

Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров

Дарья Евгеньевна Шабунина¹✉, Андрей Игоревич Данилов¹, Марина Викторовна Гравит²

¹ ООО «Центр исследований опасных факторов пожара», г. Кудрово, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Объемно-планировочные решения станций метрополитена влияют на удобство и безопасность пассажиров. Математическое моделирование является перспективным методом для решения задач, связанных с определением достаточности принятых объемно-планировочных решений станций в зависимости от пассажиропотока.

Цели и задачи. Цель исследования — обоснование метода математического моделирования пассажиропотоков для разработки оптимальных объемно-планировочных решений пересадочных станций метрополитена. Для достижения цели решены следующие задачи: разработка концепции типовой пересадочной станции метрополитена; моделирование пассажиропотока с исходными и оптимизированными объемно-планировочными решениями; моделирование эвакуации пассажиров со станции при возникновении пожара в подвагонном пространстве центрального вагона прибывающего поезда.

Методы. В работе приведен метод математического моделирования для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена. В ПК Pathfinder разработана индивидуально-поточная модель пересадочной станции, по результатам которой произведено моделирование пассажиропотока с исходными и оптимизированными объемно-планировочными решениями. Для моделирования распространения опасных факторов пожара использовался ПК PyroSim.

Результаты и их обсуждение. По результатам математического моделирования определены оптимальные объемно-планировочные решения станций метрополитена, на основе которых выполнен сценарий эвакуации пассажиров. Получено, что в момент начала эвакуации на станции находится 3684 пассажира и 296 рабочих. Результаты моделирования показали, что общее расчетное время эвакуации из типовой пересадочной станции составляет 814 с. Также получено, что значения опасных факторов пожара в расчетных точках не достигают критических значений до момента завершения эвакуации.

Выводы. Разработана и реализована математическая модель типовой пересадочной станции для определения оптимальных объемно-планировочных решений и расчета безопасной эвакуации людей. На основе данного исследования в новой редакции СП 120.13330.2022 «Метрополитены» внесены изменения, определяющие, что расчетная численность пассажиров, эвакуирующихся со станции при пожаре, определяется на основе математического моделирования пассажиропотоков в час пик.

Ключевые слова: транспортно-пересадочные узлы; пропускная способность; индивидуально-поточная модель; безопасность; опасные факторы пожара; алгоритмы поведения пассажиров

Для цитирования: Шабунина Д.Е., Данилов А.И., Гравит М.В. Метод математического моделирования пассажиропотоков для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 54–68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.54-68

✉ Шабунина Дарья Евгеньевна, e-mail: shabunina@ciofp.ru

Method of mathematical modelling of passenger flows to justify the space-planning solutions of underground stations and calculate passenger evacuation

Daria E. Shabunina¹✉, Andrey I. Danilov¹, Marina V. Gravit²

¹ LLC “Fire Hazard Research Center”, Kudrovo, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Space-planning solutions for underground stations have an effect on the comfort and safety of passengers. Mathematical modelling is a perspective method for solving problems dealing with the determination of adequacy of adopted space-planning solutions for stations depending on passenger traffic.

Aims and purposes. The purpose of the study is to justify the method of mathematical modelling of passenger flows to develop optimal space-planning solutions of interchange stations of underground. To achieve this goal, the following tasks were solved: the development of a model interchange station concept; modelling passenger flows with initial and optimized volume planning solutions; modelling of passenger evacuation from the station in case of fire in the basement of the arriving train's central carriage.

Methods. The paper presents a method of mathematical modelling to justify the space-planning solutions of underground stations. The software package Pathfinder developed an individual flow model of the interchange station, which simulated the passenger flows with initial and optimized volume-planning solutions. The software package PyroSim was used to simulate the spread of fire hazards.

Results and discussion. Based on the results of mathematical modelling, the optimal space-planning solutions for underground stations were determined, on the basis of which the passenger evacuation scenario was performed. It is obtained that there are 3,684 passengers and 296 workers at the station when the evacuation begins. The simulation results showed that the total estimated evacuation time from a typical transfer station is 814 seconds. It is obtained that the values of dangerous fire factors in the calculated points do not reach critical values until the evacuation is completed.

Conclusions. A mathematical model of a typical interchange station has been developed and implemented to determine the optimal space-planning solutions and calculate the safe evacuation of people. On the basis of this study in the new edition of the Code of Practice 120.13330.2022 "Underground" made amendments that determine that the estimated number of passengers evacuating from the station in case of fire, is based on mathematical modelling of passenger traffic during the rush hour.

Keywords: interchange hubs; capacity; individual-flow model; safety; fire hazards; passenger behavior algorithms

For citation: Shabunina D.E., Danilov A.I., Gravit M.V. Method of mathematical modelling of passenger flows to justify the space-planning solutions of underground stations and calculate passenger evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):54-68. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.54-68 (rus).

✉ Daria Evgenievna Shabunina, e-mail: shabunina@ciofp.ru

Введение

Метрополитен — вид городского транспорта, предназначенный для перевозки большого количества пассажиров в условиях плотной городской застройки. По сравнению с другими видами общественного транспорта метрополитен имеет отличительные характеристики, включающие высокую скорость, пропускную способность, своевременное обслуживание, уникальный процесс эвакуации, заключающийся в движении вверх, и однозначные маршруты (не подвержен влиянию других транспортных систем) [1]. Метрополитен рассматривается как сетевая система с пространственными топологическими отношениями, узлами которой являются станции, взаимодействующие друг с другом. Если загруженность вышерасположенной станции велика, то через некоторый промежуток времени загруженность нижерасположенной станции увеличится соответственно. Системы метрополитена большинства мегаполисов мира страдают от проблемы перегруженного пассажиропотока, особенно в часы пиковой загруженности в будние дни [2]. Прогнозирование пассажиропотоков городского транспорта практически важно для решения многих реальных задач, включая управление транспортом и общественную безопасность [3]. Московский метрополитен является четвертым в мире по загруженности и интенсивности использования (рис. 1) [4, 5]. При этом Москов-

ский метрополитен имеет сравнительно небольшую протяженность линий (405 км). На данный момент для равномерного распределения пассажиропотока в Москве строят новые линии и дополнительные пересадочные станции [6].

Пассажиропоток — движение пассажиров по определенной геометрии сети, определяемое как количество пассажиров, проходящих за единицу времени через геометрию транспортной сети [7, 8]. Пассажиропотоки имеют два основных фактора, которые необходимо определять: мощность потока и направление. Мощность пассажиропотоков — количество пассажиров, проезжающих за единицу времени через рассматриваемую геометрию транспортной сети. Так как пассажиропотоки в течение дня значительно колеблются (часы пиковой загруженности, межпиковый период), то в зависимости от мощности пассажиропотока определяется интервал движения поезда.

Ежедневно пассажиры метрополитена в час пик сталкиваются с большим количеством людей, высокой интенсивностью движения людских потоков в разных направлениях и повышенным уровнем шума [9]. Проектные решения станций метрополитена должны подвергаться анализу безопасного и комфортного нахождения пассажиров. При резком увеличении пассажиропотока в будущем существующие станции могут столкнуться с проблемой перенасыщения, если не будет изменена концепция принятия и анализа объемно-планировочных решений станций.

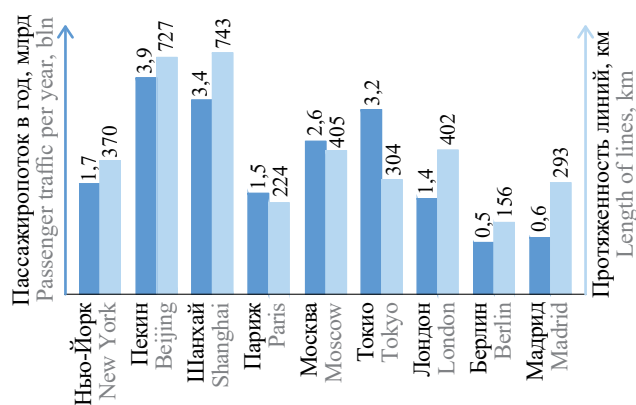


Рис. 1. Отношение протяженности линий метрополитена к количеству перевозимых пассажиров в год

Fig. 1. The ratio of the length of underground lines to the number of passengers transported per year

СП 120.13330.2012 «Метрополитены»¹ регламентирует объемно-планировочные решения станций метрополитена, включая ширину платформ, лестниц, количество эскалаторов и турникетов, пропускную и привозную способность станций метрополитена и количество вестибюлей и эвакуационных выходов. Федеральный закон № 123-ФЗ² регламентирует, что каждое здание или сооружение должно иметь объемно-планировочное решение, обеспечивающие безопасную эвакуацию людей.

Для определения суммарного пассажиропотока в часы пик за интервал движения между поездами в СП 120.13330.2012 приводится формула:

$$P = P_{\text{пут}} + P_{\text{вх}} + P_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пут}}$ — пассажиропотоки соответственно для 1 или 2-го пути (принимается максимальный);

$P_{\text{вх}}$ — суммарный пассажиропоток входа с поверхности;

$P_{\text{п}}$ — пассажиропоток со смежной линии (для пересадочной станции).

