воздуха на участке однопутных тоннелей трех линий метрополитена:

а – перегон «Приморская» – «Василеостровская»; б – перегон «Василеостровская» – «Гостинный двор») [составлено авторами]

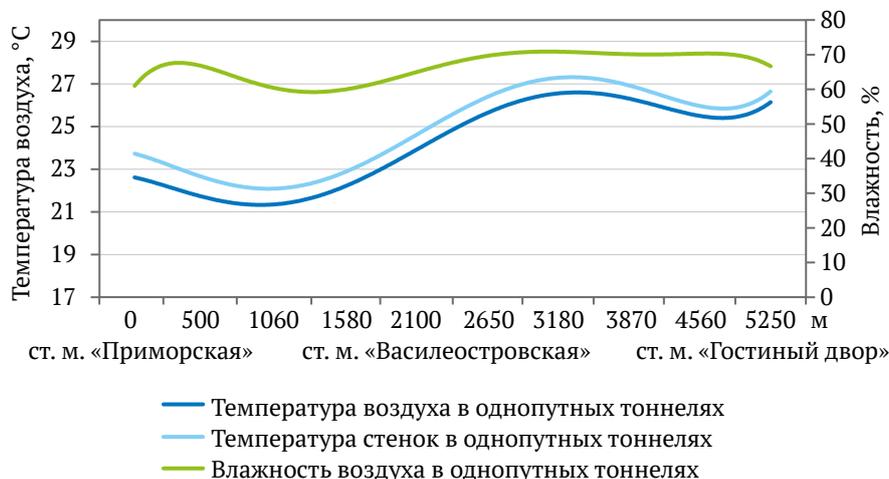


Рис. 2. Распределение температур воздуха и стенок, влажности воздуха на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостинный двор» при отсутствии движения поездов [составлено авторами]

Распределение температур воздуха по длине перегонов при движении поездов представлено на рис. 3.

Анализ результатов измерений показывает, что характер изменения температуры воздуха по длине перегонов в целом повторяет аналогичное распределение при отсутствии движения поездов за исключением определенной разницы в их значениях для тоннелей на первом и втором путях.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что средняя температура воздуха на перегонах и станциях может превышать температуру воздуха на поверхности на  $\sim 14^\circ\text{C}$ .

Причинами этого явления являются: значительное выделение тепла на участках между станциями (перегонах); использование в дневное время схем подачи свежего воздуха через вентиляционные стволы, что приводит к образованию циркуляционных контуров.

На участке тоннеля от точки смешения с наружным воздухом до станции на изменение температуры воздуха оказывают влияние несколько факторов,

например, увеличение расхода воздуха и выделение тепла движущимися поездами, процессы теплообмена между воздухом, конструкциями тоннеля и вмещающимися породами, а также процессы массообмена [9].

В то же время рост интенсивности движения поездов создает двусторонний эффект: с одной стороны, возрастает общее количество выделяемого тепла, а с другой – увеличивается расход воздуха в циркуляционных потоках.

Опираясь на разработанное методическое обеспечение, позволяющее определять параметры воздухораспределения в пристанционной вентиляционной сбойке метрополитена с учетом поршневого действия поездов, авторы исследования провели ряд расчетов тепловыделения и расхода воздуха в циркуляционных потоках при движении поездов для количественной оценки взаимовлияния указанных факторов.

Исходные данные для расчетов: средняя скорость поезда – 50 км/ч; число вагонов – 8; сечение тоннеля –  $21\text{ м}^2$ ; длина перегонов – 500–3500 м. Основные результаты расчетов представлены на рис. 4.

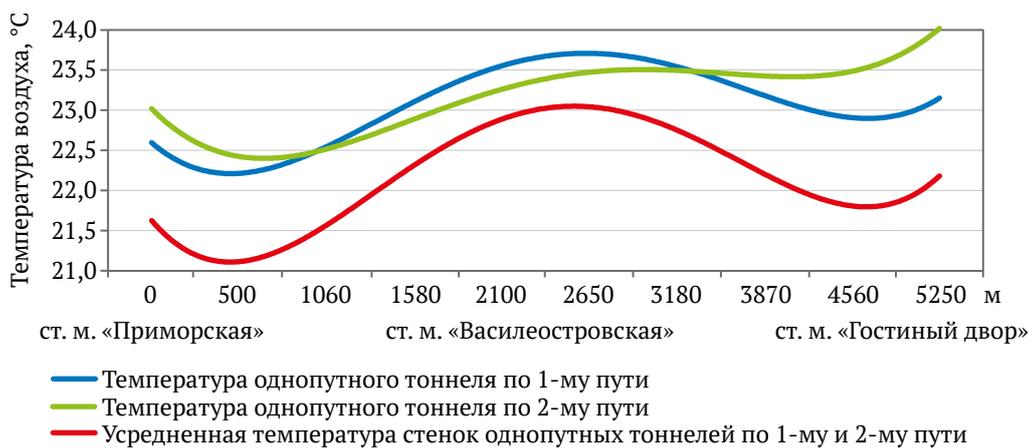


Рис. 3. Распределение температур воздуха и стенок, влажности на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостинный двор» при движении 24 пар поездов в часы пик [составлено авторами]

