

На правах рукописи

Крюкова Милана Сергеевна



**АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ
ПРОВЕТРИВАНИЯ ЛИНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ С
ОДНОПУТНЫМИ И ДВУХПУТНЫМИ ТОННЕЛЯМИ**

*Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных
пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гендлер Семен Григорьевич

Официальные оппоненты:

Лугин Иван Владимирович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория рудничной аэродинамики, ведущий научный сотрудник;

Кобылкин Сергей Сергеевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра безопасности и экологии горного производства Горного института, профессор.

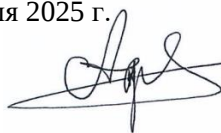
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита диссертации состоится **26 июня 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение в настоящее время населения мегаполисов определит рост объемов гражданского строительства, в том числе в районах бывших сельхозугодий. Логистика пассажиропотоков в направлениях, связывающих промышленные и селитебные зоны с культурными центрами, и значительные расстояния между ними, а также высокая стоимость земли создают проблему, решение которой возможно только за счет вывода транспортной системы с поверхности. Одним из путей реализации этого требования может быть использование подземного внеуличного транспорта – метрополитенов. Повышение рентабельности метрополитенов, определяющее снижение стоимости перевозок, связано с необходимостью постоянного совершенствования конструкций перегонных тоннелей и станций. Это достигается при использовании инновационных технологий строительства, в частности, с помощью современных тоннелепроходческих механизированных комплексов большого диаметра (9-14 м), а также применения энергосберегающих систем поддержания нормативных параметров воздушной среды, основным элементом которой является система вентиляции. Задачу создания действенных и энергоэффективных систем тоннельной вентиляции на линиях, включающих в себя однопутные и двухпутные тоннели в настоящее время нельзя считать полностью решённой. Это в определённой степени связано с отсутствием опыта эксплуатации таких линий в России и ограниченной возможностью использования опыта других стран, имеющих гораздо более тёплый климат, а также нормы эксплуатации, отличающиеся от норм, принятых в Российской Федерации. Нормативный документ (СП 120.1330.2022 п 5.8) полностью не отражает важную проблему создания системы тоннельной вентиляции в точке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей. Как показал выполненный анализ, автоматический перенос принципов организации вентиляции в зарубежных метрополитенах может привести в зимнее время к снижению температуры воздуха в перегонных тоннелях и станциях Российских метрополитенов до значений, которые могут привести к нарушению безопасности движения.

Для повышения температуры воздуха могут быть использованы калориферы, однако, при тех параметрах расходов воздуха и температур наружного воздуха, мощность калориферных установок

может достигать до 2 МВт. Решение проблемы обеспечения нормативных параметров микроклимата при одновременном снижении энергопотребления может быть достигнуто в результате обоснования параметров схем вентиляции, обеспечивающих нормативные термовлажностные показатели воздушной среды на линиях метрополитена, включающих в себя двухпутные и однопутные тоннели. В этой связи, тему исследований следует считать актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами изучения тепловых режимов и разработки научных основ проектирования систем вентиляции подземных объектов занимались ученые и инженеры в разных странах мира. Большой вклад в решение этих задач внесли: Гендлер С.Г., Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кобылкин С.С., Красюк А.М., Левин Л.Ю., Лугин И.В., Цодиков В.Я., Бондарев В.Ф., Воропаев А.Ф., Гончаров С.А., Ильин В.В., Казаков Б.П., Красноштейн А.Е., Королев Е.Г., Кремнев О.А., Поляков А.Х., Фомичев В.И., Шалимов А.В., Щербань А.Н., Алферова Е.Л., Кияница Л.А., а также Зильберборд А.Ф., Фосс И., Хайзе Ф., Каппельмайер О., Мундри Е., Аmano К., Хираматсу Ю., Стафильда А. и др. Их исследования посвящены вопросам вентиляции и тепловым режимам шахт, рудников, железнодорожных, автодорожных тоннелей и метрополитенов.

Разработанные методики тепловых расчётов основаны на вычислении количеств теплоты, выделяемых или поглощаемых различными источниками: горным массивом, испарением влаги, работой энергетических установок, включая подвижной состав и т.д. Вместе с тем, вопросы совместного влияния на распределение температуры воздуха по длине перегонов между станциями, циркуляционными потоками и количество подаваемого в тоннели наружного воздуха требуют дополнительного изучения и обоснования.

Объект исследования – линии метрополитена с однопутными и двухпутными тоннелями метрополитена.

Предмет исследования – аэротермодинамические процессы в однопутных и двухпутных тоннелях метрополитенов.

Цель работы – обоснование параметров схем вентиляции линий метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями, обеспечивающих нормативные параметры микроклимата на перегонах и станциях.

Идея работы – выбор параметров схем вентиляции, обеспечивающих нормативные параметры микроклимата в перегонных тоннелях и станциях, следует осуществлять с учётом аэродинамики подвижного состава, приводящего в случае однопутных тоннелей к циркуляционному движению воздуха между соседними станциями, а в двухпутных тоннелях – к возникновению локальной циркуляции между носовой и кормовой частями каждого поезда.

Основные задачи исследований:

1. Установить факторы, определяющие аэротермодинамические процессы, протекающие в перегонных тоннелях и станциях линий метрополитена с однопутными и двухпутными тоннелями.

2. Определить на основе математического моделирования аэродинамических процессов степень влияния поршневого эффекта поездов в однопутных тоннелях на вентиляционный режим двухпутного тоннеля.

3. Разработать методику теплового расчёта линий метрополитена с однопутными и двухпутными тоннелями на основе выявленных в результате натурных исследований закономерностей аэротермодинамических процессов.

4. Обосновать параметры схем проветривания линий метрополитена, включающие в себя однопутные и двухпутные тоннели, обеспечивающие нормативные термодинамические параметры воздуха.

5. Провести тепловые расчёты и обосновать технические решения по нормализации в летнее время теплового режима на станции, прилегающей к однопутным тоннелям, имеющим точку сопряжения с двухпутным тоннелем.

Научная новизна работы:

1. Выявлены закономерности формирования аэротермодинамических процессов воздушной среды в тоннелях и станциях линий метрополитена с однопутными и двухпутными тоннелями для климатических условий Российской Федерации.

2. Установлено, что применение рециркуляционной схемы проветривания двухпутных тоннелей в условиях Санкт-Петербурга, целесообразно при значении температуры наружного воздуха в зимнее время ниже -10°C .

Соответствие паспорту специальности.

Тема соответствует п. 11 «Гидро-, аэро-, газо- и термодинамические процессы, методы и средства управления ими в массивах горных пород и грунтов, горных выработках и выработанном пространстве» области исследований паспорта научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана математическая модель для описания аэродинамического и теплового режимов на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями.

