Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гендлер С. Г.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МЕТРОПОЛИТЕНОВ 12

1.1 Термодинамические и экологические характеристики наружного воздуха 12

1.2 Конструктивные параметры перегонных тоннелей и станций для однопутных и двухпутных тоннелей 13

1.3 Энергетические и аэродинамические характеристики подвижного состава 19

1.4 Системы обеспечения безопасных аэротермодинамических условий эксплуатации метрополитенов 29

1.5 Выводы по главе 1 35

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ 36

2.1 Методика проведения натурных исследований однопутных тоннелей 36

2.2 Результаты и анализ натурных измерений температурного режима однопутных тоннелей 39

2.3 Методика проведения натурных исследований двухпутных тоннелей 42

2.4 Результаты и анализ натурных измерений температурного режима двухпутных тоннелей 48

2.5 Результаты натурных измерений температурного режима участка сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей 51

2.6 Выводы по главе 2 52

ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА УЧАСТКЕ СОПРЯЖЕНИЯ ДВУХПУТНОГО И ОДНОПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ 55

3.1 Основные методы расчётов параметров проветривания сети горных выработок 55

3.2 Математическая модель вентиляции Невско-Василеостровской линии Санкт-Петербургского метрополитена 56

3.3 Особенности учёта поршневого эффекта подвижного состава в процессе моделирования 64

3.4 Осуществление численных расчётов и оценка влияния поршневого действия подвижного состава в однопутных тоннелях на характер движения воздушного потока в двухпутном тоннеле 66

3.5 Выводы по главе 3 70

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОДНОПУТНЫХ И ДВУХПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ 71

4.1 Методика тепловых расчётов однопутных тоннелей 71

4.2 Методика тепловых расчётов двухпутных тоннелей при схеме вентиляции с использованием подшивного потолка 76

4.3 Определение области применения рециркуляционной схемы проветривания двухпутных тоннелей в климатических условиях Санкт-Петербурга 83

4.4 Особенности расчётов температур воздуха на участках сопряжения двухпутного и однопутных тоннелей 91

4.5 Рекомендации по совершенствованию вентиляции однопутных тоннелей, прилегающих к двухпутному тоннелю на участке перегона «Беговая» – «Приморская» 93

4.6 Выводы по главе 4 94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 96

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 98

ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчет статического воздухораспределения на линии метрополитена с двухпутными тоннелями и однопутными тоннелями при разной парности поездов..... 113

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт об использовании результатов кандидатской диссертации 143

ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ 144

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Расчетная модель Невско-Василеостровской линии метрополитена в программном комплексе «Аэросеть»Ошибка! Закладка не определ

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Схема Невско-Василеостровской линии метрополитена в программном комплексе «Аэросеть» и расчетные точкиОшибка! Закладка не опред

ПРИЛОЖЕНИЕ Е Плановые почасовые размеры движения поездов..... 1512

ВВЕДЕНИЕ

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 промышленными 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 реализация 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., Амано К., Хираматсу Ю., Стафильда А. и др. Их исследования посвящены вопросам вентиляции и тепловым режимам шахт, рудников, железнодорожных, автодорожных тоннелей и метрополитенам.

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.

Предмет, объект исследования

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

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

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.

Задачи исследования:

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

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°С.

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 рекомендаций по использованию рецикруляционных 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. (Приложение Б).

Методология и методы исследований

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.

Положения, выносимые на защиту

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 $м^3/с$.

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. Санкт-Петербург), Международном форуме-конкурсе молодых исследователей стран БРИКС «Актуальные проблемы недропользования» (2024, Санкт-Петербург), конкурсе бизнес-идей, научно-технических разработок и научно-исследовательских проектов под девизом «Молодые, дерзкие, перспективные» (2023, 2024, Санкт-Петербург), конкурсе грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (2024, Санкт-Петербург).

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 (пункты списка литературы № 12, 14, 17, 20, 21, 61), 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 (Приложение В).

Структура диссертации. 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 экспериментальны 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.

ГЛАВА 1 ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ И ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

1.1 Термодинамические и экологические характеристики наружного воздуха

Термодинамические и экологические параметры наружного воздуха, играют важную роль в формировании безопасных параметров микроклимата и химического состава воздуха на станциях и перегонных тоннелях. Это связано с тем, что наружный воздух подаётся в выработки метрополитена без предварительной теплотехнической подготовки (подогрев, охлаждение) и очистки от загрязняющих веществ [86].

К термодинамическим характеристикам наружного воздуха обычно относят [3, 10, 18]: его температуру, относительную влажность, атмосферное давление, а также скорость и направление ветра, который может оказывать влияние на вентиляционный и тепловой режимы в случае выхода перегонных тоннелей на поверхность, например, в электродепо. В наибольшей степени влияет на тепловой режим перегонных тоннелей и среднемесячные значения температур наружного воздуха, и характер их изменения в течение годового периода. Именно, величины температур наружного воздуха при прочих одинаковых факторах определяют особенности формирования теплового режима выработок метрополитенов [97, 99]. Так, из анализа данных таблицы 1.1, следует, что средне январские температуры наружного воздуха для метрополитенов, эксплуатируемых в России, оказываются ниже –4°С, а средне июльские не превышают 20°С÷22°С. В то же время в странах с тёплым климатом, где имеются метрополитены, средне январские температуры превышают 5°С, а в самый жаркий месяц лета (июль) – 22°С÷24°С.

Гораздо более холодный климат России определяет и закономерности формирования термодинамических параметров воздушной среды, которые необходимо учитывать при выборе способов обеспечения нормативных климатических параметров воздуха [15, 98].

Таблица 1.1 – Климатические условия в городах России и мира, где эксплуатируются метрополитены [17]

№ п/п	Город	Температуры атмосферного воздуха	
		Среднегодовая температура, °С	Температура средне январская / средне июльская, °С
1	Москва	7,00	-5,5 / 20,5
2	Санкт-Петербург	6,75	-4,5 / 19,5
3	Нижний Новгород	5,88	-8,5 / 20
4	Казань	5,25	-10 / 20,5
5	Самара	7,08	-9 / 22
6	Екатеринбург	4,08	-10,5 / 20
7	Новосибирск	2,67	-13,5 / 19
8	Мадрид	17,42	7 / 30,5
9	Рим	18,29	7,5 / 29
10	Лондон	13,29	6,5 / 21,5
11	Турин	13,71	5 / 24

Экологическая характеристика наружного связана с присутствием в нем таких вредных газообразных веществ [120], как диоксид азота (NO_2), оксид серы (SO_2), оксид углерода (CO), а также твёрдых частиц PM (2,5 –10) – пыль [117], сажа. Как газообразные, так и твёрдые загрязняющие вещества поступают в наружный воздух от автомобильного транспорта, выбросов из котельных и теплоэлектростанций, а в некоторых случаях в результате борьбы с обмерзанием тротуаров в зимнее время [13, 116].

Фоновые концентрации загрязняющих наружный воздух вредных веществ оказывают влияние на качество воздушной среды в выработках метрополитенов и их необходимо учитывать при выборе мероприятий по нормализации микроклимата [68, 72].

1.2 Конструктивные параметры перегонных тоннелей и станций для однопутных и двухпутных тоннелей

Несмотря на то, что в последнее время набирает силу тренд, связанный с сооружением двухпутных тоннелей большого диаметра, подавляющее большинство линий метрополитенов эксплуатируются с однопутными тоннелями (рисунок 1.1, 1.2) [25, 44, 105]. Каждый из метрополитенов обладает своей

спецификой с части конструктивного исполнения, технологических подходов при сооружении и эксплуатации, инженерного обеспечения функционирования, включая системы вентиляции (таблица 1.2).

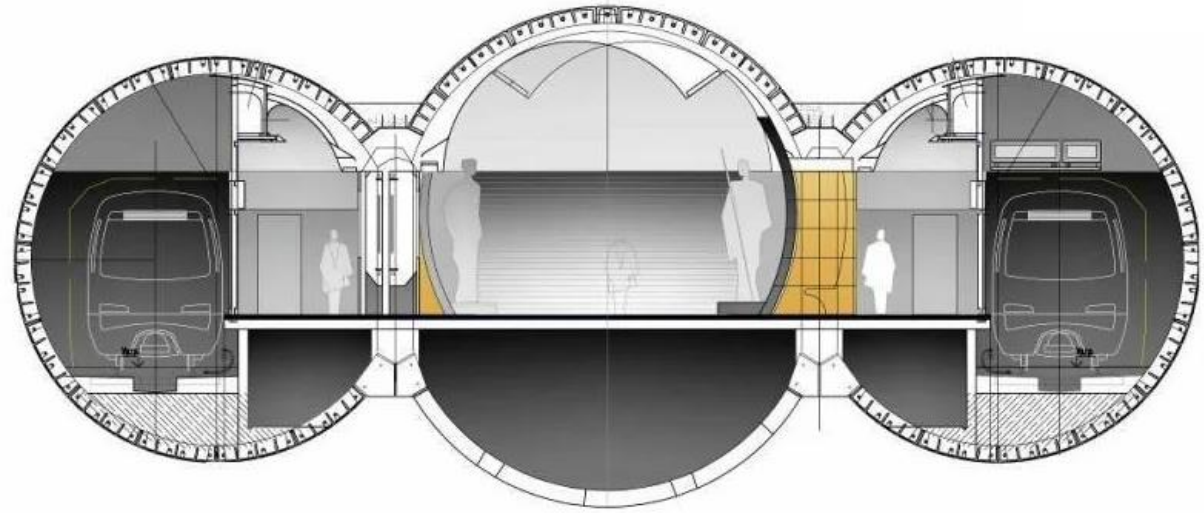


Рисунок 1.1 – Сечение станции однопутных тоннелей Невско-Василеостровской линии метрополитена в г. Санкт-Петербурге

Рисунок 1.2 – Однопутные тоннели Невско-Василеостровской линии метрополитена в г. Санкт-Петербурге (перегон «Зенит» – «Приморская»)

Как следует из таблицы 1.2, подавляющее большинство линий метрополитенов состоит из однопутных тоннелей, как глубокого, так и мелкого заложения. Необходимость снижения стоимости перевозок связано с постоянным

совершенствованием конструкций перегонных тоннелей и станций, что достигается при использовании инновационных технологий строительства, в частности, с помощью тоннелепроходческих щитов. Высокие скорости развития подземного транспорта требуют применения современных тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) большого диаметра [14]. Их использование позволяет осуществлять проходку выработок на глубинах более 30 м без нарушения земной поверхности и негативного влияния на состояние зданий и сооружений, что особенно важно для густонаселенных района мегаполисов [22].

Таблица 1.2 – Характеристика метрополитенов России

№	Город	Количество станций, шт.	Состав линий метрополитена				Системы обеспечения НПВС[1]	
			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)

В последние годы на метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга началось сооружение двухпутных тоннелей, чему способствовало развитие современных строительных технологий на основе ТМПК [11, 35, 97]. Перспективы использования двухпутных тоннелей доказаны многолетним периодом их

[1] НПВС – нормативные параметры воздушной среды

эксплуатации во многих городах мира [95, 104, 127]: Берлине, Гамбурге, Токио, Сиднее, Филадельфии, Буэнос-Айресе, Торонто, Осаке, Гамбурге, Вене, Будапеште, Афинах, Мадриде, Риме, Неаполе, Копенгагене, Брюсселе, Осло, Нью-Йорке, Чикаго и Бостоне. Строительство таких тоннелей в России началось в 2015 году в Санкт-Петербурге и в 2016 Москве. Двухпутные тоннели успешно эксплуатируются в Москве на Некрасовской линии (станции метро «Нижегородская» – «Косино») и Большой кольцевой линии (станции метро «Мневники» – «Давыдкино», «Кленовый бульвар» – «Текстильщики»), в Санкт-Петербурге – на Невско-Василеостровской (станции метро «Зенит» – «Беговая») (рисунок 1.3, 1.4, 1.5, 1.6) и Фрунзенско–Приморской линий («Проспект Славы» – «Шушары»).

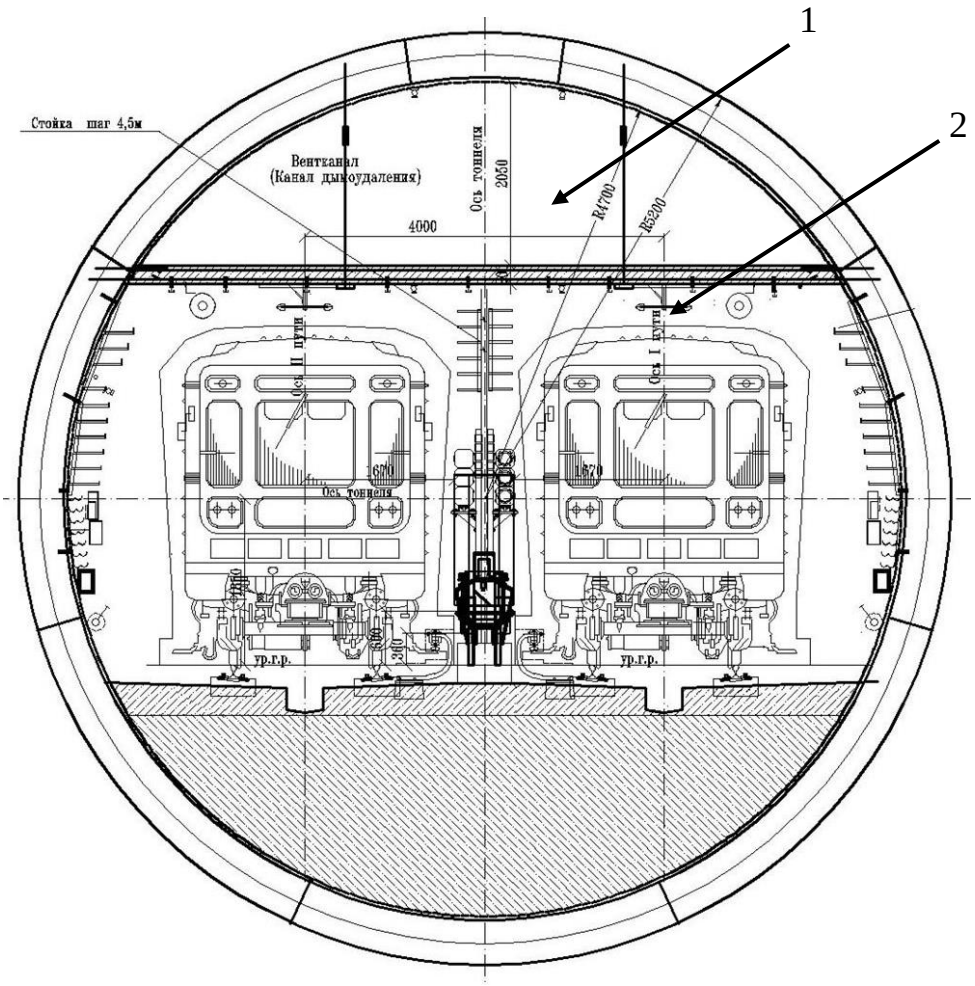


Рисунок 1.3 – Сечение двухпутного тоннеля Невско-Василеостровской линии метрополитена в г. Санкт-Петербурге, где 1 – подшивной потолок, образующий вентиляционный канал; 2 – транспортная зона тоннеля

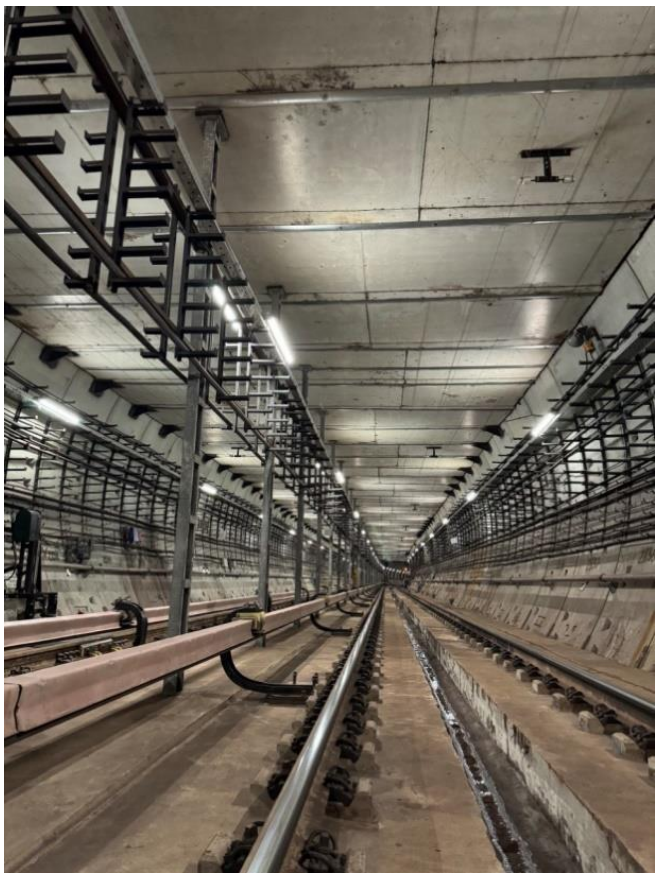


Рисунок 1.4 –Транспортная зона двухпутного тоннеля Невско-Василеостровской линии метрополитена в г. Санкт-Петербурге (перегон «Зенит» – «Беговая»)

Рисунок 1.5 – Вентиляционный канал двухпутного тоннеля Невско-Василеостровской линии метрополитена в г. Санкт-Петербурге (перегон «Зенит» – «Беговая»)

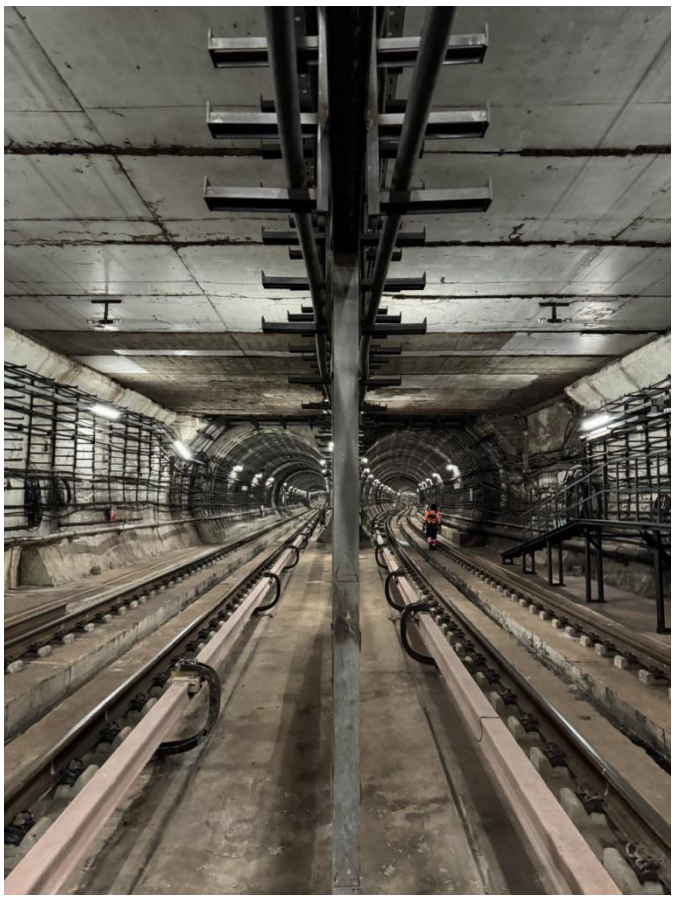


Рисунок 1.6 – Точка сопряжения двухпутного тоннеля с однопутными Невско-Василеостровской линии метрополитена в г. Санкт-Петербурге (перегон «Зенит» – «Приморская»)

Планируется пустить в эксплуатацию участки с двухпутным тоннелем в Новосибирском (Дзержинская линия) и Екатеринбургском метрополитенах (вторая линия) [38, 41].

Согласно зарубежному опыту строительства первое двухпутное метро было построено в Мадриде: за 12 лет – 156 станций и 199 км путей. Поэтому строительство двухпутных тоннелей метро называют «испанским методом» [62]. Метод получил мировое признание и широко используется в различных странах мира. Опыт строительства и эксплуатации таких тоннелей показал ряд достоинств использования «испанской технологии».

Во-первых, сооружение таких тоннелей обходится дешевле на 20÷30%, а также увеличена скорость строительства – примерно 450 метров в месяц [61]. Тем самым происходит уменьшение времени строительства в сравнении с

традиционными однопутными тоннелями при одновременном снижении сроков работ [119, 128].

Во-вторых, сокращение времени строительства происходит из-за особенностей пространственно-планировочных решений. При сооружении двухпутного тоннеля, отпадает необходимость в дорогостоящем и трудозатратном строительстве камер съездов, эвакуационных сбоек, и других выработок [87, 88, 100].

Третьим достоинством является создание требуемых санитарно-гигиенических условий; обеспечение безопасности движения поездов и гарантия безопасной эвакуации пассажиров и персонала в случае возникновения аварийной ситуации, например, пожара [42, 43, 130].

1.3 Энергетические и аэродинамические характеристики подвижного состава

Вентиляционный и тепловой режимы тоннелей метрополитена в определённой степени определяются эксплуатационными характеристиками транспортных средств (скорость движения поездов, режимы разгона и торможения, интенсивность движения и т.п.), направлением движения воздуха на перегонах между станциями, как при движении поездов, так и во время их отсутствия (в ночное время), а также типом перегонных тоннелей (однопутные или двухпутные) [93, 111].

Энергетические характеристики подвижного состава, определяют количество теплоты, выделяющееся в процессе их движения по перегонным тоннелям и зависящие от профиля линий метрополитена и типа метропоезда.

Максимальная мощность двигателей метропоездов может достигать 3000÷4000 кВт [23]. При этом, тепловыделения от подвижного состава, составляют почти 80% в общем тепловом балансе метрополитена [32], не являются постоянными во времени и распределены неравномерно по длине каждого перегона. В часы пик, когда интенсивность движения поездов достигает 34-38 пар/час, они максимальны, в вечерние и дневные часы они снижаются примерно пропорционально интенсивности движения, которое уменьшается до 10-16 пар/час. Наконец, в ночные часы, эти тепловыделения могут вообще

отсутствовать. Среднюю величину тепловыделений от подвижного состава принято оценивать по среднечасовому расходу электроэнергии и измерять в кВт/т·км. Например, для метрополитенов Москвы и Санкт-Петербурга она составляет 0,042÷0,048 кВт/т·км [40, 96].

Влияние режима движения поездов на величину тепловыделений в однопутных тоннелях рассматривалась в работах Ю. М. Ракинцева. По данным его исследований наибольшее количество теплоты выделяется при торможении, стоянке на станции и в начале разгона, которое происходит в пределах станции [85]. Значительно меньше тепловыделений на участке разгона и они совсем минимальны на участке выбега. Так, по его оценкам при интенсивности движения поездов 45 пар/ч и наполнении вагона 250 чел/ваг тепловыделения на станции в 8,2 раза больше, чем на участке разгона однопутного тоннеля, и в 38,4 раза больше, чем на участке выбега; при вдвое меньшем наполнении вагона и интенсивности движения поездов на станции выделяется в 16 раз теплоты больше, чем на участках разгона и выбега.

Проветривание перегонных тоннелей и станций осуществляется при сочетанном действии принудительной вентиляции и поршневого эффекта подвижного состава (рисунок 1.7). Степень влияния поршневого действия поездов на движение воздуха различна для однопутных и двухпутных тоннелей [115, 118]. Для однопутных тоннелей поршневой эффект приводит к циркуляции воздуха между перегонными тоннелями через соседние станции, или при наличии сбоек между станциями и сбойками [48]. Количество воздуха, циркулирующего в каждом циркуляционном контуре, зависит от расстояния между соседними станциями (сбойками), скорости поезда и интенсивности их движения [47, 52, 53]. Это явление было экспериментально подтверждено Э. М. Юшковским [114].

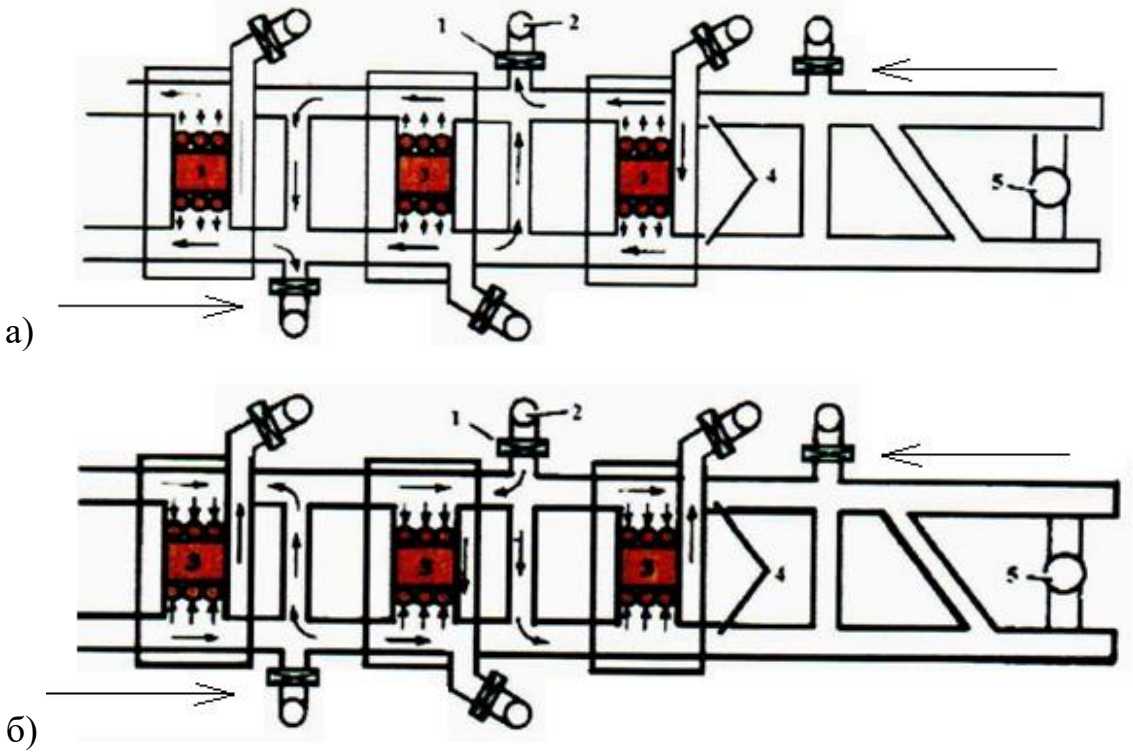


Рисунок 1.7 – Схема проветривания метрополитенов глубокого заложения со стволами у станций и на перегонах : а) в летний период; б) в зимний период, где ⟶ – движение воздуха в тоннелях; 1 – вентиляционные камеры у станций; 2 – вентиляционные шахты (стволы); 3 – станции; 4 – перегонные тоннели; 5 – вентиляционная шахта в тупике

Им была предложена зависимость, связывающая расход циркуляционного воздуха $G_ц$ ($м^3/с$) со скоростью его движения $V_п$ (м/с), сечением тоннеля $S_т$ ($м^2$) и протяжённостью участка между станциями (длина перегона) или станцией и сбойкой $l_ц$ (м), а также парностью (интенсивностью) движения поездов $n_п$ (пар/час) (1.1):

$$G_ц = V_п S_т(0{,}26 - 2{,}88/ n_п) \exp [(0{,}00036 – 0{,}0027/n_п) l_ц] \qquad (1.1)$$

Для теоретической оценки поршневого действия поездов в однопутных тоннелях метрополитена в работе [15] было сделано допущение, что распределение воздушных потоков в перегонных тоннелях, связывающих соседние станции, может быть установлено при допущении о возможности замены каждого из поездов, находящихся в тоннелях, «эквивалентными» вентиляторами, развивающем депрессию, равную депрессии поезда $h_{порш.}$. Для единичного поезда расход воздуха, перемещаемый с помощью поршневого

эффекта, определяется формулой, предложенной Г.Н. Абрамовичем [1] (1.2) - (1.2.1):

$$Q_{\text{порш.}} = \frac{S_T v_{\text{п}}}{1 + \dfrac{1}{(1 - k_{\text{зап.}})\sqrt{\xi_T \dfrac{F_T\ (1 - k_{\text{зап.}})}{F_{\text{эк}}\ (1 + C_f^{'} n_{\text{ваг.}} \dfrac{S_{\text{п.в.к.}}}{F_{\text{эк}}})}}}} \tag{1.2}$$

$$\xi_T = 1{,}5 + 4\lambda_{\text{т}}(l_{\text{м.и.}} - l_{\text{п}})/d_{\text{э}} \tag{1.2.1}$$

где $S_{\text{т}}$ – сечение тоннеля, (м^2);

$k_{\text{зап.}}$ – коэффициент заполнения сечения тоннеля поездом;

ξ_T – аэродинамический коэффициент полного сопротивления расчетной длины тоннеля, приходящейся на один поезд;

F_T – площадь сечения тоннеля, (м^2);

$F_{\text{эк}}$ – эквивалентная площадь поезда, (м^2);

$n_{\text{ваг.}}$ – число вагонов в поезде;

$S_{\text{п.в.к.}}$ – площадь крыши стенок и дна вагона, (м^2);

$C_f^{'}$ – эффективное значение теплоемкости воздуха, вычисленное с учетом массообменных процессов Дж/(кг град.);

$\lambda_{\text{т}}$ – аэродинамический коэффициент сопротивления трению воздуха о стенки тоннеля;

$l_{\text{м.и.}}$ – расстояние между поездами, (м);

$l_{\text{п}}$ – длина поезда, (м);

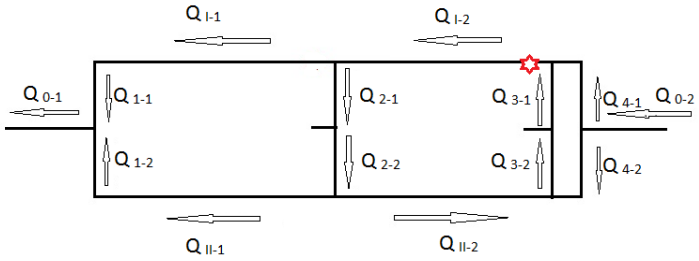
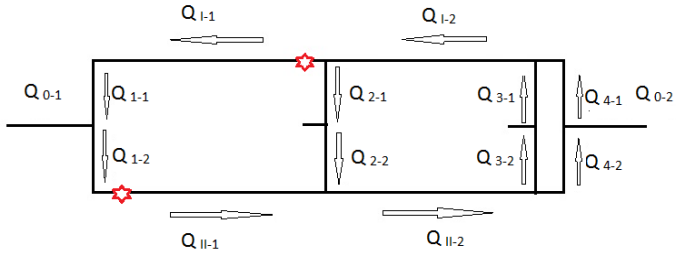
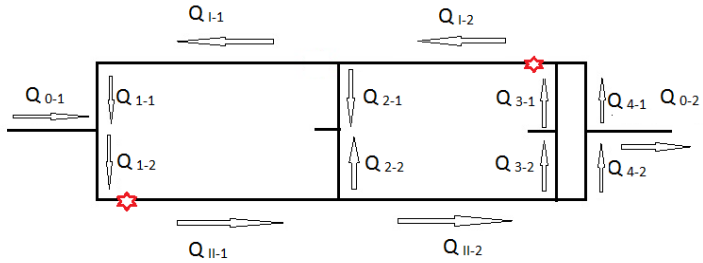
$d_{\text{э}}$ – эквивалентный гидравлический диаметр тоннеля, м.