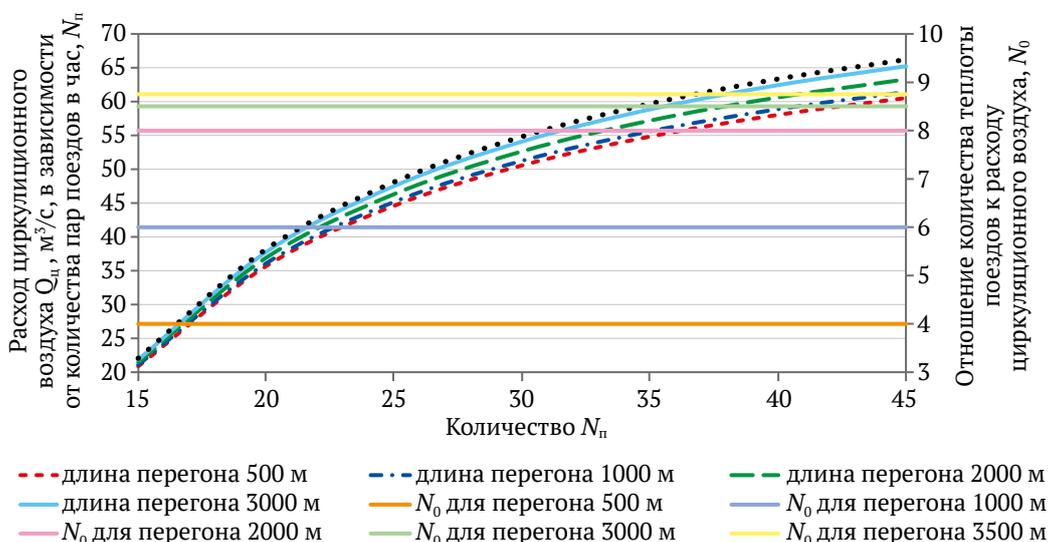


Рис. 4. Расход циркуляционного воздуха  $Q_{\text{ц}}$ , отношение количества теплоты от поездов к расходу циркуляционного воздуха (сплошная линия) в зависимости от интенсивности движения поездов  $N_{\text{п}}$  (пар/ч)



Анализ полученных данных демонстрирует, что при одновременном увеличении парности поездов с 15 до 45 пар в час и длины перегона с 500 до 3500 м количество циркуляционного воздуха  $Q_{ц}$  увеличивается в 2,5 раза. Вместе с тем, оказывается, что отношение количества теплоты, выделяемой от поездов, к расходу циркуляционного воздуха  $N_0$  не зависит от интенсивности движения и при разных длинах перегонов варьируется от 4 до 8,75. При этом отношение  $N_0$  постоянно для каждой длины перегона.

Таким образом, можно утверждать, что температура воздуха в транспортных зонах тоннелей практически не зависит от парности движения поездов.

Вместе с тем увеличение расхода циркуляционного воздуха может привести к другому негативному эффекту – увеличению концентрации взвешенной пыли, особенно в весенний период, когда наблюдается повышенная концентрация пыли в атмосфере. Это предположение подтверждается рядом проведенных исследований [12].

При эксплуатации однопутных тоннелей глубокого заложения в возникающих циркуляционных контурах аккумулируется часть теплоты от подвижного состава и других источников. В летний период это приводит к повышению температуры тоннельного воздуха, поступающего на станции (см. рис. 2, 3). Для снижения температуры воздуха можно предусмотреть установку вентиляционных сбоек непосредственно у станций холодильного оборудования, описанного в [10].

В зимний период циркуляционный воздух, смешиваясь на перегоне с холодным наружным воздухом, способствует достижению на станциях положительной температуры.

Таким образом, циркуляционные контуры играют двоякую роль: в летний период теплота, аккумулированная в них, провоцирует дополнительный подогрев воздуха и прогрессирующий прогрев вмещающих пород; зимой, наоборот, циркуляционный воздух дает возможность обеспечить на станциях и в тоннелях положительную температуру [13].

### Вентиляционные и тепловые режимы однопутных тоннелей мелкого заложения

Отличительной особенностью аэродинамических процессов в однопутных тоннелях мелкого заложения по сравнению с аналогичными процессами в тоннелях глубокого заложения является то, что образующиеся на перегонах между станциями (или сбояками) циркуляционные контуры имеют тесную аэродинамическую связь с поверхностью [14].

При глубоком заложении линий метрополитена распределения температур по длине циркуляционных контуров формируются в горизонтальной плоскости и определяются только расходом воздуха, инициируемым движущимися по параллельным тоннелям поездами, и количеством теплоты, выделяемой ими. При мелком заложении на распределение температуры оказывает значительное влияние наружный воздух, поступающий в выработки через сбойки и пешеходные пути, которым подпитываются циркуляционные контуры, в том числе даже при неработающих вентиляторах.

То есть можно утверждать, что циркуляционный контур формируется как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Данный вывод подтверждается данными измерений скоростей воздуха на станции «Площадь Гагарина-Михайловского», «Речной вокзал», «Сибирская» и др. в г. Новосибирске.

Смещение циркуляционного воздуха с наружным воздухом приводит к изменению температурного распределения по длине циркуляционного контура. Если в летний и весенний периоды такие изменения не приводят к нарушению нормативных показателей, то в зимний период температура воздуха на станциях может существенно отличаться от этих показателей в сторону понижения, что требует подогрева наружного воздуха, поступающего вследствие действия поршневого эффекта.

На основании выполненных экспериментальных исследований и численных расчетов можно сформулировать ряд предложений по управлению проветриванием линий метрополитена мелкого заложения в условиях Новосибирска (рис. 5) [15].