Данная математическая модель для платформы станции позволяет определить суммарный пассажиропоток (чел/ч) за интервал между поездами, а не количество пассажиров (чел) по всем пассажирским зонам станционного комплекса (вестибюли, эскалаторы, платформы, переходы) в начальный момент времени эвакуации. Таким образом, СП 120.13330.2012 в силу простоты метода не учитывает реальную геометрию станций и скоростные характеристики людей в потоках, не позволяет определить достаточные исходные данные в зависимости от прогнозируемых пассажиропотоков для выполнения расчетов эвакуации людей при пожаре на станции метрополитена.

¹ СП 120.13330.2012. Метрополитены.

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

Для анализа пассажиропотока на пересадочных станциях метрополитена рассмотрены диссертационные работы, связанные с моделированием пассажиропотоков на станциях «Пушкинская» и «Площадь Восстания» (Россия, Санкт-Петербург) [10, 11]. Выявлено, что в течение часа пиковой загруженности происходит неравномерность входа пассажиров и распределения потока. В то же время СП 120.13330.2012 регламентирует, что пропускную способность, число входов и пассажирского подъемно-транспортного оборудования следует определять расчетом по величине 15-минутного пассажирского потока в часы пик с учетом коэффициента неравномерности распределения потока в течение одного часа, который равен 1,4 для пересадочной станции и 1,2 — для остальных станций.

Федеральный закон № 384-ФЗ³ указывает, что соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности может быть обосновано исследованиями, моделированием, расчетами и испытаниями, выполненными по апробированному иному способу методикам.

Для точного прогнозирования пассажиропотоков в реальном времени в транспортно-пересадочных узлах применяются следующие методы: теоретический расчет, экспериментальное исследование, стратегия управления, вероятностный метод и математическое моделирование.

Теоретические расчеты используются в качестве метода для прогнозирования пассажиропотоков в метрополитене. Расчет времени эвакуации по теоретическому методу состоит из трех частей: расчет времени эвакуации в помещении с очагом пожара, на этаже с очагом пожара и в горящем здании. В статье [12] предлагается усовершенствованная формула расчета времени эвакуации на станции метрополитена. Этот метод делит зону эвакуации на различные этапы и показывает, превышает ли время эвакуации допустимые значения. Теоретический расчет учитывает время движения людей в стандартных условиях эксплуатации метрополитена, но не позволяет учесть зависимость плотности людского потока от скорости их движения, группы мобильности пассажиров, влияние объемно-планировочных решений станций (повороты, ширины проходов, лестниц и эскалаторов) на скорость движения пассажиров.

Для получения исходных данных для проведения расчетов безопасной эвакуации в метрополитене, определения количества пар поездов в час и других параметров необходимо проведение экспериментальных исследований. В работе [13] методом экспериментального исследования измеряли темпе-

³ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

ратуру в лондонском метрополитене для проверки численной модели; в работе [14] проведен эксперимент по изучению влияния тоннельной вентиляции на распространение опасных факторов пожара при возгораниях в тоннелях. Любые экспериментальные исследования на территории метрополитена являются достаточно требовательными к ресурсам (оборудование, пассажиры, время и пространство) и выполнимости. Таким образом, экспериментальное исследование оптимально проводить для валидации математических моделей и получения экспериментальных значений для задания алгоритмов в программных комплексах (ПК), необходимых для обоснования объемно-планировочных решений станций метрополитена и расчета безопасной эвакуации пассажиров.

С целью прогнозирования пассажиропотоков, повышения эффективности работы и обеспечения безопасности пассажиров в развивающихся системах метрополитена применяется стратегия управления пассажиропотоками. Текущая стратегия обычно формулируется на основе субъективного опыта оперативного персонала на каждой станции. Неспособность работников метрополитена уловить взаимосвязь между пассажиропотоками на станции и на всей линии может вызвать повышенные скопления пассажиров на станциях, что может увеличить вероятность травмоопасных ситуаций и коллапса. В работе [15] предлагается метод управления пассажиропотоком на основе координации, использующий взаимосвязь станций и линий. Метод состоит из трех этапов: определение узких мест в метрополитене в соответствии с разницей между пассажиропотоком и пропускной способностью линии; исследование корреляции между пропускной способностью станции и пропускной способностью по проекту для точного устранения повышенных пассажиропотоков; разработка методики устранения узких мест, включающая в себя контролируемые станции и их способы контроля.

Передвижение каждого человека в метрополитене является детерминированным, т.е. ежедневные перемещения пассажиров являются целенаправленными и определенными [16]. Изучение передвижения пассажиров требует вероятностной интерпретации. В работе [17] предлагается вероятностный метод, ориентированный на прогнозирование пассажиропотоков в системе метрополитена. Данный метод заключается в получении вероятности появления определенного человека на определенной станции метрополитена. Данные о месте отправления пассажиров рассчитываются исходя из данных о месте назначения, а затем, собрав все данные, имеется возможность предсказать пассажиропотоки в системе метрополитена. Результаты показывают, что, хотя вероятност-

ный метод имеет более низкую производительность, чем существующие подходы для прогнозирования пассажиропотоков, он способен прогнозировать несколько дополнительных видов пассажиропотоков на станциях и во всей системе метрополитена.

Математическое моделирование является перспективным методом для решения задач, связанных с пассажиропотоками, способным учитывать движение транспорта, алгоритмы движения людей и любые динамические изменения [18–20], в частности транспортных систем. Математическое моделирование способно решать следующие задачи:

- принятие оптимальных объемно-планировочных решений станций для безопасного и комфортного передвижения пассажиров в режиме пассажирской эксплуатации;
- определение количества пассажиров в определенный момент времени для проверки условий безопасной эвакуации и комфортного пребывания;
- оптимизация стоимости и управления: выбор оптимальных объемно-планировочных решений, заблаговременное определение всевозможных сценариев и режимов работы метрополитена.

Математическое моделирование пассажиропотоков позволяет имитировать поведение пассажиров на станционном комплексе или в целом системы метрополитена [21–23]. Главным преимуществом данного метода является возможность переключаться в пространстве и времени, ускорять или замедлять протекание процесса в зависимости от типов препятствий и объектов модели, отражающих приближенные к реальности процессы перемещения людей с учетом технологических решений. При использовании метода математического моделирования в качестве исходных данных необходимо задавать пассажиропоток на вход, выход и пересадку, алгоритмы движения пассажиров по станционному комплексу, для получения которых имеется два способа: визуальный метод и метод видеонаблюдения.

Визуальный метод имеет ряд недостатков: зависимость точности измерения параметров движения людских потоков от субъективного мнения наблюдателя; необходимость привлечения большого количества наблюдателей для получения сравнительно точных эмпирических данных; сложность определения параметров движения людских потоков при скоротечном движении на исследуемых участках или повышенной плотности людей на них; невозможность зафиксировать параметры в определенный интервал времени и провести анализ кинематики движения потока. Приведенные недостатки решаются методом видеонаблюдения, впервые использовавшимся для определения движения людских потоков на станциях метрополитена. Первые видеонаблюдения в условиях сложной организации

движения пассажиров в пересадочных узлах метрополитена осуществлены в исследовании И.И. Исаевич [24]. Наблюдения проводились в кассовых залах вестибюля, на участках пути движения перед и после эскалатора, на платформах станций и перед автоматическими контрольными пунктами. Для прогнозирования пассажиропотока и оптимальности принятых объемно-планировочных решений станций метрополитена необходимо экспериментальным путем исследовать зависимости движения пассажиров на всех топологиях станций.

Программный комплекс Pathfinder является инструментом для моделирования пассажиропотока и эвакуации в зданиях и сооружениях по индивидуально-поточной модели движения, позволяет задавать алгоритмы поведения людей. В работе [25] использовано программное обеспечение Pathfinder для моделирования эвакуации на станции метрополитена. Результаты показали, что основное влияние на станции метрополитена на движение пассажиров оказывают лестничные сходы, эскалаторы и соответствующая им ширина. Работа [26] направлена на моделирование эвакуации пассажиров в ПК Pathfinder при различных условиях и параметрах: регистрировались скорость движения пассажиров, количество людей, проходящих через различные топологии. В исследовании [27] с использованием индивидуально-поточной модели движения пасса-

жиров в ПК Pathfinder приведено, что на эвакуацию со станции метрополитена оказывают влияние тип платформы, габариты лестниц, эскалаторов и геометрические параметры самой станции. Результаты математического моделирования являются необходимыми для обоснования принятых объемно-планировочных решений станций метрополитена на стадии проектирования и для предложений управления и организации движения пассажиров при эксплуатационном режиме и при возникновении любой чрезвычайной ситуации, в том числе при пожаре.

Целью статьи является обоснование метода математического моделирования пассажиропотоков для разработки оптимальных объемно-планировочных решений пересадочных станций метрополитена для обеспечения комфортного пребывания пассажиров при эксплуатационном режиме работы станции и в часы пиковой загруженности и безопасной эвакуации пассажиров и персонала при возникновении пожара.

Материалы и методы

В качестве примера обоснования объемно-планировочных решений станции метрополитена в ПК Pathfinder разработана модель пересадочной станции, состоящая из станции «Существующая» островного типа, построенная до 2000 г. и современной станции «Новая» бокового типа (рис. 2).

