



Research Article


Received: April 2, 2024

Accepted: April 16, 2024

Published: April 23, 2024

ISSN 2304-6295

Passenger speeds as a function of human traffic density in peak hours of subway operation

Shabunina, Daria Evgenievna^{1,2*} Kudryavtsev, Vadim Sergeevich^{1,2} Chizhikov, Vladimir Petrovich¹ 

¹ LLC «Center for Research of Fire Hazardous Factors», St. Petersburg, Russian Federation; d.shabunina00@gmail.com (S.D.E.); kudriavtcevvadim00@gmail.com (K.V.S.); yovach1952@gmail.com (C.V.P.)

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; Correspondence: email d.shabunina00@gmail.com; contact phone [+79221559844](tel:+79221559844)

Keywords:

Subway; Passenger movement; Experimental study; Density of human traffic; Mobility group of passengers

Abstract:

The object of research is the movement of passengers at the subway station in peak hours. The work aims to obtain dependence of passenger speeds of different mobility groups on the human traffic density on a horizontal site, on the down staircase and on the up staircase in peak hours of subway operation. **Method.** To obtain the dependences of passenger speeds, experimental studies were conducted on observations of passenger traffic at loaded stations of St. Petersburg subway during the peak hours of station. The experimental data were processed using the least squares method (second-order polynomial model). **Results.** Mathematical dependences of passenger movement speeds of mobility groups M0-3, M2 and M3 on human traffic density were obtained. It was established that the dependences of passenger speeds on density given in the Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 1140 (allowed to be used for calculation of the operational regime of the subway) are overestimated on average by 75% on the horizontal site, by 20% on the downward stairway, by 40% on the upward stairway in comparison with the experimental speeds due to consideration of another type of traffic (evacuation) and not considering the features of the subway operation. The obtained dependences can be used as input data in the development of simulation model of passenger traffic in the assessment of space-planning solutions of the subway.

1 Введение / Introduction

Во всем мире наблюдается тенденция к укрупнению городов и агломераций вследствие перетока людей в мегаполисы, связанного с повышением профессиональных возможностей, качества жизни и сформированной инфраструктурой. Рост населения мегаполисов сопровождается повышенной востребованностью жилищного строительства. Следовательно, в крупных российских городах наблюдается тенденция роста этажности (средняя этажность на данный момент – 17-18) и плотности жилой застройки, что приводит к необходимости увеличения количества и качества работы транспортных средств [1]–[3]. Недостаточное внимание к развитию городского транспорта в мегаполисах ведет к падению уровня качества жизни населения, что способствует падению экономической привлекательности агломерации [4]–[6]. Таким образом, одной из первостепенных задач транспортного планирования является развитие транспортной инфраструктуры в условиях стремительного роста и плотности населения и формирования мегаполисов.

Shabunina, D.; Kudryavtsev, V.; Chizhikov, V.

Passenger speeds as a function of human traffic density in peak hours of subway operation; 2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11202. doi: 10.4123/CUBS.112.2



Метрополитен относится к самому эффективному виду общественного транспорта с точки зрения перевозимого количества пассажиров, что обуславливает его применение в крупных агломерациях. Пропускная и провозная способности систем метрополитена определяются исходя из расчетного (для проектируемых метрополитенов) или существующего (для реконструируемых или действующих метрополитенов) пассажиропотока [7]. Пассажиропоток – однонаправленное или разнонаправленное движение пассажиров по обозначенной траектории, определяемое как количество пассажиров, проходящих за единицу времени через рассматриваемую топологию [8], [9]. Пассажиропоток определяет условия эксплуатации станции в утренний, вечерний «час пик» и при эксплуатационном режиме работы метрополитена (межпиковый период). Проектные решения метрополитена должны подвергаться анализу безопасного и комфортного нахождения пассажиров в зависимости от предполагаемого входного пассажиропотока, при резком увеличении которого действующие станции могут столкнуться с проблемой перенасыщения и с невозможностью управления движением людского потока.

К основным критериям выбора объемно-планировочных решений (ОПР) зданий и сооружений относятся безопасность, комфорт и экономическая эффективность [10]. В работе [11] разработана многокритериальная модель оценки качества транспортного обслуживания по результатам опроса пассажиров. Получено, что критерии комфорта, безопасности и социальной значимости являются наиболее важными для пассажиров. Безопасность нахождения пассажиров в метрополитене обуславливается следующими факторами [12]–[15]:

- регулирование увеличенного пассажиропотока;
- предотвращение повышенных скоплений людей на пассажирских топологиях станции с целью уменьшения травмоопасных ситуаций;
- предотвращение общественно-опасного поведения пассажиров;
- обеспечение своевременной и безопасной эвакуации в случае возникновения чрезвычайной ситуации, в том числе пожара;
- проектирование необходимых с точки зрения расчетного или существующего пассажиропотока размеров и количества вестибюлей, пандусов, дверей, турникетов, эскалаторов и платформ для обеспечения безопасного передвижения пассажиров.

Комфортные условия нахождения пассажиров в метрополитене обуславливаются следующими факторами [16]–[18]:

- создание благоприятной среды для пассажиров на всем пути их следования;
- поддержание оптимального уровня плотности людского потока на любой топологии;
- поддержание оптимального времени ожидания и длины очереди пассажиров перед средствами попутного обслуживания;
- обеспечение беспрепятственного движения основного потока пассажиров с минимальными временными затратами на ожидание в очереди;
- поддержание достаточного уровня освещенности, необходимого для быстрой ориентации пассажиров в метрополитене.

Имитационное моделирование позволяет проводить оценку принятых ОПР зданий и сооружений, определять будущее состояние системы на основе предыдущего состояния и отображать последовательность развития процессов внутри исследуемого объекта, а затем визуализировать поведение системы [19]–[21]. Например, работа [22] направлена на разработку имитационной модели эксплуатации кинотеатра, позволившая определить среднее время ожидания и длину очереди при различном количестве пешеходных потоков и билетных касс. В исследовании [23] проведено имитационное моделирование движения пассажиров в метрополитене с целью оценки формирования очереди перед билетными кассами и досмотровыми зонами и анализа ее влияния на движение основного потока пассажиров.