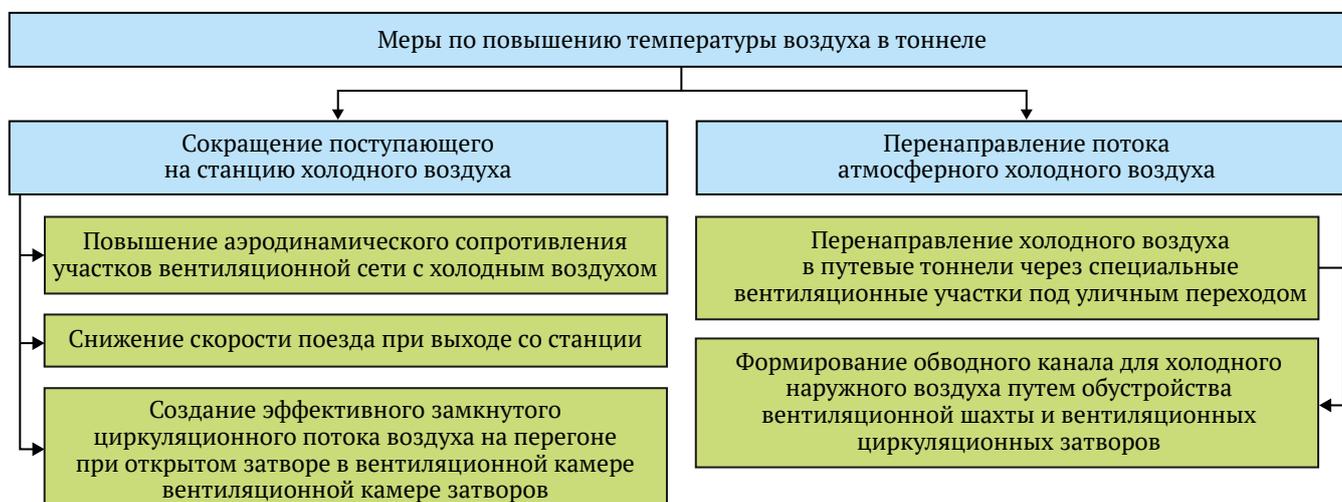


Рис. 5. Подходы по управлению проветриванием линий метрополитена мелкого заложения в условиях Новосибирска [составлено авторами]

### Вентиляционные и тепловые режимы двухпутных тоннелей

Натурные исследования термодинамических параметров воздуха в двухпутных тоннелях на участках: «тупик» – «Беговая» – «Зенит» – точка сопряжения с однопутными тоннелями, выходящими на станцию «Приморская» (рис. 6), были также осу-

ществлены летом 2023 г. Расстановка датчиков для измерения термодинамических параметров воздуха показана на рис. 7.

Методика проведения измерений и используемое приборное обеспечение соответствовали методике и приборному обеспечению, использованному в однопутных тоннелях.

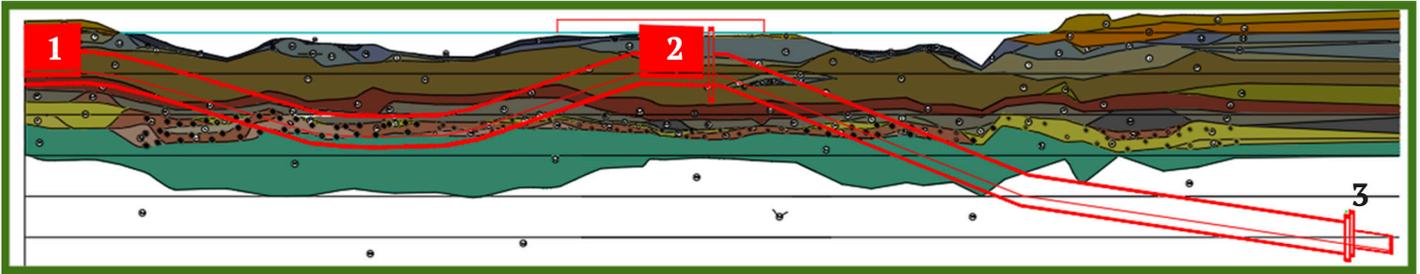


Рис. 6. Профиль перегона двухпутного участка:

1 – ст. м. «Беговая»; 2 – ст. м. «Зенит»; 3 – точка сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей [составлено авторами]