2. Разработаны рекомендации по использованию рециркуляционных схем проветривания двухпутных тоннелей, позволяющих обеспечить нормативные термодинамические параметры воздуха.

3. Результаты исследований внедрены в Акционерном обществе "Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт "Ленметрогипротранс", что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации от 15.03.25 г.

Методология и методы исследования.

При выполнении работы использовался комплексный метод исследования, включающий в себя: анализ и обобщение результатов ранее опубликованных исследований процессов теплового и вентиляционного режимов линий метрополитенов, включающих в себя однопутные и двухпутные тоннели, в сложных климатических условиях России; натурные исследования процессов тепломассопереноса в действующем метрополитене города Санкт-Петербурга; аналитические и численные расчёты теплового режима однопутных и двухпутных тоннелей, математическое моделирование аэродинамических процессов в вентиляционной сети метрополитена.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Особенности распределения скоростей и температур воздушного потока на линиях метрополитена с однопутными и двухпутными тоннелями определяются аэродинамикой движения подвижного состава, обуславливающей в случае однопутных тоннелей циркуляционное движение воздуха между соседними станциями, а в двухпутных тоннелях – возникновением локальной циркуляции на участках тоннеля, занятого поездами.

2. На участках линии метрополитена с двухпутными и однопутными тоннелями, увеличение интенсивности движения поездов в однопутных тоннелях свыше 12 пар поездов в час приводит к изменению направления движения воздуха в двухпутных тоннелях от точки сопряжения с однопутными тоннелями в сторону ближайших трёх станций двухпутного тоннеля и изменению расхода воздуха в интервале от 18 до 46 м³/с.

3. Обобщённая математическая модель формирования теплового режима участка линии метрополитена, состоящего из двухпутного тоннеля и однопутных тоннелей, должна объединять математические модели процессов нестационарного теплообмена потоков воздуха, движущихся в подшивном потолке и транспортном отсеке двухпутного тоннеля, и нестационарного теплообмена потоков воздуха в однопутных тоннелях, образованных в результате смешения объёмов воздуха, поступающих из двухпутного тоннеля, наружного воздуха и циркуляционного воздуха, инициируемого поршневым эффектом поездов.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается представительным объемом данных натурных наблюдений; использованием современных апробированных методов исследований, включающих математическое моделирование аэродинамических процессов в двухпутных и однопутных тоннелях, численные исследования воздухораспределения в сетевых моделях методом контурных объемов; удовлетворительной сходимостью результатов натурных и численных исследований.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы были представлены на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (2022, 2023, 2024, 2025 г. Москва), XVII/XVIII/XIX Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (2021, 2022, 2023, г. СПб), Международном форуме-конкурсе молодых исследователей стран БРИКС «Актуальные проблемы недропользования» (2024, СПб), конкурсе бизнес-идей, научно-технических разработок и научно-исследовательских проектов под девизом «Молодые, дерзкие, перспективные» (2023, 2024, СПб), конкурсе грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (2024, СПб).

Личный вклад автора состоит в обобщении известных результатов, проведении натурных и вычислительных экспериментов по исследованию аэротермодинамических параметров, теплообмена и воздухораспределения на линии метрополитена, включающей в себя однопутные и двухпутные тоннели, обработке и анализе результатов экспериментов, формулировании выводов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 130 наименований и 6 приложений. Диссертация изложена на 152 страницах, содержит 47 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность д.т.н. Гендлеру Семену Григорьевичу за сотрудничество и всестороннюю поддержку, включая консультирование в процессе подготовки настоящей диссертационной работы. Так же автор выражает благодарность коллективу кафедры безопасности производств за помощь в выборе направления для исследований. За содействие в организации и проведении экспериментальных исследований, в практическом внедрении полученных результатов автор благодарит сотрудников ГУП «Петербургский метрополитен» в лице Шабанова М.В., Потаева Д.В., Соколова Д.Ю., Спиркина А.В. и сотрудника АО "НИПИИ "Ленметрогипротранс" Савенкова Е.А.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены особенности формирования теплового режима термодинамических параметров воздушной среды

в тоннелях метрополитенов. Рассмотрены основные факторы, определяющие схемы проветривания тоннелей, тепловой эффект от метропоездов, поршневой эффект и типовые распределения термодинамических параметров в тоннелях. Показано, что в двухпутных тоннелях при отсутствии поездов характер изменения температуры воздуха по длине перегона определялся количеством теплоты, которая была аккумулирована грунтом в период движения поездов. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены результаты натурных исследований в ГУП «Петербургский метрополитен». 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 на станциях и в тоннелях.

В третьей главе представлено математическое моделирование аэродинамических процессов на участке сопряжения двухпутного и однопутных тоннелей, осуществлена оценка влияния поршневого действия подвижного состава в однопутных тоннелях на характер движения воздушного потока в двухпутном тоннеле.

В четвертой главе представлены методы тепловых расчетов на линиях метрополитена с двухпутными и однопутными тоннелями. Доказано, что для обеспечения нормативных климатических параметров на действующих линиях метрополитенов с двухпутными тоннелями следует использовать схемы проветривания, основанные на циркуляции воздуха между тоннелями и подшивным потолком. Обоснованы рекомендации по обеспечению нормативных параметров теплового режима линий метрополитенов с двухпутными и однопутными тоннелями.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные при проведении исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Особенности распределения скоростей и температур воздушного потока на линиях метрополитена с однопут-

ными и двухпутными тоннелями определяются аэродинамикой движения подвижного состава, обуславливающей в случае однопутных тоннелей циркуляционное движение воздуха между соседними станциями, а в двухпутных тоннелях – возникновением локальной циркуляции на участках тоннеля, занятого поездами.

Для оценки факторов, влияющих на вентиляционный и тепловой режимы тоннелей в действующем метрополитене Санкт-Петербурга был осуществлен комплекс натурных исследований. Измерения температуры (воздуха, обделки) и относительной влажности тоннельного воздуха на участке Невско-Василеостровской линии (перегоны между станциями «тупик» – «Беговая» – «Зенит» – «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор») были выполнены в ГУП «Петербургский метрополитен» в течение летнего и зимнего периодов 2023 года.

Проветривание однопутных тоннелей на перегонах «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» во время проведения замеров при отсутствии и движении поездов (рисунок 1, 2) 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». В период выполнения замеров влажность наружного и внутреннего воздуха изменялись в пределах 55-70%.

Анализ данных измерений позволил установить, что распределение температуры воздуха в тоннеле по длине перегонов имеет немонотонный характер с максимальными значениями в районе станции, а минимальными в центральной части перегона. Этот характер изменения температуры воздуха не зависит от присутствия или отсутствия в тоннелях подвижного состава и определяется лишь расположением приточной вентиляционной перегонной шахты относительно станций. При этом, в ночной период температура воздуха имеет более низкие значения, чем температура поверхности обделки тоннеля, которая в дневной период аккумулировала часть теплоты, выделенной движущимися поездами. В дневной период при движении поездов максимальные и минимальные значения температуры

воздуха в точках, совпадающих с точками при ночных замерах, превышают их, соответственно, на 4 и 3 °С.