В свою очередь, депрессия поезда будет определяться соотношением [9] (1.3):

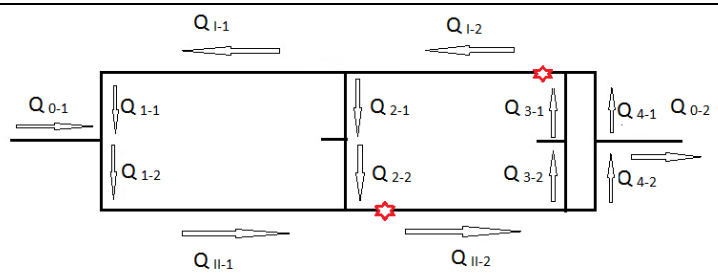
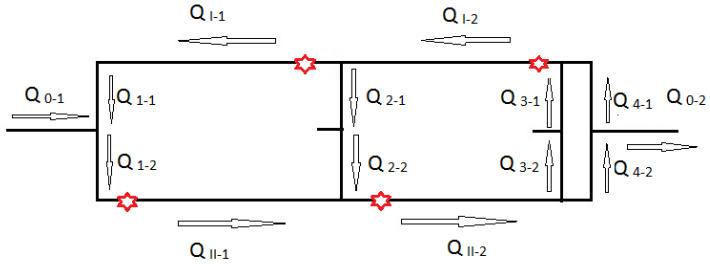
$$h_{\text{порш.}} = \frac{0{,}5\xi_T\ \rho_{\text{в}}}{S_T^2} Q_{\text{порш.}}^2 \tag{1.3}$$

Для расчёта взаимного влияния на распределение воздуха нескольких поездов, находящихся на перегоне между станциями, в программе «Вентиляция 2» была осуществлена серия расчётов, результаты которых иллюстрируются на рисунках 1.8–1.9 и в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Распределение расходов воздуха по перегонным тоннелям и сбойкам, связывающим соседние станции (✸ – место расположения поезда)

Схемы / Расход, $м^3/с$	Q_{I-1}	Q_{I-2}	Q_{II-1}	Q_{II-2}	Q_{0-1}	Q_{0-2}	Q_{1-1}	Q_{1-2}	Q_{2-1}	Q_{2-2}	Q_{3-1}	Q_{3-2}	Q_{4-1}	Q_{4-2}
	29,7	86,1	26,4	29,1	56,1	49,3	29,7	26,4	56,4	55,5	43,9	36,2	42,2	7,1
	88,6	13,3	88,6	13,3	0	0	88,6	88,6	75,3	75,3	7,7	7,7	5,6	5,6
	69,1	71,2	70,7	70,7	1,65	1,7	69,1	70,7	2,1	0,1	42,0	39,9	29,1	30,8

Продолжение таблицы 1.3

	12,9	89,1	13,5	89,8	0,58	0,6	12,9	13,4	76,3	76,4	51,6	51,7	37,5	38,1
	89,3	89,9	89,3	90,3	0,03	0,27	89,0	89,3	0,8	1,0	51,9	52,1	37,9	38,2

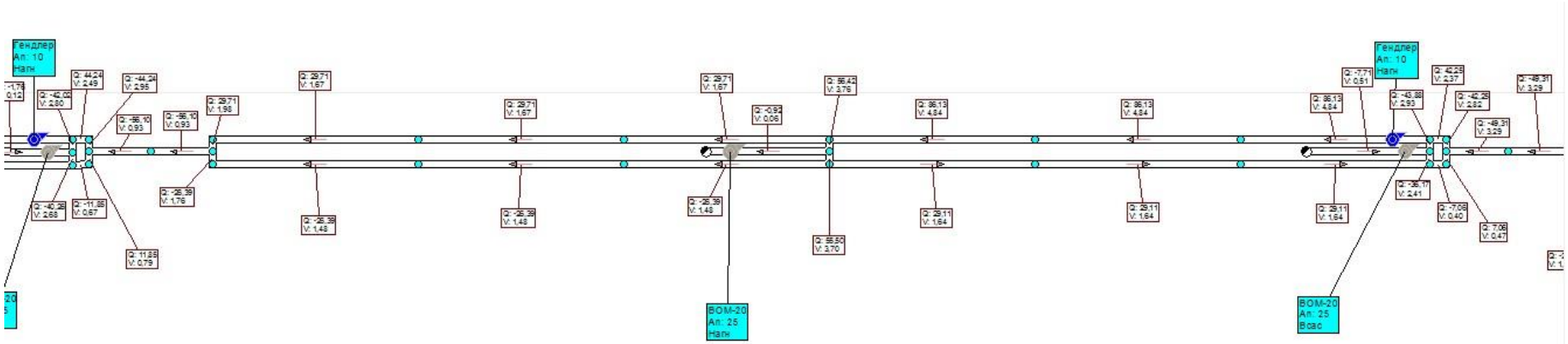


Рисунок 1.8 – Расчётное распределение воздуха для схемы 1 (Таблица 3.1)

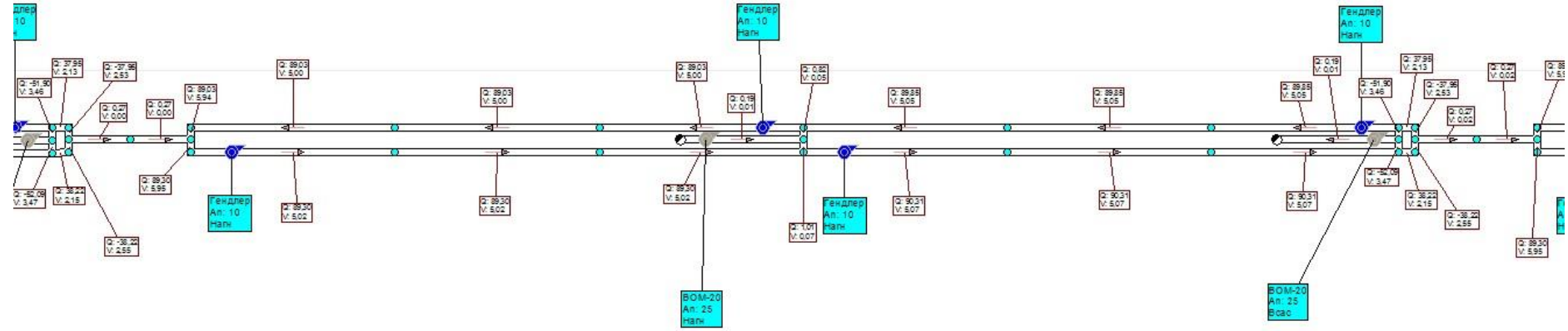


Рисунок 1.9 – Расчётное распределение воздуха для схемы 5 (Таблица 3.1)

Анализ результатов расчёта свидетельствует о том, что при прочих равных условиях (геометрические и аэродинамические параметры тоннелей, скорость движения, геометрические размеры метропоездов и т.п.) распределение воздуха по параллельным тоннелям и сбойкам зависит от количества и места нахождения поездов в перегонных тоннелях. В рамках рассмотренных 5-ти сценариев расход воздуха на различных участках перегона может изменяться в пределах 12-90 $м^3/с$.

Сопоставление результатов вычислений по предлагаемой методике с данными экспериментальных исследований, представленными на рисунке 1.7, для случая неработающей вентиляции, и показало удовлетворительное совпадение между средними расходами ними воздуха, рассчитанными при одинаковой частоте движения поездов по перегону.

Возникающая рециркуляция воздуха приводит к тому, что часть тепловой энергии, выделяющейся в тоннелях и на станциях, не выводится наружу, а, наоборот, остается внутри тоннелей и перераспределяется по длине перегонов. В зимний период времени циркуляционный воздух, имеющий положительную температуру, смешивается с холодным наружным воздухом, подаваемым в тоннели через перегонные шахты, в результате чего в тоннели поступает воздух с начальной температурой, которая значительно выше температуры наружного воздуха. На изменение температуры воздуха в перегонном тоннеле на участке от места смешения с холодным наружным воздухом до станции влияет также теплообмен воздуха с породами и массообменные процессы. Количество воздуха, проходящего по тоннелям, будет приблизительно равно сумме расхода воздуха, подаваемого вентиляторами, и расхода, определяемого поршневым действием поездов, зависящим от длины перегона между станциями, длины поезда, интенсивности и скорости их движения [27-30].

С увеличением интенсивности движения поездов с одной стороны, повышается суммарное количество выделяющейся теплоты, а с другой, увеличивается расход циркуляционного воздуха. Для оценки влияния этих факторов в работах [24, 49] были выполнены расчёты количества теплоты,

выделяемой при движении поездов, и расходы циркуляционного воздуха, создаваемые в результате поршневого эффекта.

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. Так же оказывается, что отношение количества теплоты, выделяемой от поездов, к расходу циркуляционного воздуха (N_0), не зависит от интенсивности движения и в зависимости от длины перегона варьируется от 4 до 8,75. Отношение N_0 постоянно для каждой длины перегона (рисунок 1.10).

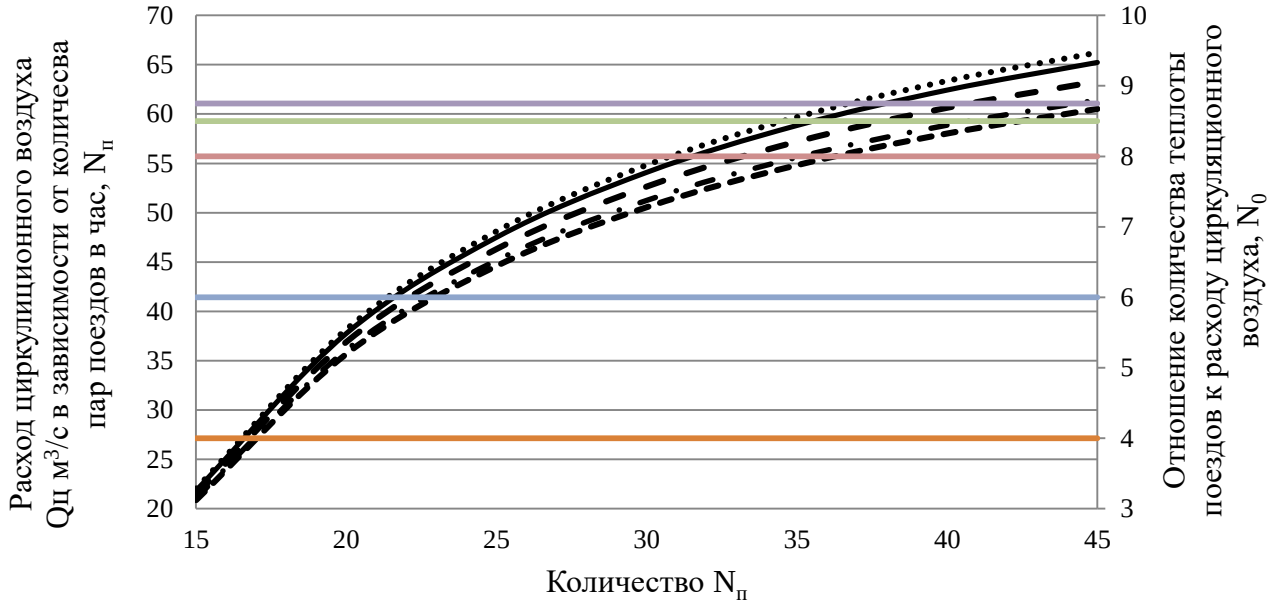


Рисунок 1.10 – Расход циркуляционного воздуха $Q_ц$, отношение количества теплоты от поездов к расходу циркуляционного воздуха (сплошная линия) в зависимости от интенсивности движения поездов $N_п$ (пар/ч), где – длина перегона 500 м; – длина перегона 1000 м; – длина перегона 2000 м; – длина перегона 3000м; – N_0 для перегона 500 м; – N_0 для перегона 1000 м; – N_0 для перегона 2000 м; – N_0 для перегона 3000 м; – N_0 для перегона 3500 м;

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

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 даёт возможность обеспечить на станциях и в тоннелях положительную температуру [109,110].

Похожая ситуация возникает и при некоторых схемах проветривания, которые используются в ночное время. Эти схемы предусматривают подачу воздуха в тоннели не по перегонным, а по станционным шахтам. Результатом этого является охлаждение участков тоннелей вблизи станций и, напротив, прогрев тоннелей у перегонных стволов (рисунок 1.11) [83].

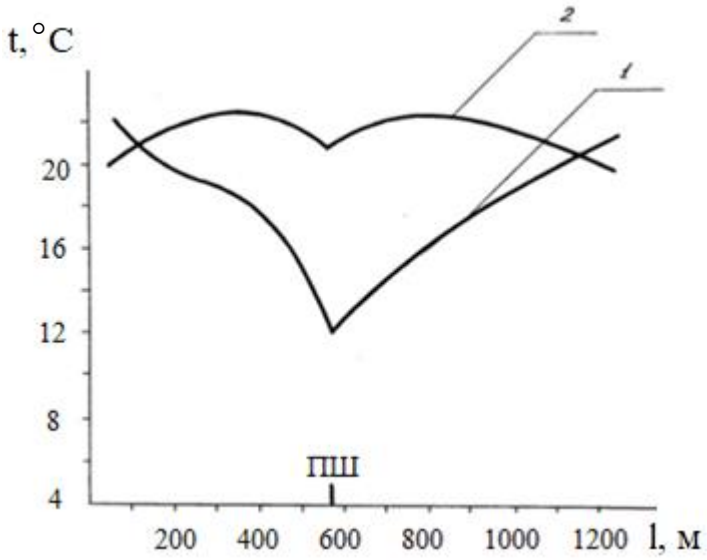


Рисунок 1.11 – Типовое распределение температур по длине перегона между станциями, где 1 - подача воздуха в перегонную шахту (ПШ), 2 - подача воздуха через станционные шахты

Влажность воздуха в метрополитене имеет более низкий уровень по сравнению с железнодорожными и автомобильными тоннелями. Среднегодовая величина уровня влажности после 10-15 лет эксплуатации стабилизируется в диапазоне 45-55%. Такое значение может быть объяснено, как повышением температуры тоннельного воздуха, так и отсутствием значительных источников

влаговыделений (капеж и течи через обделку, влажность в дренажных лотках и т.п.). В то же время в метрополитенах при сравнительно незначительном изменении температуры воздуха в течение года (в пределах 15÷25°С) наблюдается диапазон значений его относительной влажности от 25% зимой до 60-65% летом.

Особенностью двухпутных тоннелей в отличие от однопутных тоннелей является отсутствие циркуляционных потоков, инициируемых движущимися в противоположенных направлениях поездами. Численное моделирование, выполненное в институте горного дела СО РАН, показали, что встречное движение поездов не создаёт однонаправленного потока воздуха вдоль тоннеля. При встречном движении поездов в тоннеле образуются локальные области с повышенным или пониженным давлением, которые приводят к развитию циркуляционных воздушных зон, совмещённых с движущимися поездами [58].

1.4 Системы обеспечения безопасных аэротермодинамических условий эксплуатации метрополитенов

Обеспечение нормативных аэротермодинамических условий при эксплуатации метрополитенов является одним из важнейших технологических процессов, гарантирующих их безопасность в широком диапазоне изменения климатических параметров атмосферного воздуха, температуры горного массива и режимов движения подвижного состава. Объектами регулирования могут быть как воздушная среда, так и горный массив, окружающий подземные выработки. В последнем случае формирующиеся в нем термовлажностные поля не должны приводить к развитию таких физико-механических процессов, как обмерзание тоннельных конструкций и обустройств, наледеобразованию, разрушению тоннельной обделки из-за термических деформаций.

Системы обеспечения безопасных аэротермодинамических условий эксплуатации метрополитенов должны включать системы вентиляции и регулирования термодинамических параметров воздушной среды. При этом, в зависимости технологических требований поддержание необходимого теплового

режима может осуществляться или во всех выработках метрополитена, или в его отдельных частях.

Для проветривания метрополитенов используются схемы, как с подачей наружного воздуха через вентиляционные стволы на перегонах между станциями и удалением загрязнённого тоннельного воздуха через станционные вентиляционные сооружения (наклонные ходы, стволы), так и «наоборот» с подачей воздуха через станционные вентиляционные сооружения и удалением загрязнённого воздуха через стволы на перегонах. При эксплуатации однопутных тоннелей на распределение расходов воздуха по перегонным тоннелям в пределах перегонов между станциями влияют сбойки, соединяющие перегонные тоннели и поршневое действие поездов.

На рисунке 1.12 показаны типовые схемы проветривания, которые используются для метрополитенов с однпутными перегонными тоннелями глубокого заложения, прилучившими наибольшее распространение в Санкт-Петербурге [101-103].

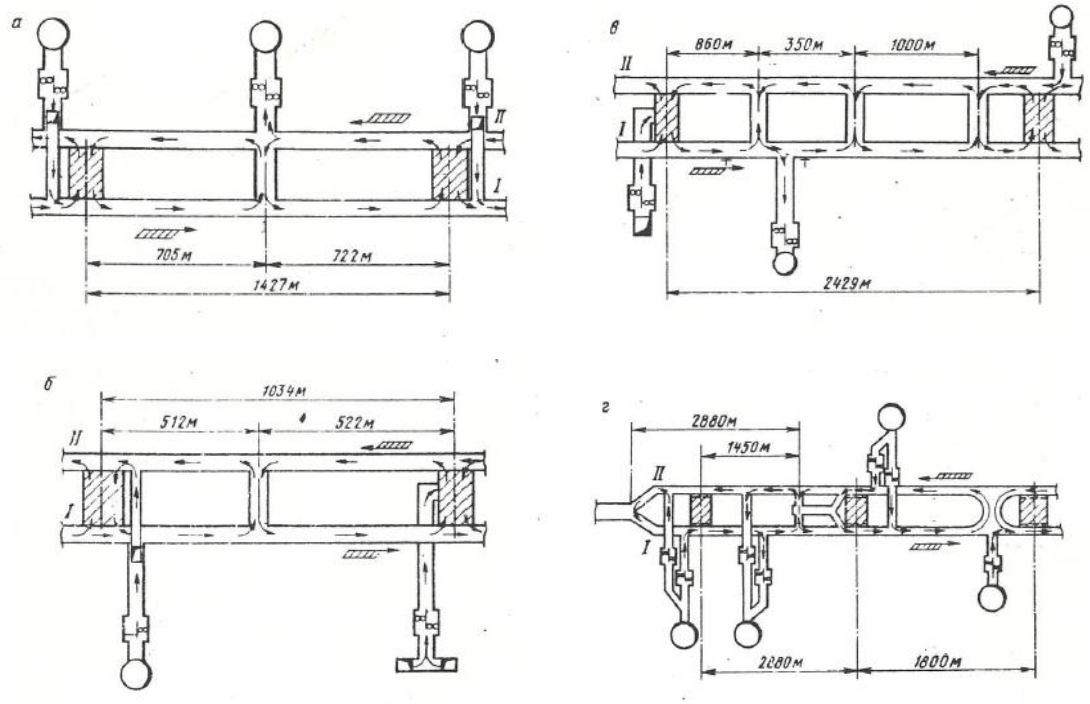


Рисунок 1.12 – Схемы проветривания участка трассы метрополитена, где а – с вентиляционной шахтой на перегоне; б – без вентиляционной шахты на перегоне, в – с дополнительными вентиляционными сбойками на перегоне; г – при раздельном проветривании тоннелей

Для подачи свежего и удаления загрязнённого воздуха используются вентиляторы, установленные в вентиляционных камерах, приуроченные к перегонным и станционным стволам. В качестве основных типов вентиляционного оборудования в российских метрополитенах используются осевые вентиляторы, производимые в АО «Вентпром» (ВОМД -24, ВОМ-18, ВОМ-20), ЗАО «ЛАДА-ФЛЕКТ» (вентиляторы серии Аксипал FTDA с диаметром рабочего колеса до 1800 мм). Более скоромно представлены вентиляторы зарубежных компаний «Zitron», «FlakWoods», «Howden».

Для метрополитенов мелкого заложения может быть использован способ проветривания без участия вентиляторов за счёт поршневого действия поездов и естественной тяги. Такой способ нашёл применение в метрополитенах Новосибирска и Екатеринбурга.

Для обеспечения нормальных условий эксплуатации (сохранения отделочных материалов, исключения возможности замораживания систем водоотлива, водопровода и канализации) температура воздуха на станциях по существующим нормам [97, 112] должна быть не менее $t_{ст} \geq +5°C$. Исходя из этого в климатических районах, где средняя температура самого холодного месяца $t_{хм} < 0°C$, систему вентиляции следует сооружать реверсивной: в тёплое время года воздух необходимо подавать на станцию и извлекать через перегон, а в холодное — на перегон и извлекать через станцию. В тёплое время года на станции будет поддерживаться наиболее низкая температура, а в холодное время года воздух, поступающий на перегон, подогревается за счёт теплоты, выделяемой в тоннелях поездами и различным оборудованием, и на станцию поступает с наиболее высокой температурой. В климатических районах со средней температурой самого холодного месяца $t_{хм} > 0°C$ система подачи и удаление воздуха на станциях и перегонных тоннелях в течение года может быть постоянной (приток чистого воздуха только через станцию, а извлечение отработанного воздуха только через перегон). Однако проведённые исследования [106] показывают, что такая система вентиляции приводит, как правило, к завышенному воздухообмену.

Систему охлаждения воздуха в климатических условиях Российской Федерации обычно применяют для служебных помещений метрополитенов, в метропоездах и, реже, в качестве локального охлаждения воздуха в переходах между станциями или непосредственно на станции (например, станция «Площадь Мужества» в Санкт- Петербурге).

Как показывает мировой опыт, общее охлаждение воздуха на станциях используется в метрополитенах мелкого заложения, расположенных в жарком климате. Например, в Токийском метрополитене летом в ночное время на станциях замораживают лёд, который утром в виде ледяной смеси распыляют по станциям. В метрополитене Милана для охлаждения воздуха используют адиабатическое охлаждение с помощью тумана. Похожие системы охлаждения применяют во многих южных городах. В Сингапурском метрополитене охлаждение воздуха осуществляется в пределах платформенного пространства, которое отделено от рельсового пути тамбурными дверями, а воздух из перегонных тоннелей удаляется наружу с помощью подплатформенной вентиляции [16] (рисунок 1.13).

Использование системы локального подогрева воздуха при эксплуатации метрополитенов становится актуальным на конечных станциях, так называемые «тупиковые станции», «тупик». Это особенно становится важным для метрополитенов мелкого заложения, расположенных в суровом климате, в которых поршневое действие поездов приводит к поступлению на станцию атмосферного воздуха с отрицательной температурой. В связи с этим, для снижения мощности его подогрева, наряду с мероприятиями по сокращению его количества, следует использовать воздушно-тепловые завесы [57, 63].

Для метрополитенов с двухпутными тоннелями, аналогично Сингапурскому метрополитену, имеется возможность отделения системы тоннельной вентиляции от системы вентиляции станций за счёт отделения платформы от рельсовых путей с помощью перегородок, что приводит, по типу Невско-Васильеостровской линии, к созданию станций закрытого типа [39, 54] (рисунок 1.14, 1.15). Необходимость разделения воздушных контуров подтверждается исследованиями

требуемых расходов воздуха в пассажирских помещениях станций и в тоннелях. Требуемый расход воздуха для двухпутного тоннеля в несколько раз превышает величину требуемого воздухообмена для пассажирских помещений станции, поскольку большая часть (до 85 %) теплоты, выделяющейся при торможении поездов, приходится на перегон [64, 123, 126].

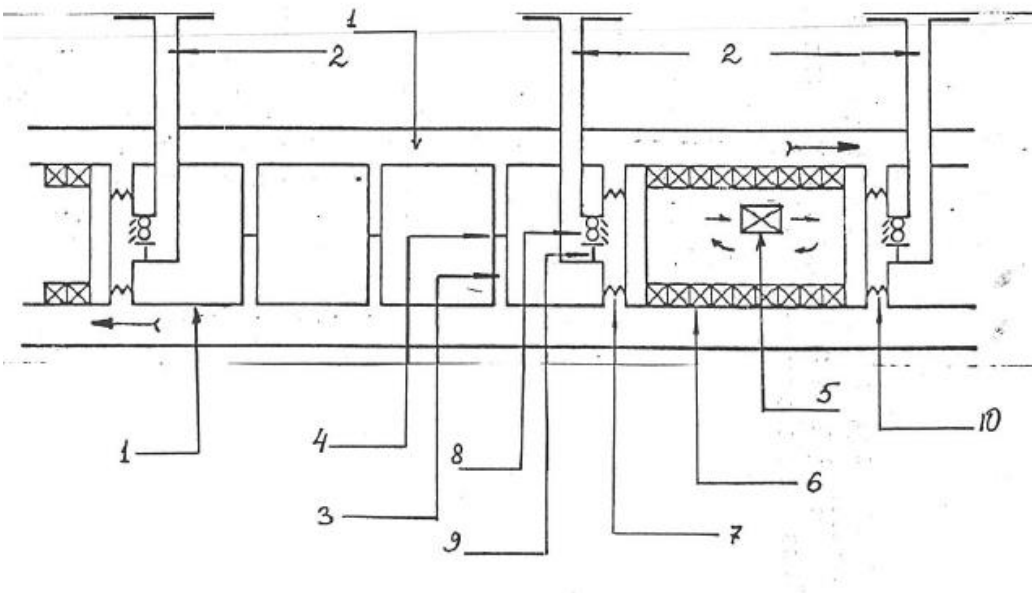


Рисунок 1.13 – Схема обеспечения теплового режима в Сингапурском метрополитене, где 1 – перегонные тоннели; 2 – вертикальные стволы; 3 – сбойки; 4 – вентиляционные двери (находятся в закрытом состоянии); 5 – система охлаждения воздуха на станции; 6 – подплатформенная вытяжная система; 7 – входной шлюз-регулятор; 8 – вентиляторы; 9 – регулятор тяги; 10 – вентиляционная перемычка (стрелками показано направление движения воздуха)

Так как двухпутный тоннель проветривается только за счёт принудительной вентиляции [2], то основной проблемой при обеспечении безопасного теплового режима следует считать минимизацию поступления в перегонные тоннели в зимнее время холодного наружного воздуха, который может привести к отрицательной температуре тоннельного воздуха на участке, прилегающем к воздухопадающим стволам, и обмерзанию конструктивных элементов системы водоотлива.

Рисунок 1.14 – Станция «Зенит» (бывш. «Новокрестовская») закрытого типа с двупутным тоннелем, г. Санкт-Петербург

Рисунок 1.15 – Станция «Беговая» закрытого типа с двупутным тоннелем, г. Санкт-Петербург

1.5 Выводы по главе 1

На основании выполненного анализа представляется возможным сформулировать цель исследования следующим образом – обоснование параметров схем вентиляции линий метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями, обеспечивающих нормативные параметры микроклимата на перегонах и станциях.

Для достижения цели требуется решение следующего ряда задач:

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.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ

2.1 Методика проведения натурных исследований однопутных тоннелей

Основные линии метрополитена Санкт-Петербурга включают однопутные тоннели, глубина заложения которых более 50 м.

Сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета совместно с ГУП «Петербургский метрополитен» в течение летнего и зимнего периодов 2023 года 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 (рисунок 2.1), имеющими погрешность ±0,5°С. Термографы были размещены по длине вышеуказанных перегонов (рисунок 2.2) [12].

Рисунок 2.1 – Термографы iButton Temperature Loggers

а)

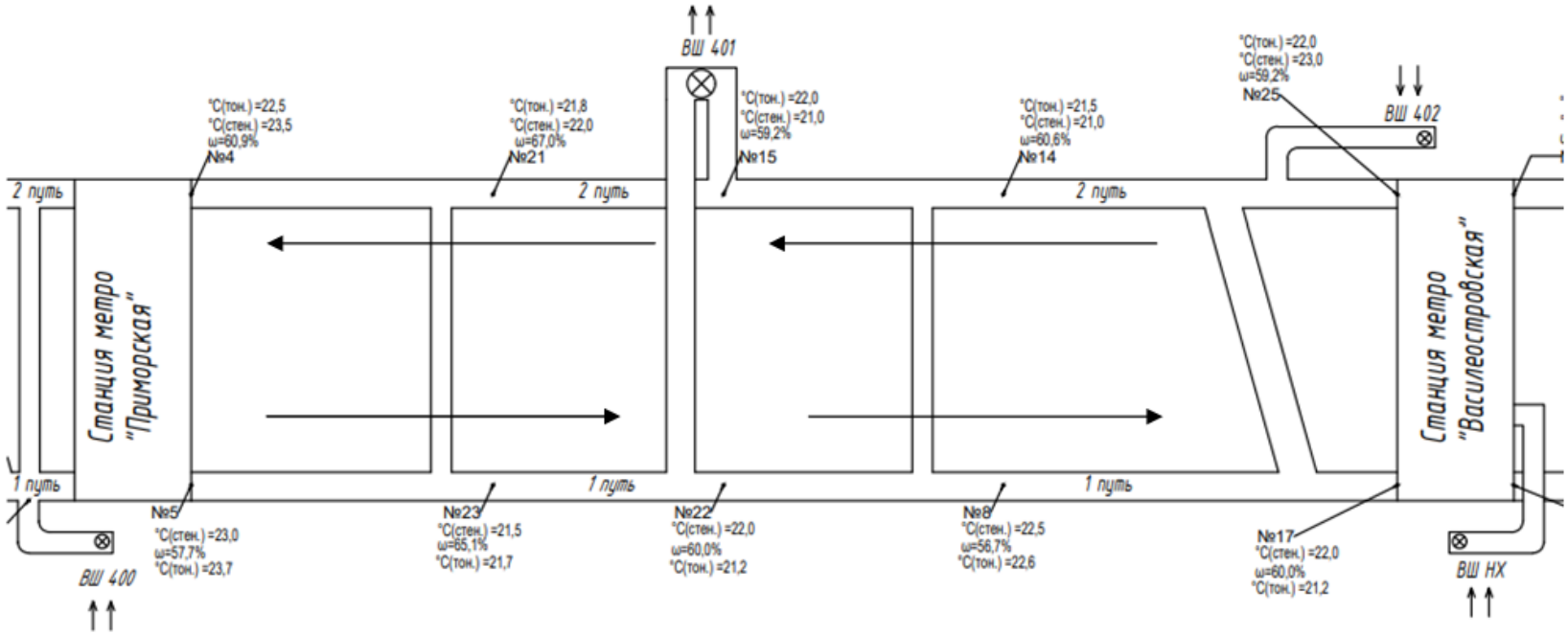


Рисунок 2.2- а – Схема расположения датчиков для измерения температуры воздуха на участке однопутных тоннелей метрополитена: ⟶ – движение воздуха в тоннелях;

а – перегон «Приморская» – «Василеостровская»

б)

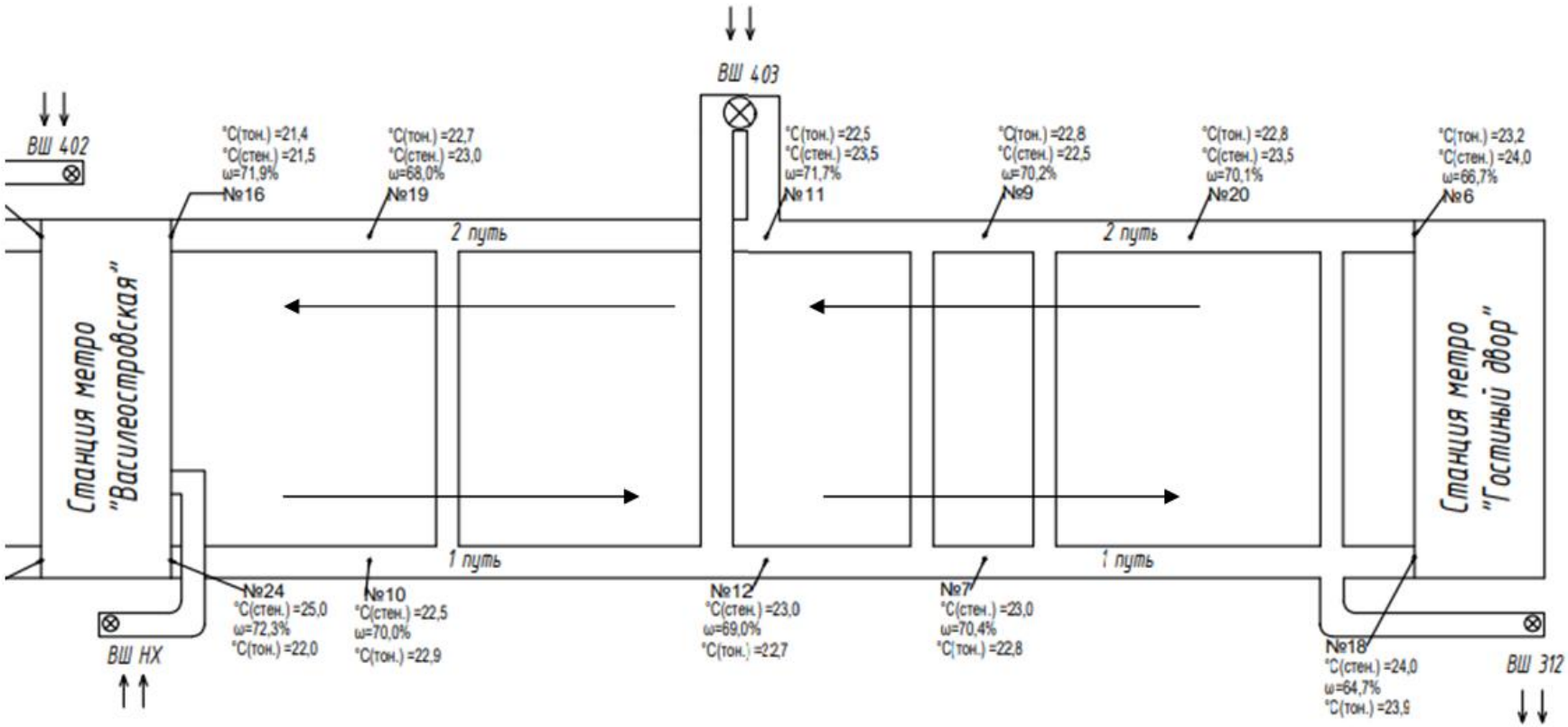


Рисунок 2.2-б – Схема расположения датчиков для измерения температуры воздуха на участке однопутных тоннелей метрополитена: ⟶ – движение воздуха в тоннелях;

б – перегон «Василеостровская» – «Гостиный двор»

Измерения проводились с интервалом 120 секунд 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 термогигрометром (TESTO 625) (рисунок 2.3).

Рисунок 2.3 – Термогигрометр TESTO 625

2.2 Результаты и анализ натурных измерений температурного режима однопутных тоннелей

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 2.4, 2.5) 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: ВОМ-24Р, FTDA-REV-200 с расходами воздуха ~46–56,4 м^3/с и скоростью воздуха ~4,6–5,64 м/с при депрессии вентиляторов ~922–1100 Па.

На перегоне «Василеостровская» – «Гостиный двор» – ВОМ-18Р, ВОМ-18-01, FTDA-REV-180, FTDA-REV-200. Расходы воздуха ~48,6–74,8 м^3/с (скорость ~4,86–7,48 м/с) при депрессии вентиляторов ~990–1520 Па [20].