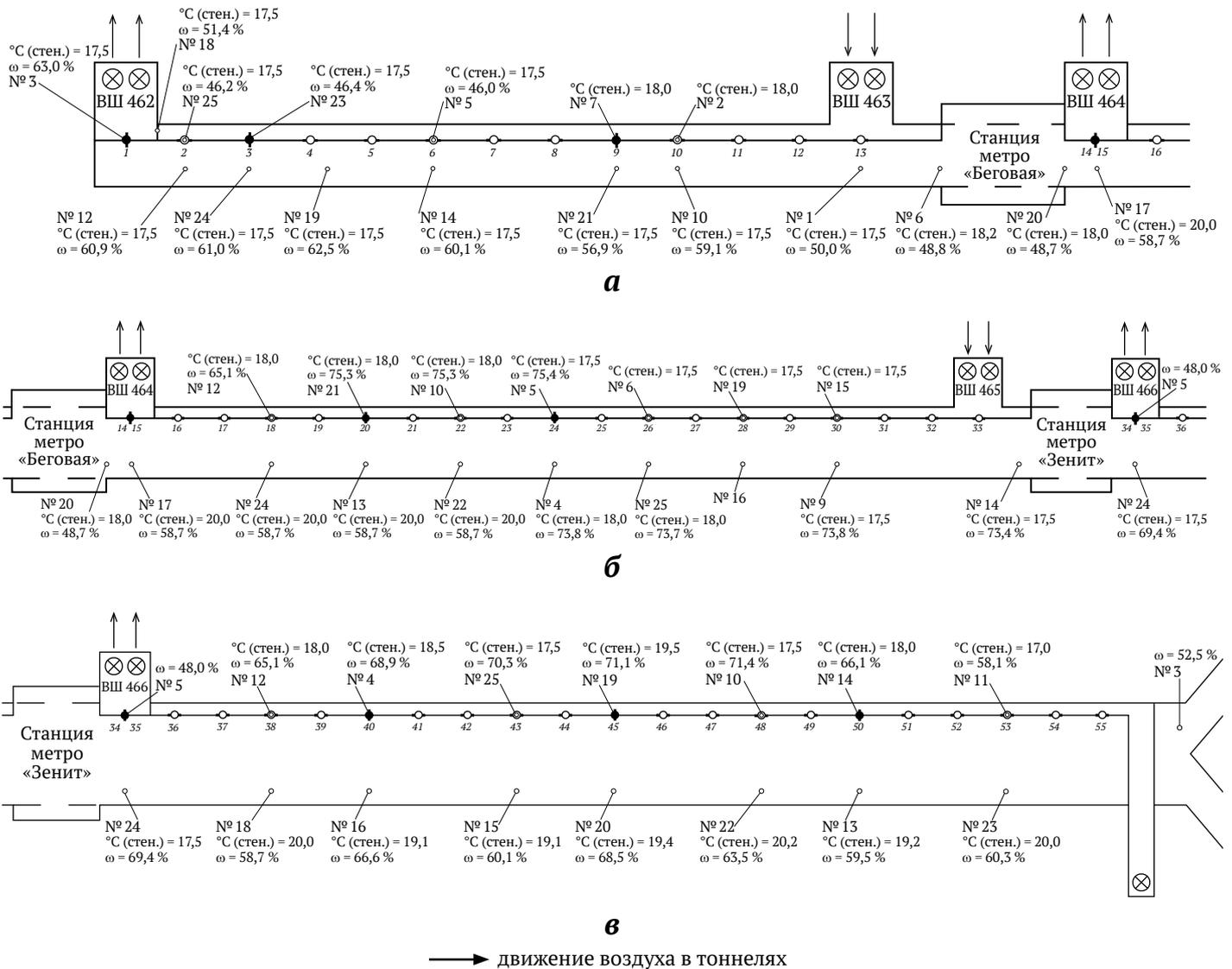


Рис. 7. Схема расположения датчиков температуры воздуха на двухпутном участке третьей линии метрополитена: а – перегон «тупик» – «Беговая»; б – перегон «Беговая» – «Зенит»; в – часть перегона «Зенит» – «Приморская» до точки сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей [составлено авторами]

На выбранных перегонах («тупик» – «Беговая» – «Зенит» – «Приморская») для подачи свежего воздуха (через пристанционные вентиляционные шахты) использовались агрегаты Zitron ZVR1-18-75/6, ZVN 1-20-75/6, FTDA-REV-200. Работа при 80 % мощности обеспечивала  $\sim 51 \text{ м}^3/\text{с}$  и скорость воздуха  $\sim 5,6 \text{ м/с}$  при депрессии вентиляторов 925 Па.

Удаление воздуха из тоннелей осуществлялось агрегатами FTDA-REV-180, расположенными в вентиляционных шахтах станций «Беговая», «Зенит» и в тупике. Работа агрегатов при 80 % мощности обеспечивала расходы воздуха  $\sim 42 \text{ м}^3/\text{с}$  (скорость  $\sim 5,6 \text{ м/с}$ ), депрессия вентилятора 925 Па.

На рис. 8 и 9 представлены графики, демонстрирующие распределение температуры воздуха, температуры поверхности обделки тоннеля и уровня влажности на участке «Беговая» – «Зенит» в периоды отсутствия движения поездов. Во время проведения измерений температура наружного воздуха составляла  $7^\circ\text{C}$ , а относительная влажность – 55 %.

В случае отсутствия движения подвижных составов вариации температурного режима вдоль участка пути обусловлены величиной тепла, запасенного почвой во время прохождения поездов, что подтверждается превышением температуры поверхности обделки над температурой воздуха и характером распределения по длине перегона подаваемого

вентиляторами воздуха. Несмотря на тепло, выделяемое грунтом, температура воздуха вдоль участка уменьшается по мере удаления от станции «Зенит» из-за притока наружного воздуха с существенно более низкой температурой, чем температура поверхности обделки. Относительная влажность воздуха вдоль участка колеблется в пределах 50–60 %.

Другая ситуация складывается в случае движения поездов (см. рис. 9). В период выполнения замеров температуры наружного воздуха показания были равны  $7^\circ\text{C}$ .