Натурные измерения термодинамических параметров воздуха в двухпутном тоннеле на перегоне «Беговая» – «Зенит», аналогично перегону с однопутными тоннелями, выполнялись при движении по тоннелю поездов и отсутствии подвижного состава (интервал времени 1:00 ч - 5:41 ч). И в первый и во второй периоды проектом предусматривалось проветривание тоннеля по продольно-поперечной схеме с использованием подшивного потолка, расположенного в своде тоннеля, и вентиляционных окон, связывающих его с транспортной зоной. При этом подача и удаление воздуха должны были осуществляться через вентиляционные шахты, прилегающие к станциям. Однако во время осуществления замеров выяснилось, что вентиляция функционировала или в нештатном режиме или вообще была отключена. Это приводило к тому, что воздух циркулировал между подшивным потолком и транспортным отсеком тоннеля, постепенно перемещаясь от станции «Зенит» к точке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей.

Описанный характер движения воздушного потока определил и распределения температур воздуха, и температур поверхности обделки по длине перегона между станциями. Графики, представленные на рисунках 3, 4 иллюстрируют, особенности этого распределения. Так, в дневное время при движении поездов, выделяемая ими теплота, равномерно распределяется по длине перегона, что подтверждается постоянной температурой на большей части тоннеля, за исключением участков, непосредственно прилегающих к станции, где режимы торможения и разгона поездов продуцируют максимум тепловыделений. Результатом является повышение температуры воздуха на этих участках на 2–3 °С относительно температуры в тоннелях (рисунок 3).

При отсутствии поездов характер изменения температуры воздуха по длине перегона определялся, как температурой поверхности обделки, которая прогревается за счёт аккумуляции грунтом теплоты днём в период движения поездов, так и поступлением в тоннель в ночное время воздуха с более низкой температурой, чем температура поверхности обделки. Судя по данным измерений, поступающий воздух оказывает превалирующее влияние на величину

температуры воздуха, чем теплообмен с поверхностью обделки, в результате чего она оказывается ниже температуры поверхности. При этом, относительная влажность воздуха по длине перегона изменяется в пределах 55 – 60%.

Несмотря на то, что натурные исследования термодинамических параметров воздушной среды осуществлялись в условиях, не соответствующих проектным решениям в части штатной работы вентиляционного оборудования. На основании выполненных измерений удалось установить характер влияния поршневого действия поездов на аэродинамику и тепловой режим однопутных и двухпутных тоннелей. Так вентиляционный режим однопутных тоннелей в значительной степени определялся поршневым действием поездов, приводящим к возникновению циркуляционных контуров между соседними станциями и аккумуляцией в воздухе части теплоты, выделяемой поездами. Принудительная вентиляция лишь обеспечивала подачу в тоннели наружного воздуха, который смешиваясь с циркуляционным воздухом, оказывал влияние на распределение его температуры по длине перегона. В двухпутных тоннелях, при фактическом отсутствии поршневого эффекта, характер распределения температуры воздуха на перегоне зависел только от расходов воздуха, подаваемых принудительной вентиляцией, и количества теплоты от движущихся поездов.

В однопутных тоннелях, расположенных за точкой сопряжения с двухпутным тоннелем, температура воздушного потока определялась, как циркуляцией воздуха между станцией «Приморская» и точкой сопряжения, так и температурой воздуха в конце перегона двухпутного тоннеля, подмешиваемого к циркуляционному воздуху. Следствием этого являлось повышение температуры воздуха в точке сопряжения и на станциях (прилегающих к точке сопряжения со стороны однопутных тоннелей) сверх нормативных значений в летнее и зимнее время (рисунок 5), а именно в двухпутном тоннеле перед точкой сопряжения на отметке 2010 м от станции «Зенит» составляющая 19,5 °С, на станции «Приморская» повышалась до 22÷23 °С в зимнее время и до 33 °С в летний период.

2. На участках линии метрополитена с двухпутными и однопутными тоннелями, увеличение интенсивности движения поездов в однопутных тоннелях свыше 12 пар поездов в час приводит к изменению направления движения воздуха в двух-

путных тоннелях от точки сопряжения с однопутными тоннелями в сторону ближайших трёх станций двухпутного тоннеля и изменению расхода воздуха в интервале от 18 до 46 м³/с.

Для оценки влияния поршневого эффекта в однопутных тоннелях на изменение расходов воздуха в перегонах двухпутного тоннеля, прилегающих к однопутным тоннелям, в аналитическом комплексе «Аэросеть» было осуществлено математическое моделирование аэродинамических процессов.

Расходы воздуха были рассчитаны в трех контрольных точках, расположенных на участке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей (точка 1), на следующем перегоне сразу после станции «Зенит» (точка 2), за станцией «Беговая» (точка 3) (рисунок 6).

В процессе вычислений было рассмотрено 15 вариантов парностей движения подвижного состава (далее ПС) на Невско-Василеостровской линии от станции «Рыбацкое» до станции «Беговая», включающих 5, 12, 24 и 40 пар поездов в час (далее пп/ч). При этом было принято, что расположение подвижных составов по длине рассматриваемой линии, определяется интенсивностью пассажиропотока и пропускной способностью станции. Результатом этого является присутствие на перегоне между станциями «Зенит» – «Гостиный двор» при одинаковой парности разного количества ПС. Например, при парности поездов 5 пп/ч находится один подвижной состав, при 12 и 24 пп/ч – 2÷4 ПС, при 40 пп/ч – 3÷8 ПС. Поршневой напор электропоездов в однопутных тоннелях определялся по методике, предложенной д.т.н. Лугиным И.В., основанной на вычислении напора, развиваемого поездами, который равен разности давлений в их носовой и кормовой частях. Для расчета величины давлений в носовой и кормовой частях поезда были заданы, в виде вентиляторов, «фиктивные» источники тяги. Аэродинамическое сопротивление между этими «фиктивными» источниками соответствовало сопротивлению зазора между поездом и стенками тоннеля. Анализ результатов вычислений позволил оценить степень влияния поршневого действия поездов в однопутных тоннелях на характер движения воздушного потока в двухпутном тоннеле (рисунок 7).

Максимальное влияние поршневого действия поездов на изменение количества и направления движения воздуха в двухпутном тоннеле характерно при парности 24 пар/час для всех расчетных то-

чек. Количество воздуха, инициируемое поршневым эффектом и соответствующее указанной степени его влияния при рассматриваемых парностях движения ПС, равно 18-46 м³/с. Изменение направления движения в расчетных точках связано с разным количеством поездов, проходящим по параллельным однопутным тоннелям в разные стороны (рисунок 8).