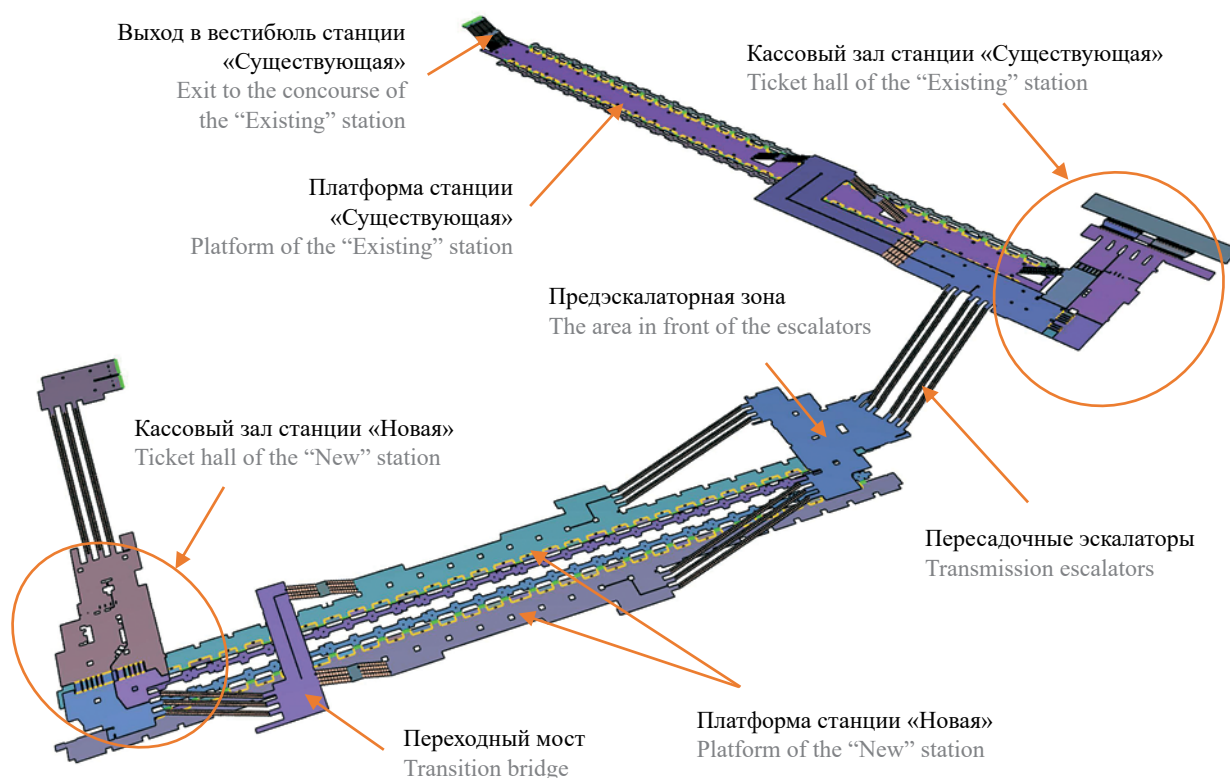


Рис. 2. Модель типовой пересадочной станции в ПК Pathfinder

Fig. 2. Model of a typical interchange station in the software package Pathfinder

Существующие пассажирские платформы проектировались островного типа преимущественно с двумя рассредоточенными эвакуационными выходами (через вестибюли). Выход на пересадку главным образом осуществляется через лестничный сход, располагающийся по центру платформы станции «Существующая». Современные пассажирские платформы проектируются бокового типа с двумя эвакуационными выходами (через вестибюль и пересадочную станцию). Выход на пересадку в основном осуществляется через эскалаторы, располагающиеся по центру каждой из платформ и ведущие в предэскалаторную пересадочную зону. Выход в вестибюль с боковых платформ осуществляется через переходной мост, ведущий по эскалатору в вестибюль. Для пересадочной станции приняты усредненные значения пассажиропотоков на входы, выходы и пересадки (рис. 3). При разработке математической модели в ПК Pathfinder и последующем моделировании использовались параметры движения людей, представленные в Методике⁴. Следовательно, результаты, полученные при моделировании, являются оценочными, так как в настоящее время отсутствуют данные по составу людского потока и по параметрам движения людских потоков на станциях метрополитена по различным участкам пути (платформа, эскалатор, лестничные сходы, турникеты, двери типа «Метро»).

⁴ Приказ МЧС РФ от 30 июня 2009 г. № 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности».

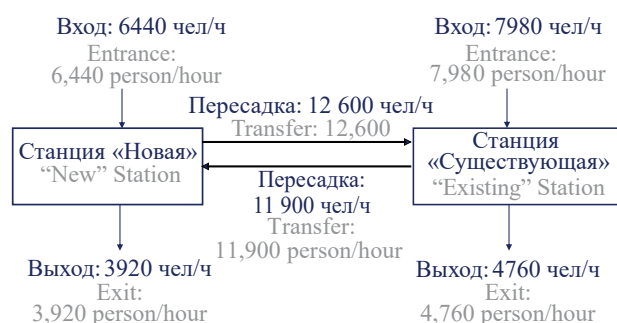


Рис. 3. Значения пассажиропотоков на входы, выходы и пересадки

Fig. 3. Values of passenger flows to entrances, exits and transfers

Пути движения пассажиров по типовой пересадочной станции согласно исходным объемно-планировочным решениям представлены на рис. 4. Согласно п. 7.1.3 СП 59.13330.2020⁵, расчетное количество маломобильных групп населения (МГН) М2 и М3 принято 5 % от общего числа, а людей группы М4 — 2 чел, согласно п. 5.16.6.16¹.

При спуске с пересадочных эскалаторов пассажиры распределяются по первому и второму пути станции «Новая», образуя пересечение потоков с пассажирами, двигающимися на пересадку в сторону станции «Существующая» и объединяющимися с потоком пассажиров, вошедших в кассовый зал вестибюля станции «Существующая». Образовавшееся пересечение потока противоречит требованиям¹.

Скорость выхода пассажиров из двери вагона определялась по формуле:

⁵ СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения.

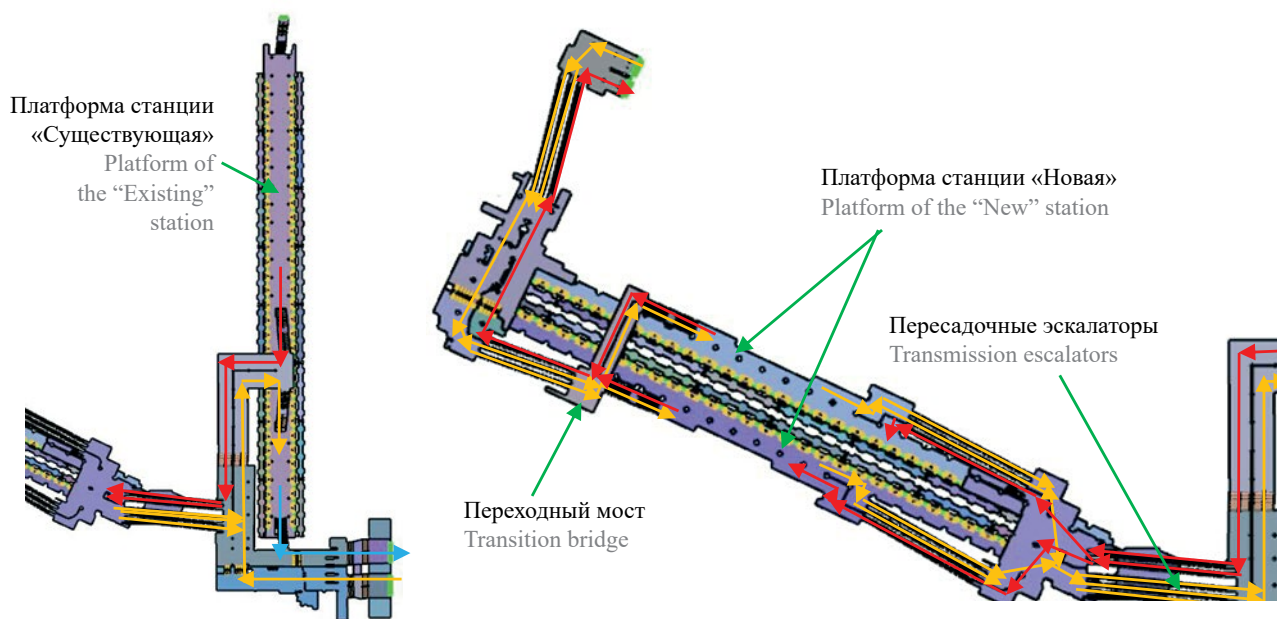


Рис. 4. Пути движения пассажиров по исходным объемно-планировочным решениям

Fig. 4. Ways of passenger traffic on the initial space-planning solutions

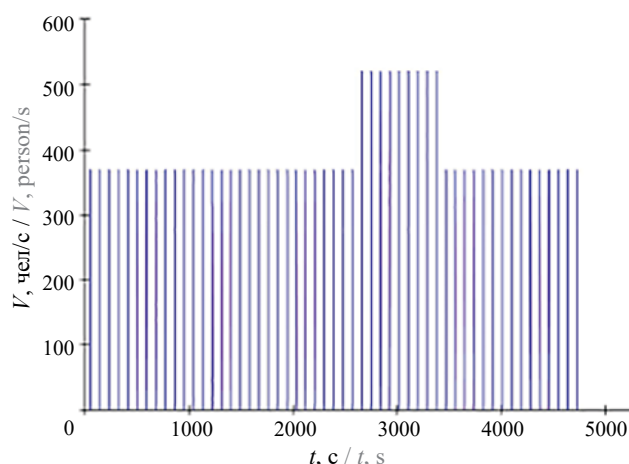


Рис. 5. Зависимость скорости выхода пассажиров из двери поезда

Fig. 5. Dependence of exit speed of passengers from the door of the train

$$q_i = \frac{N_n}{t_b \cdot n_{\text{п}} \cdot n_{\text{в}} \cdot n_{\text{д}} \cdot 2}, \quad (2)$$

где $N_{\text{п}}$ — количество пассажиров, выходящих из поезда, чел;

$t_{\text{в}}$ — время высадки пассажиров из вагона, с;

$n_{\text{п}}$ — количество пар поездов в час;

$n_{\text{в}}$ — количество вагонов в составе;

$n_{\text{д}}$ — количество дверей в вагоне.