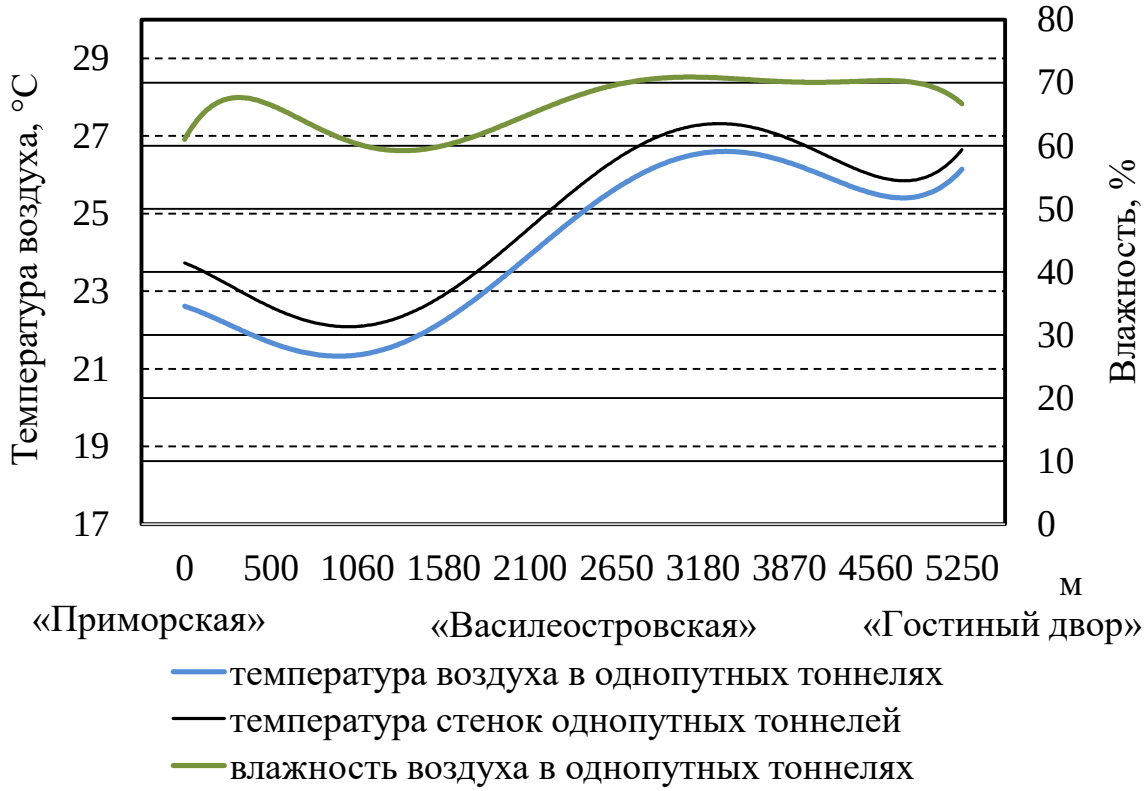


Рисунок 2.4 – Распределение температур воздуха и стенок, влажности воздуха на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при отсутствии движения поездов

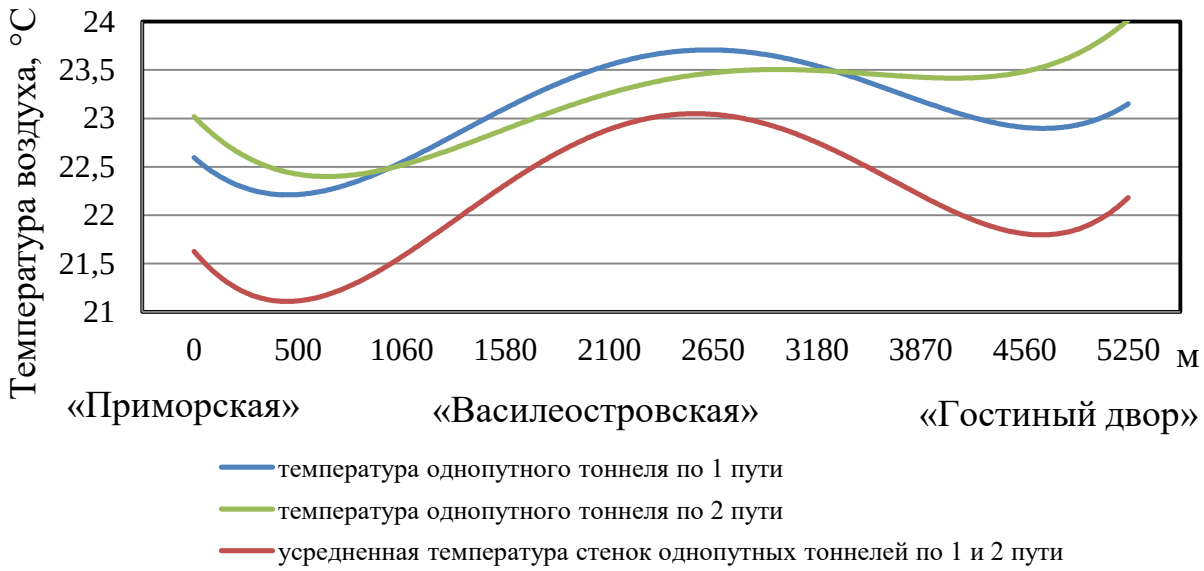


Рисунок 2.5 – Распределение температур воздуха и стенок, влажности на перегоне «Приморская» – «Василеостровская» – «Гостиный двор» при движении 24 пар поездов в часы пик

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 %.

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 ~14°С.

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 и конструкциями тоннеля, так же вмещающимися породами, процессы массообмена [6, 8].

В тоже 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.

2.3 Методика проведения натурных исследований двухпутных тоннелей

Натурные исследования термодинамических параметров воздуха в двухпутных тоннелях на участках: «тупик» – «Беговая» – «Зенит» – точка сопряжения с однопутными тоннелями, выходящими на станцию «Приморская» (рисунок 2.6), были также осуществлены летом 2023 г. Расстановка датчиков для измерения термодинамических параметров воздуха показана на рисунке 2.7.

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

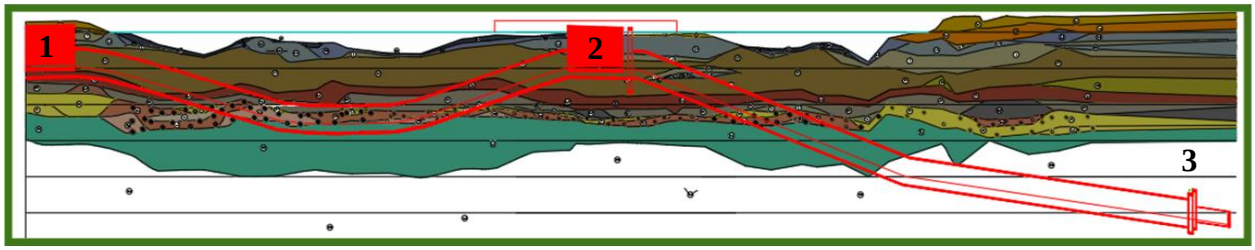


Рисунок 2.6 – Профиль перегона двухпутного участка:
1 – станция метро «Беговая»; 2 – станция метро «Зенит»;
3 – точка сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей

Измерения температуры в периоды движения и отсутствия поездов осуществлялись термографами iButton Temperature Loggers, имеющими

погрешность ±0,5°С. Термографы были размещены по длине нижеуказанных перегонов (рисунок 2.7, 2.8, 2.9).

Рисунок 2.7 – Крепление термографов на вертикальных тяжах в вентиляционном канале

Рисунок 2.8 – Крепление термографов на вертикальных стойках в транспортном отсеке

а)

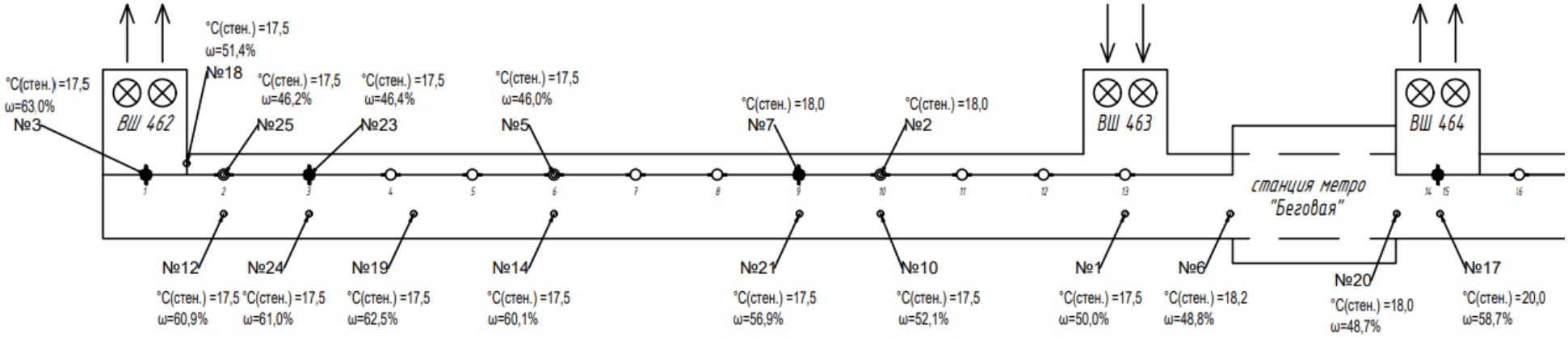


Рисунок 2.9-а – Схема расположения датчиков температуры воздуха на двухпутном участке третьей линии метрополитена:

⟶ – движение воздуха в тоннелях; а – перегон «тупик» – «Беговая»

б)

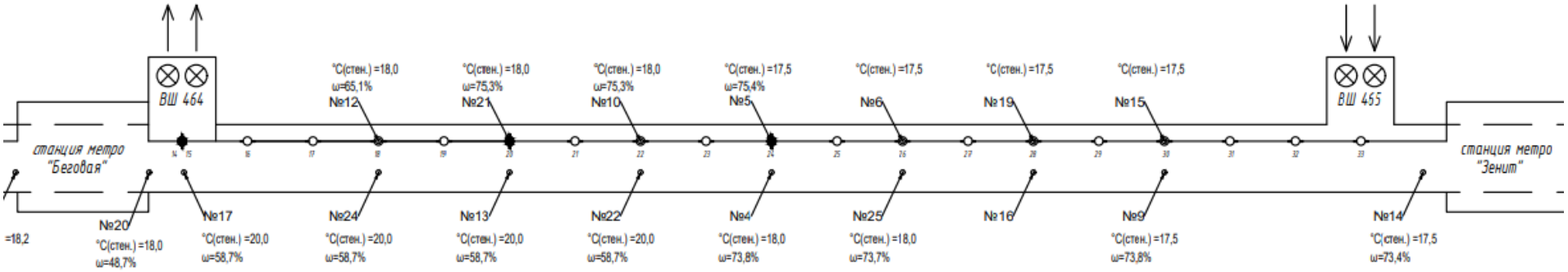


Рисунок 2.9-б – Схема расположения датчиков температуры воздуха на двухпутном участке третьей линии метрополитена:

⟶ – движение воздуха в тоннелях; б – перегон «Беговая» – «Зенит»

в)

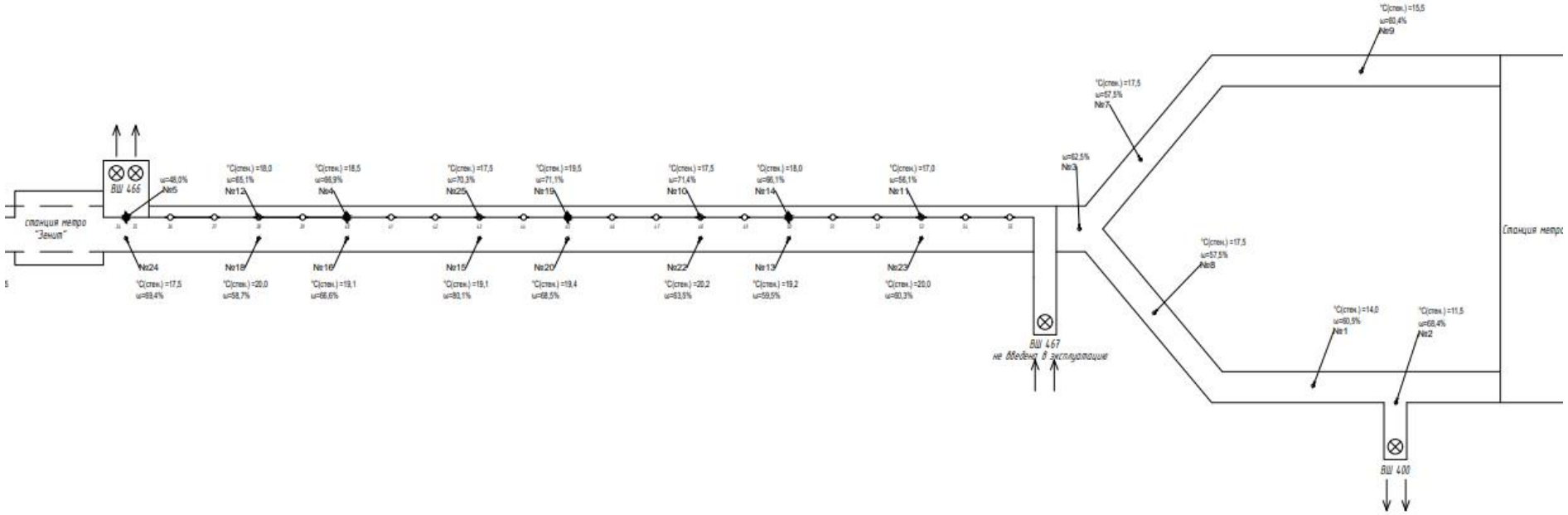


Рисунок 2.9-в – Схема расположения датчиков температуры воздуха на двухпутном участке третьей линии метрополитена:

⟶ – движение воздуха в тоннелях; в – перегон «Зенит» – «Приморская»

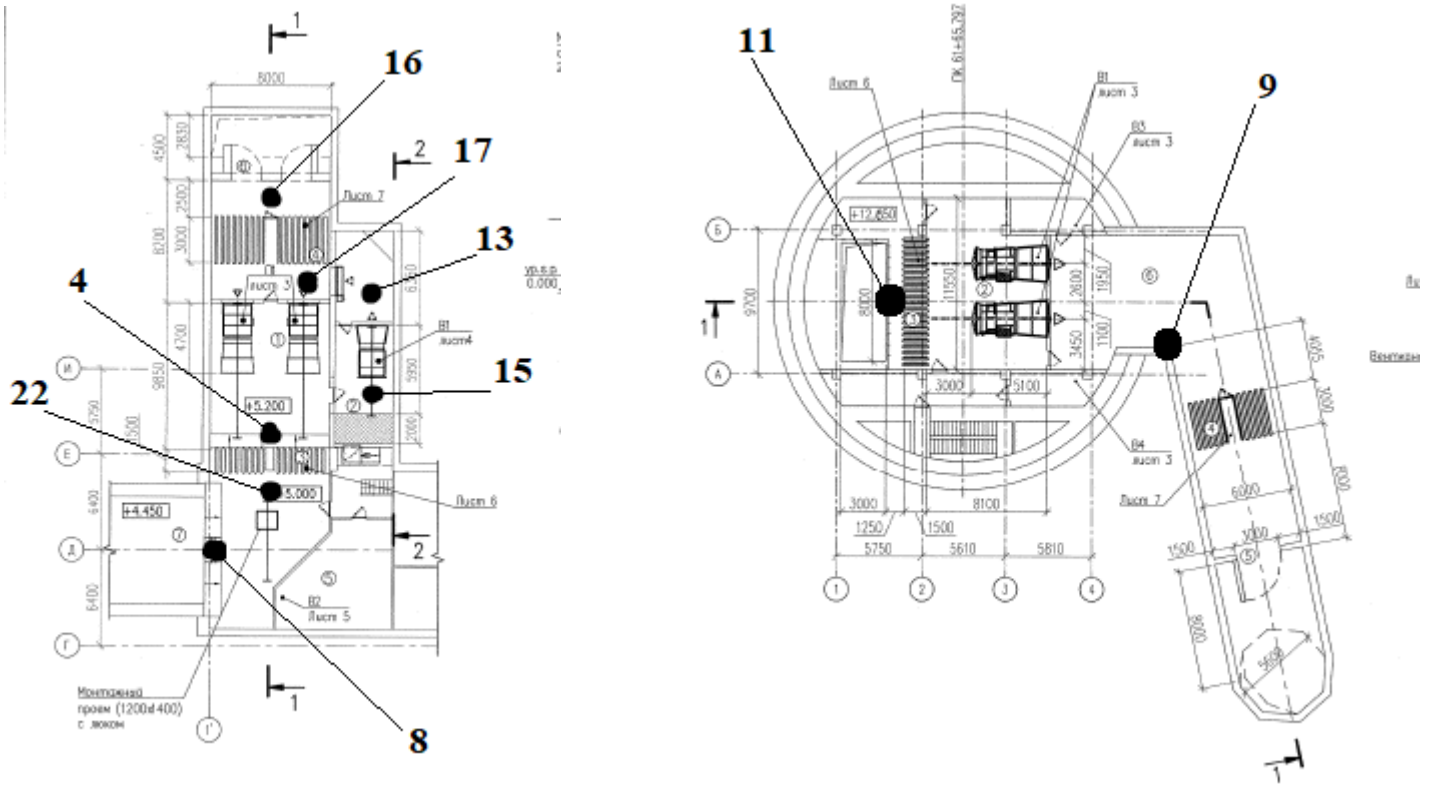


Рисунок 2.9-г – Схема расположения датчиков температуры воздуха (№ 4, 22, 16, 17 и т.д.) на двухпутном участке третьей линии метрополитена в вентиляционных шахтах

2.4 Результаты и анализ натурных измерений температурного режима двухпутных тоннелей

Натурные измерения термодинамических параметров воздуха в двухпутном тоннеле на участке «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. 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 ~51 $м^3$/с и скорость воздуха ~5,6 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 ~42 $м^3$/с (скорость ~5,6 м/с), депрессия вентилятора 925 Па.

На рисунках 2.10 и 2.11 представлены графики, демонстрирующие распределение температуры воздуха, температуры поверхности обделки тоннеля и уровня влажности на участке «Беговая» – «Зенит» в периоды отсутствия и движения поездов. Во время проведения измерений температура наружного воздуха составляла 7°C, а относительная влажность — 50-60%.

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. 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.

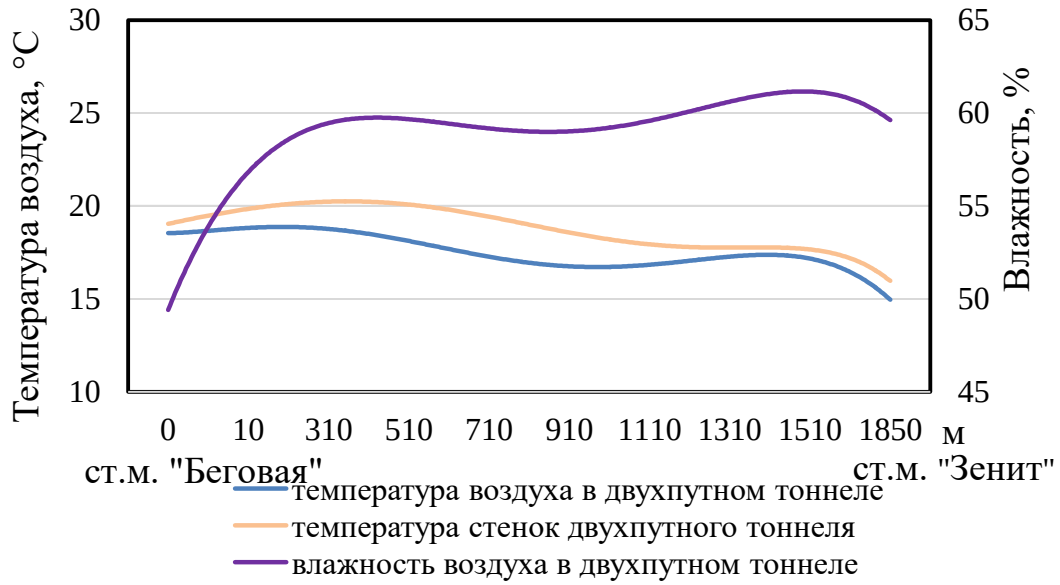


Рисунок 2.10 – Распределение температур воздуха, поверхности обделки и влажности на перегоне «Беговая» – «Зенит» при отсутствии движения поездов

Описанный характер движения воздушного потока определил и распределения температур воздуха и поверхности обделки по длине перегона между станциями. Графики, представленные на рисунках 2.10, 2.11, 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 ºС относительно температуры в тоннелях (рисунок 2.11).

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%.

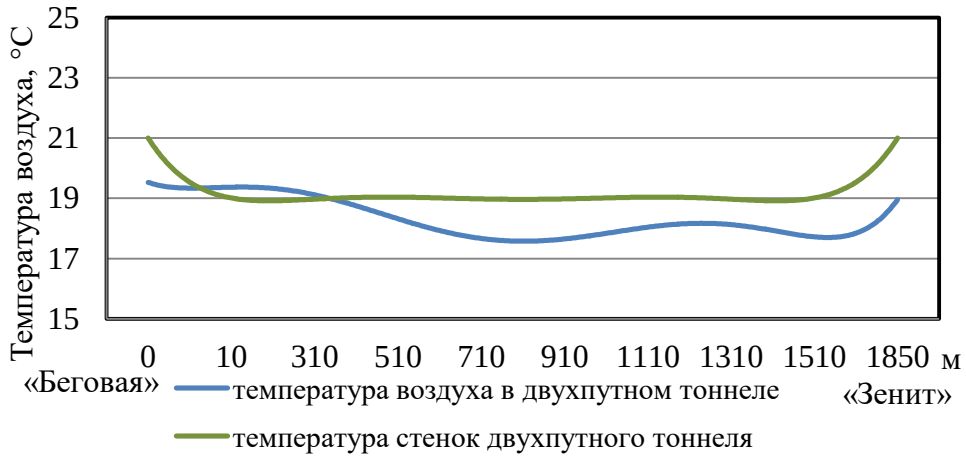


Рисунок 2.11 – Распределение температур воздуха на перегоне «Беговая» – «Зенит» при движении поездов в час-пик (24 пар/ч)

Несмотря на то, что натурные исследования термодинамических параметров воздушной среды осуществлялись в условиях, не соответствующим 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.

2.5 Результаты натурных измерений температурного режима участка сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей

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 2.12), а именно в двухпутном тоннеле перед точкой сопряжения на отметке 2010 м от станции «Зенит» составляющая 19,5ºС, на станции «Приморская» повышается до 22÷23ºС в зимнее время и до 33ºС в летний период.

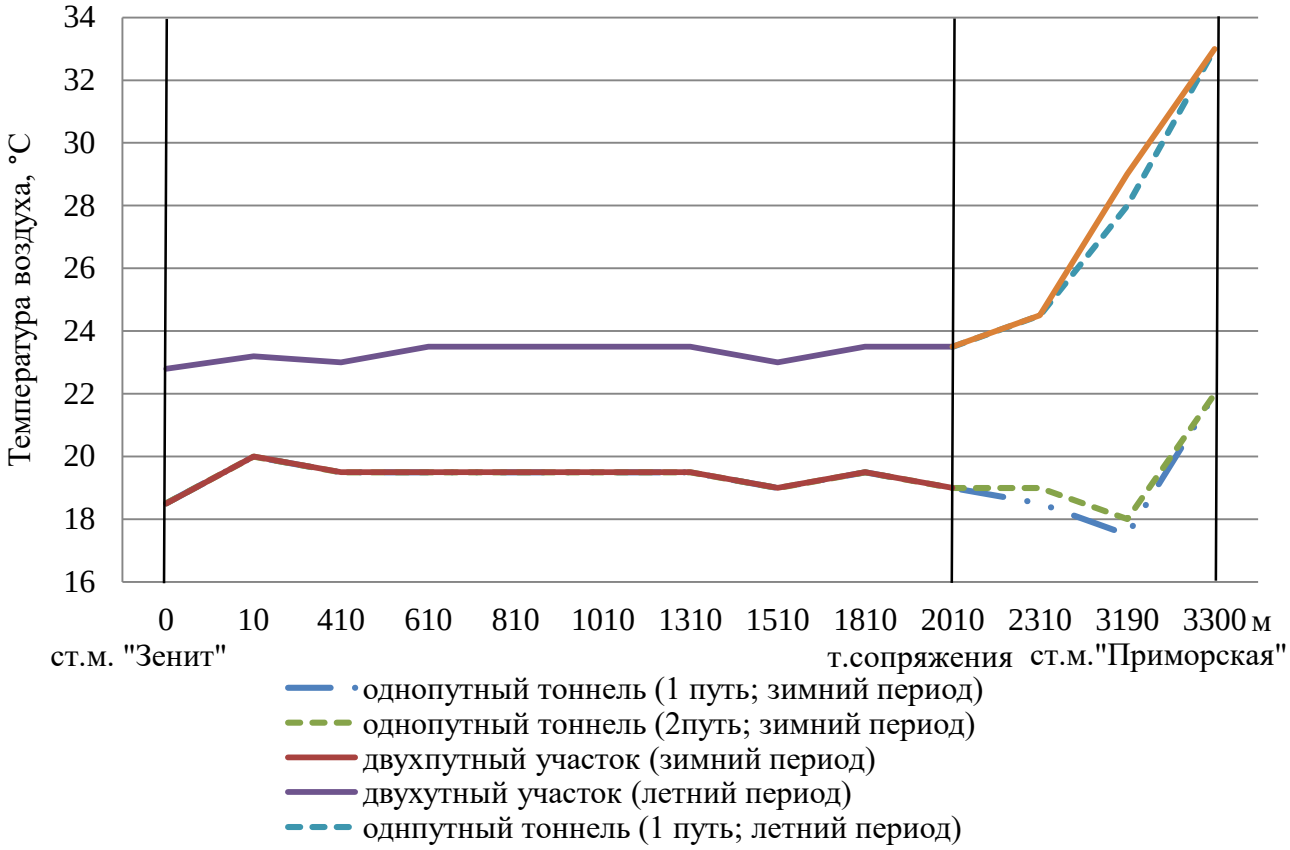


Рисунок 2.12 – Распределение температур воздуха на перегоне «Зенит» – «Приморская» при отсутствии движения поездов в летний и зимний периоды

2.6 Выводы по главе 2

На основе выполненных экспериментальных исследований были выявлены закономерности формирования вентиляционных и тепловых режимов однопутных, двухпутных тоннелей, 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 тепловыделений 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 значительное изменение температуры воздуха не наблюдается, что объясняется ростом расхода циркуляционного воздуха.

2. В однопутных тоннелях мелкого заложения образующийся между станциями циркуляционный контур подпитывается наружным воздухом, проступающим 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 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÷3ºС 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.

ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА УЧАСТКЕ СОПРЯЖЕНИЯ ДВУХПУТНОГО И ОДНОПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

3.1 Основные методы расчётов параметров проветривания сети горных выработок

Многочисленные обследования воздушных потоков в сетях метрополитена [7, 31, 34, 50, 51, 60, 94] показали, что при существующих габаритах вентиляционных путей и требуемых расходах воздуха, скорости его движения таковы, что режим движения является турбулентным и закон потерь давления при движении воздуха по участку выглядит следующим образом (3.1):

$$\Delta P = R \cdot Q^2 \qquad (3.1)$$

где ΔP – потери давления на участке, Па;

R – сопротивление участка, кμ;

Q – расход воздуха на участке, м^3/с.

Для решения задач воздухораспределения используются три сетевых закона [59]:

1. Первый закон Кирхгоффа (закон сохранения массы). Расходы воздуха Q_i в ветвях v_i должны удовлетворять условию неразрывности во всех узлах (3.2):

$$\sum_i Q_i = 0 \quad (i=1,2,\ldots n) \qquad (3.2)$$

где n – число ветвей, инцидентных каждому узлу;

2. Второй закон Кирхгофа (закон сохранения энергии) [69]. Алгебраическая сумма депрессий P_j ветвей v_j любого замкнутого контура μ равна 0, т.е. (3.3):

$$\sum_j P_j = 0 \quad (j=1,2,\ldots m) \qquad (3.3)$$

где m – число ветвей замкнутого контура μ;

3. Принцип минимума мощности [66, 67]. Расходы воздуха ветвей $v_k \in V$ с сопротивлением R_k, должны соответствовать минимуму затрат энергии на его перемещение (3.4):

$$\sum_k R_k \cdot Q_k^3 = \min \quad (k=1,2\ldots V) \tag{3.4}$$

где V – множество всех ветвей в сети.

При этом для решения задач воздухораспределения достаточно любой пары из числа трех вышеперечисленных законов (обычно, первый закон Кирхгофа и принцип минимума мощности) [76].

3.2 Математическая модель вентиляции Невско-Василеостровской линии Санкт-Петербургского метрополитена

Для исследования вентиляционной сети необходимо иметь полные сведения о ее топологии и аэродинамическом сопротивлении ее участков. Основу топологической схемы вентиляционной сети тоннельной вентиляции составляют перегонные тоннели и станции. В задаче учитываются пассажирские помещения и пути (лестницы, эскалаторы), рассматривается только часть 3 Невско-Василеостровской линии метрополитена: тупик, станции «Беговая», «Зенит», «Приморская», «Василеостровская», «Гостиный двор» [89-91].

Для элементов вентиляционной сети, которые можно представить, как воздуховоды постоянного калибра, аэродинамический коэффициент сопротивления находится через потери давления на трение [113]. Для остальных элементов аэродинамический коэффициент сопротивления находится через потери давления в местных сопротивлениях. Все сопротивления приведены к виду «коэффициент аэродинамического сопротивления» R_{ad}, Н·с^2 /м^8 [36].

Закон сопротивления в рудничной аэрогазодинамике имеет вид (3.5):

$$\Delta P = R_{ad} Q^2 \tag{3.5}$$

где R_{ad} – аэродинамическое сопротивление ветви, Н·с^2/м^8;

Q – расход воздуха в ней, м^3/с.

Потери давления ΔР при движении воздуха по длинной прямой трубе определяются по формуле Дарси – Вейсбаха (3.6)

$$\Delta \mathrm{P} = \frac{\lambda \rho \upsilon^2}{2\ \mathrm{D}_r} * l \tag{3.6}$$

где λ – коэффициент сопротивления трения;

ρ = 1,2 кг/м^3 – плотность воздуха;

υ – скорость потока, м/с;

l – длина канала, м;

$D_г$ = 4F/ П – гидравлический диаметр тоннеля, м;

F – площадь сечения, м^2;

П – периметр сечения, м.

Коэффициент сопротивления трения λ зависит от относительной шероховатости трубы Re($k_э/D_г$), мм/м. Для условий двухпутного тоннеля относительная шероховатость будет превышать значение 500 мм/м и в этом случае коэффициент сопротивления трения определяется формулой Шифринсона для вполне шероховатых труб (3.7):

$$\lambda = 0{,}11 * \left(\frac{k_э}{D_г}\right)^{0.25} \quad (3.7)$$

где $k_э$ – абсолютная эквивалентная шероховатость поверхности канала, мм. Зависит от материала обделки канала. Принимает следующие значения для различных поверхностей:

- поверхность тоннелей из монолитного бетона с неоштукатуренными следами передвижной опалубки -2–6 мм;
- хорошо оштукатуренная поверхность тоннелей из монолитного бетона - 0,1 – 0,8 мм;
- поверхность тоннелей из бетонных неребростых блоков и тюбингов, изготовленных в металлических формах -1 – 2 мм;
- поверхность основания пути и деревянных шпал с учетом загрязнения в процессе эксплуатации -1 – 2 мм.

Потери давления ΔP при движении воздуха по длинной прямой трубе определяются, как уже было показано выше. Приравнивая две вышеупомянутые формулы получаем (3.8):

$$R_{ad}Q^2 = \frac{\upsilon^2}{2D_г} * l \quad (3.8)$$

отсюда коэффициент аэродинамического сопротивления для одного метра канала (3.9):

$$R_{ad} = \frac{\lambda \rho \upsilon^2}{Q^2 2D_г} \quad (3.9)$$

учитывая, что (3.10):

$$Q = F \cdot \upsilon \quad (3.10)$$

коэффициент аэродинамического сопротивления одного метра прямого канала составит (3.11):

$$R_{ad} = \frac{\lambda \rho}{F^2 2D_г} \quad (3.11)$$

Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления составляют:

– для путевого отсека тоннеля 1 км R_{ad} = 8,4478*10^-7 Н*с^2/м^8;

– для вентиляционного канала R_{ad} = 3,019403*10^-5 Н*с^2/м^8;

– для клапана R_{ad}= 0,0114 Н*с^2/м^8.

Аэродинамические сопротивления в задаче для элементов перегона однопутных тоннелей приняты по аналогии с Новосибирским метрополитеном, полученные в результате обследования вентиляционной системы описанные в работах [45, 46, 55, 56, 65, 84, 124].

Математическая и численная модели автором не создаются, поскольку в программном комплексе «Аэросеть» [92] уже имеет верные математические и численные модели, гарантирующие правильность расчета и достоверность результатов.

Математическая модель — математическое представление реального объекта или системы. Численная модель – программный код, реализующий представление объекта или системы в форме, приближенной к алгоритмическому описанию, включающей набор данных, характеризующих свойства системы и динамику их изменения со временем.