В транспортных системах существует большое количество независимых и параллельно действующих элементов, называемых агентами [24]. Использование агентного моделирования позволяет детально описывать движение агентов, выступающих в роли пассажиров. В работе [25] разработана агентная модель для визуализации работы транспортно-пересадочного узла и прогнозирования процесса пересадки между автобусной остановкой и железнодорожной пассажирской станцией. В результате работы предложен вариант организации общественного транспорта с целью уменьшения потери времени пассажиров. Исследование [26] направлено на выбор оптимального способа хранения, организации и доставки посылок с целью экономии затрат с использованием агентного моделирования. Получено, что система доставки всех посылок в конце недели является более эффективной с точки зрения минимизации затрат, тем не менее,

Shabunina, D.; Kudryavtsev, V.; Chizhikov, V.

Passenger speeds as a function of human traffic density in peak hours of subway operation;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11202. doi: 10.4123/CUBS.112.2



сверхбыстрая доставка пользуется большей популярностью из-за имеющейся высокой конкуренции. В работе [27] используется агентное моделирование движения людей по типовой станции метрополитена в эксплуатационном режиме и при эвакуации. Разработанная модель позволила определить «узкие» места, способные снизить уровень комфорта пассажиров при эксплуатационном режиме и ухудшить условия эвакуации. Таким образом, для детальной оценки функционирования транспортного объекта с точки зрения безопасности и комфорта пассажиров возможно применение агентного моделирования с точными исходными данными, описывающими характер движения агентов и особенность функционирования метрополитена.

Российский нормативный стандарт СП 120.13330.2022 «Метрополитены» [28] допускает для моделирования движения людей в эксплуатационном режиме использовать Приказ МЧС России № 1140, описывающий параметры движения людей различных групп мобильности на различных топологиях при эвакуации. Приказ МЧС России № 1140 приводит точную классификацию людских потоков и параметры их движения: подразделяет людей на группы без ограничения мобильности (M0 (Таблица 1)) и маломобильные группы населения (Таблица 2).

Таблица 1. Характеристики людей группы мобильности M0 в соответствии с Приказом МЧС России № 1140
Table 1. Characteristics of people in mobility group M0 in according to the Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 1140

	Группа мобильности	Пропускная способность, чел./ч
Однородные группы	M0-1	Дети и подростки (7-18 лет)
	M0-2	Молодежь (18-25 лет)
	M0-3	Люди трудоспособного возраста (18-60 лет)
Неоднородные группы	M0-4	Группа, состоящая из детей дошкольного и школьного возраста и людей трудоспособного возраста
	M0-5	Группа, состоящая из детей дошкольного и школьного возраста, людей трудоспособного возраста и активных людей пожилого возраста
	M0-6	Группа, состоящая из людей трудоспособного возраста и активных людей пожилого возраста
	M0-7	Группа, состоящая из людей с грудными детьми, детей дошкольного и школьного возраста, людей трудоспособного возраста, активных людей пожилого возраста

Таблица 2. Характеристики маломобильных групп населения в соответствии с Приказом МЧС России № 1140
Table 2. Characteristics of disabled people in according to the Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 1140

Группа мобильности	Пропускная способность, чел./ч
M1	Люди, не имеющие инвалидности, со сниженной мобильностью, глухие и слабослышащие
M2	Пожилые немощные люди, слепые и слабовидящие люди
M3	Люди трудоспособного возраста с поражением опорно-двигательного аппарата
M4	Инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках
HM	Немобильные граждане
HT	Нетранспортабельные люди
HO	Люди с ограниченной степенью свободы, в том числе люди с психическими отклонениями

Приказ МЧС России № 1140 приводит соотношение эвакуируемого контингента по группам мобильности в зависимости от класса функциональной пожарной опасности здания и



минимальное расчетное количество людей в здании в момент начала эвакуации, при этом данные для метрополитена отсутствуют.

Скорость движения людского потока зависит от плотности их движения, вида пути, состава группы мобильности и от общего психологического состояния группы людей. В учебном пособии Холщевникова В. В., Самошина Д. А., Парфененко А. П., Кудрина И. С., Истратова Р. Н., Белосохова И. Р «Эвакуация и поведение людей при пожарах» приведено, что на двигательную активность влияет уровень эмоционального состояния (Таблица 3).

Таблица 3. Скорости движения людей в потоке при различных категориях движения
Table 3. Speeds of movement of people in the flow at different traffic categories

Категории движения	Скорость свободного движения V_0 по видам пути, м/мин	
	Горизонтальный участок, лестница вниз	Лестница вверх
Комфортное	< 49.0	< 27.0
Спокойное	49.0-66.0	27.0-38.0
Активное	66.0-90.0	38.0-55.0
Повышенной активности	90.0-120.0	55.0-75.0

Приказ МЧС России № 1140 приводит зависимости скоростей свободного движения людей от плотности людского потока при эвакуации. Процесс эвакуации вследствие возникновения пожара или иной чрезвычайной ситуации относится к категории движения пассажиров «повышенная активность», а движение пассажиров при эксплуатационном режиме работы метрополитена – к спокойному или активному типу движения (Таблица 3). Тем самым, применение Приказа МЧС России № 1140 при моделировании эксплуатационного режима работы для анализа влияния принятых ОПР метрополитена невозможно по ряду следующих причин:

- происходит завышение скоростей движения пассажиров, что приводит к принятию недостаточного количества основных элементов станций;
- отсутствуют данные или зависимости по определению количества людей на пассажирских топологиях станции метрополитена в любой момент времени;
- отсутствуют данные по соотношению групп мобильности в метрополитене.

Целью работы является получение зависимостей скоростей движения пассажиров различных групп мобильности от плотности людского потока при эксплуатационном режиме работы метрополитена.

Для достижения цели решены следующие задачи: проведены экспериментальные исследования по наблюдениям в часы пиковой загруженности за скоростями движения пассажиров на загруженных станциях Петербургского метрополитена, составлен алгоритм обработки экспериментальных данных, по которому получены зависимости скоростей движения пассажиров от плотности людского потока, проведено сравнение экспериментальных данных по скоростям движения пассажиров со скоростями, приведенными в Приказе МЧС России № 1140.

2 Материалы и методы / Materials and Methods

2.1 Экспериментальные исследования движения пассажиров / Experimental studies of passenger traffic

Экспериментальные исследования включают в себя наблюдение с камер видеонаблюдения метрополитена и переносных камер на штативе за скоростями движения пассажиров на различных топологиях от плотности людского потока.