Скорость входа пассажиров на станцию определялась по формуле:

$$q_i = \frac{Q_{\text{вх}}}{3600}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{вх}}$ — пассажиропоток входа на станцию, чел.

Графическое отображение задания зависимости скорости выхода пассажиров из двери поезда в ПК Pathfinder представлено на рис. 5. Принцип моделирования входа и выходов пассажиров из поезда пред-

ставлен на рис. 6. Интервал времени на выход пассажиров из вагона — 10 с, интервал времени на вход пассажиров в вагон — 10 с. С учетом 40 пар поездов в час время между прибытиями поездов — 90 с. Время моделирования — 80 мин, время наступления часа пика — 2550 с, продолжительность пика — 900 с.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования пассажиропотока с исходными объемно-планировочными решениями

На рис. 7 представлены результаты моделирования пассажиропотока в утренний час пик на 500 и 1000-й с от начала расчета по исходным объемно-планировочным решениям. На 1000-й с образуется скопление пассажиров с плотностью порядка 5 чел/м² на лестничном сходе, расположенном на переходе между двумя станциями и ведущем в сторону станции «Существующая».

Результаты моделирования количества пассажиров в кассовых залах вестибюлей и на платформах, согласно исходным объемно-планировочным решениям, показали, что количество людей, находящихся на станциях, остается постоянным до начала 15-минутного пика (рис. 8). В интервале времени 15-минутного пика лестница, ведущая на станцию «Существующая», не обеспечивает требуемую пропускную способность и происходят скопления на всех топологиях, включая, в первую очередь, вестибюль станции «Существующая».

К «узкому» месту прототипа пересадочной станции относится лестница при переходе со станции «Новая» и при проходе пассажиров, вошедших в кассовый зал станции «Существующая», которая не обеспечивает требуемую пропускную способность. Также установлено, что необходимо регулировать пассажиропотоки ограждениями для их

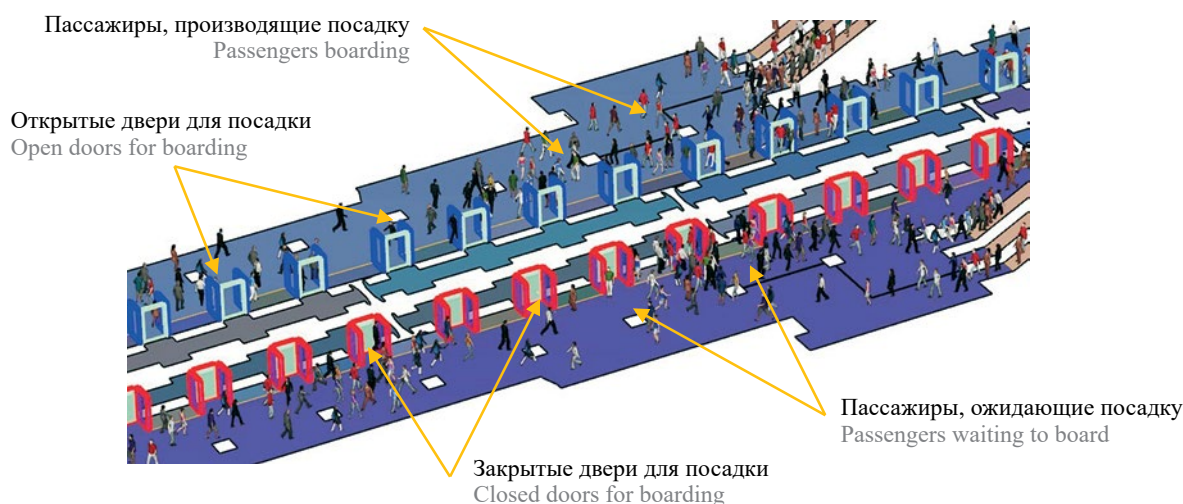


Рис. 6. Принцип моделирования входа и выходов пассажиров из поезда

Fig. 6. Principle of modelling of entry and exit of passengers from the train

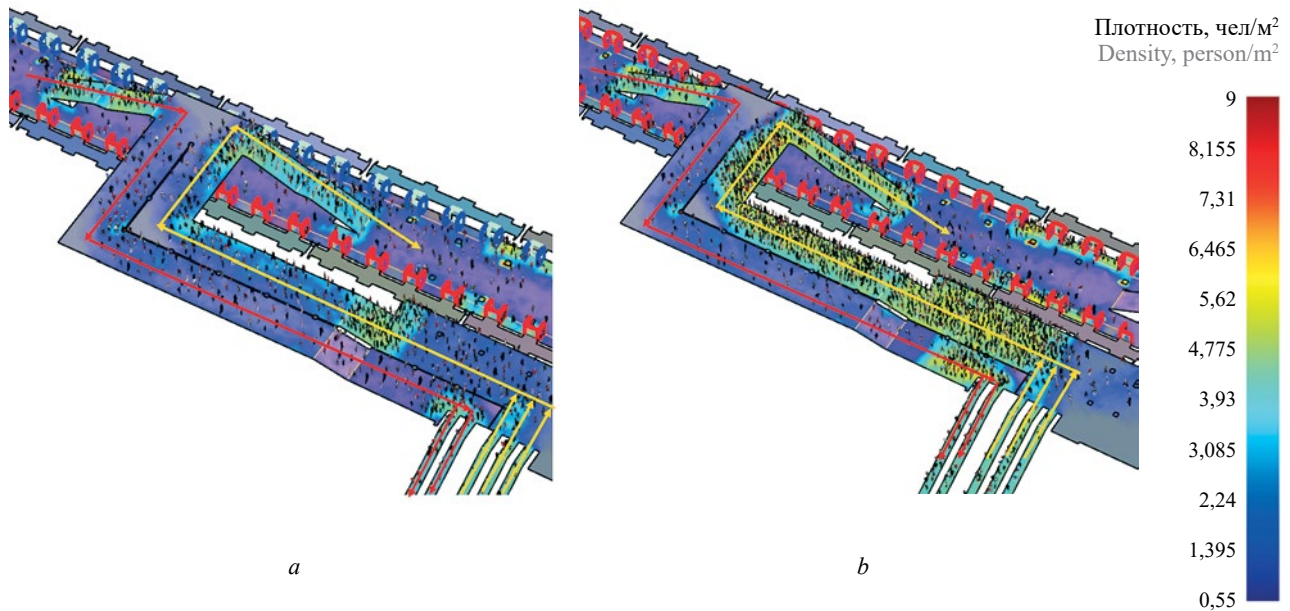


Рис. 7. Результаты моделирования пассажиропотока на 500-й (a) и 1000-й (b) с по исходным объемно-планировочным решениям на пересадке «Существующей» станции

Fig. 7. The results of modelling of passenger flow at 500 (a) and 1,000 (b) seconds by the initial space-planning solutions at the interchange “Existing” station

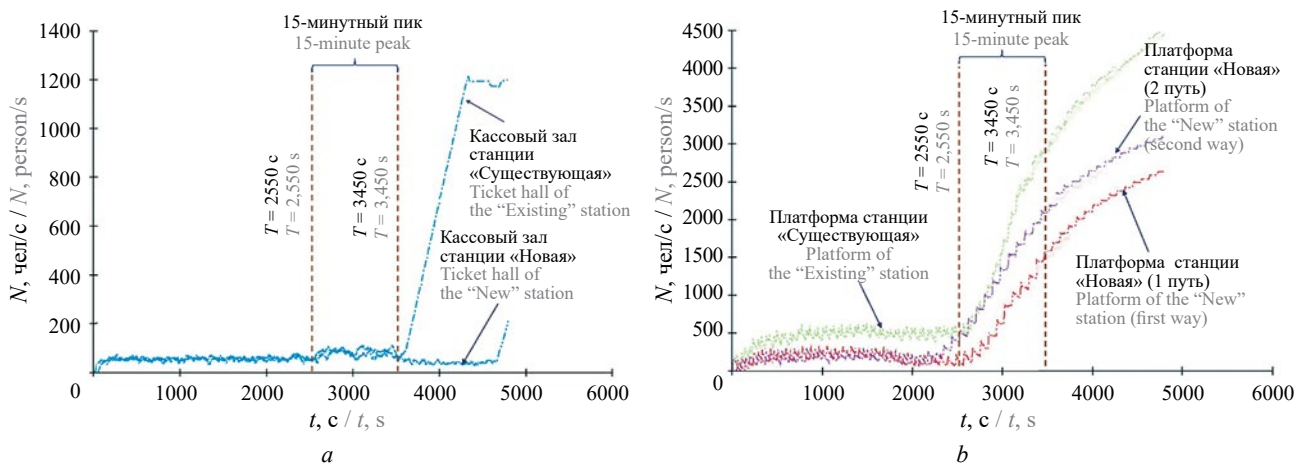


Рис. 8. Количество пассажиров согласно исходным объемно-планировочным решениям: a — в кассовых залах; b — на платформах

разделения и оптимально принимать направления движения по лестницам и эскалаторам.

