

**ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ/HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND LIGHTING**DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3>

EDN: ILNNPW

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЗДУШНОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ РАБОТЕ ВОЗДУШНО-ТЕПЛОВЫХ ЗАВЕС**

Научная статья

**Васильев Г.П.<sup>1</sup>, Горнов В.Ф.<sup>2</sup>, Колесова М.В.<sup>3,\*</sup>, Дмитриев А.Н.<sup>4</sup>, Лесков В.А.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 5</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Российская Федерация<sup>4</sup> Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (eco-insolar[at]mail.ru)

Предложена: 13.08.2026; Принята: 18.09.2026; Опубликовано: 21.09.2026

**Аннотация**

Предметом исследования является тепловой и воздушный режим подземных переходов и вестибюлей, примыкающих к станциям метрополитена. Цель работы — определение предельных температур воздуха внутри переходов и оценка возможности использования удаляемого через них вытяжного воздуха в качестве источника теплоты низкого температурного потенциала для теплонасосных воздушно-тепловых завес (ВТЗ). Методология исследования базируется на численном моделировании тепловоздушного режима помещений вестибюля в программе INSOLAR-IHG, адаптированной для условий метрополитена, а также на CFD-моделировании аэродинамики и теплообмена входной группы с подземным переходом. Влияние поршневого эффекта от движения поездов и тепловыделений пассажиропотока учитывалось через принятые диапазоны граничных условий. Расчеты выполнены для режимов работы вестибюля без пассажиропотока и с пассажиропотоком, включая утренние и вечерние часы пик, а также для режимов работы ВТЗ при отрицательных температурах воздуха в переходе. Установлено, что температурный режим помещений вестибюля формируется главным образом тепловым воздействием потока вытяжного воздуха: средняя температура воздуха в помещениях составила 18,74–18,76 °С и в исследованных режимах практически не зависела от пассажиропотока и температуры наружного воздуха, а температура воздуха, удаляемого через подземный переход, устойчиво сохранялась в диапазоне 18–24 °С. Определены предельные параметры и технологические требования к теплонасосным ВТЗ, их оборудованию и режимам эксплуатации. По предварительной оценке, основанной на температурном режиме удаляемого воздуха, экономия энергии при реализации предложенного технического решения может составить 60–70%.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, воздушно-тепловая завеса (ВТЗ), подземный переход, метрополитен, теплонасосное оборудование.

**MATHEMATICAL MODELLING OF THE THERMAL AIR CONDITIONS IN ROOMS WHEN AIR-HEAT CURTAINS ARE IN USE**

Research article

**Vasilyev G.P.<sup>1</sup>, Gornov V.F.<sup>2</sup>, Kolesova M.V.<sup>3,\*</sup>, Dmitriev A.N.<sup>4</sup>, Leskov V.A.<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 5</sup> Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation<sup>4</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (eco-insolar[at]mail.ru)

Suggested: 13.08.2026; Accepted: 18.09.2026; Published: 21.09.2026

**Abstract**

The subject of this study is the thermal and air conditions in underground passageways and lobbies adjacent to metro stations. The aim of the work is to determine the maximum air temperatures inside the passageways and to evaluate the feasibility of using the exhaust air removed through them as a low-temperature heat source for heat pump air heat curtains (AHC). The research methodology is based on numerical modelling of the thermal and air conditions in the lobby areas using the INSOLAR-IHG programme, adapted for underground railway conditions, as well as on CFD modelling of the aerodynamics and heat transfer at the inlet section connecting to the underground passageway. The influence of the piston effect caused by train movement and the heat generated by passenger flow was accounted for through the established ranges of boundary conditions. Calculations were carried out for operating conditions in the lobby without passenger flow and with passenger flow, including morning and evening rush hours, as well as for operating conditions of the ventilation and air-handling units (VAHUs) when the air temperature in the passageway was below freezing. It was determined that the temperature conditions in the lobby are primarily determined by the thermal effect of the exhaust air flow: the average indoor air temperature ranged from 18.74 to 18.76 °C and, under the operating conditions studied, was virtually independent of passenger flow and outdoor air temperature, while the temperature of the air extracted through the underground passage remained stable within the range of 18–24 °C. The limit parameters and technical requirements for heat-pump-based ventilation and air-conditioning systems, their equipment and operating modes have been defined. According to a preliminary

assessment based on the temperature profile of the extracted air, the energy savings achieved by implementing the suggested technical solution could amount to 60–70%.

**Keywords:** mathematical modelling, air-heat curtain (AHC), underground passage, metro, heat pump equipment.

### Введение

Воздушно-тепловые завесы (ВТЗ) являются важной составляющей системы обеспечения комфортного микроклимата и выступают не столько отопительным, сколько энергосберегающим, защитным оборудованием, предназначенным для разделения воздушных зон в технологическом кондиционировании. Наиболее актуально применение ВТЗ в местах с большим потоком проходящих людей, например в вестибюлях метрополитена, а также там, где существует аналогичная технологическая необходимость. Использование воздушно-тепловых завес в аэропортах, на вокзалах, в метрополитене, крупных супермаркетах и производственных помещениях позволяет эффективно сохранять внутренний микроклимат зданий.