Для определения скоростей движения пассажиров проведены экспериментальные исследования на загруженных станциях Петербургского метрополитена: «Площадь Восстания», «Проспект Ветеранов», «Проспект Просвещения», «Московская», «Садовая» и «Сенная площадь» (Рисунок 1,2).



Рис. 1 - Горизонтальные пути движения на станциях «Московская» и «Проспект Просвещения»

Fig. 1 - Horizontal sites of traffic at the stations «Moskovskaya» and «Prospekt Prosveshcheniya»

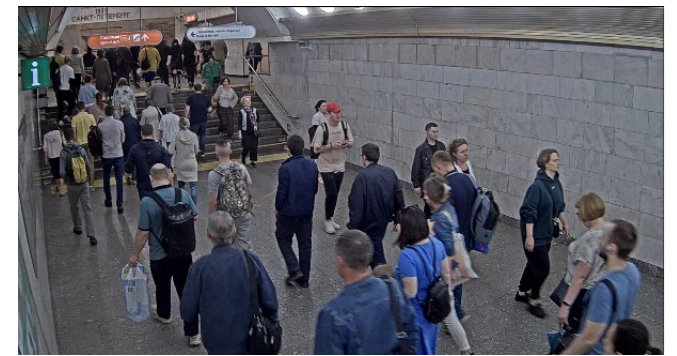


Рис. 2 - Лестничные сходы на станциях «Садовая» и «Сенная площадь»

Fig. 2 - Stairways at the stations «Sadovaya» and «Sennaya Ploshchad»

Для определения трека перемещения и скорости движения в потоке строилась кинограмма движения i -ого человека, в которой графически фиксировались его перемещения. На основании данных видеонаблюдения подсчитывалось общее количество людей N_n^t , попавших в каждую клетку n расчетной сетки, и их принадлежности к группам мобильности. Общая плотность каждой отдельной клетки n вычисляется по формуле (1):

$$D_n^t = \frac{N_n^t}{F_n}, \quad (1)$$

где N_n^t – количество людей в расчетной клетке, чел.; F_n – площадь расчетной клетки, м².

Из общего потока выбирался человек, за движением которого велось наблюдение. Определялось количество людей $N_n^{t+\Delta t}$ в ячейке расчетной сетки, в которой находился наблюдаемый человек в момент времени $t+\Delta t$. Значение плотности потока, при которой происходило движение i -ого человека внутри расчетной клетки, определялось по формуле (2):

$$D_i = \frac{N_n^t + N_n^{t+\Delta t}}{2 \cdot F_n}. \quad (2)$$

Скорость движения i -ого человека по траектории его движения на интервале $(t, t+\Delta t)$ определялась формулой (3):

$$V_i^{(t, t+\Delta t)} = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (3)$$

где Δt – интервал времени, за который пассажир преодолевает расстояние Δl , с.

Данные вычисления повторяются для i -ого человека до его выхода из зоны наблюдения либо до прохождения им заданного сечения пути.



2.2 Обработка экспериментальных исследований / Processing of experimental studies

При обработке экспериментальных данных использовался метод наименьших квадратов, позволяющий построить оптимальную оценку моментов распределения ошибки эксперимента [29–31]. В общем случае предполагается, что между независимыми переменными и результатом процесса существует функциональная связь, описываемая уравнением (4):

$$y = y(x), \quad (4)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$ – вектор значений независимых переменных. Значения x_i представлены в безразмерном виде в виде уравнения (5):

$$x_i = \frac{D_i - 0.5 \cdot (D_{max} + D_{min})}{0.5 \cdot (D_{max} - D_{min})}, \quad (5)$$

где D_i – действительное значение плотности людского потока; D_{max}, D_{min} – максимальное и минимальное значение переменной плотности людского потока.

При обработке результатов экспериментальных исследований принята полиномиальная модель второго порядка линейная относительно коэффициентов α_i вида (формула (6)):

$$y(a, x) = a_0 \cdot f_0(x) + a_1 \cdot f_1(x) + \dots + a_k \cdot f_k(x). \quad (6)$$

Исходными данными при определении значений коэффициентов α_i являются:

– матрица, описываемая уравнением (7):

$$F = (f_k(x^N)) = \begin{bmatrix} f_0(x^1) & f_1(x^1) & \dots & f_k(x^1) \\ f_0(x^2) & f_1(x^2) & \dots & f_k(x^2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_0(x^N) & f_1(x^N) & \dots & f_k(x^N) \end{bmatrix}; \quad (7)$$

– вектор результатов наблюдений, описываемый уравнением (8):

$$F\tilde{Y} = (\tilde{y}^1, \tilde{y}^2, \dots, \tilde{y}^N)'. \quad (8)$$

Расчет коэффициентов производится из условия обеспечения минимального значения расширенной квадратичной формы согласно уравнению (9):

$$S = (\tilde{y}^i - y^i)^2 = |\tilde{Y} - Y|^2 = (\tilde{Y} - Y)'(Y - Y). \quad (9)$$

Оценка дисперсии наблюдений вычисляется с помощью суммы квадратов ошибок (формула (10)) с числом степеней свободы φ_2 (формула (11)) по формуле (12):

$$S_e = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{\gamma} (\tilde{y}^{ij} - \tilde{y}^i)^2, \quad (10)$$

$$\varphi_2 = N \cdot (\gamma - 1), \quad (11)$$

$$s^2 = \frac{S_e}{\gamma \cdot \varphi_2}, \quad (12)$$

где N – количество опытов; γ – количество опытов в одной точке; \tilde{y}^{ij} – результат наблюдений в точке; \tilde{y}^i – среднее значение результата наблюдений в точке.

Сумма квадратов рассчитывается по формуле (13) и имеет $\varphi_1 = N - k - 1$ степеней свободы.

$$S_D = \sum_{i=1}^N \gamma (\tilde{y}^i - \hat{y}^i)^2. \quad (13)$$

Величина F – критерия, характеризующего адекватность модели, определяется из (14):

$$F = \frac{S_D / \varphi_1}{S_e / \varphi_2}. \quad (14)$$

Доверительный интервал для коэффициентов с вероятностью P определяется из (15):

$$|\hat{a}_i - a_i| < s_i \cdot \varepsilon, \quad (15)$$

где ε – табличное значение коэффициента, определяемого из условия (16):

$$P(X < \varepsilon) = 1 - a. \quad (16)$$

\hat{a}_i – вектор коэффициентов модели, определяемый по формуле (17):

$$\hat{a} = (F'F)^{-1} F'\tilde{Y}, \quad (17)$$

где $\hat{a} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k)$ – вектор значений коэффициентов модели; F – матрица значений функций; F' – транспонированная матрица F ; \tilde{Y} – вектор результатов наблюдений.