Результаты моделирования пассажиропотока с оптимизированными объемно-планировочными решениями

Методом математического моделирования проведены оптимизационные мероприятия пассажиропотоков типовой пересадочной станции: увеличены габариты лестницы, ведущей на станцию «Существующая», установлены ограждения для разделения пассажиропотоков и приняты оптимальные направления движения пассажиров по лестницам и эскалаторам (рис. 9). Пассажиры, вышедшие с поездов на двух путях станции «Новая» и поднимающиеся на станцию «Существующая» по трем

пересадочным эскалаторам, объединяются с потоком пассажиров, вошедших в кассовый зал вестибюля станции «Существующая». В результате на предэскалаторной зоне не возникает пересечения потоков. Таким образом, оптимизированные объемно-планировочные решения выполняют условие непересечения потока, регламентированное в СП¹.

На рис. 10 представлены результаты моделирования пассажиропотока в утренний час пик на 500 и 1000-й с от начала расчета по оптимизированным объемно-планировочным решениям. Скопление пассажиров с плотностью порядка 5 чел/м² отмечается только на лестнице, ведущей на станцию «Существующая», при этом обеспечивается свободное и безопасное перемещение пассажиров.

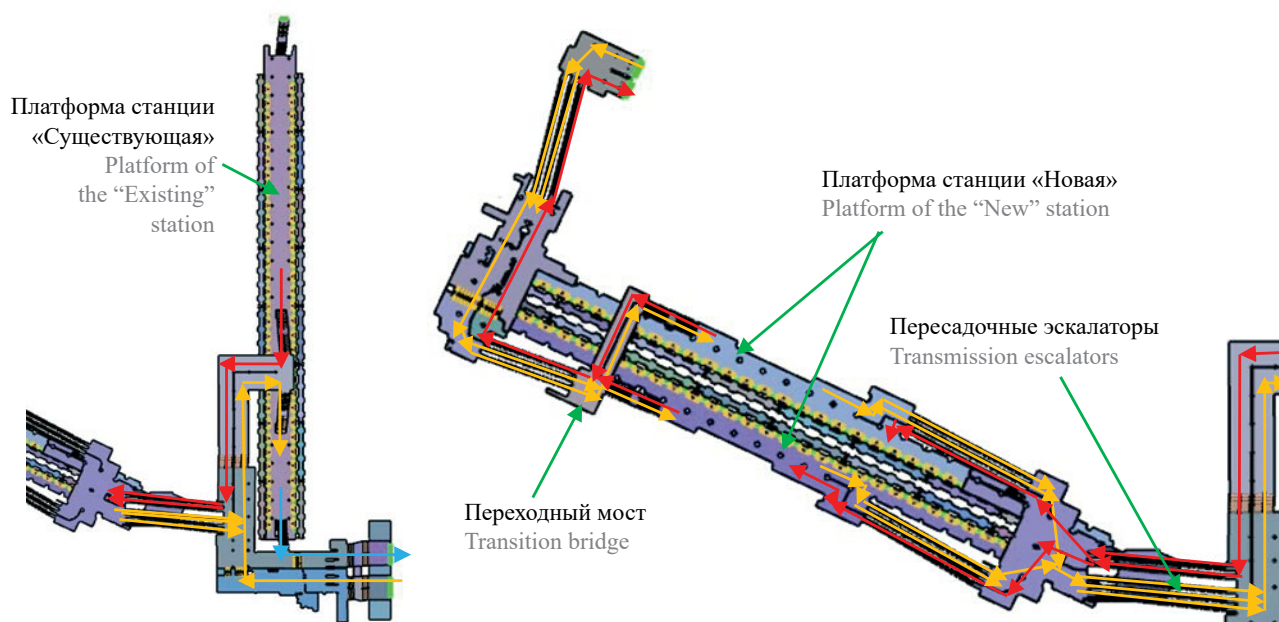


Рис. 9. Пути движения пассажиров по оптимизированным объемно-планировочным решениям
Fig. 9. Passenger traffic routes along the optimized space-planning solutions

Результаты моделирования количества пассажиров в кассовых залах вестибюлей и на платформах, согласно оптимизированным объемно-планировочным решениям, показали, что количество людей на данных топологиях остается постоянным до начала 15-минутного пика (рис. 11). В интервале времени 15-минутного пика происходит увеличение числа пассажиров и в кассовых залах вестибюлей, и на платформах. По его окончании количество людей стабилизируется без образования скоплений.

Моделирование эвакуации пассажиров со станции метрополитена с оптимизированными объемно-планировочными решениями

Рассмотрен сценарий эвакуации пассажиров при возникновении пожара в подвагонном пространстве центрального вагона прибывающего поезда на платформу станции «Существующая» (рис. 12). Для моделирования распространения опасных факторов пожара

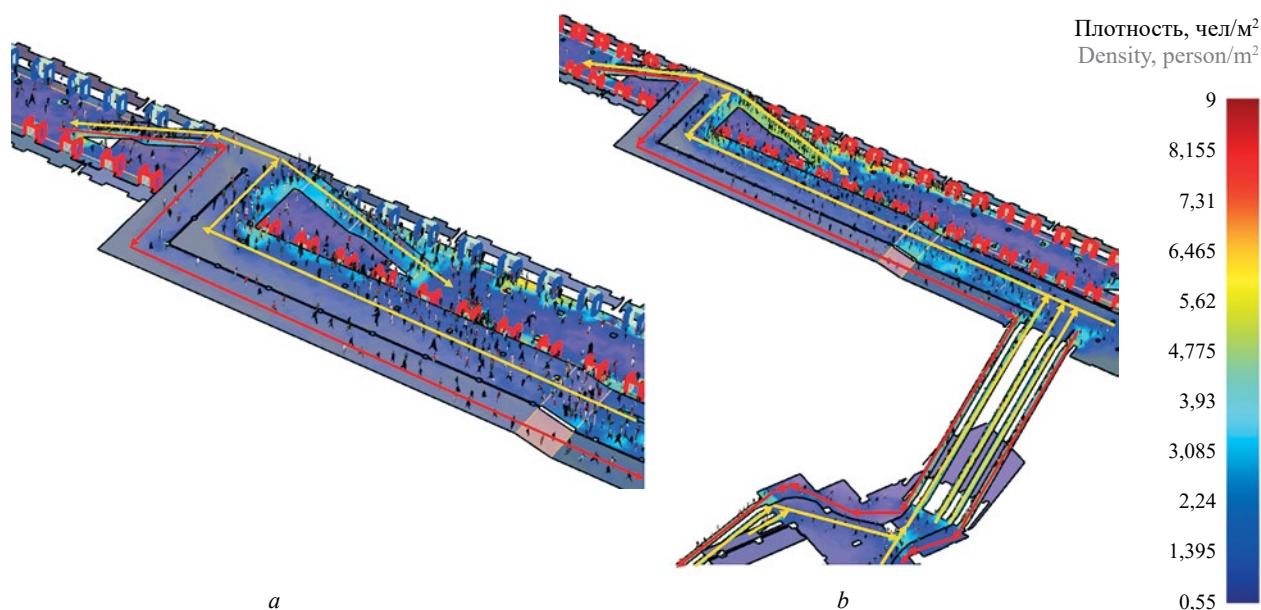


Рис. 10. Результаты моделирования пассажиропотоков на 500 (a) и 1000-й (b) с по оптимизированным объемно-планировочным решениям
Fig. 10. The results of modelling of passenger flow at 500 (a) and 1,000 (b) seconds by optimized space-planning solutions

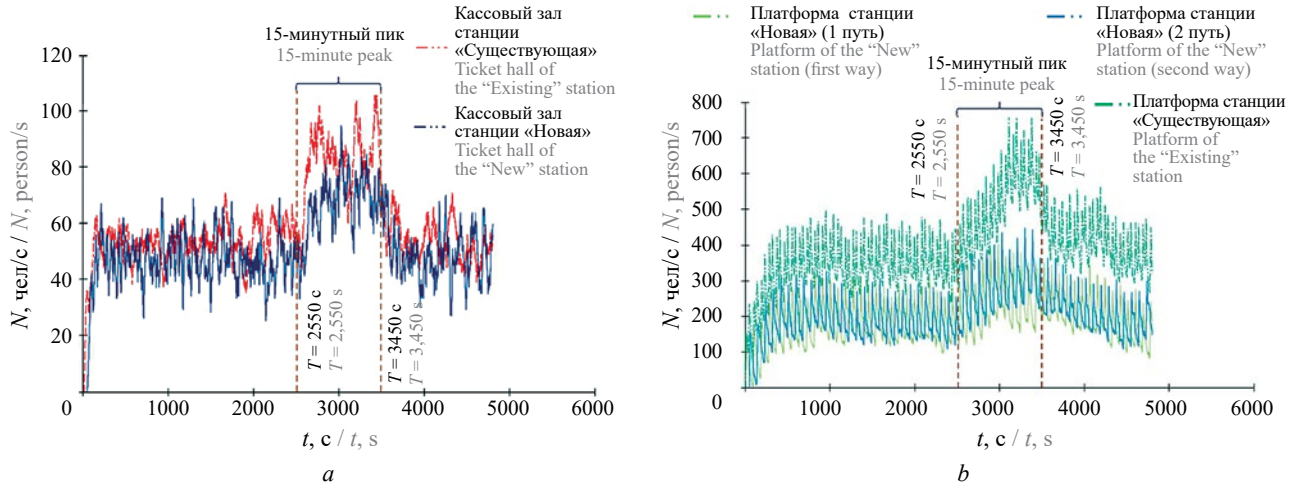


Рис. 11. Количество пассажиров согласно оптимизированным объемно-планировочным решениям: *a* — в кассовых залах; *b* — на платформах