Применительно к данным видам моделей для проверки их адекватности используются подход верификации и валидации. Верификация проводится в области математики, а валидация – в области физики.

Верификация – процесс установления соответствия между численной моделью и математической моделью. Как следует из данного определения, процесс верификации позволяет достичь уверенности в корректности численной модели. Процесс верификации модели состоит из двух шагов:

- Верификация программного кода для подтверждения того, что математические модели и алгоритмы численного решения систем уравнений работают корректно;

- Верификация вычислений для подтверждения того, что дискретизация расчетной области выполнена корректно, и дискретное решение с необходимой степенью точности соответствует математической модели.

Валидация – процесс определения степени соответствия расчетной модели реальному физическому объекту в рамках области планируемого использования данной модели.

Ни один из этапов верификации не позволяет определить, насколько выбранные модели адекватны объекту исследования. Оценка соответствия численной модели реальному миру относится к задачам валидации, которая позволяет определить, насколько физические явления и законы, включенные исследователем в расчетную модель, соответствуют постановке исходной задачи и достаточны для получения требуемых решений.

Таким образом, была создана расчетная модель (приложение Г), в дальнейшем произведена валидация модели.

В процесссе валидации было несколько вариантов сравнения расчетной модели с натурными объектами. В первом варианте сравнивались значения скорости и расходы воздуха, полученные в точках замера испытаний, с модельными (с учетом работы вентиляционных шахт (далее ВШ) при эксплуатации метрополитена). Результаты сходимости были таковы: погрешность по расходу воздуха была 22 %, по скорости 27 % (рисунок 3.1). Высокие погрешности модели обуславливаются не полной картиной геометрии подземных сооружений, неточностью измеряемых приборов и человеческого фактора.

Во втором варианте (рисунок 3.2) валидация проводилась по расходам воздуха в зависимости от разной постановки угла поворота лопаток (с учетом работы вентиляционных шахт при эксплуатации метрополитена). Результаты погрешности по расходу воздуха были 17,3%. Данный результат удовлетворительный при варианте изменения проектных решений в процессе эксплуатации метрополитена.

В третьем варианте (рисунок 3.3) валидация проводилась по данным проекта, согласно официальным чертежам и документам Санкт-Петербургского метрополитена. Углы поворота лопаток, расходы воздуха, напоры и КПД вентиляторов задавались согласно аэродинамическим характеристикам оборудования, установленного по проекту. Результаты погрешности по расходу воздуха были 9,61%. Данный результат удовлетворительный.

Созданные расчетные модели могут подвергаться изучению в программном комплексе «Аэросеть» [33]. Результаты исследований и расчетов можно использовать для создания дальнейших подтверждений научных положений диссертации [37] (приложение А).

Учет всех ВШ (в точках Замера Испытаний)										
№	ВШ	Режим	Q модель, $м^3/с$	Q испыт, $м^3/с$	Погрешность, %	Угол поворота лопатки модель	Угол поворота лопатки испытание	Vмодель, м/с	Vизм испытание, м/с	Погрешность, %
1	462	вытяжка	53			25	22	4,64		
2	463	приток	53,9	56,47	4,551	5	-5	3,27	3,6	9,17
3	464	вытяжка	41,1	55,67	26,17	20	20	4,56	7	34,86
4	465	приток	22,4	61,09	63,33	10	10	1,4	4,1	65,85
5	466	вытяжка	42,8	59,69	28,30	20	20	1,78	2,7	34,07
6	467	приток	-	-	-	-	-		-	-
7	400	приток	53,4	62,51	14,57	20	20	4,01	5,1	21,37
8	401	вытяжка	37,3	60,2	38,04	20	20	2	3,6	44,44
9	402	приток	53,7	57,91	7,27	20	20	5,78	6,9	16,23
10	НХ ВО[2]	приток	45,4	43,86	3,39	20	22	5,04	5,4	6,67
11	403	вытяжка	33,5	45,78	26,82	30	30	4,4	6,7	34,33
12	312	вытяжка	48	33,84	29,50	35	35	5,34	4	25,09
13	НХ ГД[3]	приток	46,1	45,33	1,67	30	30	5,12	5,7	10,18
				Средняя погрешность	22,147				Средняя погрешность	27,479

Рисунок 3.1 – Результаты валидации расчетной модели по расходу и скорости воздуха

[2] Наклоннный ход (эскалатор) станции метро Васильевского Острова
[3] Наклоннный ход (эскалатор) станции метро Гостиного Двора

Учет всех ВШ (по Вентиляционным Агрегатам)							
№	ВШ	Режим	Q модель, $м^3/с$	Q испыт, $м^3/с$	Погрешность, %	Угол поворота лопатки модель	Угол поворота лопатки испытание
1	462	вытяжка	53			25	22
2	463	приток	60	56,47	5,883	5	-5
3	464	вытяжка	47	55,67	15,57	20	20
4	465	приток	105	61,09	41,82	10	10
5	466	вытяжка	48	59,69	19,58	20	20
6	467	приток	-	-	-	-	-
7	400	приток	56	62,51	10,41	20	20
8	401	вытяжка	46	60,2	23,59	20	20
9	402	приток	57	57,91	1,57	20	20
10	НХ ВО[4]	приток	54	43,86	18,78	20	22
11	403	вытяжка	41	45,78	10,44	30	30
12	312	вытяжка	53	33,84	36,15	35	35
13	НХ ГД[5]	приток	49	45,33	7,49	30	30

Рисунок 3.2 – Результаты валидации расчетной модели по расходу воздуха при действующей эксплуатации метрополитена

[4] Наклоннный ход (эскалатор) станции метро Васильевского Острова
[5] Наклоннный ход (эскалатор) станции метро Гостиного Двора

Учет всех ВШ (по Вентиляционным Агрегатам)							
№	№ вентиляционной шахты	режим работы	Q расчетная модель, $м^3/с$	Q проект, $м^3/с$	сходимость, %	Угол поворота лопатки модель	Угол поворота лопатки по проекту
1	462	вытяжка	48	52	7,69	20	22
2	463	приток	57	80	28,75	4	-4,1
3	464	вытяжка	48	50	4,00	20	20
4	465	приток	68	80	15,00	4	-4,1
5	466	вытяжка	48	50	4,00	20	20
6	467	приток	55	56	1,79	20	22
7	400	приток	56	60	6,67	20	20
8	401	вытяжка	46	60	23,33	20	20
9	402	приток	56	60	6,67	20	20
10	НХ ВО[6]	приток	54	56	3,57	20	22
11	403	вытяжка	43	50	14,00	30	30
12	312	вытяжка	54	55	1,82	35	35
13	НХ ГД[7]	приток	49	52	5,77	30	30
				погрешность сходимости	9,61		

Рисунок 3.3 – Результаты валидации расчётной модели (с учётом проектных характеристик)

[6] Наклоннный ход (эскалатор) станции метро Васильевского Острова
[7] Наклоннный ход (эскалатор) станции метро Гостиного Двора

3.3 Особенности учёта поршневого эффекта подвижного состава в процессе моделирования

Вентиляционная система метрополитена имеет существенную взаимосвязность вентиляционных параметров в различных точках сети [4]. Поэтому для получения удовлетворительной точности расчётов необходимо моделировать вентиляционную сеть всего метрополитена или хотя бы весь участок, ограниченный связью тоннелей с атмосферой. Обычно вентиляционная сеть такого участка включает несколько сотен ветвей и узлов. Описание такой сети системой дифференциальных уравнений в значительной мере затруднено, как большим количеством уравнений, так и сложностью описаний потоков воздуха в многочисленных местах разветвлений [75, 79, 80, 82].

Представляет интерес задача создания метода расчёта динамики воздухораспределения, создаваемого поршневым действием движущихся электропоездов, посредством статической модели. Такой метод предложен в работах [5, 122].

Суть этого метода в том, что моделирование разности давления впереди и позади поезда, в статической модели, предлагалось представить двумя фиктивными источниками – вентиляторами. Это позволило адекватно описать фронт давления воздуха на лобовой и хвостовой поверхностях поезда. Сами вентиляторы связывались между собой аэродинамическим сопротивлением, соответствующим сопротивлению зазора между поездом и стенками тоннеля (рисунок 3.4) [121].

Аэродинамическое сопротивление зазора определялось через перепад статического давления перед и после поезда и по расходу воздуха в зазоре по данным [73], и составило 0,0074 кμ. Вентилятор, моделирующий повышенное давление перед поездом, всасывающим входом был соединен с атмосферой, а нагнетательным выходом – с тоннелем, причем перед поездом добавлялось дополнительное переменное сопротивлением $R_d = f(S)$, названное "сопротивлением рассеяния" [74, 77, 78].

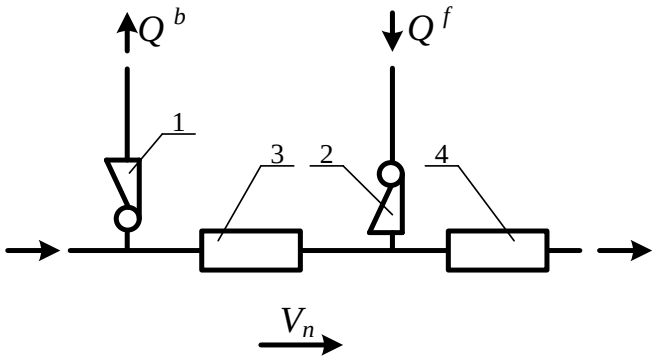


Рисунок 3.4 – Схема модели поезда, где 1 – вентилятор, моделирующий разрежение воздуха за хвостовым вагоном; 2 – вентилятор, моделирующий повышение давления воздуха перед головным вагоном; 3 – аэродинамическое сопротивление зазора между поездом и стенками тоннеля R_Z; 4 – сопротивление рассеяния, R_d; V_n – скорость поезда; Q^f и Q^b – производительность вентиляторов 1 и 2;стрелками показано направление движения воздуха

Таким образом, математическая модель потока воздуха, вызванная поршневым действием поезда, представлялась совокупностью уравнений (3.12):

$$\begin{cases} P_{SV}^f = 0.6V_n^2 + 0.64V_n + 1.94; \\ P_{SV}^f = \varphi_1(Q^f) = const; \\ P_{SV}^b = -0.238V_n^2 - 1.652V_n + 3.1; \\ P_{SV}^b = \varphi_2(Q^b) = const; \\ R_d = 7 \cdot 10^{-8} S^2 - 2.1 \cdot 10^{-7} S + 2.8 \cdot 10^{-4}; \\ R_Z = 0.0074, \end{cases} \quad (3.12)$$

где P_{SV}^f – статическое давление на лобовой поверхности поезда, Па;

P_{SV}^b – статическое давление на хвостовой поверхности поезда, Па;

R_d – сопротивление рассеивания, кμ;

R_Z – аэродинамическое сопротивление зазора между поездом и стенками тоннеля, кμ;

S – расстояние от передней поверхности поезда до того сечения в тоннеле, в котором определяется расход воздуха, м.

3.4 Осуществление численных расчётов и оценка влияния поршневого действия подвижного состава в однопутных тоннелях на характер движения воздушного потока в двухпутном тоннеле

Для оценки влияния поршневого эффекта в однопутных тоннелях на изменение расходов воздуха на перегонах двухпутного тоннеля, прилегающих к однопутным тоннелям, 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) (приложение Д).

В процессе вычислений было рассмотрено 15 вариантов парностей (таблица 3.1) 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) (приложение Е). 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.

Анализ результатов вычислений позволил оценить степень влияния поршневого действия поездов в однопутных тоннелях на характер движения воздушного потока в двухпутном тоннеле (рисунок 3.5).

Максимальное влияние поршневого действия поездов на изменение количества и направления движения воздуха в двухпутном тоннеле характерно

при парности 24 пар/час для всех расчетных точек. Количество воздуха, инициируемое поршневым эффектом и соответствующее указанной степени его влияния при рассматриваемых парностях движения ПС, равно 18-46 м^3/с. Изменение направления движения в расчетных точках связано с разным количеством поездов, проходящим по параллельным однопутным тоннелям в разные стороны (рисунок 3.6, 3.7, 3.8).

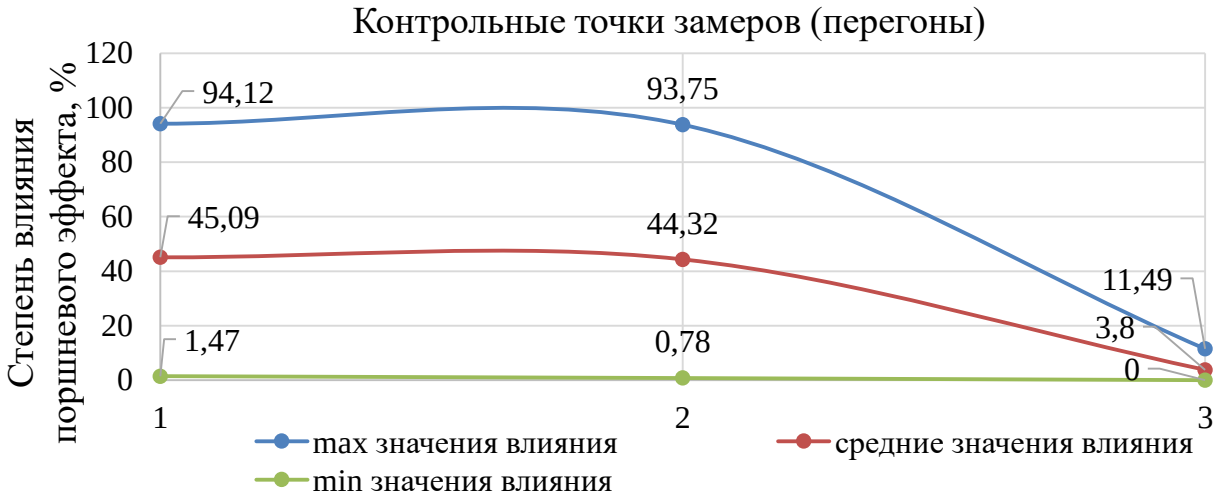
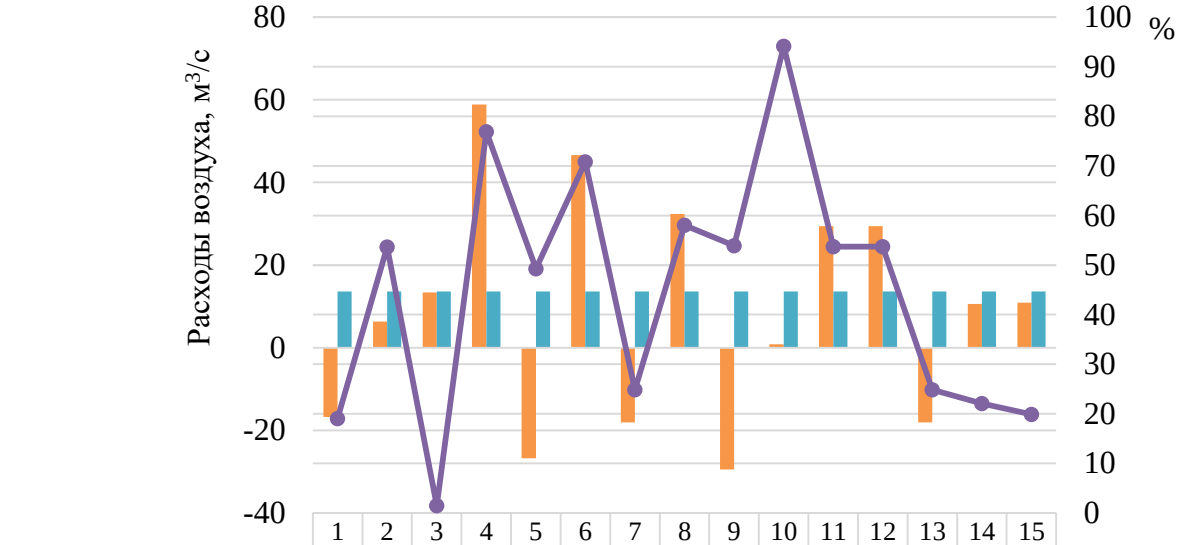
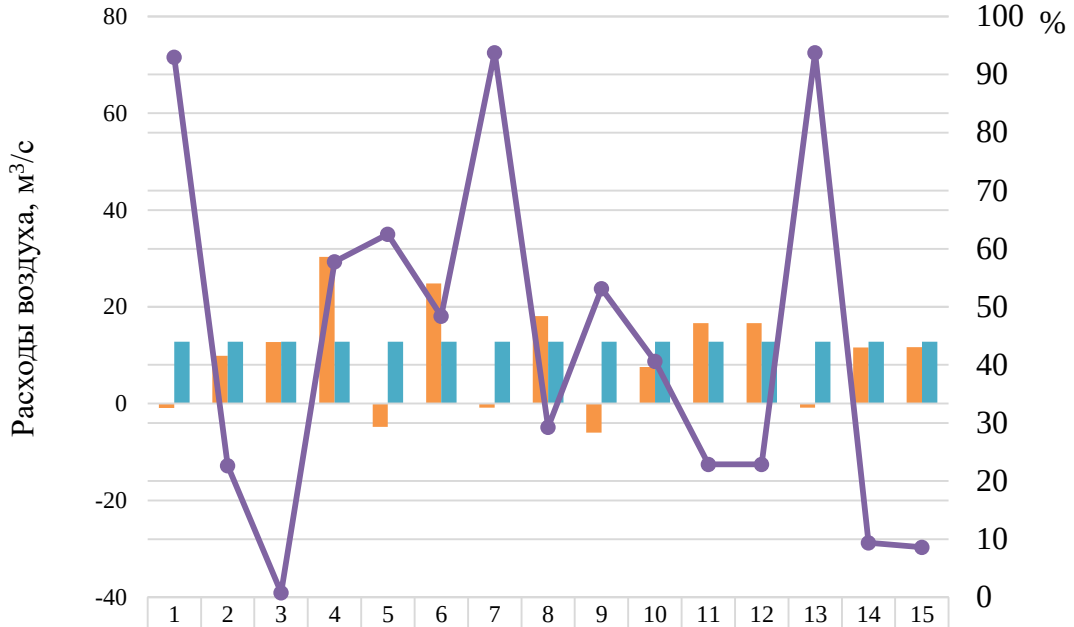


Рисунок 3.5 – График влияния поршневого эффекта однопутных тоннелей на прилегающие участки двухпутных тоннелей



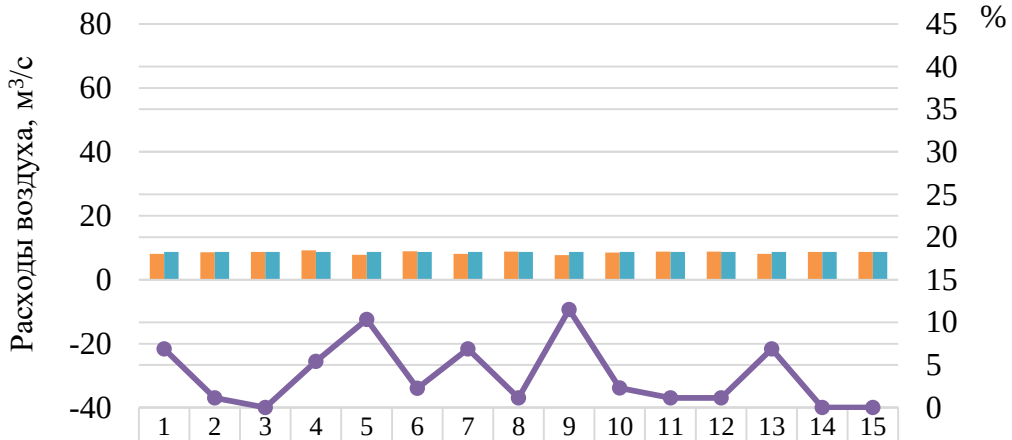
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Дневной режим (т.1)	-17	6,3	13,4	58,9	-27	46,6	-18	32,4	-30	0,8	29,4	29,4	-18	10,6	10,9
Ночной режим (т.1)	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6
Пар поездов в час	5	5	5	5	12	12	24	24	24	24	40	40	40	40	40
Разница, %	19,0	53,6	1,47	76,9	49,2	70,8	24,8	58,0	53,9	94,1	53,7	53,7	24,8	22,0	19,8

Рисунок 3.6 – График влияния поршневого эффекта на изменение расхода воздуха в расчетной точке №1 (точка сопряжения)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Дневной режим (т.1)	-0,9	9,9	12,7	30,3	-4,8	24,8	-0,8	18,1	-6	7,6	16,6	16,6	-0,8	11,6	11,7
Ночной режим (т.1)	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8
Пар поездов в час	5	5	5	5	12	12	24	24	24	24	40	40	40	40	40
Разница, %	92,97	22,66	0,78	57,76	62,50	48,39	93,75	29,28	53,13	40,63	22,89	22,89	93,75	9,38	8,59

Рисунок 3.7 – График влияния поршневого эффекта на изменение расхода воздуха в расчетной точке №2 (после станции метро «Зенит»)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Дневной режим (т.1)	8,1	8,6	8,7	9,2	7,8	8,9	8,1	8,8	7,7	8,5	8,8	8,8	8,1	8,7	8,7
Ночной режим (т.3)	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7
Пар поездов в час	5	5	5	5	12	12	24	24	24	24	40	40	40	40	40
Разница, %	6,90	1,15	0,00	5,43	10,3	2,25	6,90	1,14	11,4	2,30	1,14	1,14	6,90	0,00	0,00

Рисунок 3.8 – График влияния поршневого эффекта на изменение расхода воздуха в расчетной точке №3 (после станции метро «Беговая»)

Таблица 3.1 – Вариативность использования разного количества подвижных составов на перегонах однопутных тоннелей в зависимости от интенсивности движения

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Парность ПС[8]	5	5	5	5	12	12	24	24	24	24	40	40	40	40	40
№ ПС	Задействованные № ПС														
1			X			X		X			X	X			X
2				X		X		X			X	X		X	
3							X	X		X	X	X	X		X
4							X	X	X		X	X	X	X	
5		X			X		X			X	X	X	X		X
6	X				X		X		X		X	X	X	X	
7						X					X		X		
8						X					X		X		

[8] ПС - подвижные составы

3.5 Выводы по главе 3

Таким образом, 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 трех станций двухпутного тоннеля и изменения расхода воздуха в интервале от 18 до 46 $м^3/с$.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОДНОПУТНЫХ И ДВУХПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

4.1 Методика тепловых расчётов однопутных тоннелей

Широко используемые в настоящее время методики осуществления тепловых расчетов основаны на вычислении количеств теплоты, выделяемых или поглощаемых различными источниками: горным массивом, испарением влаги, работой энергетических установок, включая подвижной состав и т.д. В частности, методика тепловых расчетов, предложенная в работах В. Я. Цодикова и Ю. А. Полякова, и направленная на вычисление расхода воздуха, который необходимо подавать в тоннели для обеспечения нормативных параметров микроклимата [81, 82, 106]. В выше упомянутых работах мало внимания было уделено сочетанному влиянию на распределение температуры воздуха по длине перегонов между станциями циркуляционных потоков количеству подаваемого в тоннели наружного воздуха.

Более детальная разработка методики тепловых расчетов однопутных тоннелей была дана в работах С.Г. Гендлера [15, 19]. Однако в этих работах не учитывались особенности выделения теплоты на длине перегона между станциями и, собственно, на станции.

Кроме того, не были рассмотрены возможности охлаждения воздуха на станциях за счёт расположения холодильных установок в прилегающих к ним сбойках.

Типовая схема проветривания, одновременно реализующая возможность охлаждения воздуха, представлена на рисунке 4.1.

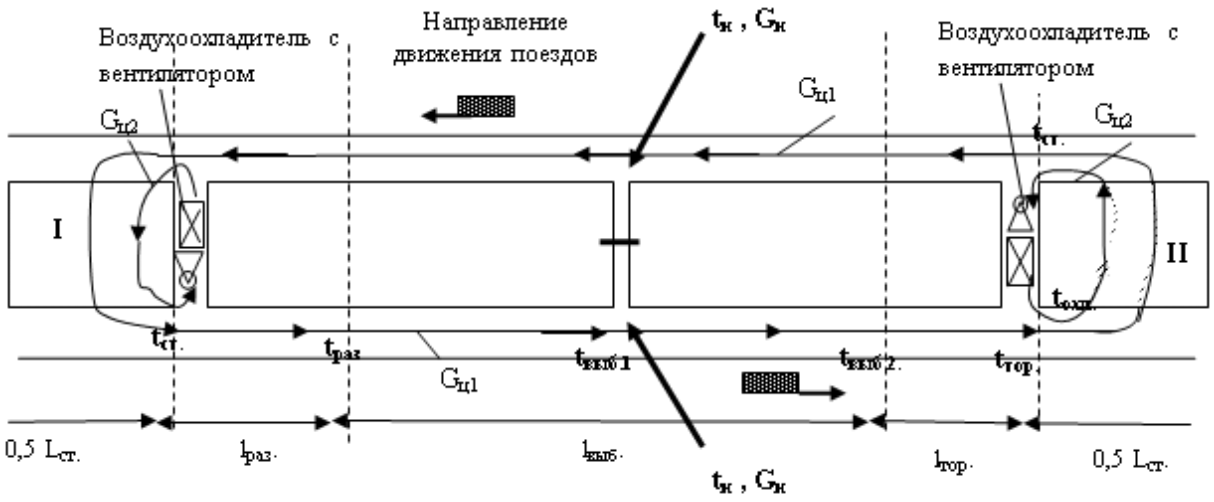


Рисунок 4.1 – Фрагмент схемы вентиляции линий метрополитена с однопутными тоннелями и охлаждением воздуха на станциях

Распределения температур воздуха по длине перегона устанавливаются при допущениях о квазистационарном характере теплообмена между воздухом [129] и горными породами, окружающими перегонные тоннели и станции, и возможности описания закона изменения температуры поступающего воздуха ступенчатым законом. Каждый временной период (зимний, летний, январский, июльский, наиболее холодной пятидневки, наиболее жаркого дня и т.п.) может быть представлен условно постоянной температурой [20,21].

Условные обозначения:

$L_{ст.}$ – длина станции, м; $l_{раз.}$– длина участка разгона, м; $l_{выб.}$– длина участка выбега, м; $l_{тор.}$ – длина участка торможения, м.

$t_{ст.}$, $t_{раз.}$, $t_{выб.1}$, $t_{выб.2}$, $t_{тор.}$, $t_{охл.}$, $t_н$ – температуры воздуха на станции, в конце участка разбега, в конце участка выбега перед смешением с наружным воздухом, в конце участка выбега, в конце участка торможения, наружного воздуха, °С.

$G_{ц1}$, $G_{ц2}$, $G_н$ – весовые расходы воздуха циркулирующего между станциями, циркулирующего между станцией и сбойкой с воздухоохладителем, подаваемого с поверхности, кг/с.

$Q_{ст.}$, $Q_{раз.}$, $Q_{выб..}$, $Q_{тор..}$ – количество теплоты, выделяемое при движении (стоянке) поезда на станциях, участке разгона, участке выбега, участке торможения, кВт.

Y – координата, отсчитываемая от начала станции, выбранной в качестве исходной, м.

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.

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.

$T_{cal.ij}$ и M_{ij} – расчётная температура пород и параметр, вычисляемые в зависимости от выбранного временного периода, °С; кВт/м.

$K_{\tau_{ij}}$ – коэффициент нестационарного теплообмена [125].

В этом случае дифференциальные уравнения теплового баланса для участков разгона, выбега и торможения будут иметь вид (4.1):

$$G_{ij}C_{ef_{ij}}\frac{\mathrm{dt_{ij}}}{\mathrm{dy}} = K_{\tau_{ij}}U(T_{cal.ij} - t_{ij}) + \frac{Q_{ij}}{l_i} + M_{ij} \qquad (4.1)$$

При расчёте приращения температуры на станциях Δt_{ij} целесообразно использовать интегральное уравнение теплового баланса [26] (4.2):

$$\Delta t_{ij} = Q_{cm.i}/((G_{ц\cdot 1} + G_{ц\cdot 2} + G_{н\cdot j})C_{ef_j} \qquad (4.2)$$

где C_{ef_j} – эффективное значение теплоемкости воздуха, вычисленное с учетом массообменных процессов Дж/(кг·°С.) [1].

Начальные условия к уравнениям (4.1) 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, начальная температура на станции I принимается соответствующей конечной температуре на станции II и равными $t_{cm,j}$.

Решения уравнений (1) имеют вид (4.3):

$$t_{i,j}^{en} = t_{i,j}^{in} \exp(-\frac{K_{\tau_{i,j}} U_i}{G_{i,j} C_{ef_{i,j}}} l_i) + (T_{cal_{i,j}} + \frac{Q_{i,j} + M_{i,j} l_i}{G_{i,j} C_{ef_{i,j}}})[1 - \exp(-\frac{K_{\tau_{i,j}} U_i}{G_{i,j} C_{ef_{i,j}}} l_i)] \qquad (4.3)$$

Введём обозначения (4.3.1) - (4.3.2):

$$\exp(-\frac{K_{\tau_{i,j}} U_i}{G_{i,j} C_{ef_{i,j}}} l_i) = b_{i,j} \qquad (4.3.1)$$

$$(T_{cal_{i,j}} + \frac{Q_{i,j} + M_{i,j} l_i}{G_{i,j} C_{ef_{i,j}}})[1 - b_{i,j}] = B_{i,j} \qquad (4.3.2)$$

При $i = 1 - t_{i,j}^{in} = t_{cm,j};\ G_{i,j} = G_{ц1,j};\ U_i = U_1;\ l_i = l_1 = l_{раз.};\ K_{\tau_{i,j}} = K_{\tau_{1,j}};$

$C_{ef_{i,j}} = C_{ef_{1,j}};\ T_{cal_{i,j}} = T_{cal_{1,j}};\ Q_{i,j} = Q_{1,j} = Q_{раз.,j};\ M_{i,j} = M_{1,j}; b_{i,j} = b_{1,j};\ B_{i,j} = B_{1,j};$

При $i = 2 - t_{i,j}^{in} = t_{1,j}^{en};\ G_{i,j} = G_{ц1,j};\ U_i = U_2;\ l_i = l_2 = 0{,}5 l_{выб.};\ K_{\tau_{i,j}} = K_{\tau_{2,j}};$

$C_{ef_{i,j}} = C_{ef_{2,j}};\ T_{cal_{i,j}} = T_{cal_{2,j}};\ Q_{i,j} = Q_{2,j} = 0{,}5 Q_{выб.,j};\ M_{i,j} = M_{2,j};\ b_{i,j} = b_{2,j};$

$B_{i,j} = B_{2,j};$

При $i = 3 - t_{i,j}^{in} = t_{2,j}^{en};\ G_{i,j} = G_{ц1,j} + G_{н,j};\ U_i = U_3;\ l_i = l_3 = 0{,}5 l_{выб.};\ K_{\tau_{i,j}} = K_{\tau_{3,j}};$

$C_{ef_{i,j}} = C_{ef_{3,j}};\ T_{cal_{i,j}} = T_{cal_{3,j}};\ Q_{i,j} = Q_{3,j} = 0{,}5 Q_{выб.,j};\ M_{i,j} = M_{3,j};\ b_{i,j} = b_{3,j};$

$B_{i,j} = B_{3,j};$

При $i = 4 - t_{i,j}^{in} = t_{3,j}^{en};\ G_{i,j} = G_{ц1,j} + G_{н,j};\ U_i = U_4;\ l_i = l_4 = l_{тор.};\ K_{\tau_{i,j}} = K_{\tau_{2,j}};$

$C_{ef_{i,j}} = C_{ef_{2,j}};\ T_{cal_{i,j}} = T_{cal_{2,j}};\ Q_{i,j} = Q_{4,j} = Q_{тор.,j};\ M_{i,j} = M_{2,j};\ b_{i,j} = b_{2,j};\ B_{i,j} = B_{2,j};$

С учётом выше приведённых соотношений формула (4.1) преобразуется в систему уравнений (4.4) - (4.8.3):

$$t_{1,j}^{en} = t_{cm,j}^{I} b_{1,j} + B_{1,j} \tag{4.4}$$

$$\boldsymbol{t}_{2,j}^{en} = \boldsymbol{t}_{1,j}^{en} \boldsymbol{b}_{2,j} + \boldsymbol{B}_{2,j} \tag{4.5}$$

$$t_{3,j}^{en} = a_{1,j} b_{2,j} t_{2,j}^{en} + d_{1,j} b_{2,j} t_{н,J} + B_{3,j} \tag{4.6}$$

$$a_{1,j} = \frac{G_{ц1,j}}{(G_{ц1,j} + G_{нj})} \tag{4.6.1}$$

$$d_{1,j} = \frac{G_{нj}}{(G_{ц1,j} + G_{нj})} \tag{4.6.2}$$

$$t_{4,j}^{en} = t_{3,j}^{en} b_{4,j} + B_{4,j} \tag{4.7}$$

$$t_{cm,j}^{II} = a_{2,j} t_{4,j}^{en} + d_{2,j} t_{охл.} + \Delta t_{cm,j} \tag{4.8}$$

$$a_{2,j} = \frac{(G_{ц1,j} + G_{нj})}{(G_{ц1,j} + G_{ц2,j} + G_{нj})} \tag{4.8.1}$$

$$d_{2,j} = \frac{G_{ц2,j}}{(G_{ц1,j} + G_{ц2,j} + G_{нj})} \tag{4.8.2}$$

$$\Delta t_{cm,j} = \frac{Q_{cm,j}}{(G_{ц1,j} + G_{ц2,j} + G_{нj}) C_{ef_{cm,j}}} \tag{4.8.3}$$

Решение системы уравнений (4.8) - (4.8.3) при допущении о равенстве температур воздуха на соседних станциях $t_{cm,j}^{I} = t_{cm,j}^{II} = t_{cm,j}$ относительно $t_{cm,j}$ может быть представлено в виде (4.9):

$$t_{cm,j} = \frac{a_{1,j} d_{2,j} B_{2,j} П_{i=2}^{i=4} b_{i,j} + d_{2,j} П_{i=3}^{i=4} b_{i,j} (a_{1,j} B_{2,j} + d_{1,j} t_{н,J}) + d_{2,j} (b_{4,j} B_{3,j} + B_{4,j}) + a_{2,j} t_{охл.} + \Delta t_{cm.j}}{1 - a_{1,j} d_{2,j} П_{i=1}^{i=4} b_{i,j}} \tag{4.9}$$

На основе уравнения (4.9) осуществляется, как прогноз теплового режима станций и перегонных тоннелей метрополитена с однопутными тоннелями, так выбираются параметры его регулирования [89-91]: расходы подаваемого и охлаждаемого воздуха, необходимая температура его охлаждения в сбойках,

прилегающих к станциях, в зависимости от температуры атмосферного воздуха, интенсивности (парности) движения поездов и количество теплоты, выделяемой на участках разгона, выбега, торможения и на станциях.