К исследованиям в области применения ВТЗ сегодня приковано внимание специалистов разных стран. Одно из первых исследований воздушных завес было выполнено Г. Хетсрони и К. Холлом [1], которые экспериментально изучили механизм распределения воздуха, проходящего через завесу, и предложили аналитические выражения для количественной оценки теплопередачи через ВТЗ. Позднее Ф. Хейс и У. Стокер [2] представили подробное описание перепадов давлений различной природы, которые необходимо учитывать при проектировании воздушных завес. В литературе известен ряд полуаналитических моделей, устанавливающих количественное влияние свойств струи на производительность ВТЗ, одна из последних аналитических моделей была разработана К. Сиреном [3], [4]. Эта модель позволила рассмотреть точку удара струи о поверхность пола и предоставила информацию, необходимую для проектирования вертикальных воздушных завес.

В исследовании Д. Карлсона и др. [5] была оценена эффективность трех серийных воздушных завес, установленных в дверных проемах моделируемого самолета, с точки зрения защиты от летающих насекомых. Измерения показали, что при работающих агрегатах более 97% комаров и 98% мух не могут попасть внутрь. Авторы отмечают, что завесы, обеспечивающие скорость воздушной струи ниже 2 м/с, не дают надежной защиты, тогда как для промышленных целей, где достаточным считается уровень защиты порядка 70%, может быть достаточной скорость струи выше 4 м/с, дополнительный занос насекомых при пересечении дверей пешеходами, по мнению авторов, неизбежен.

Х. Харамильо и др. [6] выполнили детальное численное исследование камеры нагнетания и выпускной струи воздушной завесы с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, подробно изучив турбулентную структуру потока. Развитием этих работ стал усовершенствованный полуаналитический метод прогнозирования эффективности воздушных завес, предложенный той же исследовательской группой [7]. В отличие от модели Сирена, метод учитывает эффект уноса воздуха через незащищенную боковую область, а также дает более подробное описание струйного течения, эволюция скорости вниз по потоку учитывает потенциальное ядро, развитую зону и прилегающую область. Проверка математической формулировки проводилась сравнением с экспериментальными измерениями и CFD-моделированием с использованием метода крупных вихрей (LES). Расчеты согласуются как с экспериментами, так и с результатами LES. Выполненные параметрические исследования показали рост эффективности завесы при увеличении ширины двери и (или) уменьшении ширины сопла, а также при увеличении скорости ветра и разности температур внутреннего и наружного воздуха. Среди российских исследователей необходимо выделить А. С. Стронгина, разработавшего наиболее полную методику проектирования и оценки эффективности воздушно-тепловых завес [8].

В настоящей работе тепловой режим станционных вестибюлей Московского метрополитена рассматривается с точки зрения использования удаляемого через них вытяжного воздуха в качестве источника теплоты низкого потенциала для теплонасосных воздушно-тепловых завес. В соответствии с нормативными требованиями к метрополитенам [9] вентиляция метрополитена должна обеспечивать не менее чем трехкратный воздухообмен в час по внутреннему объему пассажирских помещений и не менее 30 м<sup>3</sup>/ч наружного воздуха на одного пассажира, а в часы пик до 50 м<sup>3</sup>/ч. Ключевой проблемой при этом является необходимость удаления, в том числе через входные и выходные двери вестибюлей, избыточной тепловой энергии, выделяющейся при эксплуатации метрополитена. Условия вентиляции метрополитена в целом и режимы работы ВТЗ в частности в значительной степени обусловлены поршневым эффектом от движения поездов, мгновенное увеличение потока воздуха через ВТЗ, вызванное поршневым эффектом, может достигать 50% [10]. Вопросы моделирования воздухообмена и теплового баланса в тоннелях метрополитена рассматривались авторами ранее в работах [11], [12].

Анализ опубликованных данных натурных наблюдений за микроклиматом на платформах и в вестибюлях станций Московского метрополитена выявил следующее. Температурный режим станций и вестибюлей в значительной мере зависит от температуры наружного атмосферного воздуха, причем станции мелкого заложения более подвержены этому влиянию, чем станции глубокого заложения. Сезонные колебания температуры внутреннего воздуха на станциях и в вестибюлях имеют существенно меньшую амплитуду, чем колебания температуры наружного воздуха. Температура воздуха в вестибюлях станций как в зимнее, так и в летнее время несколько выше, чем на платформе, поступающий из тоннелей воздух дополнительно нагревается за счет тепловыделений пассажиров, а затем удаляется наружу через входы-выходы станционных вестибюлей. Таким образом, температура воздуха в вестибюлях в целом соответствует нормативным требованиям, за исключением отдельных станций, для которых температура зимой существенно завышена по отношению к нормативу 16 °С, установленному с учетом нахождения пассажиров зимой в верхней (сезонной) одежде.