3. Обобщённая математическая модель формирования теплового режима участка линии метрополитена, состоящего из двухпутного тоннеля и однопутных тоннелей, должна объединять математические модели процессов нестационарного теплообмена потоков воздуха, движущихся в подшивном потолке и транспортном отсеке двухпутного тоннеля, и нестационарного теплообмена потоков воздуха в однопутных тоннелях, образованных в результате смешения объёмов воздуха, поступающих из двухпутного тоннеля, наружного воздуха и циркуляционного воздуха, инициируемого поршневым эффектом поездов.

Математическая модель, для вычисления распределений температур воздуха по длине двухпутного тоннеля, составлена при допущениях: - для схемы без циркуляции наружный воздух подаётся в тоннель с поверхности через подшивной потолок и один из открытых клапанов; - при наличии искусственно организованной циркуляции температура воздуха, подаваемого в подшивной потолок, вычисляется с учётом температуры и расхода циркуляционного воздуха, температуры и расхода воздуха, поступающего с соседнего перегона, а также продолжительности использования циркуляционной схемы; - процессы теплообмена породного массива, окружающего подшивной потолок и тоннель, с воздухом считаются квазистационарными, что позволяет использовать при расчёте теплового потока коэффициент нестационарного теплообмена и описывается системой уравнений (1) - (2) (рисунок 9-а).

$$G_{1пj} C_{эф.п.j} \frac{d\theta_j}{dy} = K_{т.п.п.j} U_{п}^* (T_{п.п.j} - \theta_j) + K_{т.п.j} U_{п}^{**} (t_j - \theta_j) + Z_{п.п.j} \quad (1)$$

$$-G_{2тj} C_{эф.т.j} \frac{dt_j}{dy} = K_{т.п.т.j} U_{т}^{***} (T_{п.т.j} - t_j) - K_{т.п.j} U_{п}^{**} (t_j - \theta_j) + \frac{N_{эпj}}{L_1} + Z_{п.т.j}, \quad (2)$$

где θ_j – изменение температуры в подшивном потолке и тоннеле t_j на участке протяжённостью L_1 (тт. 1-2); индекс j принимает значения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответственно для годового периода,

зимнего периода, январского периода, периода наиболее холодной пятидневки, летнего периода, июльского периода, наиболее жаркого периода; U_p^* , U_p^{**} , U_T^{***} – соответственно периметр подшивного потолка по породе, периметр подшивного потолка, омываемый воздухом, периметр тоннеля без учёта периметра подшивного потолка, м; $G_{пj}$, G_{2Tj} – весовые расходы в подшивном потолке и в тоннеле, кг/с; $C_{эф.п.j}$, $C_{эф.т.j}$ – эффективные значения теплоёмкостей воздуха на участках подшивного потолка и тоннеля между точками 1-2, Дж/(кг·°C); $T_{pн.j}$, $T_{pт.j}$ – расчётные значения температуры породного массива, окружающего соответственно подшивной потолок и тоннель, °C; $Z_{pн.j}$, $Z_{pт.j}$ – расчётные значения параметра, определяющего дополнительный тепловой поток, поступающий из породного массива к воздуху, вычисляемый в зависимости от выбранного временного периода (зима, январь, наиболее холодная пятидневка, лето, июль, наиболее жаркий период), Вт/м; $K_{\tau_{ij}}$ – коэффициент нестационарного теплообмена.

Система уравнений (1) - (2) решается при следующих граничных условиях (3):

$$\theta_j = \theta_{0j} \text{ при } y=0, \frac{d\theta_j}{dy} = 0 \text{ при } y=L_1 \quad (3)$$

Математическая модель, устанавливающая распределение температур по длине однопутных тоннелей с учетом различных количеств теплоты, выделяющихся на участках разгона, выбега и торможения, имеет вид (4):

$$G_{ij} C_{эф.ij} \frac{dt_{ij}}{dy} = K_{\tau_{ij}} U (T_{cal.ij} - t_{ij}) + \frac{Q_{ij}}{l_i} + M_{ij}, \quad (4)$$

где T_{p1j} , T_{p2j} и Z_{p1j} , Z_{p2j} , $T_{pн.j}$, $T_{pт.j}$ – соответственно расчётные значения температуры породного массива, окружающего тоннель, °C; $N_{эн.1j}$, $N_{эн.2j}$ – мощности энергетических источников теплоты, кВт; $C_{эф.стj}$ – эффективная теплоемкость воздуха на станции, кДж/кг·°C; $K_{\tau_{ij}}$ – коэффициент нестационарного теплообмена; $G_{цj}$ – расход циркуляционного воздуха, кг/с; $T_{cal.ij}$ и M_{ij} – расчётная тем-

пература пород и параметр, вычисляемые в зависимости от выбранного временного периода, °C; кВт/м; j – индекс, определяющий временной период расчета; $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ – соответствует среднегодовому периоду, средне зимнему периоду, средне январскому периоду, периоду наиболее холодной пятидневки, средне летнему периоду, средне июльскому периоду, периоду наиболее жарких суток, периоду наиболее высоких дневных температур; i – номера участков по длине перегона между станциями $i = 1, 2, 3, 4$ соответствует участкам разгона, выбега до точки смешения с наружным воздухом, выбега до начала участка торможения, торможения.

Начальные условия к уравнению (4) задаются величинами температур воздуха на входе в участки разгона, выбега, торможения. При этом конечное значение температуры на предыдущем участке

$\Delta t_{i,j}^{en}$ следует рассматривать в качестве начальной температуры на рассматриваемом участке $t_{i+1,j}^{in}$, т.е., $t_{i+1,j}^{in} = t_{i,j}^{en}$. При этом, начальные температуры на станции I принимается соответствующей конечной температуре на станции II и равными $t_{cm,j}$.

Определённые отличия, с точки зрения формирования температур в перегонных тоннелях, имеет участок однопутных тоннелей за точкой их сопряжения с двухпутным тоннелем, в которой происходит смешение циркуляционного воздуха из однопутных тоннелей с воздухом, поступающим с участка двухпутного тоннеля (рисунок 9-б). Температура воздуха в точке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей, равная $t_{т.сопр.}$ (5), является начальной температурой для перегона однопутного тоннеля, между точкой сопряжения и прилегающей к нему станции «Приморская». Данная ситуация приводит к более высоким температурам воздуха, поступающим на станцию в конце перегона, что подтверждается результатами измерений (рисунок 5).

$$t_{т.смеш.} = \frac{t_{ц} \cdot G_{ц} + G_{дв.т.}}{G_{ц} + G_{дв.т.}}, \quad (5)$$

где $t_{т.смеш.}$ – температура воздуха в точке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей °C; $t_{ц}$ – температура воздуха циркуляционного воздуха однопутных тоннелей, °C; $G_{ц}$ – расход цирку-

ляционного воздуха однопутных тоннелей, кг/с; $G_{\text{дв.т.}}$ – расход циркуляционного воздуха двухпутных тоннелей, кг/с;

Правомерность предложенных математических моделей подтверждена качественным совпадением распределений расчетных и измеренных значений температуры при разнице между ними, не превышающей 15%. Расчетные зависимости, полученные при решении системы уравнений (1) - (3), позволили обосновать параметры предложенной циркуляционной схемы проветривания двухпутных тоннелей, когда тоннельный воздух, поступающей на станцию, смешивается с наружным воздухом, подогревая его до необходимой температуры. В результате этого температура воздуха в перегонных тоннелях и на станции повышается до нормативных значений. Как показывают расчеты использование схемы проветривания двухпутных тоннелей в режиме рециркуляции целесообразно при значении температуры наружного воздуха, ниже -10°C (рисунок 10).