4.2 Методика тепловых расчётов двухпутных тоннелей при схеме вентиляции с использованием подшивного потолка

Для вычисления распределения температур по длине перегонных тоннелей метрополитена используется одномерная модель, основанная на решении системы уравнений, описывающих изменение температуры воздушного потока в транспортном отсеке и в подшивном потолке. При этом были приняты следующие допущения:

- для схемы без циркуляции наружный воздух подаётся в тоннель с поверхности через подшивной потолок в 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;

- сложный закон изменения температуры воздуха, продаваемого в тоннель в течение годового периода, описывается ступенчатым законом, при котором температура воздуха в каждый временной период (год, зима, январь, наиболее холодная пятидневка, лето, июль, наиболее жаркие сутки) принимается условно постоянной;

- процессы теплообмена породного массива, окружающего подшивной потолок и тоннель, с воздухом считаются квазистационарными, что позволяет использовать при расчёте теплового потока коэффициент нестационарного теплообмена [108];

- влияние процессов массопереноса на теплосодержание воздуха учитывается на основе эффективной теплоёмкости [107];

- тепловыделения от движущихся источников теплоты, связанных с поездами, принимаются равномерно распределёнными по длине расчётного участка;

- теплообмен между воздухом в подшивном потолке и воздухом в тоннеле учитывается с помощью коэффициента теплопередачи $К_{Т_{п,j}}$.

Расчётная схема, соответствующая принятым допущениям, представлена на рисунке 4.2.

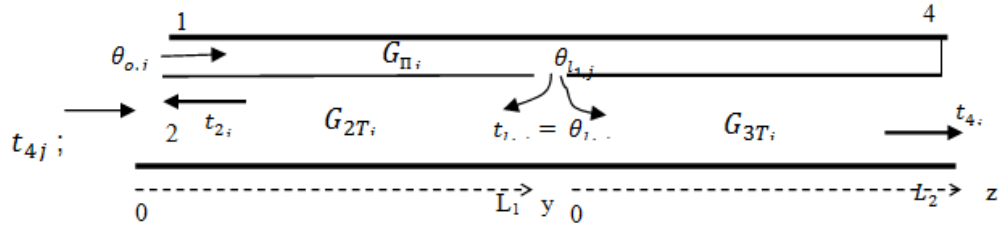


Рисунок 4.2 – Расчётная схема к постановке задачи об изменении температуры в тоннеле (y и z координатные оси, отсчитываемые от станции 1 до выпускного клапана 3 и выпускного клапана до станции 2)

Система уравнений, характеризующая изменение температуры в подшивном потолке θ_j и тоннеле t_j на участке протяжённостью L_1 (тт. 1-2) может быть представлена в виде (4.10) - (4.11):

$$G_{1п_j} C_{эф.п.j} \frac{d\theta_j}{dy} = К_{\tau_{.р.п.j}} U_п^* \left(T_{p_{п,j}} - \theta_j\right) + К_{Т_{п,j}} U_п^{**} (t_j - \theta_j) + Z_{p_{п.j}} \quad (4.10)$$

$$-G_{2T_j} C_{эф.Т.j} \frac{dt_j}{dy} = К_{\tau_{р.Т.j}} U_Т^{***} \left(T_{p_{Т,j}} - t_j\right) - К_{Т_{п,j}} U_п^{**} (t_j - \theta_j) + \frac{N_{эн_j}}{L_1} + Z_{p_{Тj}} \quad (4.11)$$

где 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.

$U_п^*$, $U_п^{**}$, $U_Т^{***}$ – соответственно, периметр подшивного потолка по породе, периметр подшивного потолка, омываемый воздухом; периметр тоннеля без учёта периметра подшивного потолка, м;

$G_{п_j}$, G_{2T_j} – весовые расходы в подшивном потолке и в тоннеле между точками 1-2, кг/с;

$C_{эф.п._j}$, $C_{эф.T._j}$ – эффективные значения теплоёмкостей воздуха на участках подшивного потолка и тоннеля между точками 1-2, Дж/(кг·К) [17].

$T_{p_{п,j}}$, $T_{p_{T,j}}$ – расчётные значения температуры породного массива, окружающего соответственно подшивной потолок и тоннель, °С. [17].

$Z_{p_{п,j}}$, $Z_{p_{T,j}}$ – 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. [17].

Выражения для вычисления $T_{p_{п,j}}$, $T_{p_{T,j}}$ и $Z_{p_{п,j}}$, $Z_{p_{T,j}}$ приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Зависимости для расчёта $T_{p_{п,j}}$, $T_{p_{T,j}}$ и $Z_{p_{п,j}}$, $Z_{p_{T,j}}$

$T_{p.п_{j=1}} = T_0$	$Z_{p.п_{j=1}} = 0$
$T_{p.п_{j=2}} = \overline{\theta}_{j=1}$;	$Z_{p.п_{j=2}} = K_{\tau_{п,j=1}} U_п^* (T_0 - \overline{\theta}_{j=1})$
$T_{p.п_{j=3}} = \overline{\theta}_{j=2}$;	$Z_{p.п_{j=3}} = K_{\tau_{п,j=1}} U_п^* (T_0 - \overline{\theta}_{j=1}) + K_{\tau_{п,j=2}} U_п^* (\overline{\theta}_{j=1} - \overline{\theta}_{j=2})$
$T_{p.п_{j=4}} = \overline{\theta}_{j=3}$;	$Z_{p.п_{j=4}} = K_{\tau_{п,j=1}} U_п^* (T_0 - \overline{\theta}_{j=1}) + K_{\tau_{п,j=2}} U_п^* (\overline{\theta}_{j=1} - \overline{\theta}_{j=2}) + K_{\tau_{п,j=3}} U_п^* (\overline{\theta}_{j=2} - \overline{\theta}_{j=3})$
$T_{p.п_{j=5}} = \overline{\theta}_{j=4}$	$Z_{p.п_{j=5}} = K_{\tau_{п,j=1}} U_п^* (T_0 - \overline{\theta}_{j=1})$
$T_{p.п_{j=6}} = \overline{\theta}_{j=5}$	$Z_{p.п_{j=6}} = K_{\tau_{п,j=1}} U_п^* (T_0 - \overline{\theta}_{j=1}) + K_{\tau_{п,j=5}} U_п^* (\overline{\theta}_{j=1} - \overline{\theta}_{j=4})$
$T_{p.п_{j=7}} = \overline{\theta}_{j=6}$	$Z_{p.п_{j=7}} = K_{\tau_{п,j=1}} U_п^* (T_0 - \overline{\theta}_{j=1}) + K_{\tau_{п,j=5}} U_п^* (\overline{\theta}_{j=1} - \overline{\theta}_{j=4}) + K_{\tau_{п,j=6}} U_п^* (\overline{\theta}_{j=4} - \overline{\theta}_{j=5})$
$T_{p.T_{j=1}} = T_0$	$Z_{p.T_{j=1}} = 0$
$T_{p.T_{j=2}} = \overline{t}_{j=1}$	$Z_{p.T_{j=2}} = K_{\tau_{T,j=1}} U_T^{***} (T_0 - \overline{t}_{j=1})$
$T_{p.T_{j=3}} = \overline{t}_{j=2}$	$Z_{p.T_{j=3}} = K_{\tau_{T,j=1}} U_T^{***} (T_0 - \overline{t}_{j=1}) + K_{\tau_{T,j=2}} U_T^{***} (\overline{t}_{j=1} - \overline{t}_{j=2})$

Продолжение таблицы 4.1

$T_{p.T_{j=4}} = \bar{t}_{j=3}$	$Z_{p.T_{j=4}} = K_{\tau_{T,j=1}} U_T^{***}(T_0 - \bar{t}_{j=1}) + K_{\tau_{T,j=2}} U_T^{***}(\bar{t}_{j=1} - \bar{t}_{j=2}) + K_{\tau_{T,j=3}} U_T^{***}(\bar{t}_{j=2} - \bar{t}_{j=3})$
$T_{p.T_{j=5}} = \bar{t}_{j=4}$	$Z_{p.T_{j=5}} = K_{\tau_{T,j=1}} U_T^{***}(T_0 - \bar{t}_{j=1})$
$T_{p.T_{j=6}} = \bar{t}_{j=5}$	$Z_T = K_{\tau_{T,j=1}} U_T^{***}(T_0 - \bar{t}_{j=1}) + K_{\tau_{T,j=5}} U_T^{***}(t_{j=1} - \bar{t}_{j=4})$
$T_{p.T_{j=7}} = \bar{t}_{j=6}$	$Z_{p.T_{j=7}} = K_{\tau_{T,j=1}} U_T^{***}(T_0 - \bar{t}_{j=1}) + K_{\tau_{T,j=5}} U_T^{***}(\bar{t}_{j=1} - \bar{t}_{j=4}) + K_{\tau_{T,j=6}} U_T^{***}(\bar{t}_{j=4} - \bar{t}_{j=5})$

где $\bar{\theta}_j$ и $\bar{t}_j$ – средние температуры воздуха по длине подшивного потолка и тоннеля на участке L_1 в зависимости от расчётного периода j, ˚С.

$K_{T_{п,j}}$ – коэффициент теплопередачи от воздуха в тоннеле к воздуху в подшивном потолке, Вт/(м^{2}К).

$K_{\tau_{.р.п.j}}$, $K_{\tau_{.р.Т.j}}$ – расчётные значения коэффициентов нестационарного теплообмена, характеризующих соответственно тепловой поток от породного массива к воздуху в подшивном потолке и к воздуху в тоннеле, Вт/(м^{2}К).

$N_{эн_j}$ – тепловая мощность энергетических источников теплоты, включая подвижной состав, освещение, технологическое оборудование, пассажиры, Вт.

Система уравнений (4.10) - (4.11) решается при следующих граничных условиях (4.12) - (4.13):

$$\theta_j = \theta_{0j} \text{ при } y=0 \qquad (4.12)$$

$$\frac{d\theta_j}{dy} = 0 \text{ при } y = L_1 \qquad (4.13)$$

Система уравнений (4.10) – (4.11) преобразуется к неоднородному линейному дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами (уравнение Эйлера) относительно температуры воздуха в подшивном потолке (4.14):

$$\frac{d^2\theta_j}{dy^2} + Б_j \frac{d\theta_j}{dy} - B_j\theta_j = K_j \qquad (4.14)$$

Решение уравнения (4.14) может быть представлено в виде (4.15):

$$\theta_j = N_{1j}\exp(r_{1j}y) + N_{2j}\exp(r_{2j}y) - \frac{K_j}{B_j} \quad (4.15)$$

где r_{1j}, r_{2j} – корни характеристического уравнения (4.16) - (4.17):

$$r_{1j} = Б_j + \sqrt{Б_j^2 + B_j} \quad (4.16)$$

$$r_{1j} = Б_j - \sqrt{Б_j^2 + B_j} \quad (4.17)$$

где N_{1j}, N_{2j} – постоянные интегрирования, вычисляемые из граничных условий (4.15) имеют вид (4.18) - (4.22):

$$N_{1j} = \frac{\left(\Theta_{0j} - \frac{K_j}{B_j}\right) r_{2j}\exp(r_{2j}L_1)}{r_{1j}\exp(r_{1j}L_1) - r_{2j}\exp(r_{2j}L_1)} \quad (4.18)$$

$$N_{2j} = -\frac{\left(\Theta_{0j} - \frac{K_j}{B_j}\right) r_{1j}\exp(r_{1j}L_1)}{r_{1j}\exp(r_{1j}L_1) - r_{2j}\exp(r_{2j}L_1)} \quad (4.19)$$

$$Б_j = \frac{K_{T_{п,j}} U_п^{**} + K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*}}{G_{1п_j} C_{эф.п._j}} - \frac{K_{T_{п,j}} U_п^{**} + K_{\tau_{р.Т.j}} U_Т^{***}}{G_{2T_j} C_{эф.Т._j}} \quad (4.20)$$

$$B_j = \frac{\left(K_{T_{п,j}} U_п^{**} + K_{\tau_{р.Т.j}} U_Т^{***}\right)\left(K_{T_{п,j}} U_п^{**} -= K_{\tau_{.р.п.j}} U_п^{*}\right) + (K_{T_{п,j}} U_п^{**})^2}{G_{1п_j} C_{эф.п._j} G_{2T_j} C_{эф.Т._j}} \quad (4.21)$$

$$K_j - - \frac{\left(K_{T_{п,j}} U_п^{**} + K_{\tau_{р.Т.j}} U_Т^{***}\right)\left(K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*} T_{р.п_j} + Z_{р.п_j}\right) + K_{T_{п,j}} U_п^{**} K_{\tau_{р.Т.j}} U_Т^{***} T_{р.Т_j} + \left(q_{эн.j} + Z_{р.T_{j=1}}\right) K_{T_{п,j}} U_п^{**}}{G_{1п_j} C_{эф.п._j} G_{2T_j} C_{эф.Т._j}} \quad (4.22)$$

Зависимость, определяющая распределение температур воздуха в тоннеле на участке между точками 1-2, имеет вид (4.23) - (4.23.2):

$$t_j = M_{1j}\exp(r_{1j}y) + M_{2j}\exp(r_{2j}y) - \frac{K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*}}{K_{T_{п,j}} U_п^{**}}\left(\frac{K_j}{B_j} - T_{р.п_j}\right) + \frac{K_j}{B_j} - \frac{Z_{р.п_j}}{K_{T_{п,j}} U_п^{**}} \quad (4.23)$$

$$M_{1j} = N_{1j}\left(1 + \frac{K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*}}{K_{T_{п,j}} U_п^{**}} + \frac{K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*}}{G_{1п_j} C_{эф.п._j}} r_1\right) \quad (4.23.1)$$

$$M_{2j} = N_{2j}\left(1 + \frac{K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*}}{K_{T_{п,j}} U_п^{**}} + \frac{K_{\tau_{р.п.j}} U_п^{*}}{G_{1п_j} C_{эф.п._j}} r_2\right) \quad (4.23.2)$$

Средние температуры воздуха по длине подшивного потолка $\overline{\theta}_j$ и тоннеля $\bar{t}_j$ между точками (1) - (2) определятся из зависимостей (4.13) и (4.21) и будут иметь вид (4.24), (4.25):

$$\overline{\theta}j = \frac{N_{1j}}{r_{1j}L_1}[\exp(r_{1j}L_1) - 1] + \frac{N_{2j}}{r_2L_1}[\exp(r_{2j}L_1) - 1] - \frac{K_j}{B_j} \quad (4.24)$$

$$\bar{t}j = \frac{M_{1j}}{r_{1j}L_1}[\exp(r_{1j}L_1) - 1] + \frac{M_{2j}}{r_2L_1}[\exp(r_{2j}L_1) - 1]) - -\frac{K_{\tau_{p.п.j}}U_п^*}{K_{T_{п,j}}U_п^{**}}(\frac{K_j}{B_j} - T_{p.п_j}) + \frac{K_j}{B_j} - \frac{Z_{p.п_j}}{K_{T_{п,j}}U_п^{**}} \quad (4.25)$$

Температуры воздуха в расчётных точках (3) $\theta_{l_{1,j}}$ и (2) t_{2j} устанавливаются из зависимостей (4.23) и (4.15), соответственно, при граничных условиях $y=L_1$ и $y=0$, и имею вид (4.26) - (4.27).

$$\theta_{l_{1,j}} = N_{1j}\exp(r_{1j}L_1) + N_{2j}\exp(r_{2j}L_1) - \frac{K_j}{B_j} \quad (4.26)$$

$$t_{2j} = M_{1j} + M_{2j} - \frac{K_{\tau_{p.п.j}}U_п^*}{K_{T_{п,j}}U_п^{**}}(\frac{K_j}{B_j} - T_{p.п_j}) + \frac{K_j}{B_j} - \frac{Z_{p.п_j}}{K_{T_{п,j}}U_п^{**}} \quad (4.27)$$

Вычисление температур в расчётных точках (2) и (3) при отсутствии циркуляции воздуха на участке (1) - (2) осуществляется по формулам (4.15) - (4.27). Определение температуры воздуха, поступающего на соседнюю станцию t_{4j} (т.4) при известной температуре $\theta_{l_{1,j}}$ выполняется по формуле, аналогичной формуле, полученной в работе [21].

При схеме проветривания с циркуляцией воздуха между точками 1-2 значения температуры воздуха, подаваемого в подшивной потолок θ_j $(y = 0)$ для годового и холодного периода (зимний, январский, наиболее холодной пятидневки) рассчитывается в зависимости от длительности периода использования циркуляционной схемы в $\tau_{ц.з.}$, $\tau_{ц.ян}$, $\tau_{ц.н.х.п.}$. В том случае, когда к вытяжной шахте поступает часть воздушного потока из соседнего перегона, при расчёте θ_j $(y = 0)$ следует учитывать температуру воздуха t_{4j} и его расход G_{T4_j}.

Таким образом, средняя температура воздуха, подаваемого в подшивной потолок в течение годового периода, длительностью $\tau_{год.}$, равна (4.28):

$$\theta_{j=1} = \frac{\theta_{j=2}\,\tau_{зим} + t_{ат.,j=5}\,\tau_{лет}}{\tau_{год.}} \quad (4.28)$$

$\tau_{зим}$., $\tau_{лет}$ – длительность зимнего и летнего периода, с.

Средняя температура воздуха, подаваемого в подшивной потолок зимой, $\theta_{j=2}$ рассчитывается как (4.29):

$$\theta_{j=2} = \frac{\theta_{j=2,ц}\,\tau_{.ц.з} + t_{ат.,j=2}\,(\tau_{зим} - \tau_{.ц.з})}{\tau_{зим.}} \quad (4.29)$$

Средняя температура воздуха, подаваемого в подшивной потолок зимой в период циркуляции $\theta_{ц.j=2}$, вычисляется с учётом температуры воздуха, выходящего из тоннеля на станцию 1 $t_{2,j=2}$, температуры воздуха, поступающего из соседнего перегона $t_{4j=2}$, весового расхода циркуляционного воздуха $G_{ц_{j=2}}$, а также температуры $t_{ат_{j=2}}$ и расхода $G_{o_{j=2}}$ наружного воздуха по формуле (4.30).

$$\theta_{ц.j=2} = \frac{(t_{2,j=2}\,G_{2Т.j=2} + t_{4,j=2}\,G_{Т4_{j=2}})G_{ц_{j=2}} + t_{ат_{j=2}}G_{o_{j=2}}(G_{2Т.j=2} + G_{Т4_{j=2}})}{(G_{2Т.j=2} + G_{Т4_{j=2}})(G_{ц_{j=2}} + G_{o_{j=2}})} \quad (4.30)$$

где $G_{o_{j=2}}$ – весовой расход наружного воздуха, кг/с.

Формулы (4.29) - (4.30) подставляются в зависимость расчёта для температуры воздуха в точке 2 тоннеля, которая записывается для среднегодовой температуры $t_{2,j=1}$ и среднезимней температуры $t_{2,j=2}$, зависящих, как от $\theta_{j=1}$, так и от $\theta_{j=2}$, которые, в свою очередь, вычисляются по температурам $t_{2,j=1}$ и $t_{2,j=2}$. Система уравнений относительно температур $t_{2,j=1}$ и $t_{2,j=2}$ решается итерационным способом. Рассчитанные значения температур далее используются при вычислении среднеянварских (j=3) температур и температур наиболее холодной пятидневки (j=4). При этом температуры воздуха, подаваемого в подшивной потолок $\theta_{j=3}$, $\theta_{j=4}$ и средние температуры воздуха в период циркуляции $\theta_{ц.j=3}$, $\theta_{ц.j=4}$ вычисляются по формулам, аналогичным формулам (4.14) - (4.15) и будут иметь вид (4.31) - (4.32.1):

$$\theta_{j=3} = \frac{\theta_{ц,j=3}\,\tau_{.ц.ян} + t_{ат.,j=3}\,(\tau_{ян} - \tau_{.ц.ян.})}{\tau_{ян.}} \quad (4.31)$$

$$\theta_{ц.j=3} = \frac{(t_{2,j=3}\, G_{2Т.j=3} + t_{4,j=3}\, G_{Т4_{j=3}})G_{ц_{j=3}} + t_{ат_{j=3}} G_{о_{j=3}}(G_{2Т.j=3} + G_{Т4_{j=3}})}{(G_{2Т.j=3} + G_{Т4_{j=3}})(G_{ц_{j=3}} + G_{о_{j=3}})} \quad (4.31.1)$$

$$\theta_{j=4} = \frac{\theta_{ц,j=4}\, \tau_{.ц.н.х.п.} + t_{ат.,j=4}\, (\tau_{н.х.п.} - \tau_{.ц.н.х.п.})}{\tau_{н.х.п..}} \quad (4.32)$$

$$\theta_{ц.j=4} = \frac{(t_{2,j=4}\, G_{2Т.j=4} + t_{4,j=4}\, G_{Т4_{j=4}})G_{ц_{j=4}} + t_{ат_{j=4}} G_{о_{j=4}}(G_{2Т.j=4} + G_{Т4_{j=4}})}{(G_{2Т.j=4} + G_{Т4_{j=4}})(G_{ц.j=4} + G_{о_{j=4}})} \quad (4.32.1)$$

Вычисления по формулам (4.31.1) - (4.32.1) осуществляются итерационным способом совместно с расчётом t_j при j=3 и j=4 по формуле (4.23). В результате вычислений находятся температуры воздуха в тоннеле и в подшивном потолке для январского периода и периода наиболее холодной пятидневки.

4.3 Определение области применения рециркуляционной схемы проветривания двухпутных тоннелей в климатических условиях Санкт-Петербурга

Вариантом возможной схемы вентиляции двухпутных тоннелей, с возможностью создания искусственного циркуляционного контура, предполагается использование специального вентиляционного канала, расположенного в верхней части тоннеля (подшивного потолка). Подобное решение уже используется в системах вентиляции автодорожных тоннелей для удаления выхлопных газов автотранспорта, а также пожарных и дымовых газов в случае пожара, его использование на линиях метрополитена с двухпутными тоннелями не имеет аналогов, как в нашей стране, так и за рубежом.

Включая в работу вентиляции метрополитенов подшивной потолок, мы имеем возможность создать искусственные управляемые циркуляционные контуры между станционным комплексом и частью перегона, за счет подмешивания в вентиляционный канал теплый воздух напрямую со станции.

В разработанном техническом решении речь идет об организации в зимний период управляемых циркуляционных потоков, которые будут оказывать влияние на формирование микроклимата. При этом смешение циркуляционного воздуха и

холодного наружного воздуха может быть организовано непосредственно в станционном комплексе, в приточной камере.

На рисунке 4.3 приведена схема проветривания тоннелей, использующая новое техническое предложение.

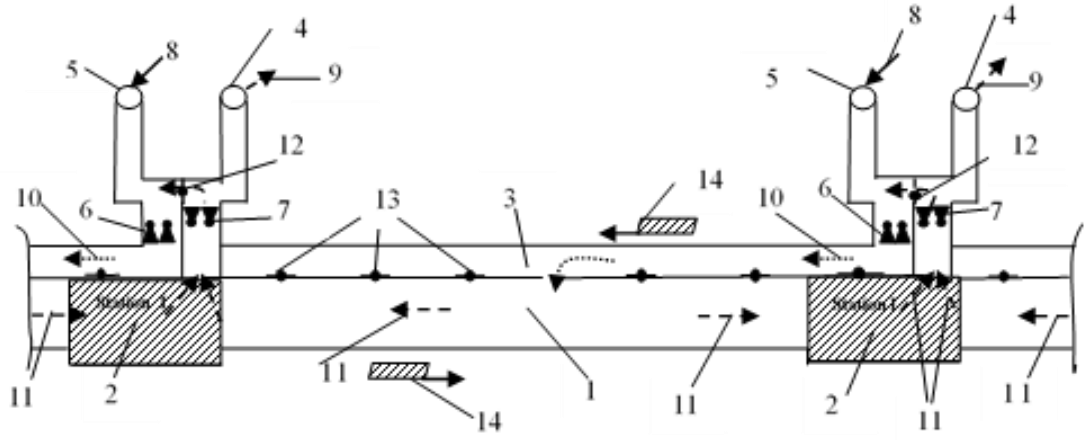


Рисунок 4.3 – Вентиляционная схема для двухпутных тоннелей с использованием подшивного потолка в холодный период, где 1 – тоннель двухпутный; 2 – станции метро; 3 – вентиляционный канал; 4 – шахта вытяжной вентиляции станции; 5 – шахта приточной вентиляции станции; 6 – вентилятор приточной вентиляции; 7 - вытяжные вентиляторы; 8 – холодный наружный воздух; 9 – вытяжной воздух; 10 – смесь наружного и циркуляционного воздуха; 11 – воздух в тоннеле; 12 – клапан выпуска циркуляционного воздуха; 13 – клапаны выпуска воздуха из вентиляционного канала в тоннеле; 14 – направление движения поездов

Холодный наружный воздух подается вентиляторами в приточную камеру, где смешивается с теплым воздухом, поступающим со станции. Расход воздуха, равный сумме расходов приточного и циркуляционного воздуха, направляется в вентиляционный канал, по которому движется до середины перегона, где через клапан выпускается в тоннель с дальнейшей возможностью движения в противоположных направлениях к соседним станциям. Температура воздуха при его движении по тоннелю по направлению к станциям повышается за счет теплоты, выделяемой от движущихся поездов и других энергетических источников. В результате его теплообмена с поверхностью вентиляционного

канала часть теплоты передается через нее к движущемуся по каналу воздуху, что также приводит к повышению его температуры.

Таким образом, теплота движущихся поездов и энергетических источников используется в предлагаемом техническом решении, как для подогрева наружного воздуха в станционном комплексе, так и его подогрева в вентиляционном канале.

При температуре наружного воздуха выше 0°С в вентиляционный канал нагнетают исключительно наружный воздух, подаваемый через шахту станционного комплекса. Выпуск воздуха с поверхности в тоннель производят через открытые вентиляционные окна, так называемые клапаны, равномерно расположенные по длине перегонного тоннеля. Перемещение воздушных масс с поверхности осуществляют с возможностью дальнейшего движения по тоннелю в направлениях к соседним станционным комплексам и удалением на поверхность с помощью вытяжных вентиляторов через вытяжные станционные шахты.

При использовании для проветривания двухпутных тоннелей схемы вентиляции, (рисунок 4.4), поступление холодного наружного воздуха в тоннель приводит к снижению температуры воздуха в центральной части перегонного тоннеля до температуры атмосферного воздуха (рисунок 4.5).

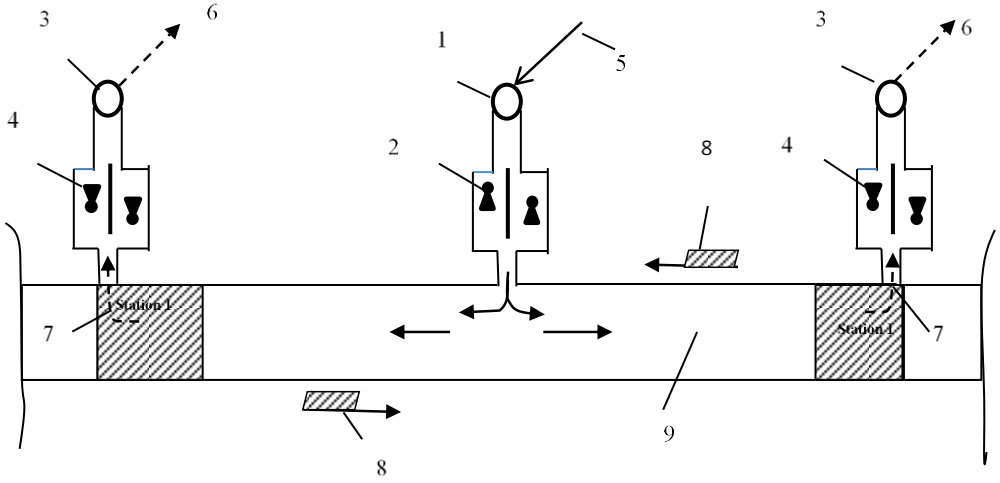


Рисунок 4.4 – Система вентиляции для двухпутного тоннеля метро, где

1 – вентиляционная шахта нагнетания в середине проходного тоннеля;

2 – вентилятор нагнетания; 3 – вентиляционная шахта станции; 4 – вытяжной вентилятор; 5 – наружный воздух; 6 – вытяжной воздух; 7 – вытяжной воздух;

8 – направление движения поезда; 9 – перегонный тоннель

При движении воздуха в направлении станций его температура, вследствие влияния теплоты от поездов и других источников, а также теплообмена с окружающими породами, монотонно повышается [70, 71]. Однако, если для средне зимней и средне январской температур наружного воздуха температура станционного воздуха достигает нормативной величины, то для температуры наиболее холодной пятидневки температура воздуха в тоннеле по всей длине перегона, в том числе на станции, имеет отрицательное значение. Помимо этого, значительные участки перегонных тоннелей, примыкающие к вентиляционным стволам, будут эксплуатироваться в условиях отрицательных температур, что, безусловно, приведет к снижению безопасности движения.

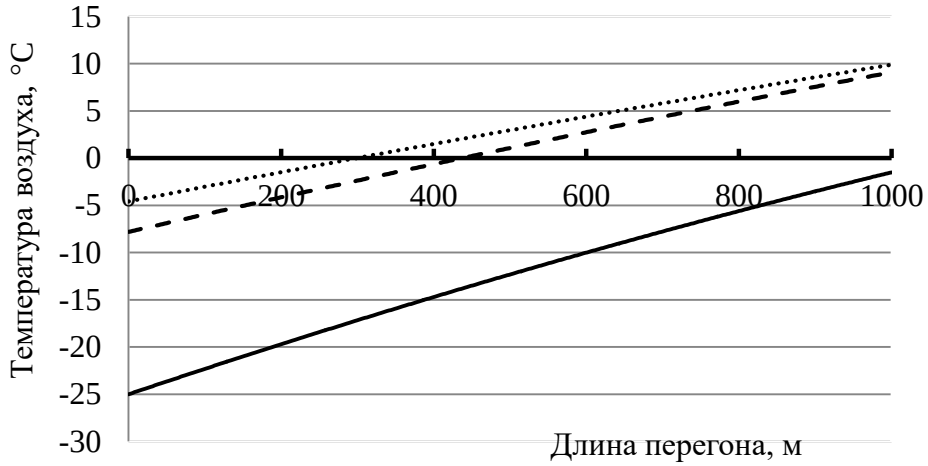


Рисунок 4.5 – Расчетное распределение температуры по длине полу перегона, где средне зимняя температура наружного воздуха – сплошная линия; средне январская температура наружного воздух – пунктирная линия, средняя температура наружного воздуха во время наиболее холодной пятидневки – точечная линия

Таким образом, результаты расчетов подтвердили ранее высказанные предположения о существенном влиянии наружного воздуха на температурный режим двухпутных тоннелей при традиционных схемах вентиляции.

Температурный режим двухпутных тоннелей для предложенной схемы вентиляции представлен на рисунке 4.6.