В сравнении с однопутным исполнением двухпутные тоннели демонстрируют более комфортный температурный режим. Это обусловлено отсутствием циркуляционных потоков, возникающих в результате движения поездов. В однопутных тоннелях тепло, выделяемое движущимися составами, накапливается на протяжении длительного периода времени, поскольку его значительная часть не удаляется вместе с исходящей струей воздуха из метрополитена [16]. В метрополитенах с двухпутными перегонными тоннелями в связи с отсутствием циркуляционных воздушных потоков (поршневой эффект) основная масса тепла распределяется по участку пути с соблюдением равномерности [17]. Постоянство температуры воздуха обеспечивается за счёт удаления тепла, за исключением зон в непосредственной близости от станции.

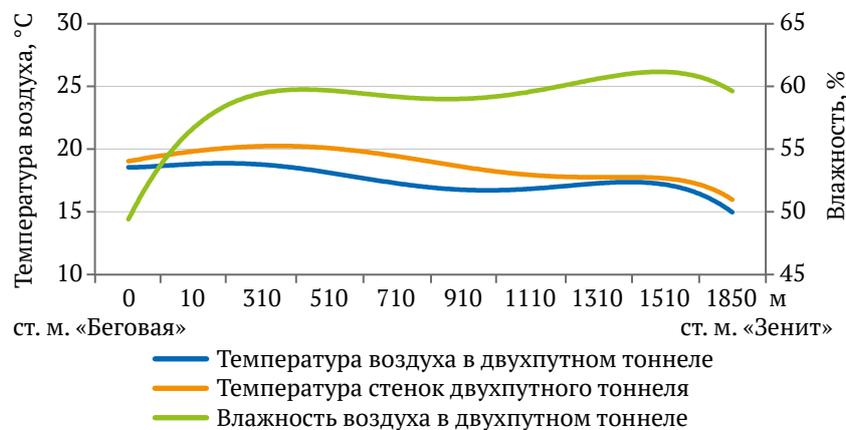


Рис. 8. Распределение температур воздуха, поверхности обделки и влажности на перегоне «Беговая»–«Зенит» при отсутствии движения поездов [составлено авторами]

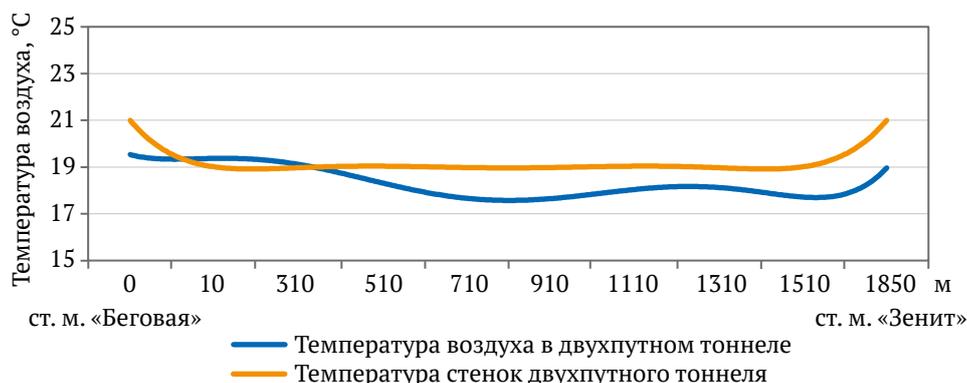


Рис. 9. Распределение температур воздуха на перегоне «Беговая» – «Зенит» при движении поездов в час пик (24 пар/ч) [составлено авторами]

В этих зонах во время торможения и остановки поездов интенсивность тепловыделения максимальна. В результате температура воздуха превышает температуру поверхности обделки, что указывает на передачу тепла грунту.

Для перегонов с двухпутными тоннелями характерно повышение температуры с увеличением интенсивности движения поездов, что связано с увеличением количества теплоты от поездов.

### Вентиляционные и тепловые режимы на перегонах, включающих однопутные и двухпутные тоннели

Особенностью формирования вентиляционного и теплового режимов на рассматриваемых перегонах являются отличия в аэродинамике воздушных потоков в двухпутном и однопутном тоннелях. Участки с однопутными тоннелями проветриваются за счет принудительной вентиляции и поршневого эффекта, при этом на отрезке между точкой сопряжения двухпутных и однопутных тоннелей и станциями,

ближайшими к сопряжению, возникает циркуляционный контур [18].

Проветривание же двухпутных тоннелей осуществляется только за счет работы шахтных вентиляторов.

При отсутствии поездов распределение температур и влажностей по длине перегона от станции «Зенит» до станции «Приморская» идентично распределению для двухпутных и однопутных тоннелей (рис. 10). В период выполнения замеров температура и влажность наружного воздуха были равны 13 °С и 69% соответственно.

В ситуации движения поездов в условиях, когда температура воздуха за соединительным узлом с двухпутными тоннелями соответствует температурному распределению, характерному для однопутных тоннелей, возможна ситуация превышения температуры по абсолютной величине в сравнении с аналогичными показателями в однопутных тоннелях (рис. 11). В период выполнения замеров температуры наружного воздуха показания были равны 17 °С.