Существенным фактором, определяющим тепловой режим кассовых залов и прилегающих к ним помещений, включая тамбуры с ВТЗ, является поток вытяжного воздуха, удаляемого через вестибюли (около 20% объема

приточного воздуха). Целью настоящей работы являются определение предельных температур воздуха внутри подземных переходов, примыкающих к вестибюлям станций, и оценка возможности использования этого воздуха в качестве источника теплоты низкого температурного потенциала для теплонасосного оборудования воздушно-тепловых завес.

### Методы и принципы исследования

Для численного моделирования параметров микроклимата кассовых залов и примыкающих к ним помещений, обслуживаемых тепловыми завесами, был определен расчетный участок станции длиной 82 м (половина станции с одним вестибюлем). Станционный и перегонные тоннели на этом участке заменялись одним эквивалентным тоннелем с внутренним диаметром 11,31 м, расположенным на средней глубине 15 м от поверхности грунта до центра тоннеля. Удаление теплоизбытков со станции осуществляется через вестибюль. Осредненный за сутки расчетный объем приточного наружного воздуха, подаваемого в тоннель, составлял от 20 до 35 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Основные геометрические параметры расчетного участка станции с вестибюлем и принятые исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Основные геометрические параметры расчетного участка станции с вестибюлем и принятые исходные данные

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.1>

| Наименование параметра                                                                                                                                          | Ед. изм.               | Значение    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------|
| Длина станции                                                                                                                                                   | м                      | 164         |
| Ширина выработки                                                                                                                                                | м                      | 20,45       |
| Площадь поперечного сечения станции                                                                                                                             | м <sup>2</sup>         | 100,38      |
| Средняя глубина заложения расчетного участка станции (от поверхности земли до центра станционного тоннеля)                                                      | м                      | 15,00       |
| Длина расчетного участка станции                                                                                                                                | м                      | 82,00       |
| Внутренний диаметр эквивалентного тоннеля                                                                                                                       | м                      | 11,31       |
| Расстояние между осями тоннелей                                                                                                                                 | м                      | 14,9        |
| Периметр поперечного сечения эквивалентного тоннеля                                                                                                             | м                      | 35,52       |
| Толщина обделки тоннеля                                                                                                                                         | м                      | 0,25        |
| Площадь внутренней поверхности теплообмена станции на расчетном участке                                                                                         | м <sup>2</sup>         | 2912,02     |
| Среднемесячный расчетный расход приточного наружного воздуха, приведенный к расчетному участку станции и учитывающий раздачу приточного воздуха в два вестибюля | тыс. м <sup>3</sup> /ч | 20,00-35,00 |
| Объемный вес приточного воздуха                                                                                                                                 | кг/м <sup>3</sup>      | 1,30        |
| Количество дверей (0,8×2,2 м) в дверном проеме входной/выходной группы одного вестибюля                                                                         | шт.                    | 6           |
| Количество тепловых завес в одном вестибюле                                                                                                                     | шт.                    | 2           |
| Тепловая мощность одной ВТЗ                                                                                                                                     | кВт                    | 95,2        |
| Расход воздуха, подаваемого завесой                                                                                                                             | тыс. м <sup>3</sup> /ч | 10          |
| Теплоемкость приточного воздуха                                                                                                                                 | кДж/(кг·°С)            | 1,00        |
| Скорость движения воздуха в                                                                                                                                     | м/ч (м/с)              | 2000 (0,56) |

| Наименование параметра                         | Ед. изм.     | Значение |
|------------------------------------------------|--------------|----------|
| тоннеле                                        |              |          |
| Теплопроводность грунта по горизонтали         | Вт/(м·°С)    | 1,00     |
| Теплопроводность грунта по вертикали           | Вт/(м·°С)    | 1,00     |
| Коэффициент теплопередачи с поверхности грунта | Вт/(м²·°С)   | 20,00    |
| Теплоемкость грунта                            | Вт·ч/(кг·°С) | 0,80     |
| Объемный вес грунта                            | кг/м³        | 2400,00  |

Численное моделирование тепловоздушного режима помещений вестибюля проводилось с помощью адаптированной для условий метрополитена программы INSOLAR-ING, разработанной авторами [10]. Расчетная схема вестибюля с расположенными в нем кассовым залом, входной/выходной группой с ВТЗ и подземным переходом приведена на рисунке 1. Воздух в объеме 20 000 м³/ч (скорость потока 0,185 м/с) поступает в помещения вестибюля со стороны платформы; средняя скорость воздуха на входе в зону ВТЗ составляет 0,5 м/с. В принципе, на некоторых станциях через вестибюль удаляется до 35 тыс. м³ воздуха в час, но этот вариант является «более» щадящим для ВТЗ, поэтому для проведения расчетов был принят минимальный расход удаляемого через вестибюль воздуха, в этом варианте влияние тепловых завес еще меньше. С учетом особенностей ввода данных в программе INSOLAR-ING тамбур с тепловыми завесами аппроксимировался протяженным коридором, по которому протекает воздушный поток с расходом, равным расходу воздуха через ВТЗ, 9900 м³/ч (в табл. 1 округленно 10 тыс. м³/ч).