Проверка значимости коэффициентов модели производится из условия (18):

$$|\hat{a}_i| > t_{kp} \cdot s_i, \quad (18)$$

где t_{kp} – критическое значение распределения Стьюдента для заданного уровня значимости.

Критерии выбора точек для статистической обработки:

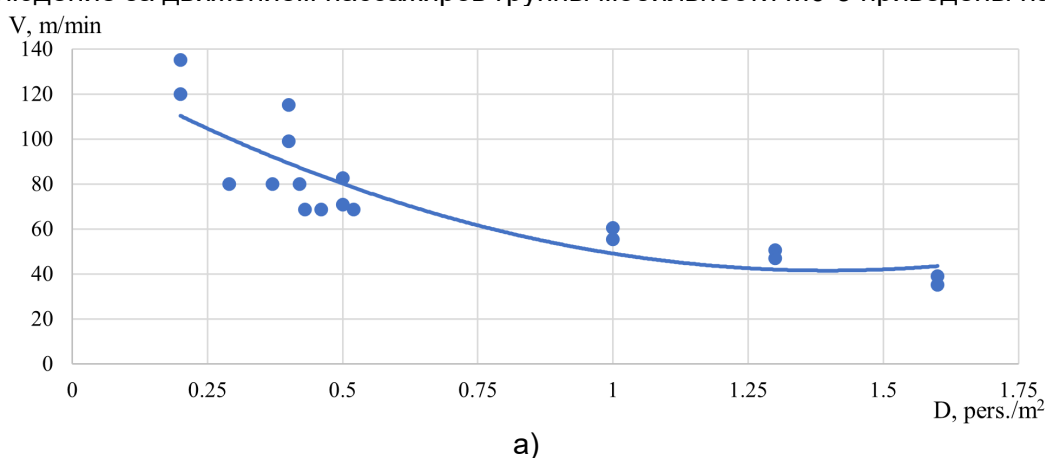
- количество измеренных значений в одной точке – не менее двух;
- исключение точек, имеющих максимальное отклонение от начальной линии тренда;
- в качестве линии тренда принимается полином второй степени.

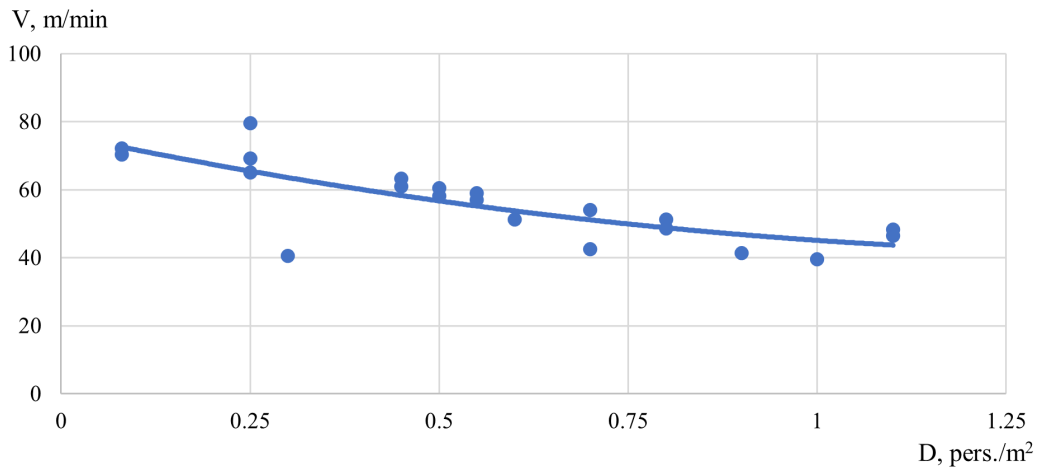
Для реализации методики обработки экспериментальных значений разработана программа, в которую вошли математические зависимости (4)-(18) для автоматизации процесса.

3 Результаты и обсуждение / Results and Discussion

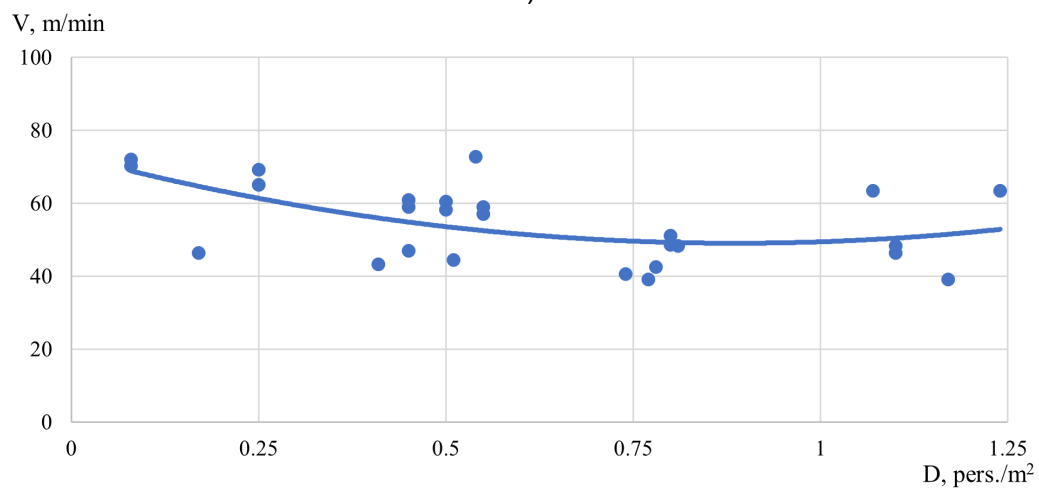
3.1 Зависимости движения пассажиров группы мобильности М0-3

Наблюдение за движением пассажиров группы мобильности М0-3 приведены на рисунке 3.