На тепловой режим однопутных тоннелей, прилегающих к двухпутному тоннелю, оказывает влияние расположение подающей воздух вентиляционной шахты вблизи станции. При этом, воздух из тоннеля, который связан с вентиляционной шахтой сбойкой, не удаляется на поверхность на участке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей, как при типовой схеме вентиляции перегона однопутных тоннелей между станциями, а направляется в параллельный однопутный тоннель и вновь поступает на станцию. Судя по результатам измерений, именно эта ситуация оказывает влияние на повышение температуры в однопутных тоннелях за точкой их сопряжения с двухпутным тоннелем (рисунок 5), что при температурах наружного воздуха, характеризующих наиболее жаркий месяц и наиболее жаркие сутки может привести к значению температуры на станции, превышающей нормативное значение 28°C .

Как показали выполненные расчеты, гарантированное снижение температуры воздуха на станции в летний период года может быть осуществлено за счет увеличения расхода, подаваемого в вентиляционную шахту наружного воздуха до величины, превышающей $75 \text{ м}^3/\text{с}$ (рисунок 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных исследований дана оценка факторов, определяющих вентиляционный и тепловой режимы перегонных тоннелей и станций на линиях мет-

рополитена с однопутными и двухпутными тоннелями. Применительно к двухпутным тоннелям разработана методика расчета и обоснованы параметры схем проветривания, обеспечивающие нормативные параметры воздушной среды, что вносит существенный вклад в безопасность эксплуатации метрополитенов в климатических условиях регионов Российской Федерации.

1. На основании натурных исследований Невско-Василеостровской линии метрополитена от станции «Беговая» до станции «Гостиный двор» показано, что основными факторами, определяющими вентиляционный и тепловой режимы, являются: поршневой эффект от поездов в однопутных тоннелях, приводящий к возникновению циркуляционных контуров между соседними станциями, в которых аккумулируется часть теплоты, выделяемой движущимися поездами, обуславливающей повышение температуры воздуха, поступающего на станцию. В двухпутном тоннеле поршневой эффект поездов ограничен локальной циркуляцией воздуха на участке тоннеля, занятого поездами, и не оказывает влияние на вентиляционный режим двухпутного тоннеля в целом.

2. Результаты математического моделирования поршневого эффекта поездов в однопутных тоннелях на аэродинамику воздушного потока в двухпутном тоннеле, имеющем точку сопряжения с однопутными тоннелями, выполненным в программном комплексе расчета сетевого воздухораспределения, свидетельствуют о том, что влияние поршневого эффекта распространяется по длине двухпутного тоннеля на два перегона, отсчитывая от точки сопряжения.

3. Разработанная математическая модель процессов теплообмена в двухпутном тоннеле, учитывающая тепловое взаимодействие воздушных потоков в подшивном потолке и в транспортном отсеке, верифицированная сопоставлением расчётных и экспериментальных данных, позволила показать, что применение предложенной рециркуляционной схемы проветривания рационально в зимнее время при температуре наружного воздуха -10°C и ниже.

4. Использование обобщённой математической модели процессов теплообмена в двухпутном и однопутных тоннелях позволило показать, что значение температуры воздуха на станции, расположенной в конце перегонного однопутного тоннеля, находящимся между этой станцией и точкой сопряжения с двухпутным тоннелем, определяется температурой и расходом воздуха в конце участка

двухпутного тоннеля, и в летнее время может превосходить допустимую величину температуры воздуха, равную 28°C.

5. Выполненные расчёты дали возможность установить, что гарантированное снижение температуры воздуха на станции в летний период года может быть осуществлено за счет увеличения расхода, подаваемого в вентиляционную шахту наружного воздуха до величины, превышающей 75 м³/с.

Перспективным направлением дальнейшей работы, развивающей исследования, осуществленные в диссертации, следует считать обоснование возможности утилизации теплоты исходящей из выработок метрополитена воздушной струи на основе теплоносного оборудования с последующим использованием в системах подогрева и кондиционирования воздуха.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Гендлер, С.Г. Проблемы эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями в условиях холодного климата / С.Г. Гендлер, **М.С. Крюкова** // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – №2. – С. 77-87.

2. Гендлер, С.Г. Управления тепловым режимом линий метрополитена с однопутными тоннелями / С.Г. Гендлер, **М.С. Крюкова** // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – №4. – С.116-127.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Гендлер, С.Г. Управление тепловым режимом линий метрополитена, включающих в себя двухпутные и однопутные тоннели / С.Г. Гендлер, **М.С. Крюкова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 248–269. DOI:10.25018/0236_1493_2023_91_0_248.

4. Гендлер, С.Г. Исследование термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями / С.Г. Гендлер, М.С. Крюкова, Е.Л. Алферова // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9. – №3. – С. 250-262. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-02- 223.

5. Гендлер, С. Г. Управление термодинамическими параметрами воздушной среды линий метрополитенов с однопутными тоннелями глубокого заложения / С.Г. Гендлер, **М.С. Крюкова**, К.В. Галачиев, Н.Т. Дедегкаева // Устойчивое развитие горных террито-

рий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 1343–1352. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1343-1352.

Публикации в прочих изданиях:

6. **Крюкова, М. С.** Проблемы эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями в условиях холодного климата / М.С. Крюкова // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет. – 2022. – С. 424–427.

Патенты:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660213 Российская Федерация. Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями. Заявка № 2023619093 : заявл. 27.04.2023 : опубл. 18.05.2023 / С. Г. Гендлер, **М.С. Крюкова**, А.В. Холмский; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «СанктПетербургский горный университет». – 1 с.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614307 Российская Федерация. Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с однопутными тоннелями. Заявка № 2024612235: заявл. 08.02.2024 : опубл. 21.02.2024 / С.Г. Гендлер, **М.С. Крюкова**, В.А. Родионов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615257 Российская Федерация. Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями, в конструкции которых отсутствует подшивной потолок. Заявка № 2024613709 : заявл. 26.02.2024 : опубл. 05.03.2024 / С.Г. Гендлер, **М.С. Крюкова**, В.А. Родионов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.