Рисунок 1 - Расчетная схема помещений вестибюля станции метрополитена  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.2>

Расчеты выполнялись для двух вариантов. В первом варианте (без учета пассажиропотока) работают две тепловые завесы тепловой мощностью 95,2 кВт каждая; время расчета совпадает со временем работы станции и составляет 19,5 ч; температура воздуха, подаваемого со станции, принята равной 17 °С. Во втором варианте, учитывающем пассажиропоток как источник и потребитель теплоты (источником «холода» являются пассажиры, входящие в вестибюль с улицы), в расчетную схему добавлялись точечные источники и стоки теплоты, моделирующие как постоянный пассажиропоток (порядка 40 человек, одновременно находящихся в помещениях), так и утренние и вечерние часы пик (порядка 600 человек). Расчетные схемы этих случаев различаются только количеством и расположением источников и стоков теплоты в кассовом зале и подземном переходе.

Для случаев, когда оснащенные ВТЗ двери кассового зала выходят непосредственно на улицу или в подземный переход, не имеющих дверей на выходе, выполнена серия расчетов аэродинамики и теплообмена входной группы при температуре воздуха внутри перехода до -5 °С. В качестве базовой модели выбрана наиболее распространенная и применяемая в настоящее время при проектировании метрополитена в Москве входная группа вход/выход через подземный переход, за основу принят вход станции «Румянцево» [12]. Высота потолка входа 3,5 м, ширина 5,9 м, расстояние до дверного узла 5,0 м; дверной узел состоит из четырех типовых дверей, сгруппированных в две линии, расстояние между линиями дверей 2,5 м (конкретная входная группа, в отличие от осредненной конфигурации дверного проема вестибюля с шестью дверями, принятой в системной модели, (см. табл. 1)). Расчеты выполнялись в CFD-пакете ANSYS R15.0, геометрия расчетной модели с линиями тока воздуха приведена на рисунке 2.

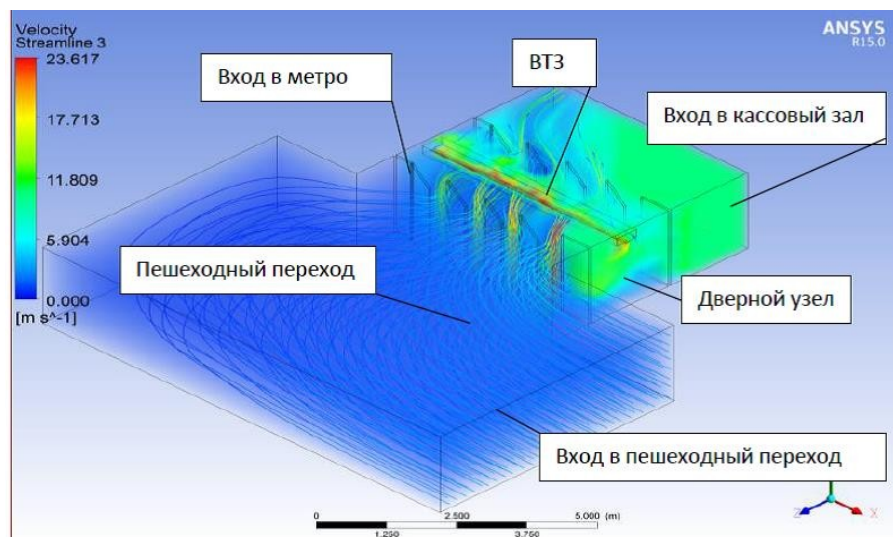


Рисунок 2 - Геометрия расчетной модели входной группы с линиями тока воздуха  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.3>

Согласно режимной карте работы системы вентиляции в районе станции «Румянцево» приняты значения избыточного давления со стороны кассового зала в диапазоне от 0 до +50 Па. Для расчета ветрового напора на входе в пешеходный переход скорость воздуха варьировалась от 1,5 до 5 м/с. Параметры тепловой завесы определены по методике [8], тип завесы принят по аналогии со станцией «Румянцево». Принятые диапазоны избыточного давления, расходов и скоростей воздуха охватывают в том числе колебания параметров, обусловленные работой тоннельной вентиляции, ветровым напором и поршневым эффектом от движения поездов [10], прямое нестационарное моделирование прохождения отдельных поездов в представленную серию расчетов не входило.

### Основные результаты

По результатам моделирования вестибюля получено распределение векторов скоростей воздушных потоков в его помещениях. Воздушный поток, поступающий со стороны станции, проходит через кассовый зал и зону ВТЗ и удаляется наружу через подземный переход, наибольшие скорости движения воздуха наблюдаются в зоне дверных проемов с ВТЗ, где формируются локальные вихревые течения, тогда как в объеме кассового зала поле скоростей близко к равномерному.