б)



в)

Рис. 3 - Зависимость движения пассажиров группы мобильности М0-3: а) по горизонтальному участку; б) по лестнице вниз; в) по лестнице вверх
 Fig. 3 - Dependence of passenger movement of mobility group M0-3: a) on the horizontal site; b) on the downward staircase; c) on the upward staircase

Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

Матрица исходных данных

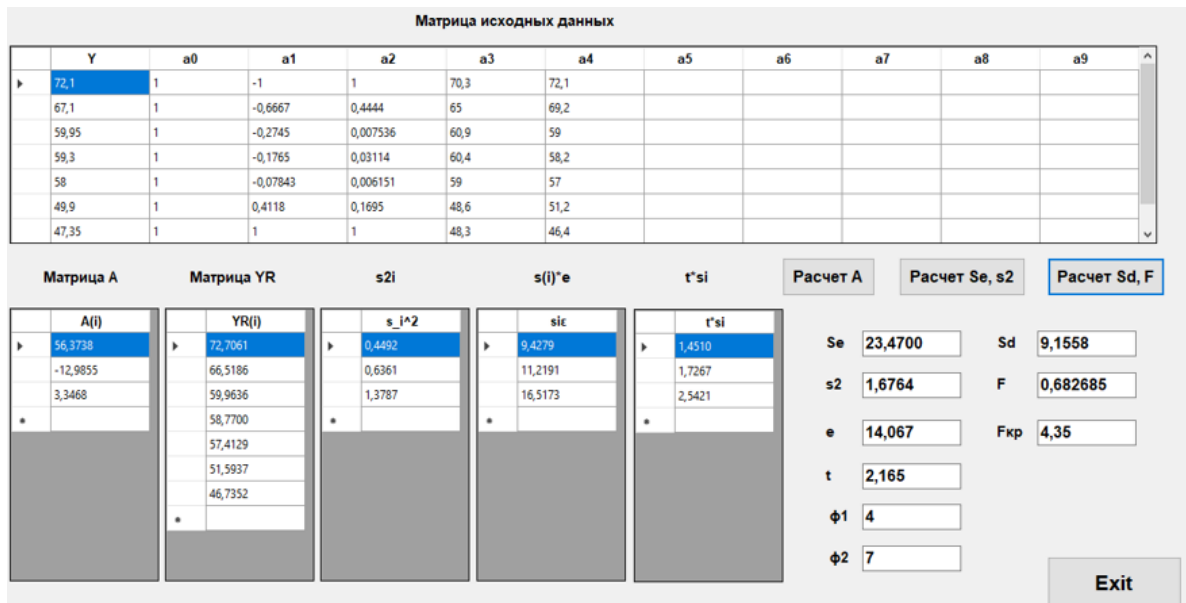
Y	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
127,5	1	-1	1	120	135					
107	1	-0,7143	0,5102	99	115					
76,7	1	-0,57143	0,32653	82,6	70,8					
57,95	1	0,14286	0,02041	60,5	55,4					
48,75	1	0,57143	0,32653	46,9	50,6					
37,05	1	1	1	38,9	35,2					

A(i)	YR(i)	s _i ²	s(i)*e	t*si
60,0603	123,8430	14,7770	48,3971	12,2319
-41,5258	101,0777	8,9819	37,7320	9,5364
22,2568	91,0570	35,8199	75,3508	19,0442
	54,5822			
	43,5988			
	40,7914			

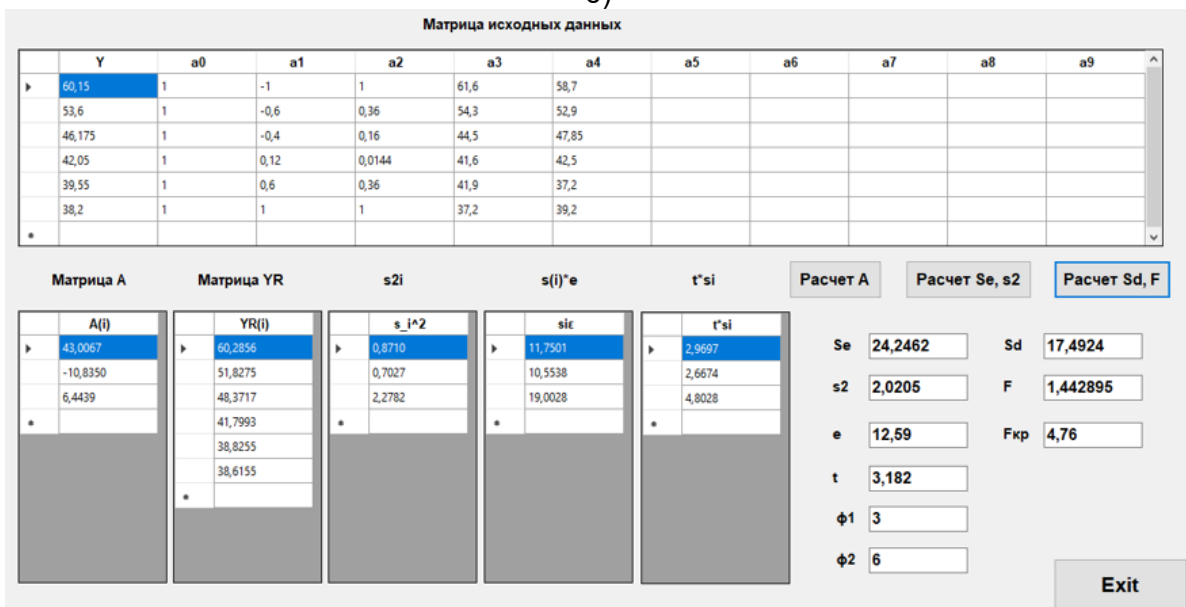
Расчет A	Расчет Se, s2	Расчет Sd, F
Se 336,8150	Sd 612,8899	
s2 28,0679	F 3,639327	
e 12,59	Fкр 4,76	
t 3,182		
φ1 3		
φ2 6		

Exit

а)



б)



в)

Рис. 4 - Результаты расчета движения пассажиров группы мобильности M0-3: а) по горизонтальному участку; б) по лестнице вниз; в) по лестнице вверх
Fig. 4 - Results of calculation of passenger movement of mobility group M0-3: a) on the horizontal site; b) on the downward staircase; c) on the upward staircase

Получены полиномиальные модели второго порядка (19)-(21).

$$y = 60.06 - 41.53 \cdot x + 22.26 \cdot x^2, \tag{19}$$

$$y = 56.37 - 12.98 \cdot x + 3.35 \cdot x^2, \tag{20}$$

$$y = 43.01 - 10.84 \cdot x + 6.44 \cdot x^2, \tag{21}$$

где y – скорость движения пассажиров M0-3 по горизонтальному участку, лестнице вниз и лестнице вверх соответственно, м/мин; x – плотность потока на горизонтальном участке, лестничном сходе (спуск), лестничном сходе (подъем) соответственно в безразмерном виде.