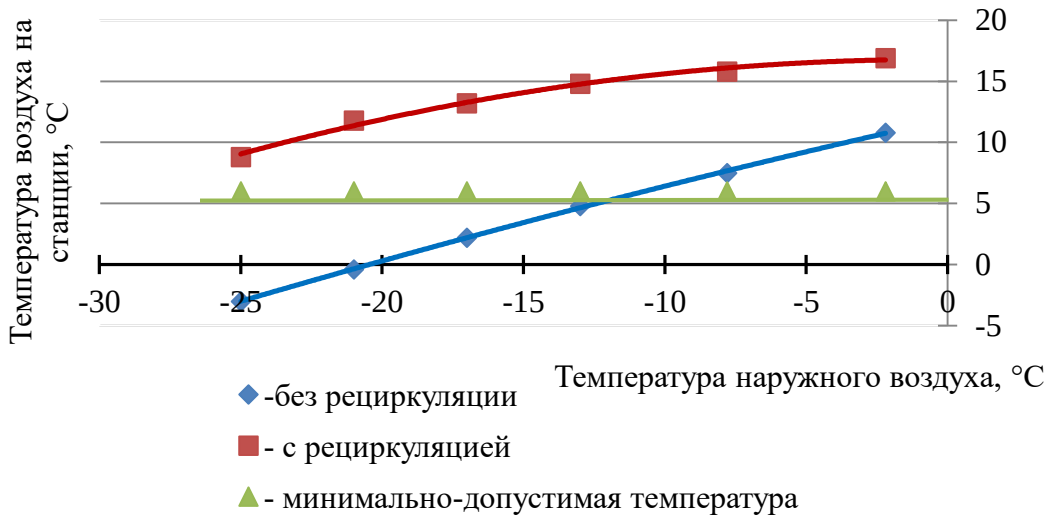


Рисунок 4.6 – Зависимость температуры воздуха на перегоне и на станции от расхода циркуляционного воздуха

На основе использования математической модели, описываемой зависимостями (2.23) - (2.46), осуществлены вариантные расчёты действующих и проектируемых линий Санкт-Петербургского метрополитена с двухпутными и однопутными перегонными тоннелями. При выполнении расчётов в качестве исходных данных приняты: актуальные схемы проветривания линий метрополитена (рисунок 4.3), геометрические размеры (длина, сечение, периметр) тоннелей и подшивного потолка между соседними станциями, климатические характеристики наружного воздуха Санкт-Петербурга, теплофизические характеристики грунтов, окружающих тоннели и станции, количества воздуха, подаваемого в тоннели в расчёте на каждый перегон, в том числе циркуляционного воздуха, количества теплоты, выделяемые движущимися поездами, и другими энергетическими источниками (таблица 4.2).

Результаты вычислений для типовых исходных данных, характеризующих Санкт-Петербургский метрополитен, представлены на рисунках 4.6, 4.7.

В зимний период для условий января и наиболее холодной пятидневки использование рециркуляции приводит к заметному повышению температуры воздуха в тоннеле. В период н.х.п. температура подаваемого в тоннель воздуха превышает температуру воздуха при отсутствии рециркуляции на 8°С. При этом,

температура воздуха, поступающего на станции, становится выше нормативного значения температуры.

Таблица 4.2 – Исходные данные, принятые при осуществлении расчётов

Параметр	Значение
Длина перегона	2000 м
Сечение тоннеля	69,4 $м^2$
Сечение подшивного потолка	14,6 $м^2$
Тепловыделения от поездов	964 кВт
Расход воздуха в холодный период	90 $м^3/с$ (60+30)
Расход воздуха в тёплый период	120 $м^3/с$ (65+55)
Расход циркуляционного воздуха	40 $м^3/с$
Температуры наружного воздуха: зимняя январская наиболее холодной пятидневки летняя июльская самого жаркого дня	 -2,2 °С -7,8 °С -25 °С 12,6 °С 18,7 °С 23 °С
Теплопроводность грунта	2,08 Вт/(м°С)
теплоёмкость грунта	1,55 кДж/кг°С
Плотность грунта	1720 $кг/м^3$
температуропроводность грунта	7.810^{-7} $м^2/с$

Анализ графиков на рисунке 4.5 даёт возможность установить рациональную область использования рециркуляции воздуха в рассматриваемых схемах вентиляции. Она определяется точкой пересечения кривой, характеризующей температуру воздуха, поступающего из тоннеля на станцию, и линией, соответствующей минимально-допустимой температуре воздуха на станции. При температуре наружного воздуха, не превышающей -10°С, температура воздуха на станциях может опускаться ниже минимально-допустимой температуры. В этой связи, это значение температуры наружного воздуха является критической величиной, определяющей необходимость включения в схемы вентиляции рециркуляции воздуха.

По сравнению с температурами в однопутных тоннелях, когда их значения на станциях могут достигать 29°С ÷ 30°С, для двухпутных тоннелей характерен более благоприятный температурный режим.

Это может быть объяснено отсутствием связанных с движением поездов циркуляционных потоков, где в течение всего годового периода может аккумулироваться теплота от движущихся поездов, значительная часть которой не удаляется с исходящей воздушной струёй из метрополитена [17].

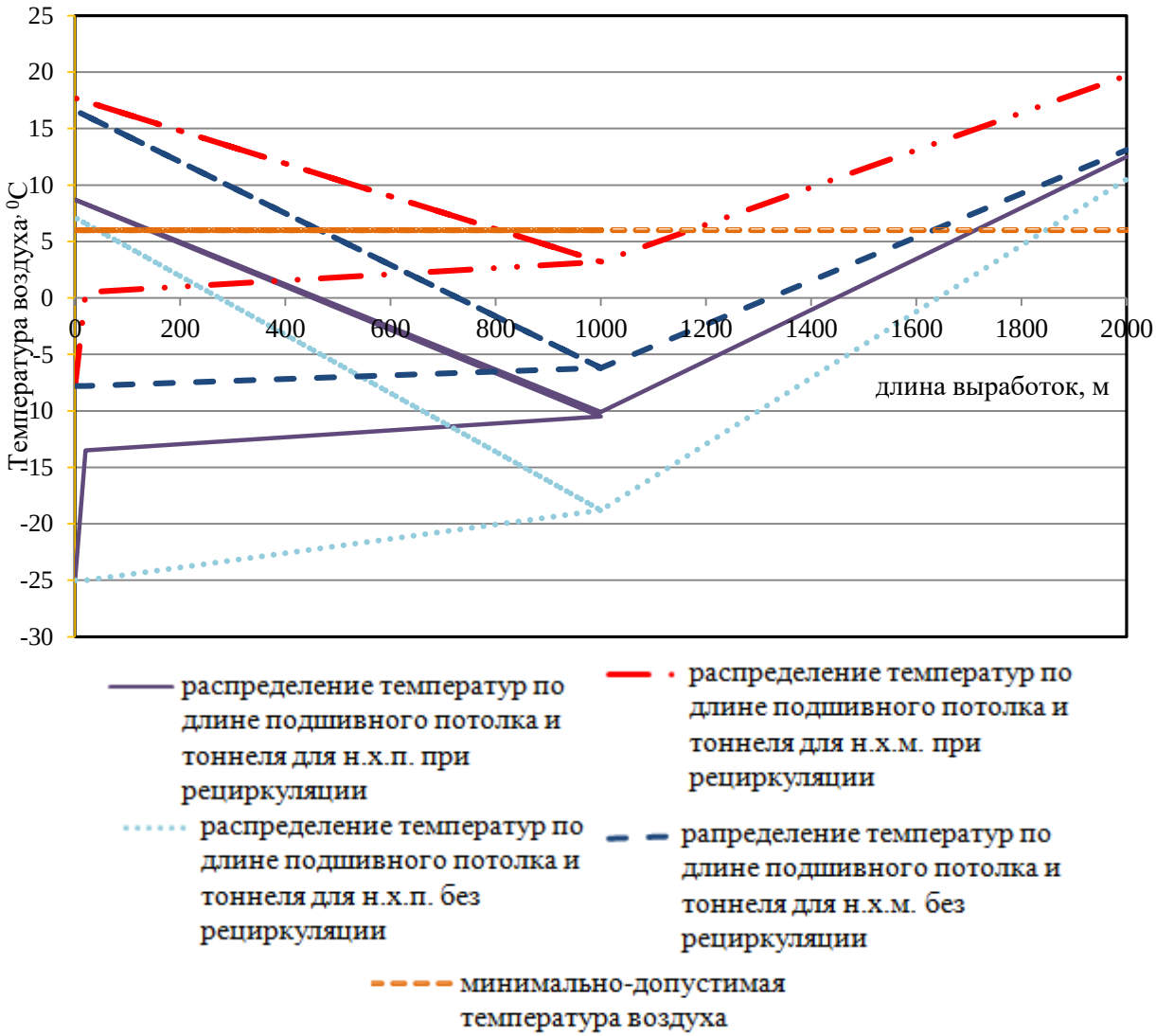


Рисунок 4.7 – Результаты расчётов распределения температур по длине подшивного потолка и участков двупутного тоннеля от центральной части перегона до соседних станций для условий зимнего периода (январские температуры (н.х.м.), температуры наиболее холодной пятидневки (н.х.п.) при схемах вентиляции с рециркуляцией и без рециркуляции воздуха

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 шахтной сбойкой, не удаляется на поверхность на участке сопряжения однопутных и двухпутных тоннелей, как при типовой схеме вентиляции перегона однопутных тоннелей между станциям, а направляется в параллельный однопутных 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 4.9), что при температурах наружного воздуха, характеризующих наиболее жаркий месяц и наиболее жаркие сутки может привести к значению температуры на станции, превышающей нормативное значение 28°С.

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 м^3/с (рисунок 4.8).

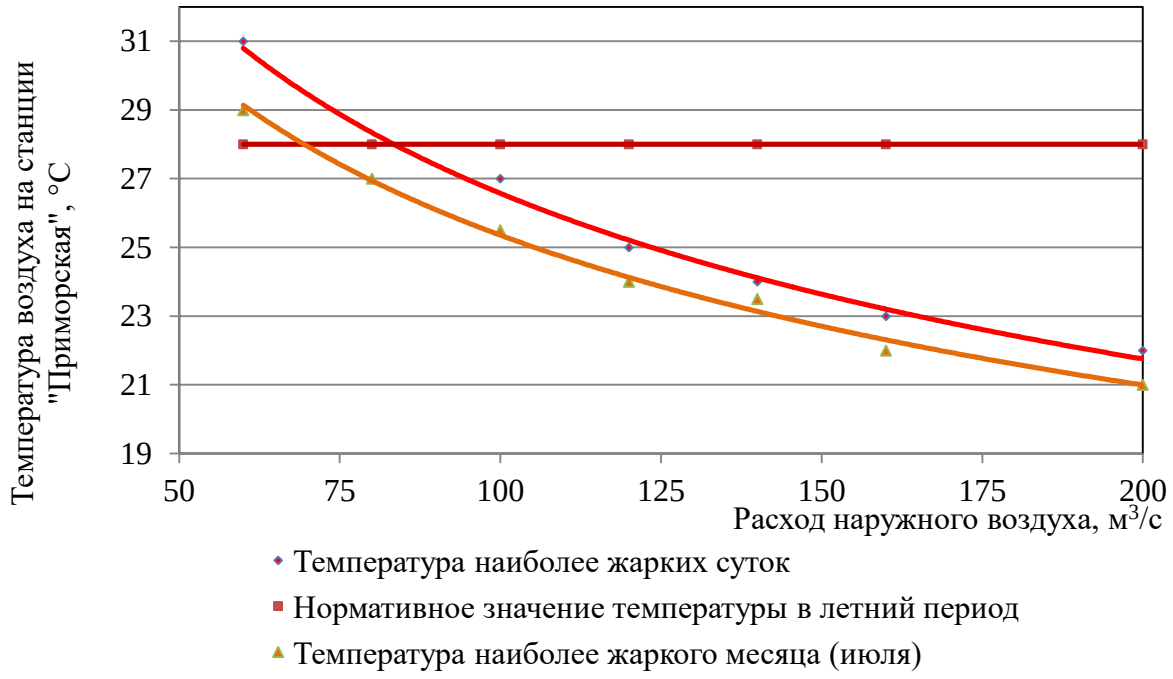


Рисунок 4.8 – Температуры воздуха на станции, расположенной за точкой сопряжения участка двухпутного тоннеля и однопутных тоннелей

4.4 Особенности расчётов температур воздуха на участках сопряжения двухпутного и однопутных тоннелей

Особый интерес с точки зрения формирования температур в перегонных тоннелях имеет участок однопутных тоннелей между точкой сопряжения двухпутного и однопутных тоннелей, где происходит смешение воздуха, поступающего из двухпутного тоннеля и воздуха, циркулирующего в однопутных тоннелях (рисунок 4.9).

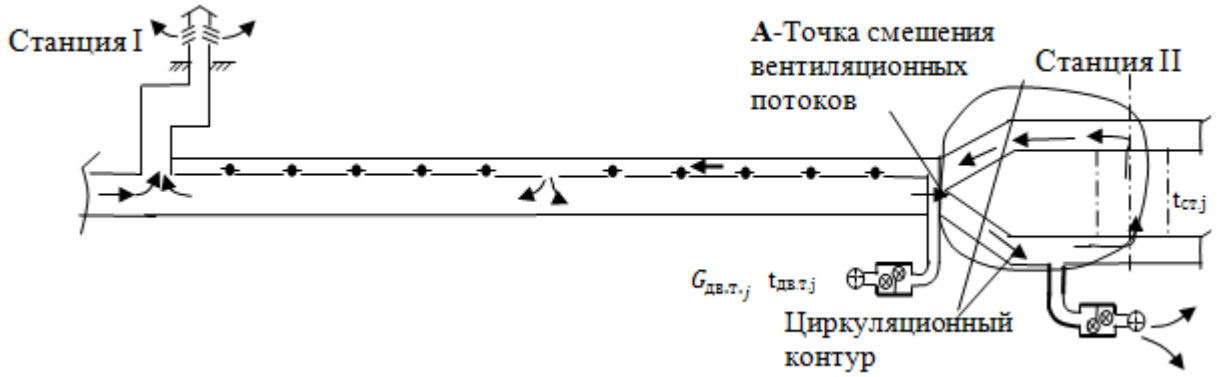


Рисунок 4.9 – Схема вентиляции участка сопряжения двухпутного и однопутных тоннелей, где $G_{дв.т}$ – весовые расходы воздуха в двухпутном тоннеле; j – индекс, определяющий временной период расчета; $t_{дв.т.}$ – температуры воздуха в двухпутном тоннеле; j =1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – соответствует среднегодовому 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

В отличие от стандартной ситуации, типичной для однопутных тоннелей, когда циркуляционный воздух, имеющих температуру, превышающую температуру на станциях, разбавляется более холодным наружным воздухом, нагнетаемым в тоннель по перегонным шахтам. В рассматриваемом случае функцию наружного воздуха выполняет воздух из двухпутного тоннеля, имеющий расход $G_{\text{дв.т.}_j}$ и температуру $t_{\text{дв.т}_j}$. Следствием этого может быть повышение температуры воздуха на станциях сверх нормативных значений. Зависимость для расчёта температуры воздуха на станции, находящейся на

расстоянии L от участка сопряжения, получена на основе методического подхода, предложенного в работе [21] (4.33) - (4.33.9).

$$t_{\text{ст}_j} = \Delta G_j exp\left(-A_{2_j}L\right)\frac{N_{1,j} + \Delta t_j \exp\left(-A_{1_j}L\right) + t_{\text{дв.т}_j}G_{\text{дв.т.}j}G_{\text{ц}_j}^{-1}}{M_j} + \frac{N_{2,j}}{M_j} + \Delta t_j \qquad (4.33)$$

$$M_j = 1 - \Delta G_j \exp[-(A_{1,j} + A_{2,j})L] \qquad (4.33.1)$$

$$N_{1_j} = \left(T_{\text{р}1_j} + B_{1_j}\right)[1 - \exp(-A_{1,j}L)] \qquad (4.33.2)$$

$$N_{2_j} = \left(T_{\text{р}2_j} + B_{2_j}\right)[1 - \exp(-A_{2,j}L)] \qquad (4.33.3)$$

$$A_{1,j} = \frac{k_{\tau 1_j}U}{c_{\text{эф.}1_j}(G_{\text{дв.т.}j} + G_{\text{ц}_j})} \qquad (4.33.4)$$

$$A_{2,j} = \frac{k_{\tau 2_j}U}{c_{\text{эф.}2_j}G_{\text{ц}_j}} \qquad (4.33.5)$$

$$B_{1_j} = \frac{N_{\text{эн.}1_j} + Z_{\text{р}1_j}L}{k_{\tau 1_j}UL} \qquad (4.33.6)$$

$$B_{2_j} = \frac{N_{\text{эн.}2_j} + Z_{\text{р}2_j}L}{k_{\tau 2_j}UL} \qquad (4.33.7)$$

$$\Delta t_j = \frac{Q_{\text{ст}_j}}{c_{\text{эф.ст}_j G_{\text{ц}_j}}} \qquad (4.33.8)$$

$$\Delta G_j = \frac{G_{\text{ц}_j}}{G_{\text{ц}_j} + G_{\text{дв.т.}j}} \qquad (4.33.9)$$

$T_{\text{р}1_j}$; $T_{\text{р}2_j}$ и $Z_{\text{р}1_j}$; $Z_{\text{р}2_j}$; $\text{T}_{\text{р}_{\text{п,j}}}$ $\text{T}_{\text{р}_{\text{т,j}}}$ – соответственно расчётные значения температуры породного массива, окружающего тоннель, ˚С и значения параметра, определяющего дополнительный тепловой поток, поступающий из породного массива к воздуху при j = 2, 3, 4, 5, 6, 7, рассчитываемый по формулам, аналогичным, приведенным в таблице 4.1.;

$N_{\text{эн.}1_j}, N_{\text{эн.}2_j}$ – мощности энергетических источников теплоты, кВт;

$c_{\text{эф.ст}_j}$ – эффективная теплоемкость воздуха на станции, кДж/кг°С;

$G_{\text{ц}_j}$ – расход циркуляционного воздуха, кг/с.

Таким образом, предлагаемая методика расчёта даёт возможность вычислять распределение температур по длине тоннелей для среднегодовых, средне зимних, средне летних, среднемесячных и экстремальных (наиболее холодной пятидневки, наиболее жаркого дня) температур наружного воздуха. Она может быть использована для вычисления температур воздуха в двухпутных тоннелях при рассмотренной схеме проветривания с подшивным потолком и на участках сопряжения двухпутных и однопутных тоннелей [89-91].

Процедура вычисления температур осуществляется в несколько этапов. На первом этапе определяются среднегодовые значения температур воздуха, на втором – средне летние и средне зимние температуры, на третьем – распределения температур для каждого месяца, и, наконец, на последнем этапе – экстремальные температуры для наиболее холодных или теплых периодов.

4.5 Рекомендации по совершенствованию вентиляции однопутных тоннелей, прилегающих к двухпутному тоннелю на участке перегона «Беговая» – «Приморская»

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.

4.6 Выводы по главе 4

1. Разработанные методики тепловых расчетов, базируются на определении количества теплоты, выделяемой или поглощаемой различными источниками, такими как горный массив, испарение влаги, работа энергетических установок, включая подвижной состав, и другие. Однако вопросы, связанные с совместным влиянием этих факторов на распределение температуры воздуха по длине перегонов между станциями, циркуляционными потоками и объемом подаваемого в тоннели наружного воздуха, остаются недостаточно изученными и требуют дальнейшего изучения.

2. Термодинамические параметры тоннельного воздуха на линиях метрополитена, включающих двухпутные и однопутные тоннели, и последующая разработка мероприятий по управлению этими параметрами, должны устанавливаться на основе предложенной методики расчёта распределения температур для условий среднегодовых, средне зимних, средне летних, среднемесячных и экстремальных (наиболее холодной пятидневки, наиболее жаркого дня) температур наружного воздуха.

3. Для схем проветривания двухпутных тоннелей, в которых одним из элементов вентиляционной системы является подшивной потолок в зимний период времени при температуре наружного воздуха ниже значений -8°С ÷ -10°С, следует использовать специально организованную рециркуляцию тоннельного воздуха между центральной частью тоннеля и входом наружного воздуха в подшивной потолок.

4. Закономерности формирования теплового режима однопутных тоннелей метрополитена определяются влиянием многочисленных факторов, основными из которых следует считать образование циркуляционных потоков, связанных с движением поездов, тепловыделениями от подвижного состава,

неравномерно распределенные по длине перегонов между станциями, температуру наружного воздуха и его расход.

5. Предложенная методика позволяет осуществлять тепловые расчеты однопутных тоннелей метрополитенов с учетом сложного закона изменения температуры атмосферного воздуха, интенсивности движения поездов и количество теплоты, выделяемой на участках разгона, выбега, торможения и на станциях, и использования систем охлаждения воздуха, размещенных в сбойках, прилегающих к станциям.

6. Использование вентиляционного канала в системе вентиляции по сравнению с традиционными техническими решениями, предполагающими подачу воздуха в тоннель через перегонные вентиляционные шахты, позволяет отказаться от перегонных вентиляционных узлов, что особенно важно при сооружении метрополитенов в мегаполисах; дает возможность существенно повысить, по сравнению с типовой схемой аварийной вентиляции, эффективность эвакуации людей при пожаре (защита путей эвакуации) и организации удаления дыма, как из тоннеля, так и со станций; при понижении температуры наружного воздуха ниже - 15°С ÷ - 10°С осуществить его подогрев за счет смешения с частью теплого станционного воздуха.

7. Расчеты показали, 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.

8. Без использования рециркуляции воздуха его температура по длине подшивного потолка даже при средней температуре холодного периода -5°С будет достигать положительных значений только к середине перегона между станциями. Во время холодной пятидневки и температуре около -25°С температура воздуха в тоннеле не будет выше -2°С по всей длине подшивного потолка от места подачи воздуха на станции до его выпуска в тоннель в середине перегона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных исследований дана оценка факторов, определяющих вентиляционный и тепловой режимы перегонных тоннелей и станций на линиях метрополитена 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°С 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°С.

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 $м^3/с$.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика: учебник для втузов / Г.Н.Абрамович - 4-е изд., перераб. - М.: Наука, 1976. - 888 с.: ил. - Библиогр.: с. 884-885.

2. Алферова, Е.Л. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутом тоннеле метрополитена / Е.Л. Алферова, И.В. Лугин, Л.А. Кияница // ГИАБ. – 2016. – №6. – С. 5-14.

3. Андрющенко, В.Н. Проблемы регламентации микроклимата подземных выработок / В.Н. Андрющенко. - Физические процессы горногопроизводства, вып. 11. Л.: Изд.ЛГИ. - С. 26-37.

4. Бодров, В.А. Воздухообмен в тоннелях метрополитенов мелкого заложения от поршневого эффекта движения поездов / В.А. Бодров, В.Б. Трошин, П.С. Веселов // Метро. – 1993. – № 3. – С. 38-39.

5. Бурлаков, Д.Д. Исследование влияния поршневого движения поездов метрополитена на обеспеченность воздухом станций метро / Д.Д. Бурлаков, В.П. Федотова, О.В. Скопинцева // ГИАБ, 2019. –№S19. С. 28–36.

6. Веденин, А.Н. Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания железнодорожных тоннелей при их эксплуатации / А.Н. Веденин, В.В. Смирняков // Зап. горн. ин-та – 2007. – Т. 172. – С. 190-191.

7. Водяник, Г.М. Компьютерное моделирование вентиляционной сети шахты как динамического объекта / Г.М. Водяник // Компьютерное моделирование технологических процессов / Новочеркасский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 1996. – С. 71-81.

8. Волков, В.П. Тоннели и метрополитены / В.П. Волков, С.Н. Наумов, А.Н. Пирожкова, В.Г. Храпов – М. : Транспорт, 1975. – 551 с.

9. Воропаев, А.Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции / А.Ф. Воропаев; Л.: Изд-во АН СССР, 1950.

10. Воропаев, А.Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах / А.Ф. Воропаев; М.: Недра, 1979. – 192 с.

11. Гаев, Д.В. Московский метрополитен сегодня / Д.В. Гаев // Подземное простанство мира. – 1997. – № 2. – С. 18.

12. 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.

13. Гендлер, С.Г. Особенности тепловых расчетов подземных сооружений транспортного назначения / С.Г. Гендлер, С.Е. Беспалов, В.А. Соколов, Э.М. Юшковский // Межвуз. сб. «Вентиляция шахт и рудников». Интенсификация теплообмена и пылегазообразование в горных выработках. – Л., 1989. – С. 77-81.

14. 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.

15. Гендлер, С.Г. Тепловой режим подземных сооружений. — Л.: ЛГИ им. Г.В. Плеханова, 1987. — 102 с.

16. Гендлер, С.Г. Управление качеством воздуха при эксплуатации подземных сооружений транспортного назначения. / С.Г. Гендлер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000(7). – С. 99-105.

17. 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.

18. Гендлер, С.Г. Управление тепловым режимом подземных сооружений глубокого заложения при переменных аэротермодинамических параметрах воздушного потока: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / С.Г. Гендлер — Санкт-Петербург, 1996. — 43 с.

19. Гендлер, С.Г. Управление тепловым режимом тоннелей в суровых климатических условиях / С.Г. Гендлер // Транспортное строительство. – 1991. – № 11. – С. 11-13.

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

21. 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.

22. Гигиняк, Е.И. Открытие второго вестибюля станции Петербургского метрополитена «Спортивная» / Е.И. Гигиняк // Метро и тоннели. – 2015. – №3. – С. 8-9.

23. ГОСТ Р 50850-96. Вагоны метрополитена. Общие технические условия. –Введ. 1996-01-17. – М.: ИПК Издательство стандартов.

24. Гусев, В.С. Методы теплотехнических расчетов по обеспечению микроклимата в сооружениях гражданской обороны. М.: Стройиздат, 1975. -157 с.

25. Двухпутный тоннель на участке «Проспект славы» – «Шушары» [Электронный ресурс] // Подземный эксперт. – 2013. – Режим доступа: https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/tehnologii/dvukhputnyj-tonnel/ (дата обращения: 28.02.2025).

26. Дмитриев, А.П. Термодинамические процессы в горных породах А.П. Дмитриев, Л.С. Кузяев. – М.: – 1967. - 159 с.

27. Долинский, Е.А. О расчетном определении коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок / Е.А. Долинский, Р.С. Кирин // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1990. – № 6. – С. 53-57.

28. Дядькин, Ю.Д. Методика теплового расчета шахт и рудников в сложных условиях. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых / Ю.Д. Дядькин // Новосибирск, Наука. - №5. - 1973. - С.92-100.

29. Дядькин, Ю.Д. О методах тепловых расчетов рудничного воздуха. Научные доклады высшей школы. «Горное дело». - 1958. - №1.

30. Дядькин, Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. — М.: Недра, 1968. — 256 с.

31. Зайцев, А.В. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках / А.В. Зайцев, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. –№ 12. – С. 151-156.

32. Зайцев, А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Зайцев Артём Валерьевич. — Пермь, 2019. – 247 с.

33. Зайцев, А.В. Теплотехнические системы нормализации микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК Норильский никель» / А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин, С.В. Бутаков, М.А. Семин // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 34-39.

34. Зарипов, Р.Г. Нелинейные колебания газа в трубе / Р.Г. Зарипов, М.А. Ильгамов, Ю.Н. Новиков, В.Б. Репин // Всес. конф. «Нелинейн. явления», Москва, 19-22 сент., 1989: Тез. докл. – М. – 1989. – С. 17-18.

35. Иванов, С.А. Опыт ЭМС Московского метрополитена по обеспечению микроклимата на подземных объектах / С.А. Иванов // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 42-43.

36. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. // М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

37. Казаков, Б.П. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников / Б.П. Казаков, Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин // ГИАБ, 2006. №S1. С. 21-33.

38. Кияница, Л.А. Исследование тепловыделений по длине линии метрополитена с двухпутным тоннелем и станциями закрытого типа // Материалы I Всероссийской научно-технической конференции, посвящённой памяти д-ра

техн. наук, профессора, А.А. Сандера: сб. науч. тр. «Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве», Новосибирск: Издательство НГАСУ (Сибстрин). – 2017. – С. 112-120.

39. Кияница, Л.А. Научно-методические основы разработки раздельной системы вентиляции станции закрытого типа метрополитена с двухпутным туннелем / Л.А. Кияница // ГИАБ. – 2019. – №1. С. 84-96.

40. Кияница, Л.А. Тепло-массообменные процессы в подземных сооружениях станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем: дис. канд. техн. наук: 25.00.20 / Л.А. Кияница. – Новосибирск, 2018. –194 с.

41. Корнилков, М.В. Объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения по строительству и эксплуатации линий Екатерибургского и Челябинского метрополитенов / М.В. Корнилков, Б.Д. Половов, А.Н. Кряжевских, Н.Г. Кузьмин // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – №6. – С. 70-78.

42. Королев, Е.Г. Особенности работы тоннельной вентиляции в зависимости от конструкции архитектуры подземных объектов / Е.Г. Королев // Организация систем воздухообмена, контроля и управления микроклиматом, управление режимами вентиляции в экстремальных условиях в тоннелях и на станциях метрополитена: Материалы конференции Хозяйственной Ассоциации «Метро», С-Пб., 1997. – С. 60-61.

43. Коротков, В.Н. Работа тоннельной вентиляции Петербургского метрополитена. Особенности состояния микроклимата / В.Н. Коротков // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 41.

44. Косарева, А. Собянин осмотрел строительство станции БКЛ метро «Кунцевская» [Электронный ресурс] / А. Косарева // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. – 2021. – Режим доступа: https://stroi.mos.ru/news/sobianin-osmotriel-stroitiel-stvo-stantsii-bkl-kuntsievskaia (дата обращения: 20.02.2025).

45. Красюк, А.М. Взаимное влияние режимов вентиляции станций линии метрополитена / А.М. Красюк, И.В Лугин., А.Н. Чигишев // Метро и тоннели. – 2002. – № 2. – С. 36-38.

46. Красюк, А.М. Взаимосвязность режимов вентиляции станций метрополитена / А.М. Красюк, И.В. Лугин // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. – 2003. – № 4.

47. Красюк, А.М. Влияние поршневого действия поездов на тоннельную вентиляцию метрополитенов мелкого заложения [Текст] / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов, А.Н. Чигишев. Метро и тоннели. Изд-во "ТА Инжиниринг". – 2010. – № 2. – С. 30-32.

48. Красюк, А.М. Влияние поршневого действия поездов на тоннельную вентиляцию метрополитенов мелкого заложения // А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов, А.Н. Чигишев // Метро и тоннели. –2010. –№2. – С. 30-32.

49. Красюк, А.М. Исследование температурных полей грунтового массива, окружающего станции метрополитена мелкого заложения / А.М. Красюк, И.В. Лугин, А.Ю. Пьянкова // ФТПРПИ, 2012. –№3. – С. 64-74.

50. Красюк, А.М. Математическое моделирование воздухораспределения в вентиляционной сети метрополитена с учетом поршневого действия поездов [Текст] / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов. Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение. Аэрология. – М.: МГГУ. – 2009. – С. 48-57.

51. Красюк, А.М. Математическое моделирование воздухораспределения в вентиляционной сети метрополитена с учетом поршневого действия поездов /А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов // ГИАБ. – 2009. – S13. – С. 48–57.

52. Красюк, А.М. Об использовании поршневого действия поездов в тоннельной вентиляции метрополитена мелкого заложения [Текст] / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов, А.Н. Чигишев. Труды конф. С участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» в III т. Т. III. Машиноведение. – Новосибирск: ин-т горного дела СО РАН, 2010 – С. 252-257.

53. Красюк, А.М. Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения [Текст] / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск. – 2010. – № 4. – С. 75-82.

54. Красюк, А.М. Обоснование технологической схемы вентиляции двухпутных тоннелей метрополитенов без перегонных вентиляционных камер / А.М. Красюк, И.В. Лугин, Е.Л. Алферова, Л.А. Кияница // ФТПРПИ. – 2016. – №4. – С. 117-130.

55. Красюк, А.М. Повышение эффективности вентиляции метрополитенов / А.М. Красюк, И.В. Лугин, А.Н. Чигишев, В.И. Демин // Метро. – 1999. – № 2-3. – С. 33-37.

56. Красюк, А.М. Тоннельная вентиляция метрополитенов / А.М. Красюк. – Новосибирск: Наука, 2006. – 164 с.

57. Красюк, А.М. Экспериментальное исследование температуры обделок тоннеля и массива окружающего грунта в метрополитене мелкого заложения / А.М. Красюк, И.В. Лугин // ГИАБ, 2008. – S5. – С. 124-129.

58. Красюк. А.М. Технологическая схема вентиляции метрополитенов с двухпутными тоннелями / А.М. Красюк, И.В. Лугин, Е.Л. Алферова, Л.А. Кияница // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды V Международной конференции, г. Екатеринбург, 7-8 октября 2016 г. – Изд-во УГГУ, 2016. – С 80-86.

59. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес // М.: Мир, 1978. – 432 с.

60. Круглов, Ю.В. Исследование методов расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях и их реализация в программном комплексе «Аэросеть» / Ю.В. Круглов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии Горного Института УрО РАН по результатам НИР в 2007 г.. Пермь, 2008. –С. 232-235.

61. **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.

62. Линкишкин, Г.В. Метрополитены Испании: особенности и технические преимущества / Г.В. Линкишкин, М.Ю. Губин, Д.А. Бойцов // Метро и тоннели. –2012. – № 5. – С. 36-38.

63. Лугин, И.В. Изменение температурного поля грунта вокруг подземной станции метрополитена с начала эксплуатации / И.В. Лугин, А.Ю. Пьянкова // Известия Высших учебных заведений. Строительство, 2010. –№10(622). – С. 48-55.

64. Лугин, И.В. Исследование теплового потока в грунтовый массив из двухпутного тоннеля метрополитена мелкого заложения / И.В. Лугин, Е. Л. Алферова // ГИАБ, 2017. – № 2. – С. 305-314.

65. Лугин, И.В. Комплексный анализ эффективности схем вентиляции для метрополитена с двухпутным тоннелем / И.В. Лугин, Е.Л. Алферова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 268-273.

66. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов; М.: Госэнергоиздат, 1963, – 344 с.

67. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков; М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

68. Медведев, Б.И. Естественная тяга глубоких шахт / Б.И. Медведев, А.М. Гущин, В.Л. Лобов; М.: Недра, 1985. – 77 с.