Fig. 11. The number of passengers according to the optimized space-planning solutions: *a* — in the ticket halls; *b* — on the platforms

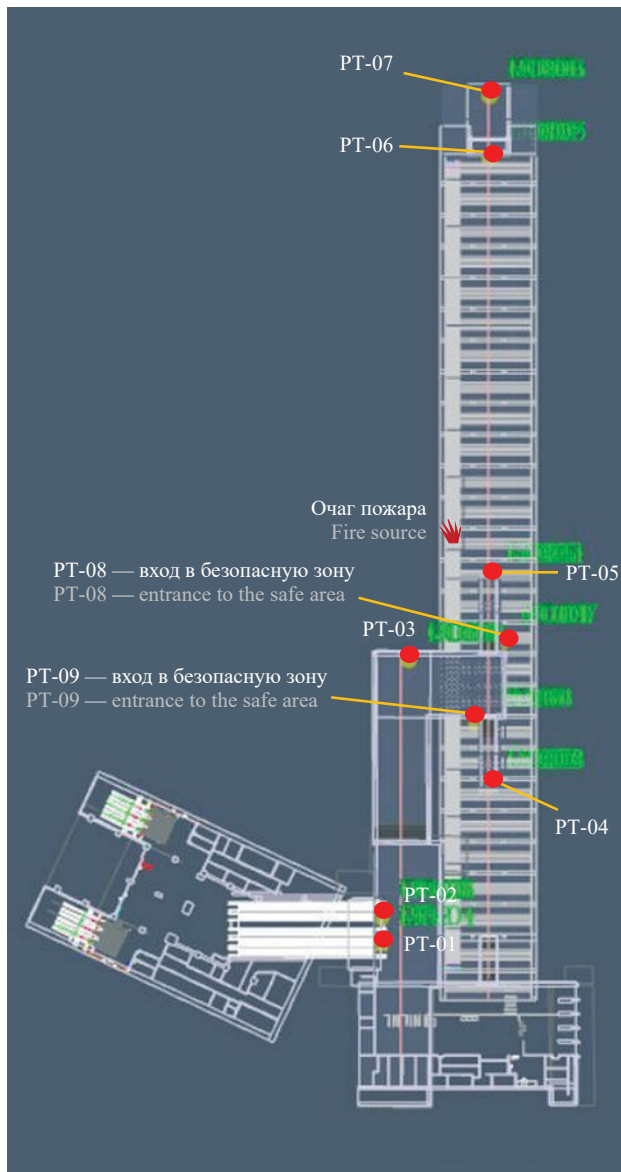


Рис. 12. Расположение расчетных точек на расчетной модели

Fig. 12. Location of calculation points on the design model

использовался ПК PyroSim, представляющий собой графический пользовательский интерфейс для FDS.

Принято, что время возникновения пожара в вагоне поезда — 2910 с от начала моделирования пассажиропотока. Со скоростью движения поезда в аварийном режиме 45 км/ч и с принятым расстоянием 2,9 км между станциями время прибытия поезда на станцию «Существующая» с момента его возгорания — 4,5 мин. В течение этого времени пассажиры скапливаются на платформе станции. Время прибы-

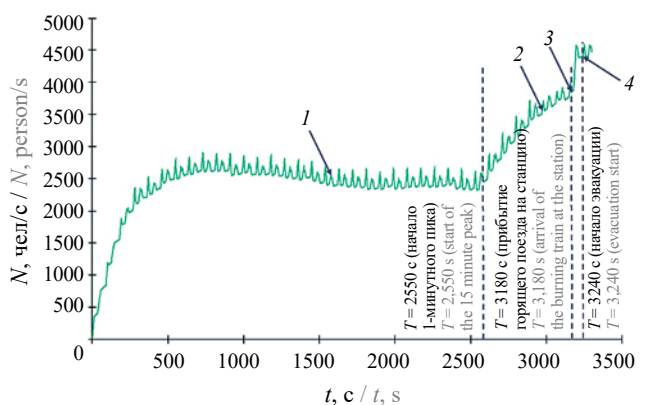


Рис. 13. Зависимость количества пассажиров от времени на пересадочной станции до начала эвакуации: 1 — моделирование пассажиропотока на типовой пересадочной станции до начала 15-минутного пика; 2 — эксплуатационный режим работы станции в течение 15-минутного пика; 3 — 3180-я с: прибытие горящего поезда на станцию «Существующая», выход пассажиров на станцию из поезда; 4 — 3240-я с: начало эвакуации пассажиров

Fig. 13. Dependence of the number of passengers from the time at the interchange station before the beginning of the evacuation: 1 — simulation of passenger flow at a typical transfer station before the start of the 15-minute peak; 2 — operating regime of the station during the 15-minute peak; 3 — 3180 second: arrival of the burning train at the station “Existing” platform, exit of passengers to the station from the train; 4 — 3240 second: start of passenger evacuation

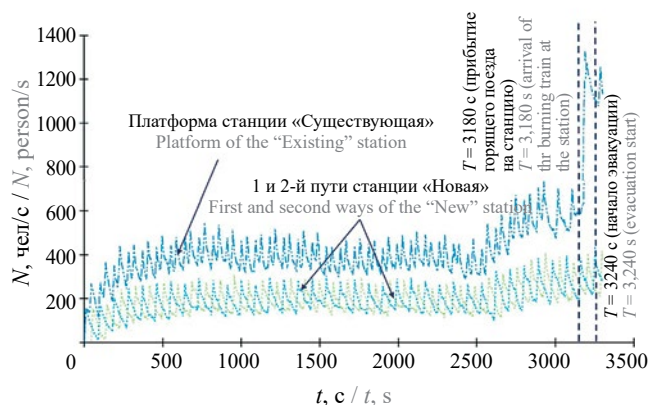


Рис. 14. Зависимость количества пассажиров от времени на платформах станции «Существующая» и «Новая»

Fig. 14. Dependence of the number of passengers from the time on the platforms of the stations "Existing" and "New"

тия горящего поезда на станцию — 3180-я с от начала моделирования пассажиропотока. Время начала эвакуации — 3240-я с согласно Методике⁴, время начало эвакуации пассажиров на платформе — 3240-я с, персонала — 90 с). Общее количество людей, находящихся на пересадочной станции на 3240-й с, — 4409 чел.

Количество людей, находящихся в горящем поезде, принято на основании максимальной вме-

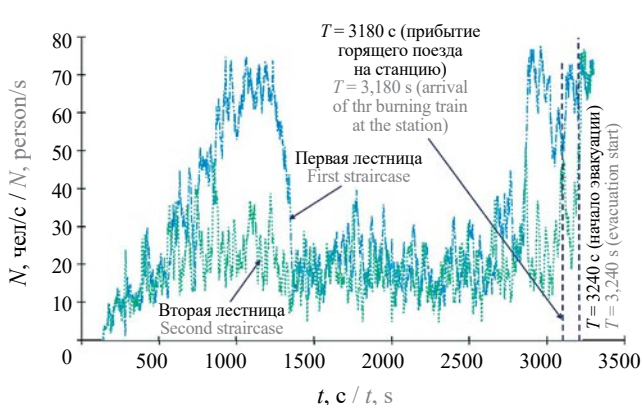


Рис. 15. Зависимость количества пассажиров от времени на лестницах, ведущих на платформу станции «Существующая»

Fig. 15. Dependence of the number of passengers from the time on the stairs leading to the platform of the station "Existing"

стимости поезда в соответствии с п. 5.2.3.¹ — 1517 чел, из которых 0,1 % МГН группы М4 — по 1 чел в первом и последнем вагонах.

Зависимость количества людей, находящихся на различных топологиях станции, от времени представлены на рис. 13–15.