Интегральные показатели, полученные для вариантов без учета и с учетом пассажиропотока, сопоставлены в таблице 2. Учет пассажиропотока изменил среднюю температуру воздуха в помещениях лишь на 0,02 °С, а удельные тепловые потоки на 2,65 Вт/м<sup>2</sup> (около 1,2% по тепловыделениям и 0,16 % по потоку, удаляемому с вентиляционными выбросами), при заданном вентиляционном расходе пассажиропоток влияет преимущественно на локальную структуру температурного поля, практически не меняя интегральных показателей.

Таблица 2 - Сопоставление интегральных показателей теплового режима помещений вестибюля

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.4>

| Показатель                                                             | Ед. изм.          | Без учета пассажиропотока | С учетом пассажиропотока |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|
| Средняя температура воздуха в помещениях вестибюля за период расчета   | °С                | 18,74                     | 18,76                    |
| Средние удельные тепловыделения за расчетный период                    | Вт/м <sup>2</sup> | 227,76                    | 230,41                   |
| Средний удельный тепловой поток, удаляемый с вентиляционными выбросами | Вт/м <sup>2</sup> | 1660,83                   | 1663,48                  |
| Удельные тепловыделения, сохраненные в                                 | Вт/м <sup>2</sup> | 6,76                      | 6,77                     |

| Показатель | Ед. изм. | Без учета пассажиропотока | С учетом пассажиропотока |
|------------|----------|---------------------------|--------------------------|
| помещения  |          |                           |                          |

Распределение температур внутреннего воздуха для варианта без учета пассажиропотока представлено на рисунке 3, а: температура воздуха в кассовом зале сохраняется на уровне 17 °С, в зоне действия струй ВТЗ достигает 24–27 °С, а в подземном переходе, через который удаляется вытяжной воздух, устанавливается в диапазоне 18–24 °С. Соответствующее распределение для варианта с учетом пассажиропотока приведено на рис. 3, б: поля температур, полученные для утреннего и вечернего часов пик при единовременном присутствии в помещениях порядка 600 человек, практически не отличаются от приведенных на рис. 3, б: температура воздуха в кассовом зале удерживается на уровне 17 °С, а в подземном переходе — в диапазоне 18–24 °С; в утренний час пик непосредственно у входного проема наблюдается локальное понижение температуры до 9–15 °С, а в вечерний час пик — локальное повышение до 25–26 °С в зоне скопления пассажиров.

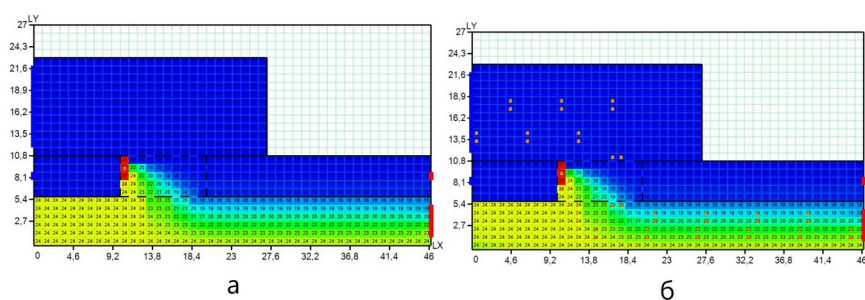


Рисунок 3 - Распределение температур воздуха (°С) в помещениях вестибюля:

а) без учета пассажиропотока, б) с учетом пассажиропотока в течение дня

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.5>

Таким образом, в результате численного моделирования параметров микроклимата в помещениях вестибюля установлено, что температурный режим этих помещений формируется в основном под тепловым воздействием потока вытяжного воздуха, проходящего через кассовый зал и входную/выходную группы, оснащенные ВТЗ, и удаляемого через входы в подземный переход. Тепловое влияние температуры наружного воздуха на параметры микроклимата помещений вестибюля в исследованных режимах минимально.

Моделирование входной группы выполнено при следующих исходных условиях: скорость воздуха на входе в пешеходный переход 3 м/с при температуре -3 °С, двери открыты наполовину, скорость воздуха на выходе из ВТЗ 8–10 м/с при температуре +50 °С; избыточное давление со стороны кассового зала отсутствует. Из указанных выше диапазонов давления и скорости, подробно представлен именно этот режим, остальные расчетные точки диапазонов в настоящей статье не приводятся. Распределения температуры и скоростей воздушных потоков представлены на рис. 4 и 5.

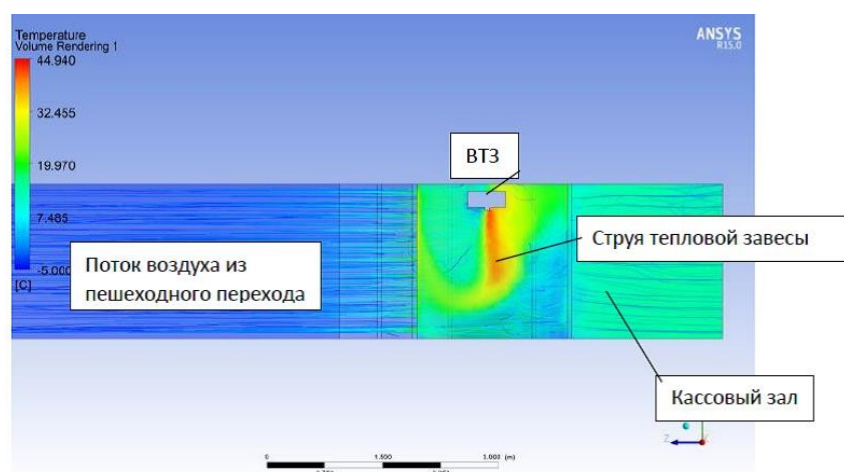


Рисунок 4 - Распределение температуры воздушных потоков в зоне дверного узла с ВТЗ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.6>