69. Меренков, А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. –280 с.

70. Михеев, М.А. Основы теплопередачи. - Л.: ГЭИ, 1956, - 390 с.

71. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева; Изд. 2-е, перераб. и доп.– М.: «Энергия», 1977. – 344 с.

72. Мохирев, Н.Н. Проветривание рудников и шахт: курс лекций / Н.Н. Мохирев; Пермь, 1998. – 230 с.

73. Павлов, С.А. Исследование воздухораспределения от поршневого действия поездов [Текст] / С.А. Павлов // Сборник трудов молодых ученых. Т. 2. Изд. ИГД СО РАН. – Новосибирск. – 2010. – С. 81-86.

74. Павлов, С.А. О способах регулирования воздухораспределения, вызванного поршневым действием поездов в системе тоннельной вентиляции метрополитенов мелкого заложения / С.А. Павлов // ГИАБ. – 2014. – №7. С. 212–220.

75. Павлов, С.А. Повышение эффективности использования поршневого действия поездов для тоннельной вентиляции метрополитена: дис. канд. техн. наук: 25.00.20 / С.А. Павлов. – Новосибирск, 2011. – 148 с.

76. Павлов, С.А. Элементы вентиляционных систем транспортных тоннелей и метрополитенов зарубежных стран [Текст] / С.А. Павлов. Сборник трудов молодых ученых. Т. 1. Изд. ИГД СО РАН. – Новосибирск. – 2008. – С. 159-164.

77. Патент № 2463452. Способ тоннельной вентиляции. – Опубл. 10.10.2012; Заявка №: 2011113600/03, 07.04.2011; Бюл. № 28. / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов, А.Н. Чигишев.

78. Патент №2556558. Способ вентиляции метрополитена. – Опубл.10.07.2015; Заявкка № 2014122746/03, 03.06.2014; Бюл. №19. / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов и др.

79. Петров, Н.Н. Моделирование проблем рудничной аэрологии / Н.Н. Петров, М.Ю. Шишкин и др. // ФТПРПИ. – 1992. – № 2.

80. Петров, Н.Н. Тепловой режим вентиляционных стволов и его регулирование / Н.Н. Петров, И.И. Тимошенко // ФТПРПИ. – 1985. – № 3. – С. 59-63.

81. Подойницын, А.В. Система основной вентиляции Екатеринбургского метрополитена / А.В. Подойницын // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 40.

82. Поляков, А.Х. Проектирование вентиляции тоннелей / А.Х. Поляков – М.: Стройиздат, 1971. – 145 с.

83. Пьянкова, А.Ю. Прогнозирование тепловых режимов подземных сооружений метрополитенов мелкого заложения в условиях Западной Сибири: дисс. канд. техн. наук: 25.00.20 / А.Ю Пьянкова. – Новосибирск, 2016. – 211 с.

84. Пьянкова, А.Ю. Прогнозирование процесса изменения температуры грунта, окружающего станцию метрополитена // ГИАБ, 2014. –№7. –С.407–414.

85. Ракинцев, М.Ю. Технический уровень и пути совершенствования тоннельной вентиляции метрополитена/ М.Ю. Ракинцев // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 4. – С. 48-51.

86. Руководство по проектированию вентиляции шахт. — М.: Недра, 1975 г. - 238 с.

87. Савенков, Е.А. Обоснование схемы вентиляции двухпутных тоннелей метрополитенов без строительства перегонных сооружений / Е.А. Савенков, В. Кастаньеда Негальскалов, Р.А. Куров // ГИАБ. – 2015. №S6. – С. 202-213.

88. Сатаров, В.Н. Основы проектирования вентиляции подземных рудников: Учеб. пособие / В.Н. Сатаров; ГАЦМиЗ.– Красноярск, 1996. – 152 с.

89. 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». – EDN PCSEDV.

90. 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». – EDN RIPWOC.

91. 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 «Санкт-Петербургский горный университет». – EDN TBLJJV.

92. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Аналитический комплекс «Аэросеть» №ru2015610589, 2015. № заявки: 2014613790. Дата регистрации: 24.04.2014. Дата публикации: 14.01.2015 / А.В. Зайцев, Б.П. Казаков, А.В. Кашников, Д.С. Кормщиков, Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин, П.С. Мальков, А.В. Шалимов.

93. Сидоров, Ю.П. Методы расчета и выбора теплотехнических параметров ограждающих конструкций и режимов работы систем кондиционирования пассажирских вагонов и кабин локомотивов: дисс. докт. тех. Наук: 05.22.07 / Ю.П. Сидоров. – М., 1986. –380 с.

94. Слепых, В.Ф. Прогнозный расчет вентиляционных сетей рудников / В.Ф. Слепых, Е.В. Вязниковцев; Алма-Ата: Наука, 1973. – 190 с.

95. Соколов, Л.С. Краткий обзор метрополитенов мира / Л.С. Соколов, И.И. Иванов, Н.С. Шлычкова. – Москва: Научно-техническое общество Московского метрополитена им. В. И. Ленина, 1958. – 116 с.

96. Соловьев, Д.Е. Прогноз теплового режима рудника с учетом динамики развития горных работ / Д.Е. Соловьев, Ю.А. Хохолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – С. 270-275.

97. СП 120.13330.2012 Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 (с Изменениями N 1-4).

98. СП 131.13330.2020 Строительная климатология СНиП 23-01-99* (с Изменениями N 1, 2).

99. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой, с Изменениями № 1-5).

100. Ушаков, К.З. Рудничная вентиляция. Справочник / Под ред. К.З. Ушакова.; М.: Недра, 1988. – 440 с.

101. Фомичев, В.И. Вентиляция тоннелей и подземных сооружений / В.И. Фомичев // Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1991. – 200 с.

102. Фролов, Ю.С. Метрополитены на линиях мелкого заложения. Новая концепция строительства / Ю.С. Фролов, Ю.Е. Крук. – М.:"ТИМР", 1994. – 244 с.

103. Фролов, Ю.С. Метрополитены: учебник для вузов / Ю.С. Фролов, Д.М. Голицынский, А.П. Ледяев; М.: «Желдориздат», 2001. – 528 с.

104. Фролов, Ю.С. Опыт и перспективы развития транспортной инфраструктуры Испании / Ю.С. Фролов // Метро и тоннели. – 2012. – № 3. – С. 1-9.

105. Характеристики участка линии метрополитена от ст. «Международная» до ст. «Южная» и щита S-782 «Надежда» [электронный ресурс] // Администрация Санкт-Петербурга. – 2014. – Режим доступа: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr_infr_kom/news/43782/ (дата обращения: 25.02.2025).

106. Цодиков, В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В.Я. Цодиков. – М.: Недра, 1975. – 237 с.

107. Цой, С.В. Электронно-вычислительная техника в вентиляционной службе шахт / С.В. Цой, С.М. Цхай; Алма-Ата: «Наука», 1966. – 232 с.

108. Черняк, В.П. Нестационарный тепломассоперенос в разрушаемых массивах горных пород / В.П. Черняк, В.А. Киреев, А.С. Полубинский // Киев, Наукова думка, 1992. - 222 с.

109. Чигишев, А.Н. Разработка режимов работы тоннельной вентиляции метрополитенов мелкого заложения: автореф. канд. техн. наук / А.Н. Чигишев. – Новосибирск, 2005. – 20 с.

110. Шерстнев, Н.В. Контроль и организация воздухообмена в тоннеле и на станции Нижегородского метрополитена / Н.В. Шерстнева // Метро и тоннели – 2004. – № 4. – С. 38-39.

111. Шестернев, Н.А. Контроль управления параметрами микроклимата на Нижегородском метрополитене / Н.А. Шестернев // Организация систем воздухообмена, контроля и управления микроклиматом, управление режимами вентиляции в экстремальных условиях в тоннелях и на станциях метрополитена: Материалы конференции Хозяйственной Ассоциации «Метро» / С-Пб, 1997. – С. 42-45.

112. Шувалов, Ю.В. Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны / Ю.В. Шувалов, А.Ф. Галкин // Горный информационноаналитический бюллетень. — 2010. - № 8. — С. 365-370.

113. Щербань, А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко; М.: Недра, 1977. – 359 с.

114. Юшковский, Э.М. Особенности проектирования вентиляции двухуровневой пересадочной станции / Э.М. Юшковский // Организация систем воздухообмена, контроля и управления микроклиматом, управление режимами вентиляции в экстремальных условиях в тоннелях и на станциях метрополитена: Материалы конференции Хозяйственной Ассоциации «Метро», С-Пб., 1997. – С. 58-59.

115. Feng, Lian. Study on ventilation blocking computation in subway / Feng Lian, Liu Ying-qing // Zhongguo tiedao kexue China Railway Sci. = China Railway Sci. – 2002. – № 3. – С. 120-123.

116. Gabay, D. The particle pollution in the underground: a new approach by an hydraulic scale model / D. Gabay, S. Tokarek, M. Milhe, P. Noe // Advances In Air Pollution Series. – 2002. – Vol.11. –P. 551-559.

117. Irgibayev, T.; Lugin, I.; Kiyanitsa, L. Justification of an Energy-Efficient Air Purification System in Subways Based on Air Dust Content Studies. Buildings 2023, 13, 2771. https://doi.org/10.3390/buildings13112771.

118. Jia, Li. Numerical simulation on an unsteady three-dimension flow produced by high-speed train passing into a tunnel / J. Li, H. Peng, Y. Lixin // Beijing jiaotong daxue xuebao J. Beijing Jiatong Univ. = J. Beijing Jiatong Univ. – 2008. – № 1. – С. 83-87.

119. Ke, Zai-tian. Test and study of shenzhen metro high-load pile foundation underpinning model / Ke Zai-tian, Gao Yan, Zhang Shu-ceng // Zhongguo tiedao kexue China Railway Sci. = China Railway Sci. – 2003. – № 5. – С. 15-22.

120. Krasyuk, A.; Lugin, I.; Irgibayev T.; Kiyanitsa, L. Dust arrestment in subways: analysis and technique design // International journal of Environmental Science and Technology. Sci. 2024, 22(3). DOI: 10.1007/s13762-024-05970-5.

121. Krasyuk, A.; Lugin, I.; Kiyanitsa, L. The Analysis of Thermal Conditions in Extra-Long Railway Tunnels during the Cold Season // Journal of Mining Science, 2021, Vol. 57, No. 1, pp. 154–170. DOI: 10.1134/S1062739121010166.

122. Krasyuk, A.; Lugin, I.; Irgibayev, T.; Alferova, E. Substantiation of Parameters of the Network Model of the Air Distribution Due the Piston Effect in the Extra-Long Tunnels. Appl. Sci. 2023, 13, 9096. https://doi.org/10.3390/app13169096.

123. Krasyuk, A.M. Delineation of soil body area exposed to thermal effect of subway stations and tunnels / A.M. Krasyuk, I.V. Lugin, A.Y. P'yankova // Journal Of Mining Science. – 2015. – Vol.51. – №1. P. 138-143.

124. Krasyuk, A.M. Experimental research into air distribution in a terminal subway station / A.M. Krasyuk, I.V. Lugin, S.A. Pavlov // Tunnelling And Underground Space Technology. – 2019. – Vol. 85. – P. 21–28.

125. Lu, Ping. Instability analysis and control research on airflow in subway ventilation network / Lu Ping, L. Guang-xuan, Li Pei-e, Z. Wei // Zhongguo tiedao kexue China Railway Sci. = China Railway Sci. – 2004. – № 2. – С. 134-138.

126. Lugin, I.V. Integrated Performance Analysis of Ventilation Schemes for Double-Line Subway Tunnel / I.V. Lugin, E.L. Alferova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012043

127. Luo, J.J. Numerical simulation on an unsteady three-dimension flow produced by high-speed train passing into a tunnel / J.J. Luo, B. Gao, M.S. Wang //

Zhongguo tiedao kexue China Railway Sci. = China Railway Sci. – 2005. – № 1. – C. 15-19.

128. Maslak, V. Innovative engineering solutions for improving operational safety and efficiency of subways with two-way tunnels / V. Maslak, D. Boytsov, A. Danilov, E. Levina, S. Gendler // Procedia Engenering. – 2016. – №165. – P. 214-223.

129. Mossi, M. Simulation aeraulique et ventilation / M. Mossi // Traces – 2008. – T. 134. – № 15-16. – C. 19-22.

130. P.C. Miclea and D McKinney. The impact of fire location in station on computer simulation results and fan operation requirements / Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. – Aosta Valley, Italy: October 1997.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет статического воздухораспределения на линии метрополитена с двухпутными тоннелями и однопутными тоннелями при разной парности поездов

Таблица А.1 – 1 вариант воздухораспределения при парности 5 поездов в час

№	Модельный расход воздуха $м^3/с$	Аэродинамическое сопротивление кμ
1	45,185	0,0008
2	50,763	0,0006
3	41,468	0,006
4	4,014	0,01133
5	15,984	0,000372
6	3,377	0,01133
7	2,997	0,01133
8	2,82	0,01133
9	2,775	0,01133
10	11,97	0,000186
11	8,593	0,000186
12	5,596	0,000186
13	2,775	0,000186
14	11,97	0,000186
15	5,596	0,000186
16	8,593	0,000186
17	2,775	0,000186
18	2,133	0,061
19	4,492	0,01133
20	0	0,000186
21	3,691	0,000186
22	7,443	0,000186
23	11,429	0,000186
24	3,691	0,01133
25	0	0,000186
26	3,987	0,01133
27	7,443	0,000186
28	3,751	0,01133
29	3,691	0,000186
30	11,429	0,000186
31	7,961	0,0002
32	7,961	0,000372
33	7,961	0,0002
34	7,961	0,0002
35	7,961	0,000372
36	7,961	0,0002
37	10,036	0,01133
38	10,036	0,000186
39	20,235	0,000186
40	31,074	0,000186
41	43,287	0,000186

Продолжение таблицы А.1

42	10,199	0,01133
43	10,036	0,000186
44	12,214	0,01133
45	31,074	0,000186
46	10,838	0,01133
47	20,235	0,000186
48	14,515	0,01133
49	43,287	0,000186
50	21,511	6,1E-06
51	12,528	6,1E-06
52	4,958	0,01133
53	17,486	6,1E-06
54	29,001	0,000186
55	28,801	0,000186
56	2,593	0,6667
57	2,593	0,006
58	2,593	0,0002
59	48,832	0,0002
60	48,832	0,006
61	48,832	0,00028
62	0,181	138
63	46,058	0,0006
64	46,058	0,0008
65	5,044	0,6667
66	5,044	0,0006
67	5,044	0,002069
68	53,731	0,002
69	53,731	0,0006
70	53,731	0,000284
71	0,351	138
72	48,336	0,006
73	48,336	0,00008
74	2,309	0,0526
75	2,377	0,5
76	31,177	9,41E-05
77	2,376	0,5
78	31,378	9,41E-05
79	7,62	0,000206
80	23,557	0,000006
81	6,599	0,000206
82	7,142	0,000358
83	0,478	0,00145
84	7,077	0,000358
85	7,109	0,000403
86	0,032	0,00145
87	7,109	0,000403
88	7,109	0,000106
89	0	0,00145
90	7,109	0,000106

Продолжение таблицы А.1

91	7,109	0,00057
92	0	0,00145
93	7,109	0,00057
94	7,136	7,58E-05
95	0,026	0,000006
96	7,083	7,58E-05
97	10,218	9,6E-06
98	3,082	0,000006
99	4,001	9,6E-06
100	31,715	0,00003
101	11,008	0,000133
102	34,926	0,006
103	7,673	0,0006
104	7,673	0,6667
105	34,926	0,00008
106	7,673	0,002
107	43,134	0,002
108	43,134	0,0006
109	43,134	0,000284
110	0,534	138
111	7,675	0,0006
112	7,675	0,6667
113	34,919	0,00008
114	7,675	0,002
115	43,128	0,002
116	43,128	0,0006
117	43,128	0,000284
118	0,534	138
119	34,919	0,006
120	69,845	0,006
121	3,211	0,000126
122	0,79	0,00145
123	23,911	5,09E-05
124	84,298	0,000175
125	52,582	6,1E-06
126	67,374	0,000175
127	47,273	0,00041
128	37,025	0,00145
129	30,35	0,00041
130	25,399	0,000246
131	21,874	0,00145
132	8,475	0,000246
133	45,185	0,0006
134	53,84	0,006
135	53,84	0,000305
136	53,84	0,0002
137	8,09	0,0002
138	8,09	0,006
139	8,09	0,6667

Продолжение таблицы А.1

140	0,565	138
141	52,243	0,0006
142	55,781	0,006
143	55,781	0,000305
144	55,781	0,0002
145	3,308	0,0002
146	3,308	0,006
147	3,308	0,6667
148	0,231	138
149	27,561	0,0526
150	16,557	5,28E-05
151	8,841	0,5
152	8,783	0,5
153	17,258	9,79E-05
154	69,501	9,79E-05
155	42,744	6E-07
156	26,187	0,00072
157	26,757	0,000691
158	28,27	0,000247
159	37,698	0,006
160	7,983	0,0006
161	7,983	0,6667
162	37,698	0,00008
163	7,983	0,002
164	46,237	0,002
165	46,237	0,0006
166	46,237	0,000283
167	0,556	138
168	24,673	0,000185
169	7,985	0,0006
170	7,985	0,6667
171	7,985	0,002149
172	46,227	0,002
173	46,227	0,0006
174	46,227	0,000284
175	0,556	138
176	37,686	0,006
177	75,384	0,006
178	9,428	0,00031
179	13,013	0,000491
180	0,014	0,00145
181	1,513	6,1E-06
182	1,778	6,1E-06
183	11,206	2,97E-05
184	11,234	2,97E-05
185	11,22	0,000312
186	11,22	0,000312
187	2,351	0,0526
188	3,093	0,6666

Продолжение таблицы А.1

189	3,093	0,006
190	3,093	0,000346
191	56,101	0,0002
192	56,101	0,006
193	56,101	0,000284
194	0,216	138
195	52,792	0,0006
196	52,792	0,0008
197	11,992	9,79E-05
198	12,8	9,79E-05
199	22,054	1,92E-05
200	17,938	6,1E-06
201	5,946	0,00021
202	13,014	0,000116
203	9,04	6E-07
204	14,986	8,74E-05
205	14	0,000403
206	0,986	6,1E-06
207	0	0,00145
208	14	0,000403
209	14	0,000403
210	14	0,000403
211	14	0,0002
212	14	0,0002
213	28	0,00004
214	1,746	0,011457
215	26,254	0,00004
216	1,371	0,00151
217	1,24	0,00031
218	25,441	0,00004
219	1,24	0,006
220	1,24	0,0002
221	0,122	0,0002
222	0,122	0,006
223	0,122	0,6667
224	0,009	138
225	1,371	0,000705
226	1,188	0,011457
227	1,371	0,00005
228	0,375	0,00151
229	0,813	0,011457
230	1,188	0,00151
231	26,629	0,00004
232	16,374	0,000084
233	47,931	0,0006
234	47,931	0,000305
235	43,004	0,00004
236	47,931	0,002147
237	4,606	0,002

Продолжение таблицы А.1

238	4,606	0,0006
239	4,606	0,666538
240	0,321	138
241	43,004	0,00322
242	43,004	0,0044
243	15,46	0,000084
244	14,895	0,00005
245	0,457	0,002
246	0,229	0,00002
247	0,74	0,017706
248	0,282	0,017706
249	0,457	0,002
250	0,229	0,00002
251	0,229	0,00002
252	0,229	0,00002
253	0,74	0,017706
254	0,282	0,017706
255	25,299	7,61E-05
256	5,761	7,61E-05
257	24,648	0,011457
258	9,839	8,81E-05
259	0,613	138
260	10,452	0,000672
261	10,452	0,02775
262	67,461	0,006
263	68,074	0,000305
264	60,602	0,000772
265	68,074	0,000294
266	6,412	0,0002
267	6,412	0,006
268	6,412	0,66538
269	0,447	138
270	50,763	0,0006
271	60,602	0,002876
272	31,059	0,011457
273	29,542	0,00121
274	35,303	4,22E-05
275	1,245	0,00802
276	0,622	0,00002
277	0,622	0,00002
278	1,245	0,00802
279	0,622	0,00002
280	0,622	0,00002
281	47,568	0,0006
282	47,568	0,000304
283	41,596	6,61E-05
284	47,568	0,002
285	5,584	0,002
286	5,584	0,0006

Продолжение таблицы А.1

287	5,584	0,666538
288	0,389	138
289	41,596	0,006
290	41,596	0,006
291	0,56	0,017706
292	0,685	0,017706
293	0,56	0,017706
294	7,413	0,00005
295	6,293	0,000084
296	0,685	0,017706
297	8,782	0,00002
298	9,786	3,38E-05
299	1,003	0,00002
300	0,485	138
301	1,488	0,666538
302	1,488	0,02775
303	56,294	0,006
304	56,778	0
305	51,254	0,0008
306	56,778	0,0002
307	4,711	0,0002
308	4,711	0,006
309	4,711	0,666538
310	0,329	138
311	50,25	0,0006
312	51,254	0,00121
313	47,504	0,0006
314	47,504	0,000305
315	16,82	0,000051
316	26,606	0,011457
317	24,648	0,001916
318	41,468	1,69E-05
319	41,468	0,00038
320	47,504	0,002
321	5,643	0,002
322	5,643	0,0006
323	5,643	0,666538
324	0,393	138
325	41,468	0,006
326	29,542	0,011457
327	37,686	0,00008
328	52,243	0,0008
329	45,185	0,0006
330	48,336	0,00008
331	46,058	0,0006
332	52,792	0,0008
333	37,686	0,00008
334	37,698	0,00008
335	52,243	0,0008

Продолжение таблицы А.1

336	24,673	0,000185
337	84,298	0,000175
338	9,428	0,00031
339	156,102	0,000657
340	117,399	0,000666
341	67,374	0,001296
342	88,727	0,001437
343	28,671	0,000175

Таблица А.2 – 2 вариант воздухораспределения при парности 12 поездов в час

№	Модельный расход воздуха $м^3/с$	Аэродинамическое сопротивление кμ
1	45,103	0,0008
2	50,665	0,0006
3	41,478	0,006
4	4,024	0,01133
5	16,024	0,000372
6	3,386	0,01133
7	3,005	0,01133
8	2,827	0,01133
9	2,782	0,01133
10	12	0,000186
11	8,614	0,000186
12	5,609	0,000186
13	2,782	0,000186
14	12	0,000186
15	5,609	0,000186
16	8,614	0,000186
17	2,782	0,000186
18	2,138	0,061
19	4,503	0,01133
20	0	0,000186
21	3,701	0,000186
22	7,461	0,000186
23	11,458	0,000186
24	3,701	0,01133
25	0	0,000186
26	3,996	0,01133
27	7,461	0,000186
28	3,761	0,01133
29	3,701	0,000186
30	11,458	0,000186
31	7,981	0,0002
32	7,981	0,000372
33	7,981	0,0002
34	7,981	0,0002
35	7,981	0,000372
36	7,981	0,0002

Продолжение таблицы А.2

37	9,791	0,01133
38	9,791	0,000186
39	19,742	0,000186
40	30,316	0,000186
41	42,231	0,000186
42	9,951	0,01133
43	9,791	0,000186
44	11,916	0,01133
45	30,316	0,000186
46	10,574	0,01133
47	19,742	0,000186
48	14,161	0,01133
49	42,231	0,000186
50	21,564	6,1E-06
51	12,559	6,1E-06
52	4,971	0,01133
53	17,53	6,1E-06
54	28,298	0,000186
55	28,094	0,000186
56	2,593	0,6667
57	2,593	0,006
58	2,593	0,0002
59	48,831	0,0002
60	48,831	0,006
61	48,831	0,00028
62	0,181	138
63	46,057	0,0006
64	46,057	0,0008
65	5,029	0,6667
66	5,029	0,0006
67	5,029	0,002069
68	53,762	0,002
69	53,762	0,0006
70	53,762	0,000284
71	0,35	138
72	48,382	0,006
73	48,382	0,00008
74	2,315	0,0526
75	2,325	0,5
76	30,418	9,41E-05
77	2,324	0,5
78	30,623	9,41E-05
79	6,891	0,000206
80	23,528	0,000006
81	5,769	0,000206
82	6,372	0,000358
83	0,518	0,00145
84	6,287	0,000358
85	6,33	0,000403

Продолжение таблицы А.2

86	0,042	0,00145
87	6,329	0,000403
88	6,33	0,000106
89	0	0,00145
90	6,33	0,000106
91	6,33	0,00057
92	0	0,00145
93	6,33	0,00057
94	6,365	7,58E-05
95	0,036	0,000006
96	6,294	7,58E-05
97	9,74	9,6E-06
98	3,375	0,000006
99	2,919	9,6E-06
100	32,83	0,00003
101	10,527	0,000133
102	34,963	0,006
103	7,667	0,0006
104	7,667	0,6667
105	34,963	0,00008
106	7,667	0,002
107	43,163	0,002
108	43,163	0,0006
109	43,163	0,000284
110	0,534	138
111	7,668	0,0006
112	7,668	0,6667
113	34,956	0,00008
114	7,668	0,002
115	43,158	0,002
116	43,158	0,0006
117	43,158	0,000284
118	0,534	138
119	34,956	0,006
120	69,919	0,006
121	2,132	0,000126
122	0,787	0,00145
123	24,429	5,09E-05
124	85,749	0,000175
125	52,919	6,1E-06
126	64,084	0,000175
127	33,851	0,00041
128	32,207	0,00145
129	31,877	0,00041
130	13,211	0,000246
131	20,639	0,00145
132	11,238	0,000246
133	45,103	0,0006
134	53,782	0,006

Продолжение таблицы А.2

135	53,782	0,000305
136	53,782	0,0002
137	8,112	0,0002
138	8,112	0,006
139	8,112	0,6667
140	0,566	138
141	51,741	0,0006
142	55,49	0,006
143	55,49	0,000305
144	55,49	0,0002
145	3,504	0,0002
146	3,504	0,006
147	3,504	0,6667
148	0,245	138
149	27,65	0,0526
150	4,454	5,28E-05
151	8,758	0,5
152	8,695	0,5
153	19,933	9,79E-05
154	71,674	9,79E-05
155	37,712	6E-07
156	33,258	0,00072
157	33,963	0,000691
158	36,434	0,000247
159	37,829	0,006
160	7,96	0,0006
161	7,96	0,6667
162	37,829	0,00008
163	7,96	0,002
164	46,344	0,002
165	46,344	0,0006
166	46,344	0,000283
167	0,554	138
168	30,786	0,000185
169	7,961	0,0006
170	7,961	0,6667
171	7,961	0,002149
172	46,335	0,002
173	46,335	0,0006
174	46,335	0,000284
175	0,554	138
176	37,82	0,006
177	75,649	0,006
178	1,395	0,00031
179	7,034	0,000491
180	0,074	0,00145
181	2,472	6,1E-06
182	2,744	6,1E-06
183	4,139	2,97E-05

Продолжение таблицы А.2

184	4,29	2,97E-05
185	4,213	0,000312
186	4,216	0,000312
187	3,781	0,0526
188	3,187	0,6666
189	3,187	0,006
190	3,187	0,000346
191	55,973	0,0002
192	55,973	0,006
193	55,973	0,000284
194	0,223	138
195	52,564	0,0006
196	52,564	0,0008
197	5,555	9,79E-05
198	6,655	9,79E-05
199	31,226	1,92E-05
200	14,683	6,1E-06
201	9,128	0,00021
202	18,755	0,000116
203	12,47	6E-07
204	21,599	8,74E-05
205	20,177	0,000403
206	1,421	6,1E-06
207	0	0,00145
208	20,177	0,000403
209	20,177	0,000403
210	20,177	0,000403
211	20,177	0,0002
212	20,177	0,0002
213	40,354	0,00004
214	2,943	0,011457
215	37,411	0,00004
216	4,016	0,00151
217	3,634	0,00031
218	35,508	0,00004
219	3,634	0,006
220	3,634	0,0002
221	0,357	0,0002
222	0,357	0,006
223	0,357	0,6667
224	0,025	138
225	4,016	0,000705
226	0,83	0,011457
227	4,016	0,00005
228	1,073	0,00151
229	1,903	0,011457
230	0,83	0,00151
231	36,338	0,00004
232	6,69	0,000084

Продолжение таблицы А.2

233	47,942	0,0006
234	47,942	0,000305
235	43,028	0,00004
236	47,942	0,002147
237	4,594	0,002
238	4,594	0,0006
239	4,594	0,666538
240	0,32	138
241	43,028	0,00322
242	43,028	0,0044
243	13,224	0,000084
244	9,873	0,00005
245	3,267	0,002
246	1,634	0,00002
247	1,591	0,017706
248	1,676	0,017706
249	3,267	0,002
250	1,634	0,00002
251	1,634	0,00002
252	1,634	0,00002
253	1,591	0,017706
254	1,676	0,017706
255	23,152	7,61E-05
256	7,902	7,61E-05
257	24,643	0,011457
258	9,927	8,81E-05
259	0,613	138
260	10,54	0,000672
261	10,54	0,02775
262	67,457	0,006
263	68,069	0,000305
264	60,593	0,000772
265	68,069	0,000294
266	6,416	0,0002
267	6,416	0,006
268	6,416	0,66538
269	0,448	138
270	50,665	0,0006
271	60,593	0,002876
272	31,053	0,011457
273	29,539	0,00121
274	37,441	4,22E-05
275	2,288	0,00802
276	1,144	0,00002
277	1,144	0,00002
278	2,288	0,00802
279	1,144	0,00002
280	1,144	0,00002
281	47,573	0,0006

Продолжение таблицы А.2

282	47,573	0,000304
283	41,606	6,61E-05
284	47,573	0,002
285	5,579	0,002
286	5,579	0,0006
287	5,579	0,666538
288	0,388	138
289	41,606	0,006
290	41,606	0,006
291	1,119	0,017706
292	1,169	0,017706
293	1,119	0,017706
294	6,402	0,00005
295	4,165	0,000084
296	1,169	0,017706
297	8,741	0,00002
298	9,765	3,38E-05
299	1,024	0,00002
300	0,485	138
301	1,509	0,666538
302	1,509	0,02775
303	56,29	0,006
304	56,774	0
305	51,243	0,0008
306	56,774	0,0002
307	4,717	0,0002
308	4,717	0,006
309	4,717	0,666538
310	0,329	138
311	50,219	0,0006
312	51,243	0,00121
313	47,509	0,0006
314	47,509	0,000305
315	16,835	0,000051
316	26,6	0,011457
317	24,643	0,001916
318	41,478	1,69E-05
319	41,478	0,00038
320	47,509	0,002
321	5,638	0,002
322	5,638	0,0006
323	5,638	0,666538
324	0,393	138
325	41,478	0,006
326	29,539	0,011457
327	37,82	0,00008
328	51,741	0,0008
329	45,103	0,0006
330	48,382	0,00008

Продолжение таблицы А.2

331	46,057	0,0006
332	52,564	0,0008
333	37,82	0,00008
334	37,829	0,00008
335	51,741	0,0008
336	30,786	0,000185
337	66,058	0,000175
338	73,107	0,001437
339	85,749	0,001296
340	139,164	0,000654
341	158,856	0,000643
342	1,395	0,00031
343	153,946	0,000657
344	118,351	0,000666
345	64,084	0,001296
346	89,861	0,001437
347	28,489	0,000175

Таблица А.3 – 3 вариант воздухораспределения при парности 24 поезда в час

№	Модельный расход воздуха $м^3/с$	Аэродинамическое сопротивление кμ
1	45,288	0,0008
2	51,602	0,0006
3	41,382	0,006
4	4,111	0,01133
5	16,371	0,000372
6	3,459	0,01133
7	3,07	0,01133
8	2,889	0,01133
9	2,842	0,01133
10	12,26	0,000186
11	8,801	0,000186
12	5,731	0,000186
13	2,842	0,000186
14	12,26	0,000186
15	5,731	0,000186
16	8,801	0,000186
17	2,842	0,000186
18	2,185	0,061
19	4,601	0,01133
20	0	0,000186
21	3,781	0,000186
22	7,623	0,000186
23	11,706	0,000186
24	3,781	0,01133
25	0	0,000186
26	4,083	0,01133
27	7,623	0,000186
28	3,842	0,01133

Продолжение таблицы А.3

29	3,781	0,000186
30	11,706	0,000186
31	8,154	0,0002
32	8,154	0,000372
33	8,154	0,0002
34	8,154	0,0002
35	8,154	0,000372
36	8,154	0,0002
37	7,603	0,01133
38	7,603	0,000186
39	15,329	0,000186
40	23,539	0,000186
41	32,791	0,000186
42	7,726	0,01133
43	7,603	0,000186
44	9,252	0,01133
45	23,539	0,000186
46	8,21	0,01133
47	15,329	0,000186
48	10,996	0,01133
49	32,791	0,000186
50	22,032	6,1E-06
51	12,831	6,1E-06
52	5,078	0,01133
53	17,91	6,1E-06
54	22,012	0,000186
55	21,775	0,000186
56	2,596	0,6667
57	2,596	0,006
58	2,596	0,0002
59	48,829	0,0002
60	48,829	0,006
61	48,829	0,00028
62	0,181	138
63	46,051	0,0006
64	46,051	0,0008
65	4,912	0,6667
66	4,912	0,0006
67	4,912	0,002069
68	53,999	0,002
69	53,999	0,0006
70	53,999	0,000284
71	0,342	138
72	48,744	0,006
73	48,744	0,00008
74	2,365	0,0526
75	1,873	0,5
76	23,647	9,41E-05
77	1,872	0,5