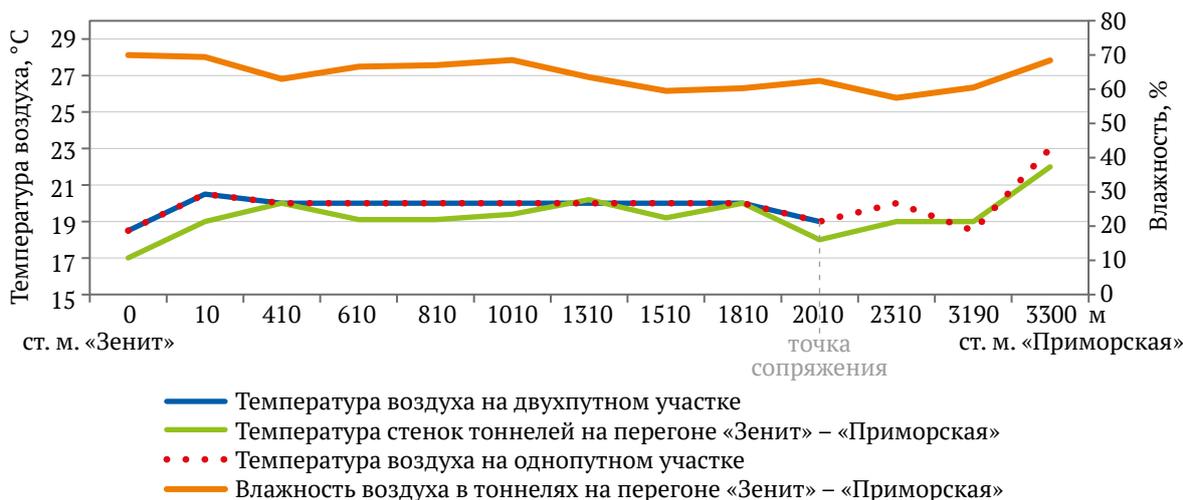


Рис. 10. Распределение температур воздуха на перегоне «Зенит»–«Приморская» при отсутствии движения поездов, точка сопряжения – место, где двухпутный тоннель переходит в два однопутных [составлено авторами]

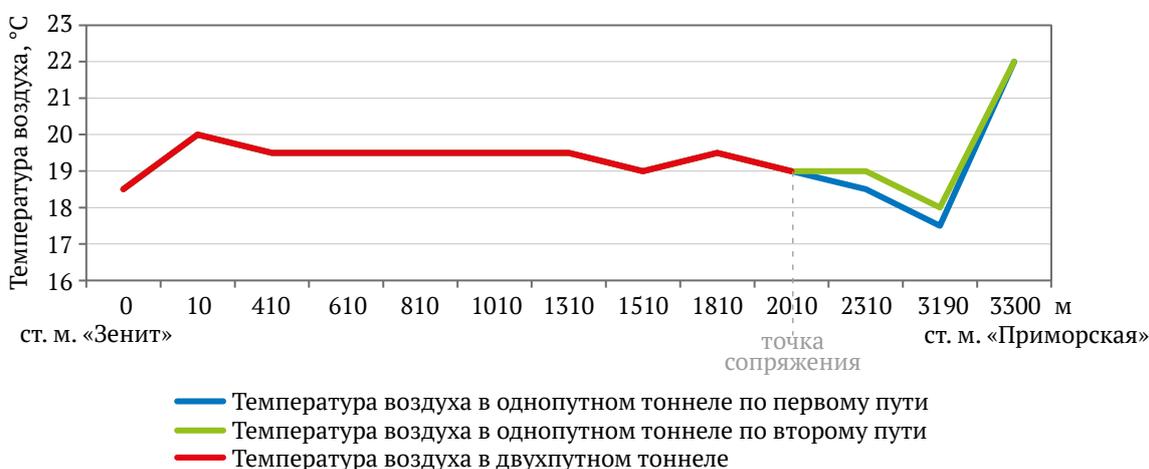


Рис. 11. Распределение температур воздуха на перегоне «Зенит» –«Приморская» при движении поездов в час пик (24 пар/ч) [составлено авторами]



Вышесказанное подтверждается результатами измерений, демонстрирующих, что температура воздуха, в двухпутном тоннеле перед точкой сопряжения на отметке 2010 м от станции «Зенит» составляющая 19,5 °С, на станции «Приморская» повышается до 22–23 °С. Причиной этого является подпитка циркуляционного контура на однопутном участке перегона воздухом из двухпутного тоннеля, который имеет более высокую температуру, чем наружный воздух, подаваемый с поверхности, как при классической схеме проветривания.

Для понижения температурного режима в однопутных тоннелях возможно применение метода вентиляции с использованием наружного воздуха. Данный метод предусматривает подачу свежего воздуха извне в двухпутный тоннель посредством специально спроектированной шахты, расположенной в конце двухпутного участка.

### Выводы

На основе выполненных экспериментальных исследований были выявлены закономерности формирования вентиляционных и тепловых режимов однопутных, двухпутных тоннелей и участка сопряжения и предложены мероприятия по совершенствованию вентиляционного и теплового режимов, обеспечивающих нормативные климатические условия. В частности, было установлено, что:

1. В глубоких однопутных тоннелях температурный режим формируется под воздействием двух основных факторов: циркуляции воздуха между станциями, обусловленной поршневым эффектом, и тепловыделения от движущихся составов. Распределение температуры вдоль перегонов характеризуется неравномерностью, с минимальными значениями в середине и максимальными – на станциях. Это явление обусловлено схемой вентиляции, предусматривающей подачу свежего воздуха на перегоны и его удаление на станциях. При увеличении интенсивности движения поездов значительного изменения температуры воздуха не наблюдается, что объясняется ростом расхода циркуляционного воздуха.