По результатам моделирования на основных топологиях типовой пересадочной станции

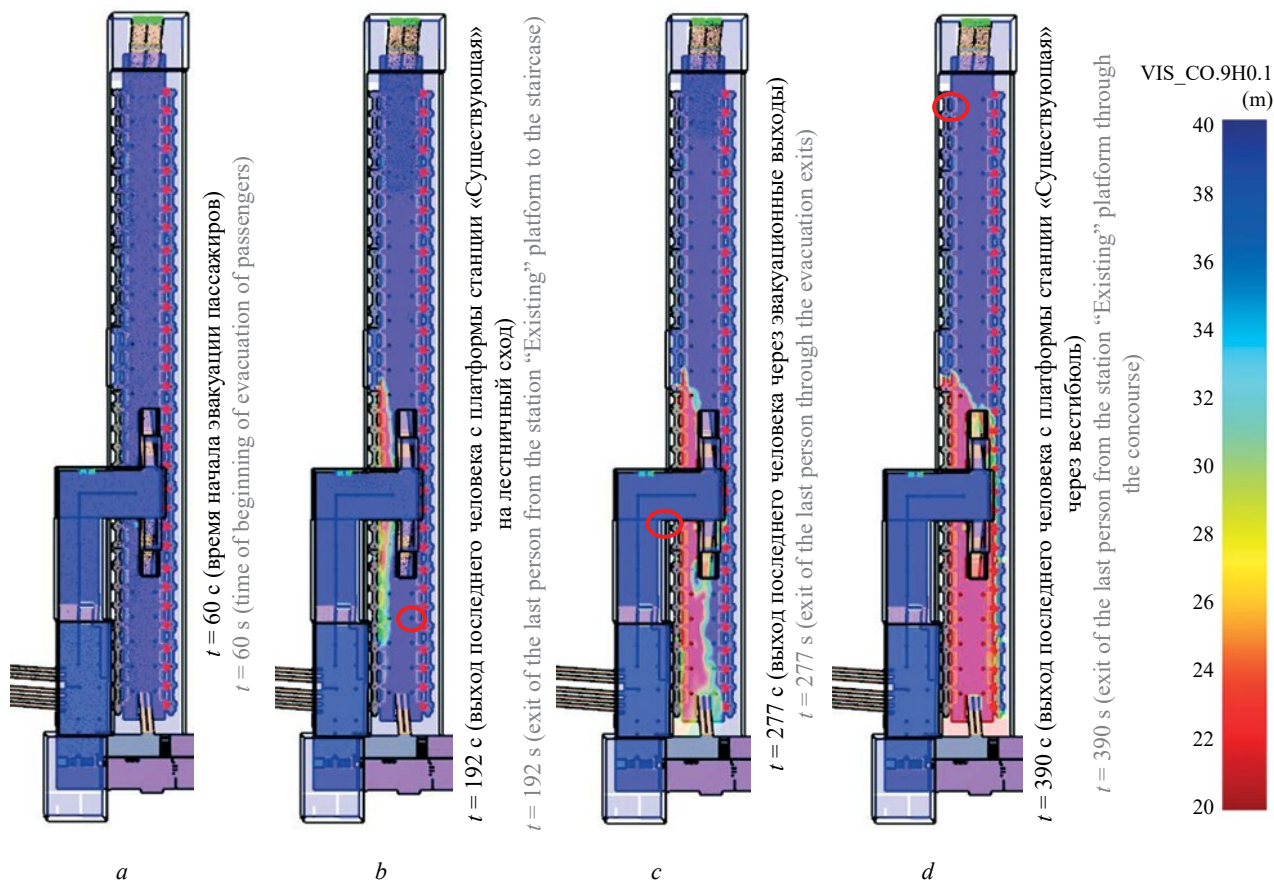


Рис. 16. Зависимость дистанции видимости на уровне рабочей зоны (1,7 м от платформы станции «Существующая» и переходе на платформу станции «Новая») от времени

Fig. 16. Dependence of visibility distance at the working area level (1.7 m from the station platform "Existing" and the passage to the station platform "New") from the time

Анализ условий безопасной эвакуации при пожаре
Analysis of safe evacuation conditions in case of fire

Расчетная точка Calculation point	Время эвакуации $t_{эв}$, мин Evacuation time $t_{эв}$, min	$0,8\tau_{бл}$, мин $0.8\tau_{bl}$, min	Выполнение условия $\tau_{эв} \leq 0,8\tau_{бл}$ Fulfillment of the condition $\tau_{эв} \leq 0.8\tau_{bl}$	
РТ-01	1,97	—	Выполнено Done	Выполнено Done
РТ-02	1,90	—	Выполнено Done	
РТ-03	4,62	—	Выполнено Done	
РТ-04	3,20	3,47	Выполнено Done	
РТ-05	4,03	4,13	Выполнено Done	
РТ-06	6,50	—	Выполнено Done	
РТ-07	7,75	—	Выполнено Done	
РТ-08	3,92	5,20	Выполнено Done	
РТ-09	—	2,80	Выполнено Done	

Примечание: $\tau_{бл}$ — время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.

Note: τ_{bl} — time of blocking evacuation routes by fire hazards.

в момент начала эвакуации (выход пассажиров из горящего поезда) принято 3684 пассажира и 296 работников метрополитена. На рис. 16 представлены зависимости дистанции видимости на уровне рабочей зоны на уровне платформы «Существующая» и на переходе на платформу станции «Новая».

Анализ условий безопасной эвакуации при пожаре в подвагонном пространстве центрального вагона прибывающего поезда на платформу станции «Существующая» представлен в таблице.

Результаты моделирования распространения опасных факторов пожара и эвакуации пассажиров показывают, что:

- опасная зона формируется в районе расположения вагона с очагом пожара и на участке платформы у лестничного схода, ведущего в сторону пересадки и эвакуационных выходов. За 390 с пассажиры и персонал, находящиеся на платформе станции «Существующая», покидают опасную зону;
- значения опасных факторов пожара в расчетных точках не достигают критических значений до момента завершения моделирования эвакуации через эти точки;
- общее расчетное время эвакуации пассажиров и персонала из типовой пересадочной станции — 814 с (13,57 мин).

Выводы

В результате работы получены следующие результаты:

1. Выполнен обзор и анализ научных работ в области прогнозирования пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах, в том числе метрополитенах. На основе полученных результатов выявлено, что математическое моделирование является перспективным методом, позволяющим принимать оптимальные объемно-планировочные решения станций, проводить расчеты по обеспечению условий безопасной эвакуации в определенный момент времени и определять всевозможные сценарии возникновения чрезвычайных ситуаций, в том числе пожаров, и режимов работы метрополитена.

2. Разработана и реализована математическая модель типовой пересадочной станции для определения оптимальных объемно-планировочных решений и расчета безопасной эвакуации пассажиров при возникновении пожара. Отличительной особенностью математической модели является задание алгоритмов поведения пассажиров исходя из значений пассажиропотоков и возможность получения точного числа людей, находящихся на всех топологиях станции в момент начала эвакуации.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в предложении метода для анализа принимаемых объемно-планировочных решений

не только транспортно-пересадочных узлов, но и для любых общественных транспортных сооружений. Метод математического моделирования позволяет обосновать достаточность объемно-планировочных решений, оптимизировать пути движения пассажиров в зависимости от топологии и пассажиропотоков, определить количество людей на каждом элементе объекта, которые будут использоваться как исходные данные для расчетов эвакуации людей при чрезвычайной ситуации, в том числе при пожаре.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности использования мате-

матического моделирования в деятельности научных и проектных организаций для обоснования требований федеральных законов и иных нормативных документов по проектированию общественных и транспортно-пересадочных сооружений и обеспечения комфортного и безопасного нахождения людей на объектах.

На основе данного исследования в новой редакции¹ СП 120.13330.2022 «Метрополитены» внесены изменения, определяющие, что расчетная численность пассажиров, эвакуирующихся со станции при пожаре, определяется на основе математического моделирования пассажиропотоков в час пик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Liang X., Qin H., Xie M.* Simulation study of passenger flow characteristics in subway passage // DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. 2016. DOI: 10.12783/dtcse/cmsam2016/3565
2. *Yang X., Yang X., Pan F., Kang Y., Zhang J.* The effect of passenger attributes on alighting and boarding efficiency based on social force model // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. Vol. 565. P. 125566. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125566
3. *Lei W., Li A., Gao R., Hao X., Deng B.* Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2012. Vol. 391. Issue 22. P. 5355–5365. DOI: 10.1016/j.physa.2012.06.033
4. *Авдеев В.С.* Распределение пассажиропотока на примере транспортной системы Московского метрополитена // Этносоциум и межнациональная культура. 2020. № 147 (9). С. 36–40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44534003>
5. *Zou Q., Yao X., Zhao P., Dou F., Yang T.* Managing recurrent congestion of subway network in peak hours with station inflow control // Journal of Advanced Transportation. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2018/6931025
6. *Peimbert M., Alcaraz L.D.* Where environmental microbiome meets its host: Subway and passenger microbiome relationships // Molecular Ecology. 2022. Vol. 32. Issue 10. Pp. 2602–2618. DOI: 10.1111/mec.16440
7. *Wang L., Chen Y., Wang C.* Research on evolutionary model of urban rail transit vulnerability based on computer simulation // Neural Computing and Applications. 2020. Vol. 32. Issue 1. Pp. 195–204. DOI: 10.1007/s00521-018-3793-6
8. *Jia F., Jiang X., Li H., Yu X., Xu X., Jiang M.* Passenger-oriented subway network capacity calculation and analysis based on simulation // Transportation Letters. 2021. Vol. 13. Issue 8. Pp. 555–567. DOI: 10.1080/19427867.2020.1741778
9. *Xue H., Jia L., Guo J.* Adaptive multilevel collaborative passenger flow control in peak hours for a subway line // Advances in Mathematical Physics. 2020. Vol. 2020. Issue 3. Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2020/3862157
10. *Кударов П.С.* Математические модели формирования входного пассажиропотока станций метрополитена : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 16 с.
11. *Константинова Т.Ю.* Методы и средства оптимизации режимов работы устройств станций и узлов метрополитена : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 24 с.
12. *Zhang B., Xu Z.S., Zhao Q.W., Liu Y.Y.* A study on theoretical calculation method of subway safety evacuation // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 597–604. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.085
13. *Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment G.* Modelling of heat energy recovery potential form underground railways with nearby vertical ground heat exchangers in an urban environment // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 147. Pp. 1059–1069. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.118
14. *Wu J., Shen F.* Experimental study on the effects of ventilation on smoke movement in tunnel fires // International Journal of Ventilation. 2016. Vol. 15. Issue 1. Pp. 94–103. DOI: 10.1080/14733315.2016.1173295
15. *He Z., Chen Y., Sun L., Zhong J., Zhu Y.* Identifying station-link correlation for target passenger flow control in subway network // 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2018. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569533
16. *Ембұлаев В.Н.* Вероятностный метод определения поездок пассажиров на маршруте по данным входа и выхода // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2019. № 11 (2). С. 58–69. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/058-069
17. *Leng B., Zeng J., Xiong Z., Lv W., Wan Y.* Probability tree based passenger flow prediction and its application to the Beijing subway system // Frontiers of Computer Science. 2013. Vol. 7. Issue 2. Pp. 195–203. DOI: 10.1007/s11704-013-2057-y