Продолжение таблицы А.3

78	23,885	9,41E-05
79	1,299	0,000206
80	22,348	0,000006
81	2,511	0,000206
82	0,336	0,000358
83	0,964	0,00145
84	1,548	0,000358
85	0,22	0,000403
86	0,556	0,00145
87	0,992	0,000403
88	0,442	0,000106
89	0,222	0,00145
90	0,77	0,000106
91	0,584	0,00057
92	0,142	0,00145
93	0,628	0,00057
94	0,286	7,58E-05
95	0,298	0,000006
96	0,926	7,58E-05
97	2,858	9,6E-06
98	3,144	0,000006
99	4,07	9,6E-06
100	39,752	0,00003
101	3,311	0,000133
102	35,23	0,006
103	7,618	0,0006
104	7,618	0,6667
105	35,23	0,00008
106	7,618	0,002
107	43,378	0,002
108	43,378	0,0006
109	43,378	0,000284
110	0,531	138
111	7,618	0,0006
112	7,618	0,6667
113	35,228	0,00008
114	7,618	0,002
115	43,377	0,002
116	43,377	0,0006
117	43,377	0,000284
118	0,531	138
119	35,228	0,006
120	70,458	0,006
121	4,523	0,000126
122	0,452	0,00145
123	31,917	5,09E-05
124	35,837	0,000175
125	3,916	6,1E-06
126	35,833	0,000175

Продолжение таблицы А.3

127	35,823	0,00041
128	0,013	0,00145
129	35,846	0,00041
130	35,145	0,000246
131	0,679	0,00145
132	36,525	0,000246
133	45,288	0,0006
134	53,912	0,006
135	53,912	0,000305
136	53,912	0,0002
137	8,061	0,0002
138	8,061	0,006
139	8,061	0,6667
140	0,563	138
141	52,972	0,0006
142	56,191	0,006
143	56,191	0,000305
144	56,191	0,0002
145	3,009	0,0002
146	3,009	0,006
147	3,009	0,6667
148	0,21	138
149	27,446	0,0526
150	26,222	5,28E-05
151	8,922	0,5
152	8,92	0,5
153	27,605	9,79E-05
154	25,367	9,79E-05
155	21,509	6E-07
156	4,714	0,00072
157	3,858	0,000691
158	69,154	0,000247
159	37,493	0,006
160	8,02	0,0006
161	8,02	0,6667
162	37,493	0,00008
163	8,02	0,002
164	46,071	0,002
165	46,071	0,0006
166	46,071	0,000283
167	0,559	138
168	28,829	0,000185
169	8,153	0,0006
170	8,153	0,6667
171	8,153	0,002149
172	45,447	0,002
173	45,447	0,0006
174	45,447	0,000284
175	0,568	138

Продолжение таблицы А.3

176	36,726	0,006
177	74,219	0,006
178	47,93	0,00031
179	65,556	0,000491
180	2,95	0,00145
181	65,296	6,1E-06
182	52,646	6,1E-06
183	4,716	2,97E-05
184	12,91	2,97E-05
185	7,666	0,000312
186	9,96	0,000312
187	4,342	0,0526
188	2,821	0,6666
189	2,821	0,006
190	2,821	0,000346
191	56,449	0,0002
192	56,449	0,006
193	56,449	0,000284
194	0,197	138
195	53,431	0,0006
196	53,431	0,0008
197	12,556	9,79E-05
198	25,84	9,79E-05
199	87,503	0,000019
200	115,093	6,1E-06
201	67,893	0,00011
202	82,867	6E-07
203	14,974	8,74E-05
204	23,117	0,000403
205	18,481	6,1E-06
206	12,388	0,00145
207	3,507	0,000403
208	15,895	0,000403
209	35,505	0,000403
210	35,505	0,0001
211	15,895	0,0002
212	17,212	0,00004
213	3,86	0,011457
214	13,352	0,00004
215	9,816	0,00151
216	8,881	0,00031
217	10,253	0,00004
218	8,881	0,006
219	8,881	0,0002
220	0,874	0,0002
221	0,874	0,006
222	0,874	0,6667
223	0,061	138
224	9,816	0,000705

Продолжение таблицы А.3

225	2,857	0,011457
226	9,816	0,00005
227	5,956	0,00151
228	3,099	0,011457
229	2,857	0,00151
230	7,397	0,00004
231	50,179	0,000084
232	47,832	0,0006
233	47,832	0,000305
234	42,783	0,00004
235	47,832	0,002147
236	4,72	0,002
237	4,72	0,0006
238	4,72	0,666538
239	0,329	138
240	42,783	0,00322
241	42,783	0,0044
242	30,276	0,000084
243	39,779	0,00005
244	9,952	0,002
245	4,976	0,00002
246	5,2	0,017706
247	4,751	0,017706
248	9,952	0,002
249	4,976	0,00002
250	4,976	0,00002
251	4,976	0,00002
252	5,2	0,017706
253	4,751	0,017706
254	39,349	7,61E-05
255	8,247	7,61E-05
256	24,692	0,011457
257	9,073	8,81E-05
258	0,614	138
259	9,687	0,000672
260	9,687	0,02775
261	67,497	0,006
262	68,11	0,000305
263	60,675	0,000772
264	68,11	0,000294
265	6,376	0,0002
266	6,376	0,006
267	6,376	0,66538
268	0,445	138
269	51,602	0,0006
270	60,675	0,002876
271	31,102	0,011457
272	29,573	0,00121
273	21,326	4,22E-05

Продолжение таблицы А.3

274	5,509	0,00802
275	2,755	0,00002
276	2,755	0,00002
277	5,509	0,00802
278	2,755	0,00002
279	2,755	0,00002
280	47,52	0,0006
281	47,52	0,000304
282	41,5	6,61E-05
283	47,52	0,002
284	5,628	0,002
285	5,628	0,0006
286	5,628	0,666538
287	0,392	138
288	41,5	0,006
289	41,5	0,006
290	2,809	0,017706
291	2,7	0,017706
292	2,809	0,017706
293	14,556	0,00005
294	20,174	0,000084
295	2,7	0,017706
296	9,155	0,00002
297	9,964	3,38E-05
298	0,808	0,00002
299	0,485	138
300	1,293	0,666538
301	1,293	0,02775
302	56,33	0,006
303	56,815	0
304	51,345	0,0008
305	56,815	0,0002
306	4,659	0,0002
307	4,659	0,006
308	4,659	0,666538
309	0,325	138
310	50,537	0,0006
311	51,345	0,00121
312	47,46	0,0006
313	47,46	0,000305
314	16,69	0,000051
315	26,654	0,011457
316	24,692	0,001916
317	41,382	1,69E-05
318	41,382	0,00038
319	47,46	0,002
320	5,683	0,002
321	5,683	0,0006
322	5,683	0,666538

Продолжение таблицы А.3

323	0,396	138
324	41,382	0,006
325	29,573	0,011457
326	36,726	0,00008
327	52,972	0,0008
328	45,288	0,0006
329	48,744	0,00008
330	46,051	0,0006
331	53,431	0,0008
332	36,726	0,00008
333	37,493	0,00008
334	52,972	0,0008
335	90,215	0,001437
336	70,01	0,001556
337	70,01	0,000185
338	119,044	0,00062
339	160,224	0,000627
340	35,837	0,000175
341	143,149	0,000639
342	126,88	0,000645
343	95,22	0,001437
344	31,661	0,00031
345	47,93	0,005085
346	35,833	0,000175
347	4,636	0,0006
348	184,196	0,000639
349	124,44	0,000661
350	127,649	0,00011
351	56,547	0,001437
352	111,774	0,000885
353	114,172	0,001275
354	4,636	0,0006
355	33,107	0,0001
356	78,667	0,001437
357	35,505	0,006167
358	67,893	0,000448

Таблица А.4 – 4 вариант воздухораспределения при парности 40 поездов в час

№	Модельный расход воздуха $м^3/с$	Аэродинамическое сопротивление кμ
1	1	44,846
2	2	51,519
3	3	41,391
4	4	4,185
5	5	16,664
6	6	3,521
7	7	3,125
8	8	2,94
9	9	2,893
10	10	12,479

Продолжение таблицы А.4

11	11	8,958
12	12	5,834
13	13	2,893
14	14	12,479
15	15	5,834
16	16	8,958
17	17	2,893
18	18	2,224
19	19	4,683
20	20	0
21	21	3,848
22	22	7,759
23	23	11,916
24	24	3,848
25	25	0
26	26	4,156
27	27	7,759
28	28	3,911
29	29	3,848
30	30	11,916
31	31	8,3
32	32	8,3
33	33	8,3
34	34	8,3
35	35	8,3
36	36	8,3
37	37	5,654
38	38	5,654
39	39	11,399
40	40	17,505
41	41	24,386
42	42	5,746
43	43	5,654
44	44	6,881
45	45	17,505
46	46	6,106
47	47	11,399
48	48	8,177
49	49	24,386
50	50	22,426
51	51	13,061
52	52	5,169
53	53	18,23
54	54	16,425
55	55	16,138
56	56	2,599
57	57	2,599
58	58	2,599
59	59	48,826

Продолжение таблицы А.4

60	60	48,826
61	61	48,826
62	62	0,181
63	63	46,046
64	64	46,046
65	65	4,831
66	66	4,831
67	67	4,831
68	68	54,158
69	69	54,158
70	70	54,158
71	71	0,336
72	72	48,99
73	73	48,99
74	74	2,407
75	75	1,492
76	76	17,628
77	77	1,491
78	78	17,917
79	79	3,599
80	80	21,227
81	81	9,847
82	82	0,422
83	83	3,177
84	84	13,023
85	85	6,785
86	86	7,207
87	87	20,23
88	88	20,147
89	89	13,362
90	90	33,592
91	91	52,374
92	92	17,038
93	93	50,63
94	94	12,856
95	95	39,519
96	96	6,46
97	97	12,287
98	98	0,569
99	99	7,029
100	100	29,049
101	101	13,106
102	102	35,259
103	103	7,612
104	104	7,612
105	105	35,259
106	106	7,612
107	107	43,401
108	108	43,401

Продолжение таблицы А.4

109	109	43,401
110	110	0,53
111	111	7,614
112	112	7,614
113	113	35,251
114	114	7,614
115	115	43,395
116	116	43,395
117	117	43,395
118	118	0,53
119	119	35,251
120	120	70,51
121	121	6,21
122	122	0,819
123	123	22,145
124	124	85,46
125	125	56,411
126	126	56,04
127	127	48,148
128	128	34,468
129	129	21,573
130	130	28,124
131	131	20,023
132	132	1,55
133	133	44,846
134	134	53,6
135	135	53,6
136	136	53,6
137	137	8,183
138	138	8,183
139	139	8,183
140	140	0,571
141	141	50,261
142	142	54,59
143	143	54,59
144	144	54,59
145	145	4,047
146	146	4,047
147	147	4,047
148	148	0,283
149	149	27,932
150	150	19,645
151	151	8,48
152	152	8,434
153	153	9,984
154	154	60,244
155	155	39,122
156	156	19,477
157	157	21,122

Продолжение таблицы А.4

158	158	96,134
159	159	38,735
160	160	7,796
161	161	7,796
162	162	38,735
163	163	7,796
164	164	47,074
165	165	47,074
166	166	47,074
167	167	0,543
168	168	26,19
169	169	8,193
170	170	8,193
171	171	8,193
172	172	45,258
173	173	45,258
174	174	45,258
175	175	0,571
176	176	36,495
177	177	75,23
178	178	49,652
179	179	62,685
180	180	2,966
181	181	75,011
182	182	51,634
183	183	1,982
184	184	11,05
185	185	4,948
186	186	8,084
187	187	3,946
188	188	2,858
189	189	2,858
190	190	2,858
191	191	56,403
192	192	56,403
193	193	56,403
194	194	0,2
195	195	53,345
196	196	53,345
197	197	14,964
198	198	24,051
199	199	84,183
200	200	113,478
201	201	67,381
202	202	80,091
203	203	12,71
204	204	22,831
205	205	18,738
206	206	12,511

Продолжение таблицы А.4

207	207	6,029
208	208	18,54
209	209	35,343
210	210	35,343
211	211	18,54
212	212	15,03
213	213	3,675
214	214	11,356
215	215	9,379
216	216	8,486
217	217	8,395
218	218	8,486
219	219	8,486
220	220	0,835
221	221	0,835
222	222	0,835
223	223	0,058
224	224	9,379
225	225	2,743
226	226	9,379
227	227	5,704
228	228	2,961
229	229	2,743
230	230	5,651
231	231	48,454
232	232	47,84
233	233	47,84
234	234	42,802
235	235	47,84
236	236	4,71
237	237	4,71
238	238	4,71
239	239	0,328
240	240	42,802
241	241	42,802
242	242	29,489
243	243	38,529
244	244	9,482
245	245	4,741
246	246	4,962
247	247	4,52
248	248	9,482
249	249	4,741
250	250	4,741
251	251	4,741
252	252	4,962
253	253	4,52
254	254	38,638
255	255	7,54

Продолжение таблицы А.4

256	256	24,687
257	257	9,149
258	258	0,614
259	259	9,762
260	260	9,762
261	261	67,493
262	262	68,107
263	263	60,668
264	264	68,107
265	265	6,38
266	266	6,38
267	267	6,38
268	268	0,445
269	269	51,519
270	270	60,668
271	271	31,098
272	272	29,57
273	273	22,03
274	274	5,183
275	275	2,592
276	276	2,592
277	277	5,183
278	278	2,592
279	279	2,592
280	280	47,525
281	281	47,525
282	282	41,51
283	283	47,525
284	284	5,624
285	285	5,624
286	286	5,624
287	287	0,392
288	288	41,51
289	289	41,51
290	290	2,647
291	291	2,537
292	292	2,647
293	293	14,187
294	294	19,48
295	295	2,537
296	296	9,113
297	297	9,944
298	298	0,831
299	299	0,485
300	300	1,316
301	301	1,316
302	302	56,326
303	303	56,811
304	304	51,335

Продолжение таблицы А.4

305	305	56,811
306	306	4,665
307	307	4,665
308	308	4,665
309	309	0,326
310	310	50,504
311	311	51,335
312	312	47,465
313	313	47,465
314	314	16,704
315	315	26,648
316	316	24,687
317	317	41,391
318	318	41,391
319	319	47,465
320	320	5,679
321	321	5,679
322	322	5,679
323	323	0,395
324	324	41,391
325	325	29,57
326	326	36,495
327	327	50,261
328	328	44,846
329	329	48,99
330	330	46,046
331	331	53,345
332	332	36,495
333	333	38,735
334	334	50,261
335	335	95,479
336	336	55,534
337	337	55,534
338	338	121,669
339	339	151,013
340	340	82,615
341	341	67,91
342	342	85,46
343	343	150,526
344	344	153,37
345	345	137,056
346	346	144,803
347	347	87,404
348	348	57,399
349	349	49,652
350	350	146,956
351	351	125,182
352	352	56,04
353	353	90,916

Продолжение таблицы А.4

354	354	34,266
355	355	4,093
356	356	184,806
357	357	123,745
358	358	128,442

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт об использовании результатов кандидатской диссертации

Утверждаю
Генеральный директор АО НИПИИ
«Ленметрогипротранс»

к.т.н. Маслак Владимир Александрович
«15» марта 2025 г.

АКТ
об использовании результатов
кандидатской диссертации
Крюковой Миланы Сергеевны
по научной специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Специальная комиссия АО НИПИИ «Ленметрогипротранс» в составе:
Председатель:
Заместитель генерального директора, канд. техн. наук — Лебедев Михаил Олегович
Член комиссии:
Начальник отдела проектирования вентиляции и санитарно-технических устройств, канд. техн. наук — Савенков Евгений Алексеевич
Главный специалист — Левина Елена Константиновна

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Аэротермодинамическое обоснование схем проветривания линий метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, были использованы в АО НИПИИ «Ленметрогипротранс» для оценки и совершенствования проектных решений по проветриванию участка Невско – Василеостровской линии метрополитена, включающего двухпутные и однопутные тоннели от станции «Беговая» до станции «Приморская».

Представленные в диссертационной работе результаты исследований позволили на основе выявленных закономерностей формирования теплового и вентиляционного режимов линий метрополитена с двухпутными и однопутными тоннелями, разработать методику определения параметров системы вентиляции, что дало возможность обосновать режимы ее работы, обеспечивающие создание нормативных параметров микроклимата при минимизации энергетических затрат.

Председатель:
Заместитель генерального директора, канд. техн. наук — Лебедев Михаил Олегович
Член комиссии:
Начальник отдела проектирования вентиляции и санитарно-технических устройств, канд. техн. наук — Савенков Евгений Алексеевич
Главный специалист — Левина Елена Константиновна

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023660213

Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)***

Авторы: ***Гендлер Семен Григорьевич (RU), Крюкова Милана Сергеевна (RU), Холмский Алексей Валерьевич (RU)***

Заявка № **2023619093**

Дата поступления **27 апреля 2023 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***18 мая 2023 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

RU2023660213

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2023660213
Дата регистрации: **18.05.2023**
Номер и дата поступления заявки:
2023619093 27.04.2023
Дата публикации и номер бюллетеня:
18.05.2023 Бюл. № 5
Контактные реквизиты:
нет

Автор(ы):
Гендлер Семен Григорьевич (RU),
Крюкова Милана Сергеевна (RU),
Холмский Алексей Валерьевич (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями

Реферат:
Программа предназначена для расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями. Результатом реализации программы является расчет температур тоннельного воздуха в тоннеле и подшивном потолке в различных точках перегона между станциями в разные периоды года, что дает выбрать величину количества воздуха, обеспечивающую при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями нормативные термодинамические параметры воздушной среды. Программа может быть использована в учебном процессе аспирантов кафедры «Безопасность производств» по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика», а также в образовательном процессе студентов по дисциплинам «Аэрология горных предприятий», «Тепловой режим горных выработок», «Тепловые процессы в горных выработках и горных массивах».

Язык программирования: golang

Объем программы для ЭВМ: 2 МБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024614307

Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с однопутными тоннелями

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)***

Авторы: ***Гендлер Семен Григорьевич (RU), Крюкова Милана Сергеевна (RU), Родионов Владимир Алексеевич (RU)***

Заявка № **2024612235**
Дата поступления **08 февраля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***21 февраля 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU2024614307

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2024614307
Дата регистрации: **21.02.2024**
Номер и дата поступления заявки:
2024612235 08.02.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
21.02.2024 Бюл. № 3

Автор(ы):
Гендлер Семен Григорьевич (RU),
Крюкова Милана Сергеевна (RU),
Родионов Владимир Алексеевич (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с однопутными тоннелями

Реферат:
Программа предназначена для расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с однопутными тоннелями. Результатом реализации программы является расчет температур тоннельного воздуха в тоннеле в различных точках перегона между станциями в разные периоды года, что дает выбрать величину количества воздуха, обеспечивающую при эксплуатации линий метрополитена с однопутными тоннелями нормативные термодинамические параметры воздушной среды. Программа может быть использована в учебном процессе аспирантов кафедры «Безопасность производств» по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика», а также в образовательном процессе студентов по дисциплинам «Аэрология горных предприятий», «Тепловой режим горных выработок», «Тепловые процессы в горных выработках и горных массивах».

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 30 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024615257

Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями, в конструкции которых отсутствует подшивной потолок

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)***

Авторы: ***Гендлер Семен Григорьевич (RU), Крюкова Милана Сергеевна (RU), Родионов Владимир Алексеевич (RU)***

Заявка № **2024613709**
Дата поступления **26 февраля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***05 марта 2024 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

RU2024615257

ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2024615257
Дата регистрации: **05.03.2024**
Номер и дата поступления заявки:
2024613709 26.02.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
05.03.2024 Бюл. № 3
Контактные реквизиты:
нет

Автор(ы):
Гендлер Семен Григорьевич (RU),
Крюкова Милана Сергеевна (RU),
Родионов Владимир Алексеевич (RU)
Правообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Программа расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями, в конструкции которых отсутствует подшивной потолок

Реферат:
Программа предназначена для расчета температур тоннельного воздуха при эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями, в конструкции которых отсутствует подшивной потолок. Результатом реализации программы является расчет температур тоннельного воздуха в тоннеле в различных точках перегона между станциями в разные периоды года, что дает возможность выбрать величину количества воздуха, обеспечивающую при эксплуатации линий метрополитена с однопутными тоннелями нормативные термодинамические параметры воздушной среды. Программа может быть использована в учебном процессе аспирантов кафедры «Безопасность производств» по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика», а также в образовательном процессе студентов по дисциплинам «Аэрология горных предприятий».

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 35 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Расчетная модель Невско-Василеостровской линии метрополитена в программном комплексе «Аэросеть»

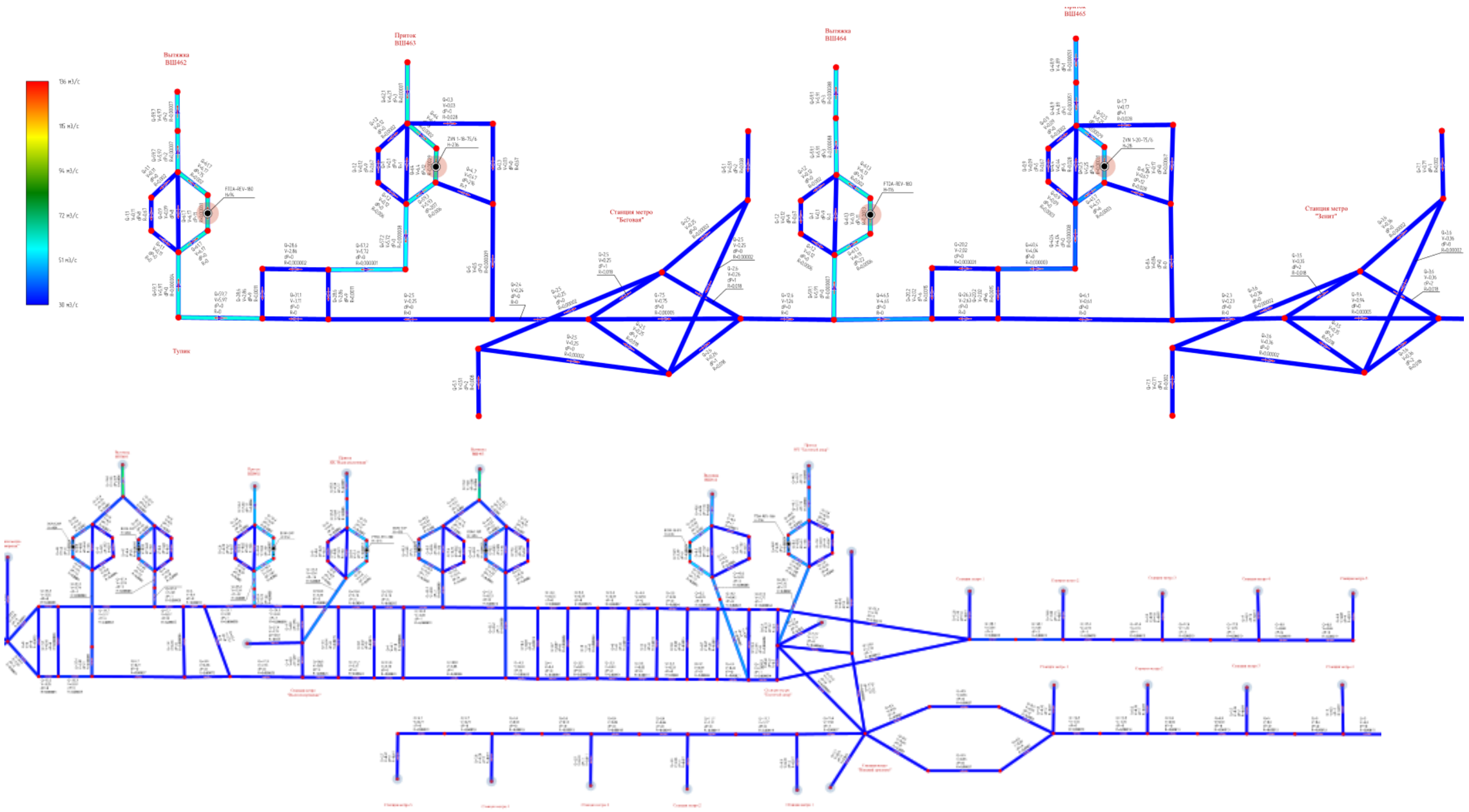


Рисунок Г.1 – Расчетная модель Невско-Василеостровской линии метрополитена в программном комплексе «Аэросеть»

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Схема Невско-Василеостровской линии метрополитена в программном комплексе «Аэросеть» и расчетные точки

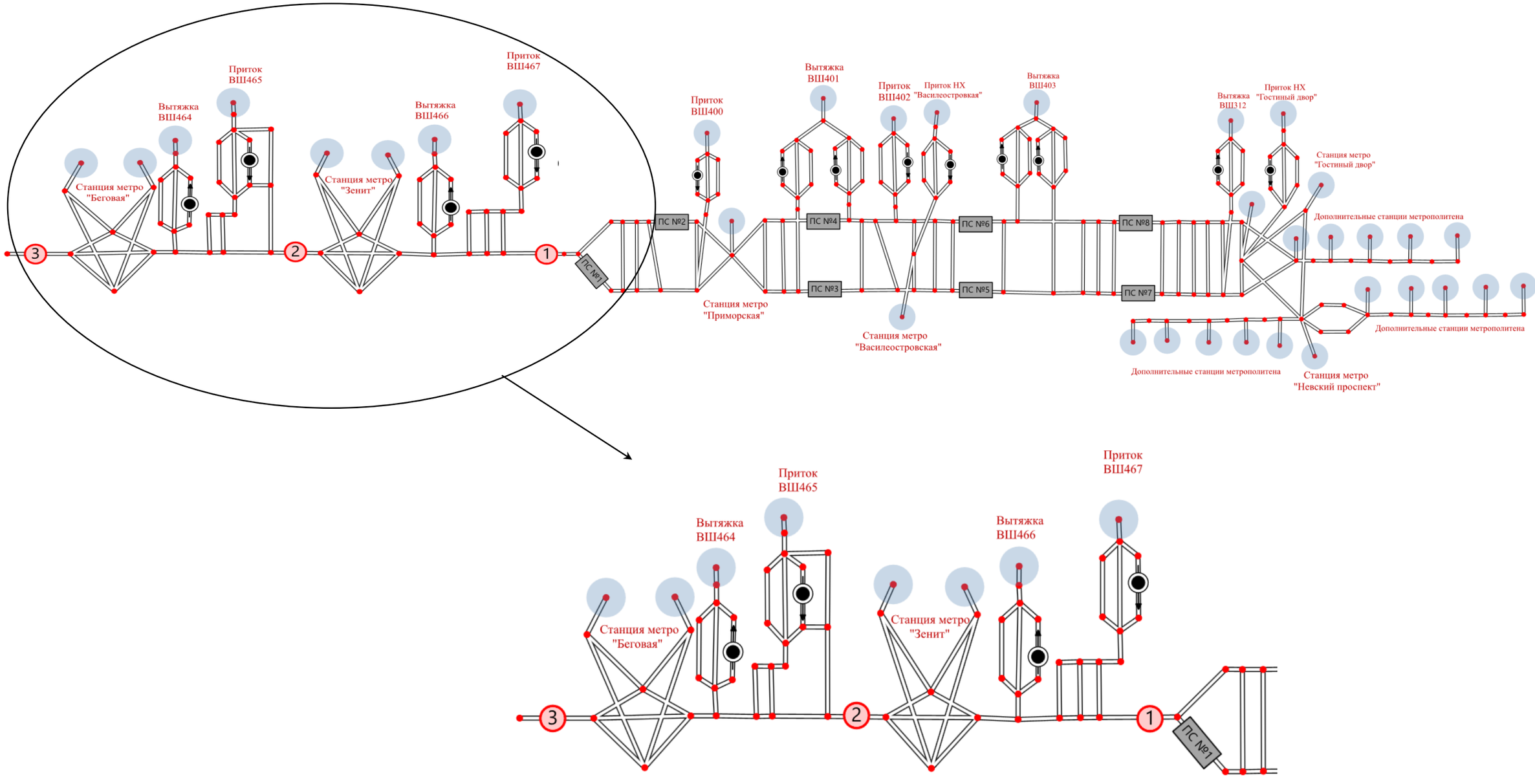
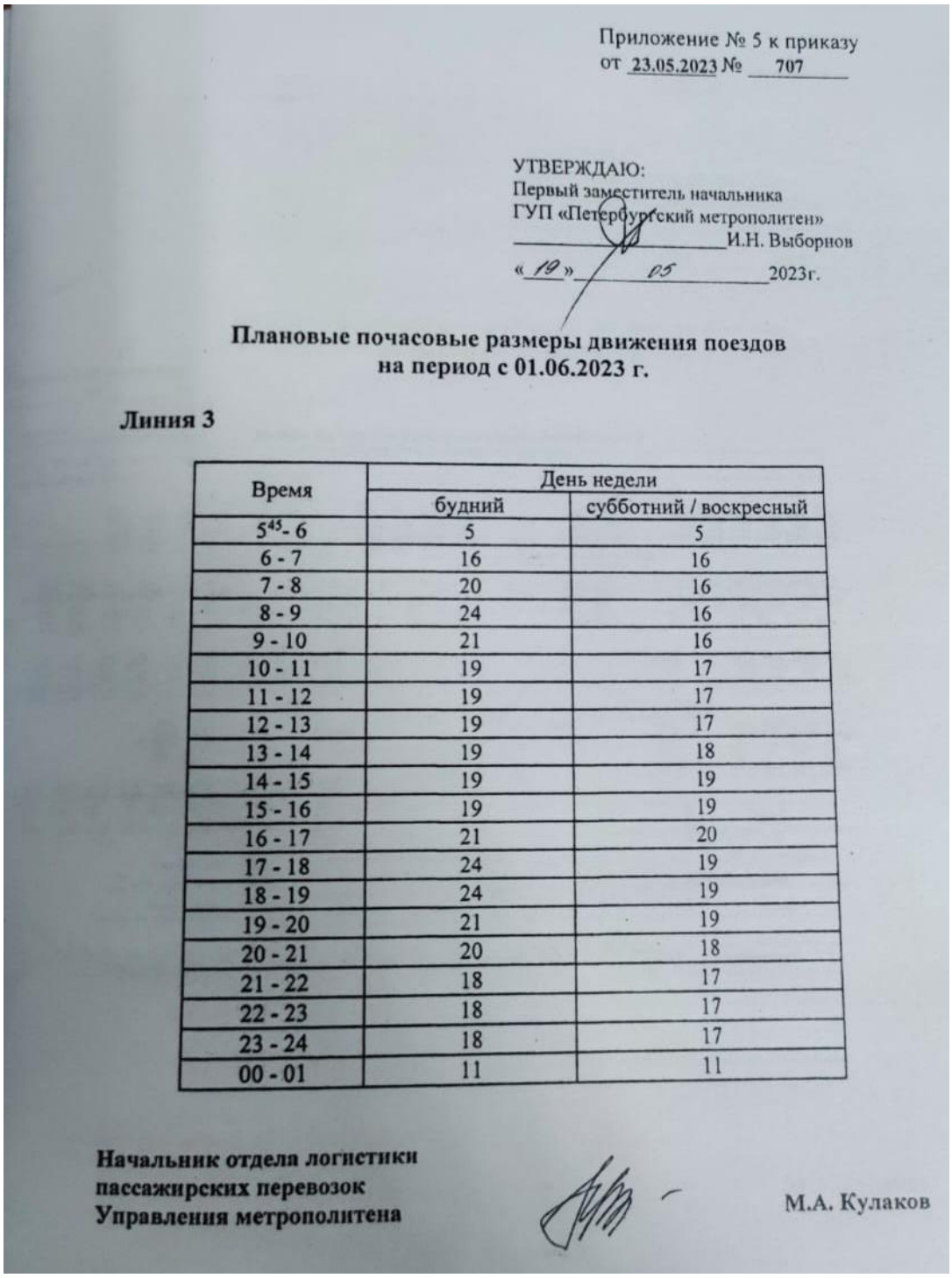


Рисунок Д.1 – Схема Невско-Василеостровской линии метрополитена в программном комплексе «Аэросеть» и расчетные точки

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
Плановые почасовые размеры движения поездов



Приложение № 5 к приказу
от 23.05.2023 № 707

УТВЕРЖДАЮ:
Первый заместитель начальника
ГУП «Петербургский метрополитен»
_____И.Н. Выборнов
«19» 05 2023г.

Плановые почасовые размеры движения поездов
на период с 01.06.2023 г.

Линия 3

Время	День недели	
	будний	субботний / воскресный
5^{45}- 6	5	5
6 - 7	16	16
7 - 8	20	16
8 - 9	24	16
9 - 10	21	16
10 - 11	19	17
11 - 12	19	17
12 - 13	19	17
13 - 14	19	18
14 - 15	19	19
15 - 16	19	19
16 - 17	21	20
17 - 18	24	19
18 - 19	24	19
19 - 20	21	19
20 - 21	20	18
21 - 22	18	17
22 - 23	18	17
23 - 24	18	17
00 - 01	11	11

Начальник отдела логистики
пассажирских перевозок
Управления метрополитена М.А. Кулаков

Рисунок Е.1 – Плановые почасовые размеры движения поездов