Условия $F = 3.639 < F_{кр} = 4.76$, $F = 0.683 < F_{кр} = 4.35$, $F = 1.44 < F_{кр} = 4.76$, следовательно,

модели являются адекватными (рисунок 4).

Shabunina, D.; Kudryavtsev, V.; Chizhikov, V.

Passenger speeds as a function of human traffic density in peak hours of subway operation;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11202. doi: 10.4123/CUBS.112.2

Скорости движения пассажиров группы мобильности М0-3 как функция от плотности людского потока определяются зависимостями (22)-(24).

$$v = 150.24 - 141.08 \cdot D + 45.422 \cdot D^2, \quad (22)$$

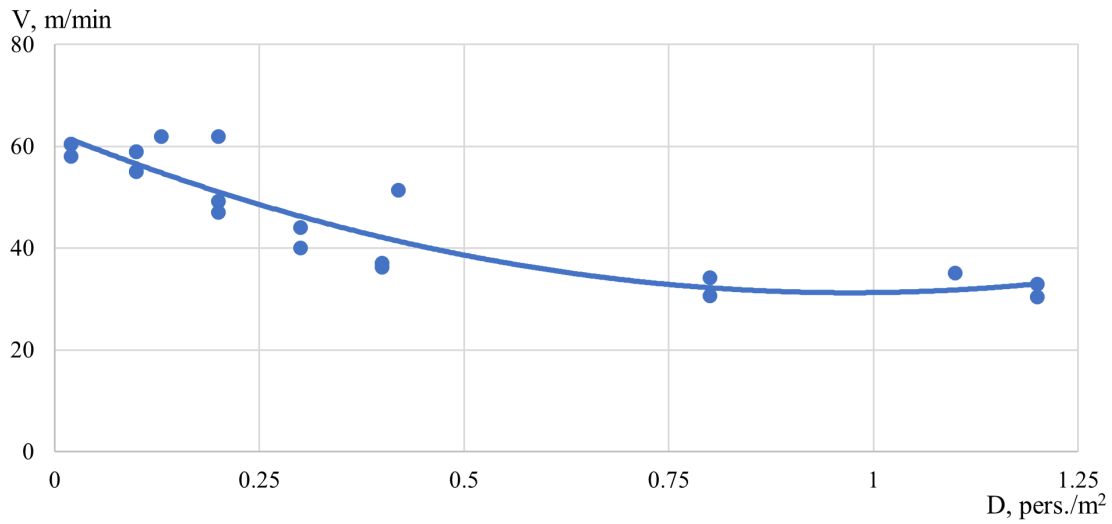
$$v = 75.875 - 40.645 \cdot D + 12.867 \cdot D^2, \quad (23)$$

$$v = 70.806 - 57.756 \cdot D + 25.776 \cdot D^2, \quad (24)$$

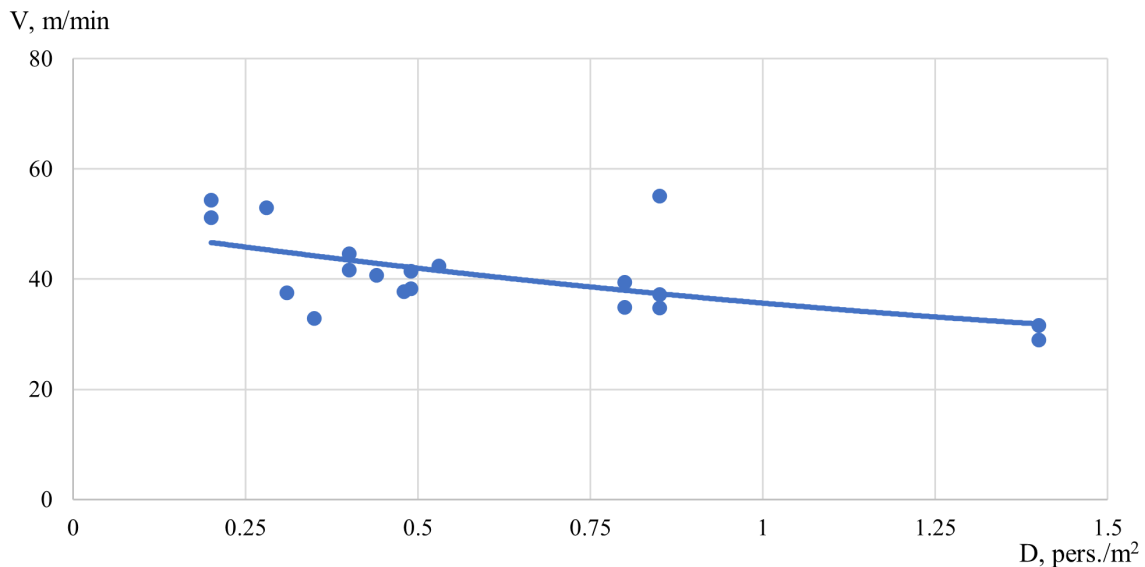
где v – скорость движения пассажиров группы мобильности М0-3 по горизонтальному участку, лестнице вниз и лестнице вверх соответственно, м/мин; D – плотность людского потока, чел/м².