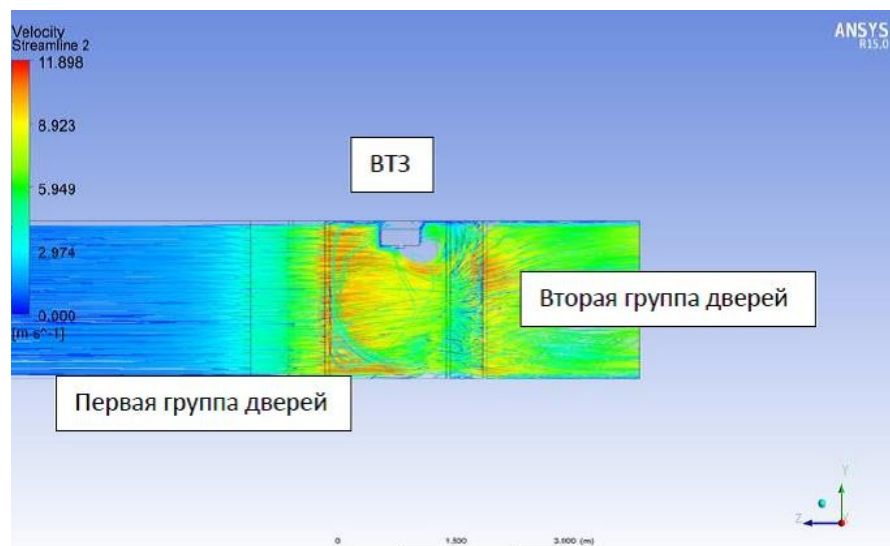


Рисунок 5 - Распределение скоростей воздушных потоков в зоне дверных групп  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.7>

Расчеты показали, что происходит прорыв холодного воздуха в кассовый зал, однако скорость воздуха на входе в кассовый зал составляет не более 1,9 м/с при температуре +11 °С, что вполне удовлетворяет требованиям подогрева прорывающегося воздуха. При этом воздушно-тепловая завеса не полностью отсекает пространство кассового зала, струя ВТЗ при скорости потока 8 м/с оказывается короткой и не перекрывает полностью сечение дверного проема (см. рис. 4). Объемные визуализации температурных полей и линий тока, полученные в этой серии расчетов, показывают, что теплые струи завес локализованы в пределах дверного узла, между линиями дверей формируется зона повышенной температуры, часть подогретого воздуха сносится потоком из перехода в сторону кассового зала, а воздушный поток в самом переходе остается практически изотермичным. Поле скоростей (см. рис. 5) свидетельствует о формировании в проемах между дверями струйных течений со скоростями до 8–12 м/с и зоны возвратных вихревых течений перед дверным узлом со стороны перехода.

Выполненное численное моделирование и анализ его результатов позволили определить предельные параметры и технологические требования к ВТЗ, оснащенным теплонасосным оборудованием и использующим низкопотенциальную теплоту вытяжного воздуха, удаляемого через вестибюли станций метрополитена (см. табл. 3).

Таблица 3 - Предельные параметры и технологические требования к теплонасосным ВТЗ, их оборудованию и режимам эксплуатации

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.76.3.8>

| Наименование параметра                                                                       | Ед. изм.  | Значение       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|
| Теплопроизводительность тепловой завесы                                                      | кВт       | 50-100         |
| Теплопроизводительность теплонасосного оборудования                                          | кВт       | 50-100         |
| Расход воздуха, подаваемого тепловой завесой                                                 | тыс. м³/ч | 8-10           |
| Температура воздуха на выходе из ВТЗ:<br>– в режиме нагрева<br>– в режиме охлаждения         | °С        | 35-40<br>18-20 |
| Относительная влажность воздуха на входе в ВТЗ                                               | %         | 60-80          |
| Температура воздуха на входе в ВТЗ:<br>– в режиме нагрева<br>– в режиме охлаждения           | °С        | 10<br>25       |
| Температура воздуха, используемого в качестве источника тепловой энергии низкого потенциала* | °С        | 10             |
| Температура кипения паров                                                                    | К         | 278            |



| Наименование параметра                   | Ед. изм. | Значение                                                                                                                            |
|------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| хладагента                               |          |                                                                                                                                     |
| Температура конденсации паров хладагента | К        | 328                                                                                                                                 |
| Основные режимы работы:                  |          |                                                                                                                                     |
| – зимнее время                           | –        | нагрев воздуха с возможностью одновременного охлаждения кассового зала или технологических помещений                                |
| – летнее время                           | –        | охлаждение тамбура с ВТЗ или технологических помещений со сбросом тепловой энергии с конденсаторов в подземный переход или на улицу |
| Холодопроизводительность                 | кВт      | 35-70                                                                                                                               |