2. В однопутных тоннелях мелкого заложения образующийся между станциями циркуляционный контур подпитывается наружным воздухом, поступающим на станции и тоннели по пешеходным путям. В летний период это явление не оказывает существенного влияния на характер распределения температур. В зимний период указанное явление может привести к понижению температуры на станциях до критических значений.

Обеспечение нормативных параметров воздуха на станциях в зимний период года может быть реализовано организационными, аэродинамическими и теплотехническими методами. Первые связаны со

снижением поршневого действия за счет уменьшения скорости прибывающих и уходящих поездов. Вторые – с повышением аэродинамического сопротивления участков вентиляционной сети, обеспечивающих движение холодного атмосферного воздуха или за счет внутренних циркуляционных контуров. Третьи – с применением систем подогрева поступающего наружного воздуха (воздушно-тепловые завесы).

3. В двухпутных тоннелях при отсутствии поездов характер изменения температуры воздуха по длине перегона определялся количеством теплоты, которая была аккумулирована грунтом в период движения поездов. Во время движения теплота, выделяемая поездами, движущимися навстречу друг другу при практическом отсутствии поршневого эффекта, равномерно распределяется по длине перегона. Это обуславливает постоянную температуру воздуха в тоннелях, за исключением участков, непосредственно прилегающих к станции, где в период торможения и остановки поездов количество продуцируемой ими теплоты максимально. В результате температура воздуха на этих участках повышается на 2–3 °С относительно температуры в тоннелях.

На перегонах, где присутствуют как двухпутные, так и однопутные тоннели, повышение температуры воздуха на станции, расположенной рядом с однопутными тоннелями, обусловлено образованием циркуляционных потоков между зоной соединения двухпутного и однопутных тоннелей и прилегающей к ним станцией.

4. Рекомендации по нормализации аэротермодинамического режима для рассмотренных типов тоннелей сводятся к следующему:

– при установленной возможности превышения в летнее время температурой воздуха нормативных параметров (значений) необходимо предусмотреть или резерв по его расходу, или его охлаждение в сбойках, прилегающих к станциям;

– для повышения температуры воздуха могут быть использованы организационные, аэродинамические и теплотехнические методы: первые связаны со снижением поршневого действия за счет уменьшения скорости подвижных составов; вторые заключаются в повышении аэродинамического сопротивления участка вентиляционной сети, связанного с притоком наружного воздуха; третьи – в создании систем подогрева холодного внешнего воздуха (воздушно-тепловые завесы);

– на перегонах, включающих двухпутный и однопутные тоннели, возможное повышение температуры воздуха на станции, прилегающей к однопутным тоннелям, может быть компенсировано за счёт подачи наружного воздуха в двухпутный тоннель через шахту, сооружённую в конце двухпутного участка.

### Список литературы / References

1. Юнгмейстер Д. А., Ячейкин А. И. Обоснование рациональной конструкции исполнительного органа тоннелепроходческого щита для условий шахт Метростроя Санкт-Петербурга. *Записки Горного института*. 2021;249:441–448. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.13>  
Yungmeister D. A., Yacheykin A. I. Rational design justification of the tunnel boring shield executive body for the conditions of the mines of Saint Petersburg Metrostroy. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:441–448. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.13>



2. Дашко Р.Э., Лохматиков Г.А. Верхнекотлинские глины Санкт-Петербургского региона как основание и среда уникальных сооружений: инженерно-геологический и геотехнический анализ. *Записки Горного института*. 2022;254:180–190. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>  
Dashko R.E., Lokhmatikov G.A. The Upper Kotlin clays of the Saint Petersburg region as a foundation and medium for unique facilities: an engineering-geological and geotechnical analysis. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:180–190. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>
3. Maevski I. Features of tunnel ventilation systems design in hot climate. In: *Proceedings from 12<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Portoroz, Slovenia, 11–13 July 2006. BHR Group; 2006. Pp. 331–347.
4. Кияница Л.А. К вопросу определения аналитических зависимостей теплового потока в грунт из подземных сооружений станций закрытого типа метрополитена мелкого заложения с двухпутным тоннелем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(2):89–102.  
Kiyantsa L.A. Determining analytical dependences for heat flow in soil from enclosed-type shallow underground subway stations with double-track tunnels. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(2):89–102. (In Russ.)
5. Зедгенизов Д.В. К расчету коэффициентов автоматического регулятора производительности тоннельного вентилятора. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021;2(3):213–218. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-213-218>  
Zedgenizov D.V. To calculation of the coefficients of automatic regulator of tunnel fan capacity. *InterekspoGeo-Sibir*. 2021;2(3):213–218. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-213-218>
6. Цодиков В.Я. Глава III. Системы вентиляции тоннелей метрополитенов и основные положения их расчетов. В: *Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов*. 2-е изд. М.: Недра; 1975.  
Tsodikov V.Ya. Chapter III. Ventilation systems of subway tunnels and the main provisions of their calculations. In: *Ventilation and Heat Supply of Subways*. 2nd ed. Moscow: Nedra Publ.; 1975. (In Russ.)
7. Vardy A., Hagenah B. Full-scale flow measurements in a tunnel air shaft. In: *Proceedings from 12<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Portoroz, Slovenia, 11–13 July 2006. BHR Group; 2006. Pp. 343–357.
8. Sahlin P., Eriksson L., Grozman P. et al. 1D models for thermal and air quality prediction in underground traffic systems. In: *Proceedings from 12<sup>th</sup> International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*. Portoroz, Slovenia, 11–13 July 2006. Pp. 261–267.
9. Кияница Л.А., Унаспеков Б.А. Определение параметров воздухораспределения в пристанционной вентиляционной сбойке метрополитена от поршневого действия поездов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(12):99–109. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_12\\_0\\_99](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_99)  
Kiyantsa L.A., Unaspekov B.A. Estimate of air distribution in ventilation tunnel between subway station as function of piston effect. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(12):99–109. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_12\\_0\\_99](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_99)
10. Гендлер С.Г., Крюкова М.С. Управление тепловым режимом линий метрополитена с однопутными тоннелями. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2022;(4):116–127.  
Gendler S.G., Kryukova M.S. Thermal management of metro lines with single-track tunnels. *IzvestijaTul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(4):116–127. (In Russ.)
11. Гендлер С.Г., Крюкова М.С. Проблемы эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями в условиях холодного климата. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2022;(2):77–87.  
Gendler S.G., Kryukova M.S. Problems of operation of metro lines with double-track tunnels in a cold climate. *Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):77–87. (In Russ.)
12. Смирняков В.В., Родионов В.В., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока. *Записки Горного института*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>  
Smirnyakov V.V., Rodionov V.A., Smirnyakova V.V., Orlov F.A. The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when changing the structure of air flow. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:71–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12>
13. Лугин И.В., Павлов С.А., Иргибаяев Т.И. Обоснование параметров кольцевых моделей при декомпозиции вентиляционной сети протяженной линии метрополитена для расчета воздухораспределения. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2022;2(3):214–220. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-3-214-220>  
Lugin I.V., Pavlov S.A., Irgibaev T.I. Justification of the parameters of ring models in the decomposition of the ventilation network of an extended metro line for the calculation of air distribution. *Interekspo Geo-Sibir*. 2022;2(3):214–220. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2022-2-3-214-220>
14. Кияница Л.А., Лугин И.В., Красюк А.М. О структуре воздушного потока в пристанционных вентиляционных сбойках метрополитенов. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021;2(3):219–229. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-219-229>  
Kiyantsa L.A., Lugin I.V., Krasnyuk A.M. On air flow structure in station ventilation connections of subways. *Interekspo Geo-Sibir*. 2021;2(3):219–229. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-3-219-229>