3.2 Зависимости движения пассажиров группы мобильности М2

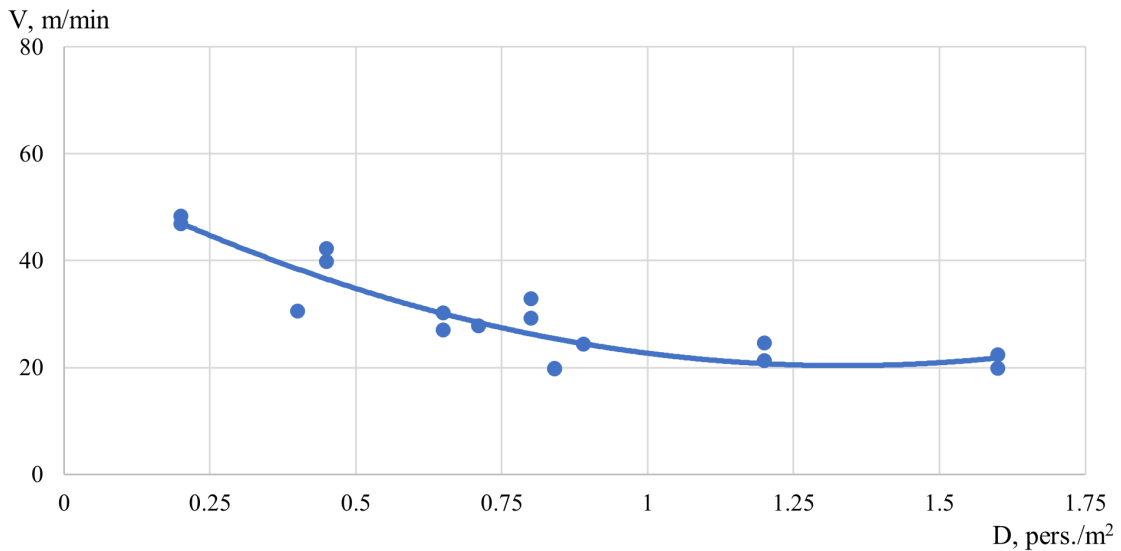
Наблюдение за движением пассажиров группы мобильности М2 приведены на рисунке 5.



а)



б)



В)

Рис. 5 - Зависимость движения пассажиров группы мобильности M2: а) по горизонтальному участку; б) по лестнице вниз; в) по лестнице вверх
 Fig. 5 - Dependence of passenger movement of mobility group M2: a) on the horizontal site; b) on the downward staircase; c) on the upward staircase

Результаты расчетов приведены на рисунке 6.

Матрица исходных данных

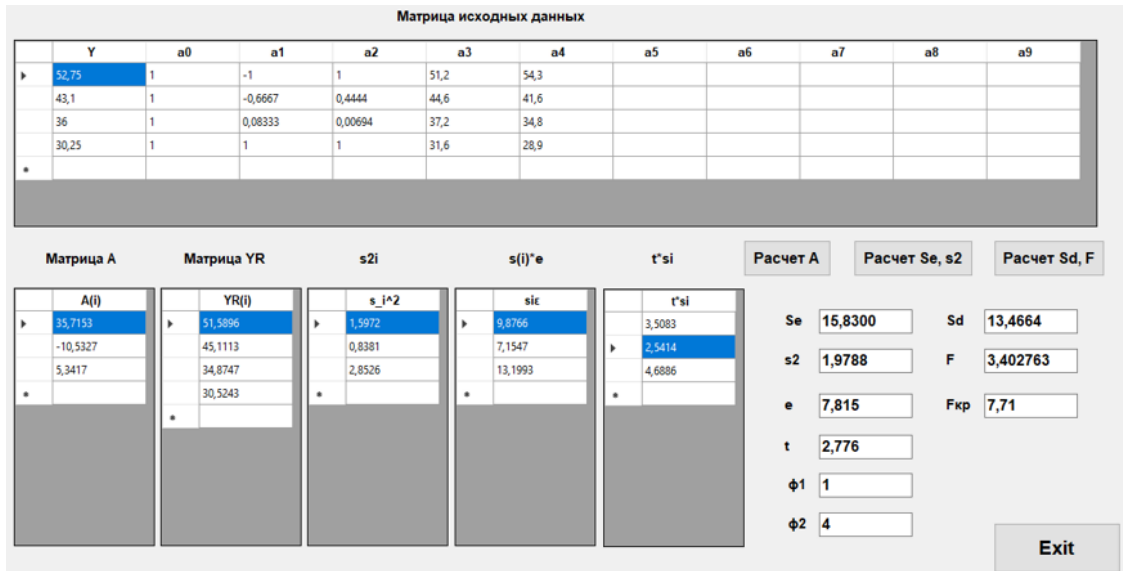
Y	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
55,6	1	-1	1	58,9	52,3					
48,8	1	-0,8182	0,6694	51,2	46,4					
41,6	1	-0,6364	0,4050	43,8	39,4					
36,956	1	-0,4545	0,2066	38,8	35,1					
32,15	1	0,2727	0,07438	34,1	30,2					
25,05	1	1	1	27,3	22,8					

Матрица A	Матрица YR	s _{2i}	s(i)*e	t*si																							
<table border="1"> <tr><td>A(i)</td></tr> <tr><td>31,7442</td></tr> <tr><td>-13,6732</td></tr> <tr><td>8,1410</td></tr> </table>	A(i)	31,7442	-13,6732	8,1410	<table border="1"> <tr><td>YR(i)</td></tr> <tr><td>53,5584</td></tr> <tr><td>48,3812</td></tr> <tr><td>43,7429</td></tr> <tr><td>39,6406</td></tr> <tr><td>28,6210</td></tr> <tr><td>26,2119</td></tr> </table>	YR(i)	53,5584	48,3812	43,7429	39,6406	28,6210	26,2119	<table border="1"> <tr><td>s_i²</td></tr> <tr><td>3,3567</td></tr> <tr><td>1,9363</td></tr> <tr><td>5,2441</td></tr> </table>	s _i ²	3,3567	1,9363	5,2441	<table border="1"> <tr><td>sie</td></tr> <tr><td>23,0664</td></tr> <tr><td>17,5190</td></tr> <tr><td>28,8782</td></tr> </table>	sie	23,0664	17,5190	28,8782	<table border="1"> <tr><td>t*si</td></tr> <tr><td>5,8298</td></tr> <tr><td>4,4278</td></tr> <tr><td>7,2941</td></tr> </table>	t*si	5,8298	4,4278	7,2941
A(i)																											
31,7442																											
-13,6732																											
8,1410																											
YR(i)																											
53,5584																											
48,3812																											
43,7429																											
39,6406																											
28,6210																											
26,2119																											
s _i ²																											
3,3567																											
1,9363																											
5,2441																											
sie																											
23,0664																											
17,5190																											
28,8782																											
t*si																											
5,8298																											
4,4278																											
7,2941																											