*Примечание: \* – в качестве источника тепловой энергии низкого потенциала используется воздух подземного перехода. В случае использования теплонасосной ВТЗ для охлаждения кассового зала в летнее время целесообразно рассмотреть возможность использования в качестве низкопотенциального источника теплоты воздуха кассового зала*

### Обсуждение

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что поток вытяжного воздуха, удаляемого через вестибюли, представляет собой устойчивый источник теплоты низкого потенциала, температура воздуха в подземном переходе сохраняется в диапазоне 18–24 °С в течение всего времени работы станции и в исследованных режимах практически не зависит ни от интенсивности пассажиропотока, ни от температуры наружного воздуха. Принятая в табл. 3 расчетная температура источника (10 °С) назначена с запасом по отношению к этому диапазону, что обеспечивает стабильные условия работы испарителей теплонасосного оборудования.

Вместе с тем моделирование входной группы выявило ограничение существующих схем ВТЗ: струя завесы не перекрывает полностью сечение дверного проема, вследствие чего часть холодного воздуха прорывается в кассовый зал. Поскольку параметры прорывающегося потока (скорость не более 1,9 м/с, температура +11 °С) удовлетворяют требованиям подогрева, задача завесы в рассматриваемых условиях сводится не к полному отсечению проема, а к гарантированному догреву прорывающегося воздуха, эти условия учтены при формировании технологических требований к теплонасосным ВТЗ, приведенных в табл. 3.

Предусмотренные режимы работы теплонасосных ВТЗ, такие как: нагрев воздуха в зимнее время с возможностью одновременного охлаждения кассового зала или технологических помещений и охлаждение тамбура с ВТЗ в летнее время со сбросом теплоты конденсации в подземный переход или наружу, обеспечивают круглогодичное использование оборудования и повышают энергетическую эффективность технического решения в целом.

### Заключение

Представленные, в настоящей статье результаты исследований, подтвердили возможность использования вытяжного воздуха вестибюлей Московского метрополитена в качестве источника тепловой энергии низкого потенциала для теплонасосных воздушно-тепловых завес. Численное моделирование показало, что температура воздуха, удаляемого через подземные переходы, устойчиво сохраняется в диапазоне 18–24 °С и в исследованных режимах практически не зависит от пассажиропотока и температуры наружного воздуха, а параметры прорывающегося в кассовый зал воздуха (скорость не более 1,9 м/с, температура +11 °С) удовлетворяют требованиям подогрева прорывающегося воздуха. Определены предельные параметры и технологические требования к теплонасосным ВТЗ, их оборудованию и режимам эксплуатации. Судя по температурному режиму вытяжного воздуха, удаляемого через ВТЗ, экономия энергии при реализации этого технического решения может составить, по предварительной оценке, 60–70%.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.