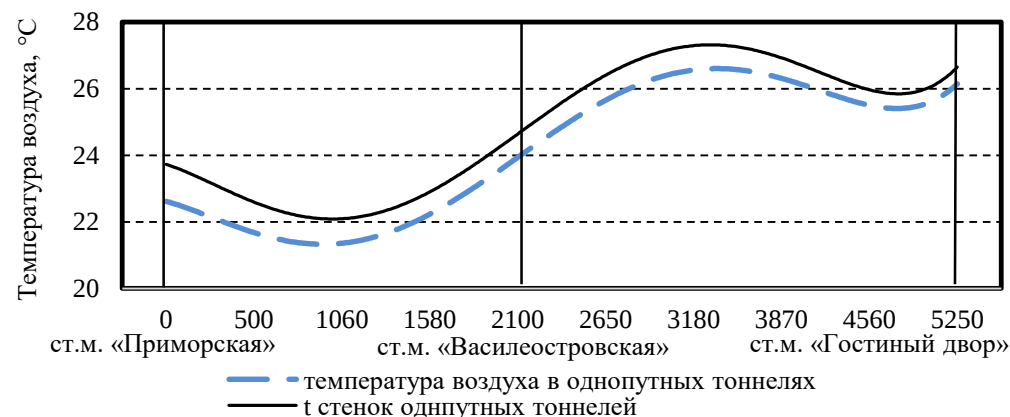


Рисунок 1 – Распределение температур воздуха и стенок на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при отсутствии движения поездов

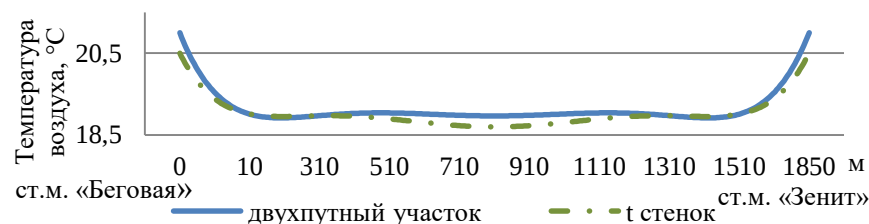


Рисунок 3 – Распределение температур воздуха на перегоне «Беговая» – «Зенит» при движении поездов в час-пик (24 пп/час)

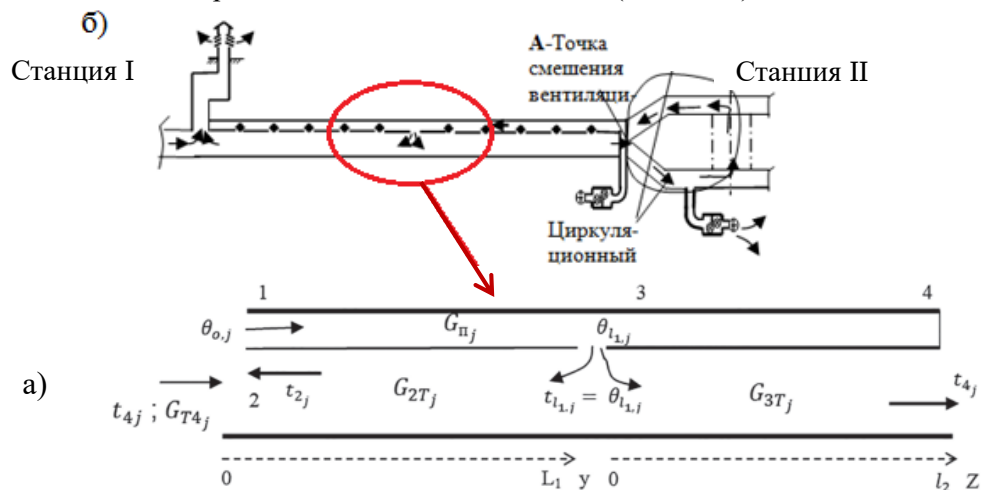


Рисунок 9 – а) расчётная схема (y и z координатные оси, отсчитываемые от станции 1 до выпускного клапана 3 и выпускного клапана до станции 2)
б) Схема вентиляции участка сопряжения двухпутного и однопутных тоннелей

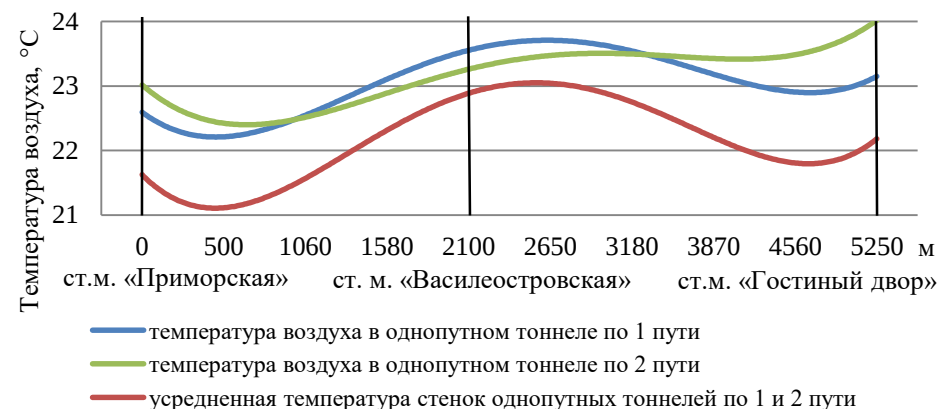


Рисунок 2 – Распределение температур воздуха и стенок на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при движении поездов в часы пик (24 пп/час)

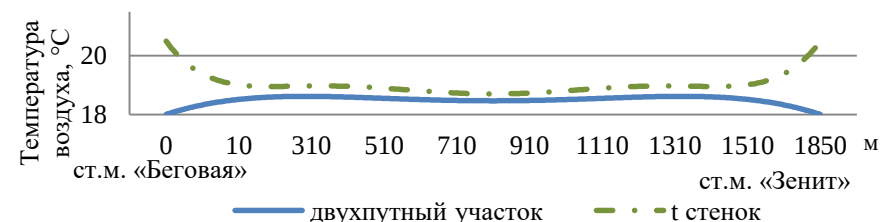


Рисунок 4 – Распределение температур воздуха на перегоне «Беговая» – «Зенит» при отсутствии движения поездов