15. Красюк А.М., Лугин И.В. Поддержание параметров микроклимата на тупиковой станции линии метрополитена. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019;2(4):122–130. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-122-130>  
Krasnyuk A.M., Lugin I.V. Keeping of microclimate parameters at terminal station of subway line. *InterexpoGeo-Sibir*. 2019;2(4):122–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-122-130>
16. Zhikharev S. Enhanced methodology for thermal management area assessment of metro lines. In: *E3S Web of Conferences. IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2024)*. 2024;525:05018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452505018>
17. Zhikharev S. Methodological approach to determining the area of air recycling on metro lines with double track tunnels. In: *E3S Web of Conferences. XIV International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (TITDS-XIV-2023)*. 2024;471:02022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447102022>
18. Каримов Д. Д. Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2022;19(1):17–27. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-17-27>  
Karimov D. Numerical simulation of aerodynamic processes of air mass movement in underground tunnels taking into account piston impact of rolling stock. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022;19(1):17–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-17-27>

### Информация об авторах

**Семен Григорьевич Гендлер** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7721-7246](https://orcid.org/0000-0002-7721-7246), Scopus ID [56168675100](https://scopus.com/authorid/56168675100), ResearcherID [I-9283-2017](https://orcid.org/I-9283-2017); e-mail [sgendler@mail.ru](mailto:sgendler@mail.ru)

**Милана Сергеевна Крюкова** – аспирант кафедры безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9632-3979](https://orcid.org/0000-0001-9632-3979), Scopus ID [58723622900](https://scopus.com/authorid/58723622900); e-mail [s215068@stud.spmi.ru](mailto:s215068@stud.spmi.ru)

**Елена Леонидовна Алферова** – инженер, научный сотрудник института горного дела СО РАН им. Н.А. Чинакала, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9453-2355](https://orcid.org/0000-0001-9453-2355), Scopus ID [57193708767](https://scopus.com/authorid/57193708767); e-mail [alfenok.ru@gmail.com](mailto:alfenok.ru@gmail.com)

### Information about the authors

**Simeon G. Gendler** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Industrial Safety, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7721-7246](https://orcid.org/0000-0002-7721-7246), Scopus ID [56168675100](https://scopus.com/authorid/56168675100), ResearcherID [I-9283-2017](https://orcid.org/I-9283-2017); e-mail [sgendler@mail.ru](mailto:sgendler@mail.ru)

**Milana S. Kryukova** – PhD-Student of the Department of Industrial Safety, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9632-3979](https://orcid.org/0000-0001-9632-3979), Scopus ID [58723622900](https://scopus.com/authorid/58723622900); e-mail [s215068@stud.spmi.ru](mailto:s215068@stud.spmi.ru)

**Elena L. Alferova** – Engineer, Researcher at the Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9453-2355](https://orcid.org/0000-0001-9453-2355), Scopus ID [57193708767](https://scopus.com/authorid/57193708767); e-mail [alfenok.ru@gmail.com](mailto:alfenok.ru@gmail.com)

Поступила в редакцию	22.02.2024	Received	22.02.2024
Поступила после рецензирования	12.04.2024	Revised	12.04.2024
Принята к публикации	07.05.2024	Accepted	07.05.2024