### Список литературы / References

1. Hetsroni G. Further studies of the air curtain / G. Hetsroni // Quarterly Bulletin of the Michigan Agricultural Experiment Station. — 1964. — Vol. 46, № 3. — P. 438–452.
2. Hayes F.C. Design data for air curtains / F.C. Hayes // ASHRAE Transactions. — 1969. — Vol. 75, Pt. 2. — P. 168–179.
3. Sirén K. Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain. Part I / K. Sirén // Energy and Buildings. — 2003. — Vol. 35, № 7. — P. 681–695. — DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00223-2.
4. Sirén K. Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain. Part II / K. Sirén // Energy and Buildings. — 2003. — Vol. 35, № 7. — P. 697–705. — DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00224-4.
5. Carlson D.A. Prevention of mosquitoes and house flies from entering simulated aircraft with commercial air curtain units / D.A. Carlson, J.A. Hogsette, D.L. Kline [et al.] // Journal of Economic Entomology. — 2006. — Vol. 99, № 1. — P. 182–193. — DOI: 10.1603/0022-0493(2006)099[0182:POMDCA]2.0.CO;2.
6. Jaramillo J.E. A detailed study of the plenum and discharge jet produced by air curtains / J.E. Jaramillo, C.D. Pérez-Segarra, A. Oliva // Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Computational Technology. — Stirlingshire : Civil-Comp Press, 2008. — P. 104. — DOI: 10.4203/ccp.89.104.
7. Giráldez H. Improved semi-analytical method for air curtains prediction / H. Giráldez, C.D. Pérez-Segarra, I. Rodríguez [et al.] // Energy and Buildings. — 2013. — Vol. 66. — P. 258–266. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.07.011.
8. Стронгин А.С. Оценка эффективности воздушно-тепловых завес для ворот производственно-складских зданий / А.С. Стронгин // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. — 2020. — № 3. — С. 24–29. — ISSN 1609-7843.
9. СП 120.13330.2012. Метрополитены. СНиП 32-02-2003 : свод правил : утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 264. — Москва : Минрегион России, 2012.
10. Проведение исследований, разработка технических и технологических решений для создания на базе теплонасосного оборудования тепловых завес вестибюлей станций метрополитена : отчет о НИР (Государственный контракт № ДГП 19-12-РМ от 10 января 2019 г.). — УДК 620.92:502.174.1. — № госрегистрации АААА-А19-119040590049-0. — Инв. № 17-1/2019. — Москва, 2019.
11. Васильев Г.П. Алгоритм управления вентиляцией в тоннеле метро на основе модели теплового баланса / Г.П. Васильев, Н.В. Песков, Т.М. Лысак [и др.] // Прикладная математика и информатика: труды факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова. — Москва, 2023. — С. 4–18.
12. Васильев Г.П. Расчет кратности воздухообмена в тоннеле метро / Г.П. Васильев, Н.В. Песков, Т.М. Лысак [и др.] // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. — 2023. — № 5. — С. 46–51.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Hetsroni G. Further studies of the air curtain / G. Hetsroni // Quarterly Bulletin of the Michigan Agricultural Experiment Station. — 1964. — Vol. 46, № 3. — P. 438–452.
2. Hayes F.C. Design data for air curtains / F.C. Hayes // ASHRAE Transactions. — 1969. — Vol. 75, Pt. 2. — P. 168–179.
3. Sirén K. Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain. Part I / K. Sirén // Energy and Buildings. — 2003. — Vol. 35, № 7. — P. 681–695. — DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00223-2.
4. Sirén K. Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain. Part II / K. Sirén // Energy and Buildings. — 2003. — Vol. 35, № 7. — P. 697–705. — DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00224-4.
5. Carlson D.A. Prevention of mosquitoes and house flies from entering simulated aircraft with commercial air curtain units / D.A. Carlson, J.A. Hogsette, D.L. Kline [et al.] // Journal of Economic Entomology. — 2006. — Vol. 99, № 1. — P. 182–193. — DOI: 10.1603/0022-0493(2006)099[0182:POMDCA]2.0.CO;2.
6. Jaramillo J.E. A detailed study of the plenum and discharge jet produced by air curtains / J.E. Jaramillo, C.D. Pérez-Segarra, A. Oliva // Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Computational Technology. — Stirlingshire : Civil-Comp Press, 2008. — P. 104. — DOI: 10.4203/ccp.89.104.
7. Giráldez H. Improved semi-analytical method for air curtains prediction / H. Giráldez, C.D. Pérez-Segarra, I. Rodríguez [et al.] // Energy and Buildings. — 2013. — Vol. 66. — P. 258–266. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.07.011.
8. Strongin A.S. Otsenka effektivnosti vozdušno-teplovyykh zaves dlya vorot proizvodstvenno-skladskikh zdaniy [Evaluation of the effectiveness of air-thermal curtains for gates of industrial and warehouse buildings] / A.S. Strongin // AVOK: Ventilyatsiya, otopleniye, konditsionirovaniye vozdukha, teplosnabzheniye i stroitel'naya teplofizika [AVOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. — 2020. — No. 3. — P. 24–29. — ISSN 1609-7843. [in Russian]
9. SP 120.13330.2012. Metropoliteny. SNiP 32-02-2003 [Subways. SNiP 32-02-2003] : set of rules : approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Minregion of Russia) of June 30, 2012 No. 264. — Moscow : Minregion of Russia, 2012. [in Russian]
10. Provedeniye issledovaniy, razrabotka tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh resheniy dlya sozdaniya na baze teplonasosnogo oborudovaniya teplovyykh zaves vestibulyey stantsiy metropolitena [Conducting research, developing technical and technological solutions for creating heat curtains for metro station lobbies based on heat pump equipment] : research report (State Contract No. DGP 19-12-RM of January 10, 2019). — UDC 620.92:502.174.1. — State registration No. АААА-А19-119040590049-0. — Inventory No. 17-1/2019. — Moscow, 2019. [in Russian]
11. Vasiliev G.P. Algoritm upravleniya ventilyatsiyei v tonnele metro na osnove modeli teplovogo balansa [Ventilation control algorithm in a metro tunnel based on a heat balance model] / G.P. Vasiliev, N.V. Peskov, T.M. Lysak [et al.] //



Prikladnaya matematika i informatika: trudy fakul'teta VMK MGU imeni M.V. Lomonosova [Applied Mathematics and Informatics: Proceedings of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University]. — Moscow, 2023. — P. 4–18. [in Russian]

12. Vasiliev G.P. Raschet kratnosti vozdukhooobmena v tonnele metro [Calculation of air exchange rate in a metro tunnel] / G.P. Vasiliev, N.V. Peskov, T.M. Lysak [et al.] // Ventilyatsiya, otopleniye, konditsionirovaniye vozdukha, teplosnabzheniye i stroitel'naya teplofizika [Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. — 2023. — № 5. — P. 46–51. [in Russian]