18. Xu X., Li H., Liu J., Ran B., Qin L. Passenger flow control with multi-station coordination in subway networks: algorithm development and real-world case study // *Transportmetrica B*. 2019. Vol. 7. Issue 1. Pp. 446–472. DOI: 10.1080/21680566.2018.1434020
19. Ling X., Huang Z., Wang C., Zhang F., Wang P. Predicting subway passenger flows under different traffic conditions // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13. Issue 8. Pp. 1–23. DOI: 10.1371/journal.pone.0202707
20. Sun Y., Zhang G., Yin H. Passenger flow prediction of subway transfer stations based on nonparametric regression model // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2014. Vol. 2014. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2014/397154
21. Лапишин В.А. Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры // *Молодой ученый*. 2020. № 291. С. 33–36. URL: <https://moluch.ru/archive/291/65976/>
22. Jiaojiao X., Jin L. Simulation study on emergency evacuation of metro stations in fire degradation mode // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1187. Issue 5. P. 052072. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/5/052072
23. Xie C., Li X., Chen B., Lin F., Lin Y., Huang H. Subway sudden passenger flow prediction method based on two factors: case study of the Dongsishitiao station in Beijing // *Journal of Advanced Transportation*. 2021. Vol. 2021. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/5577179
24. Исаевич И.И. Разработка основ многовариантного анализа объемно-планировочных решений станций и пересадочных узлов метрополитена на основе моделирования закономерного движения людских потоков : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. 18 с.
25. Qin J., Liu C., Huang Q. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on pathfinder // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 21. P. 100677. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100677
26. Wang F. Multi-scenario simulation of subway emergency evacuation based on multi-agent // *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20. Issue 2. Pp. 387–397. DOI: 10.2507/IJSIMM20-2-CO8
27. Huang Y., Lei J., Wang K. The influence of obstructions of evacuation node on subway stations fire evacuation capability // *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2018)*. 2018. DOI: 10.2991/rac-18.2018.42

REFERENCES

1. Liang X., Qin H., Xie M. Simulation study of passenger flow characteristics in subway passage. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. 2016. DOI: 10.12783/dtcse/cmsam2016/3565
2. Yang X., Yang X., Pan F., Kang Y., Zhang J. The effect of passenger attributes on alighting and boarding efficiency based on social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021; 565:125566. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125566
3. Lei W., Li A., Gao R., Hao X., Deng B. Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012; 391(22):5355–5365 DOI: 10.1016/j.physa.2012.06.033
4. Avdeev V.S. Distribution of passenger traffic on the example of the transport system of the moscow metro. *Ethno-society and Interethnic Culture*. 2020; 147(9):36–40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44534003> (rus).
5. Zou Q., Yao X., Zhao P., Dou F., Yang T. Managing recurrent congestion of subway network in peak hours with station inflow control. *Journal of Advanced Transportation*. 2018; 2018:1–16. DOI: 10.1155/2018/6931025
6. Peimbert M., Alcaraz L.D. Where environmental microbiome meets its host: Subway and passenger microbiome relationships. *Molecular Ecology*. 2022; 32(10):2602–2618. DOI: 10.1111/mec.16440
7. Wang L., Chen Y., Wang C. Research on evolutionary model of urban rail transit vulnerability based on computer simulation. *Neural Computing and Applications*. 2020; 32(1):195–204. DOI: 10.1007/s00521-018-3793-6
8. Jia F., Jiang X., Li H., Yu X., Xu X., Jiang M. Passenger-oriented subway network capacity calculation and analysis based on simulation. *Transportation Letters*. 2021; 13(8):555–567. DOI: 10.1080/19427867.2020.1741778
9. Xue H., Jia L., Guo J. Adaptive multilevel collaborative passenger flow control in peak hours for a subway line. *Advances in Mathematical Physics*. 2020; 2020(3):1–16. DOI: 10.1155/2020/3862157
10. Kudarov R.S. *Mathematical models of formation of entrance passenger flow in metro stations :abstract of the dissertation of the Candidate of technical sciences*. Saint Petersburg, 2009; 16. (rus).
11. Konstantinova T.Yu. *Methods and means to optimize operation modes of stations and subway nodes : abstract of Ph.D. in Technical Sciences*. Saint Petersburg, 2006; 24. (rus).
12. Zhang B., Xu Z.S., Zhao Q.W., Liu Y.Y. A study on theoretical calculation method of subway safety evacuation. *Procedia Engineering*. 2014; 71:597–604. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.085
13. Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment G. Modelling of heat energy recovery potential form underground railways with nearby vertical ground heat exchangers in an urban environment. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 147:1059–1069. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.118
14. Wu J., Shen F. Experimental study on the effects of ventilation on smoke movement in tunnel fires. *International Journal of Ventilation*. 2016; 15(1):94–103. DOI: 10.1080/14733315.2016.1173295

15. He Z., Chen Y., Sun L., Zhong J., Zhu Y. Identifying station-link correlation for target passenger flow control in subway network. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2018. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569533
16. Embulaev V.N. A probabilistic method of determining a travel route according to the input and output. *Territory of new opportunities. Bulletin of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2019; 11(2):58-69. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/058-069 (rus).
17. Leng B., Zeng J., Xiong Z., Lv W., Wan Y. Probability tree based passenger flow prediction and its application to the Beijing subway system. *Frontiers of Computer Science*. 2013; 7(2):195-203. DOI: 10.1007/s11704-013-2057-y
18. Xu X., Li H., Liu J., Ran B., Qin L. Passenger flow control with multi-station coordination in subway networks: algorithm development and real-world case study. *Transportmetrica B*. 2019; 7(1):446-472. DOI: 10.1080/21680566.2018.1434020
19. Ling X., Huang Z., Wang C., Zhang F., Wang P. Predicting subway passenger flows under different traffic conditions. *PLoS ONE*. 2018; 13(8):1-23. DOI: 10.1371/journal.pone.0202707
20. Sun Y., Zhang G., Yin H. Passenger flow prediction of subway transfer stations based on nonparametric regression model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2014; 2014(1):1-8. DOI: 10.1155/2014/397154
21. Lapshin V.A. Peculiarities of modeling the passenger flow of transport infrastructure facilities. *Young Scientist*. 2020; 291:33-36. URL: <https://moluch.ru/archive/291/65976/> (rus).
22. Jiaojiao X., Jin L. Simulation study on emergency evacuation of metro stations in fire degradation mode. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1187(5):052072. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/5/052072
23. Xie C., Li X., Chen B., Lin F., Lin Y., Huang H. Subway sudden passenger flow prediction method based on two factors: Case study of the Dongsishitiao station in Beijing. *Journal of Advanced Transportation*. 2021; 2021:1-8. DOI: 10.1155/2021/5577179
24. Isayevich I.I. *Development of foundations for the multivariant analysis of the space-planning solutions of metro stations and interchange hubs on the basis of simulation of the regular motion of human flows : abstract of Ph.D. in Technical Sciences*. Moscow, 1990; 18. (rus).
25. Qin J., Liu C., Huang Q. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020; 21:100677. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100677
26. Wang F. Multi-scenario simulation of subway emergency evacuation based on multi-agent. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021; 20(2):387-397. DOI: 10.2507/IJSIMM20-2-CO8
27. Huang Y., Lei J., Wang K. The influence of obstructions of evacuation node on subway stations fire evacuation capability. *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2018)*. 2018. DOI: 10.2991/rac-18.2018.42

Поступила 03.03.2023, после доработки 24.03.2023;

принята к публикации 06.04.2023

Received March 3, 2023; Received in revised form March 24, 2023;

Accepted April 6, 2023

Информация об авторах

ШАБУНИНА Дарья Евгеньевна, научный сотрудник, ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров», Россия, 188691, г. Кудрово, ул. Областная, 9; ORCID: 0000-0002-6155-060X; e-mail: shabunina@ciofp.ru

ДАНИЛОВ Андрей Игоревич, генеральный директор, ООО «Центр исследований опасных факторов пожаров», Россия, 188691, г. Кудрово, ул. Областная, 9; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

ГРАВИТ Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; РИНЦ ID: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; Scopus AuthorID: 56826013600; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Daria E. SHABUNINA, Researcher, LLC "Fire Hazard Research Center", Oblastnaya St., 9, Kudrovo, 188691, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6155-060X; e-mail: shabunina@ciofp.ru

Andrey I. DANILOV, General Manager, LLC "Fire Hazard Research Center", Oblastnaya St., 9, Kudrovo, 188691, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9162-7073; e-mail: danilov@ciofp.ru

Marina V. GRAVIT, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya St., 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 667288; ResearcherID: B-4397-2014; Scopus AuthorID: 56826013600; ORCID: 0000-0003-1071-427X; e-mail: marina.gravit@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.