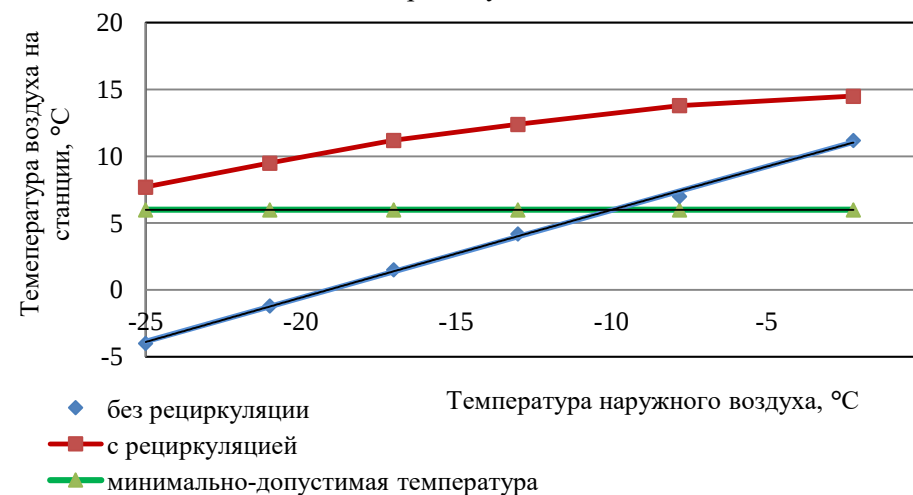


Рисунок 10 – Температура воздуха на станции при схемах проветривания с рециркуляцией и без рециркуляции воздуха

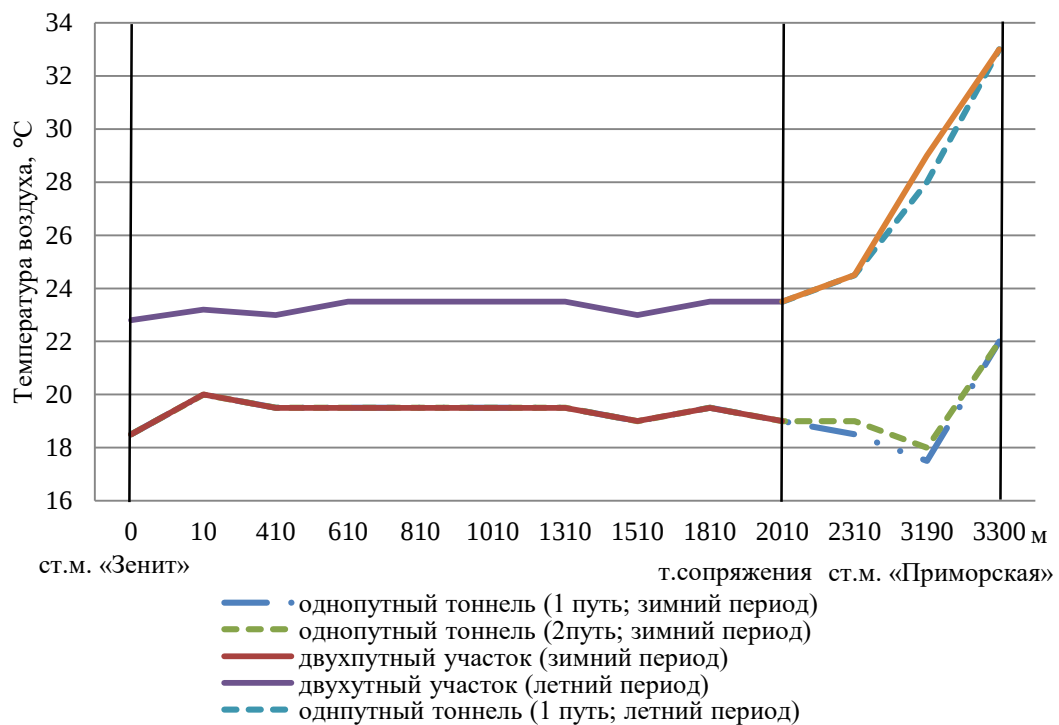


Рисунок 5 – Распределение температур воздуха на перегоне «Зенит» – «Приморская» при отсутствии движения поездов в летний и зимний периоды

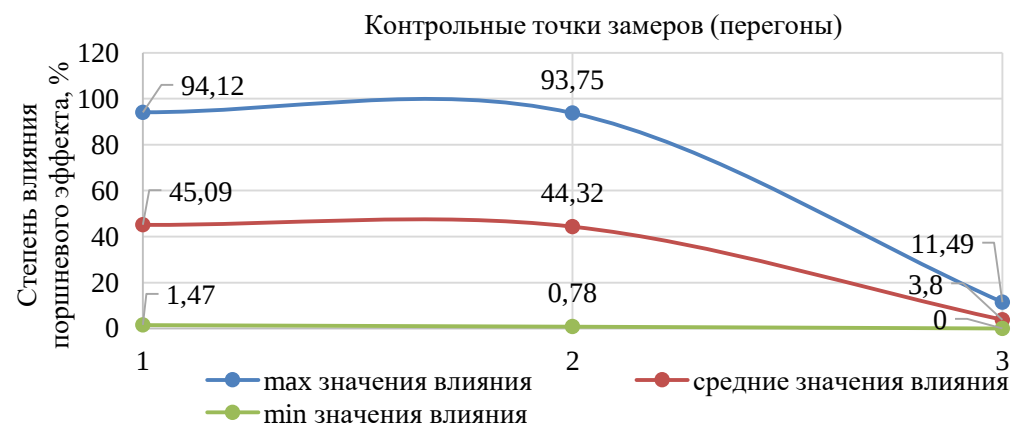


Рисунок 7 – График влияния поршневого эффекта однопутных тоннелей на прилегающие участки двухпутных тоннелей

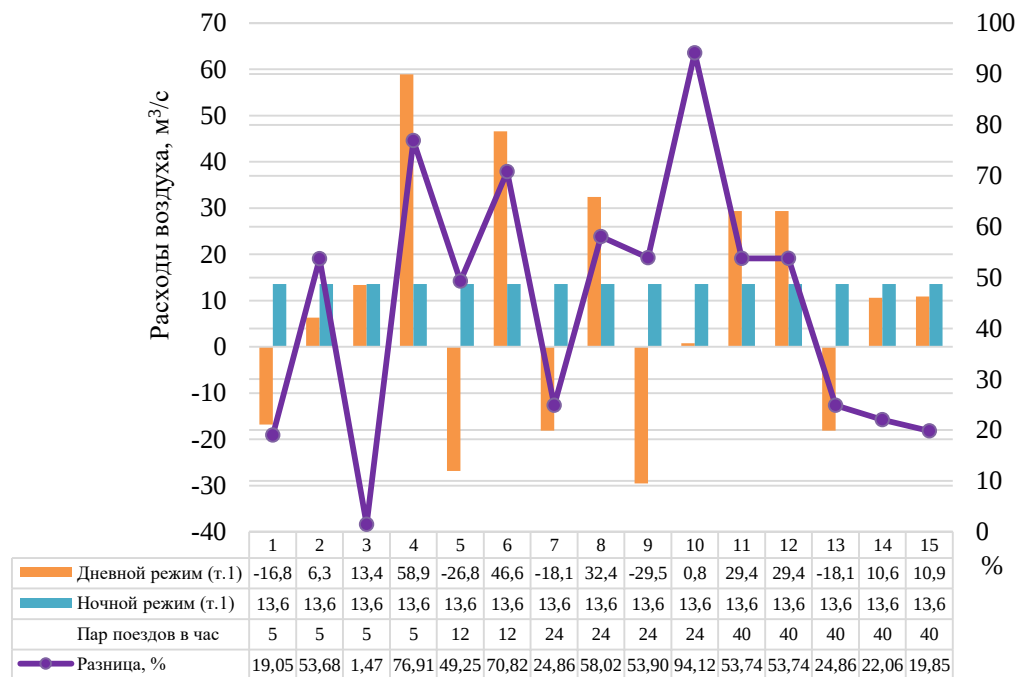


Рисунок 8 – График влияния поршневого эффекта на изменение расхода воздуха в расчетной точке №1 (точка сопряжения)

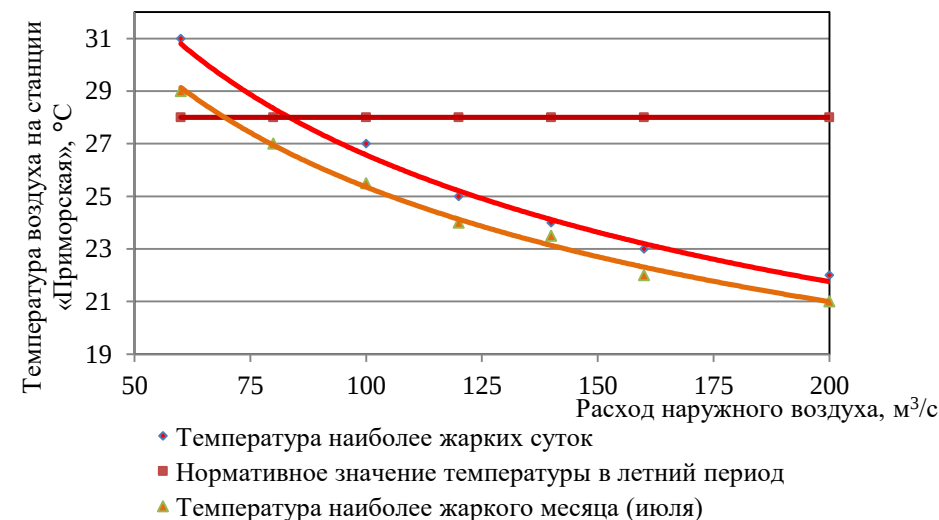


Рисунок 11 – Температуры воздуха на станции, расположенной за точкой сопряжения участка двухпутного тоннеля и однопутных тоннелей

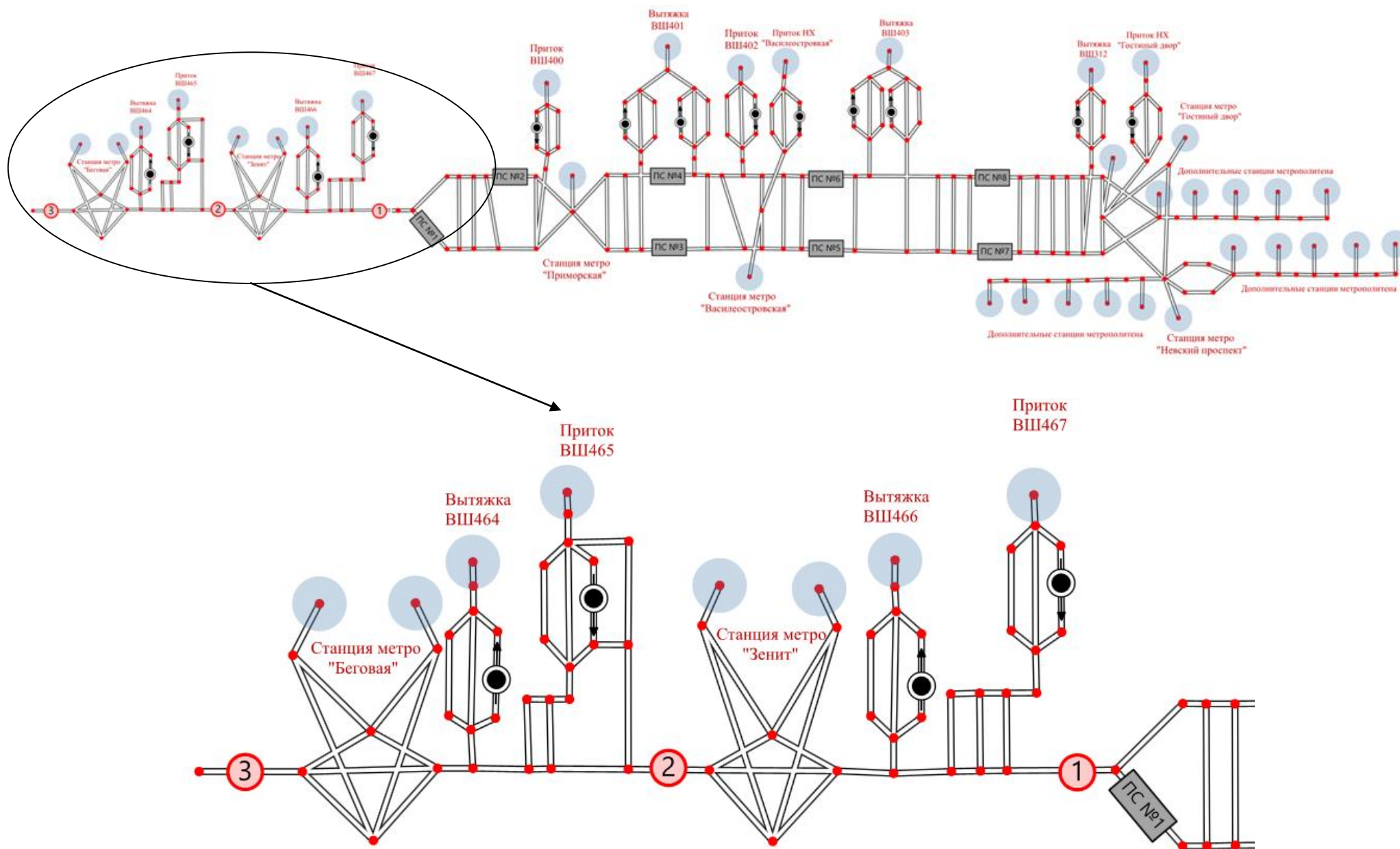


Рисунок 6 – Схема Невско-Василеостровской линии метрополитена с расчетными точками, выполненная в программном комплексе «Аэросеть»