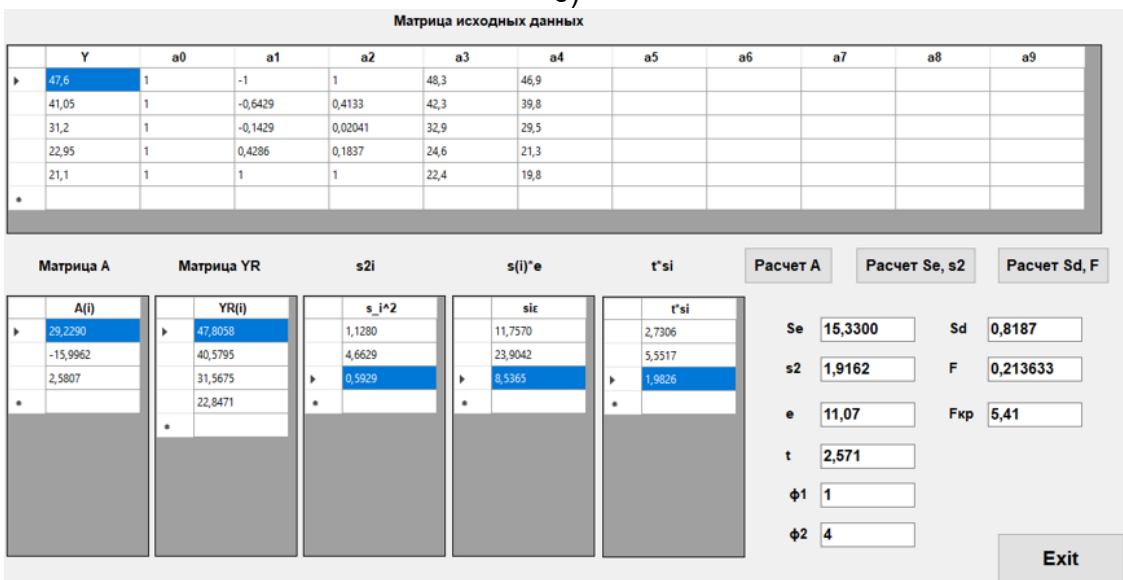
Расчет A	Расчет Se, s2	Расчет Sd, F
	Se 67,5551	Sd 59,8930
	s2 5,6296	F 1,773161
	e 12,59	Fкр 4,76
	t 3,182	
	φ1 3	
	φ2 6	

Exit

а)



б)



в)

Рис. 6 - Результаты расчета движения пассажиров группы мобильности M2: а) по горизонтальному участку; б) по лестнице вниз; в) по лестнице вверх
Fig. 6 - Results of calculation of passenger movement of mobility group M2: a) on the horizontal site; b) on the downward staircase; c) on the upward staircase

Получены полиномиальные модели второго порядка (25)-(27).

$$y = 31.74 - 13.67 \cdot x + 8.14 \cdot x^2, \tag{25}$$

$$y = 35.72 - 10.53 \cdot x + 5.34 \cdot x^2, \tag{26}$$

$$y = 29.23 - 16.00 \cdot x + 2.58 \cdot x^2, \tag{27}$$

где y – скорость движения пассажиров M2 по горизонтальному участку, лестнице вниз и лестнице вверх соответственно, м/мин; x – плотность потока на горизонтальном участке, лестничном сходе (спуск), лестничном сходе (подъем) соответственно в безразмерном виде.

Условия $F = 1.77 < F_{кр} = 4.76$, $F = 3.40 < F_{кр} = 7.71$, $F = 0.21 < F_{кр} = 5.41$, следовательно, модели являются адекватными (рисунок 6).

Скорости движения пассажиров группы мобильности М2 как функция от плотности людского потока определяются зависимостями (28)-(30).

$$v = 59.273 - 59.842 \cdot D + 26.909 \cdot D^2, \quad (28)$$

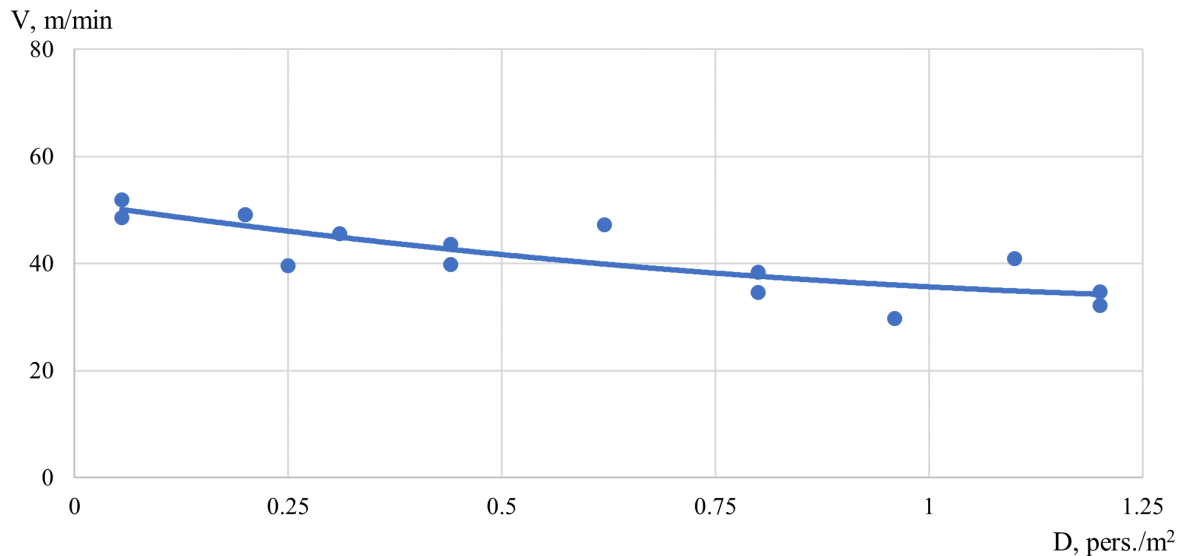
$$v = 59.255 - 41.295 \cdot D + 14.838 \cdot D^2, \quad (29)$$

$$v = 54.062 - 32.332 \cdot D + 5.267 \cdot D^2, \quad (30)$$

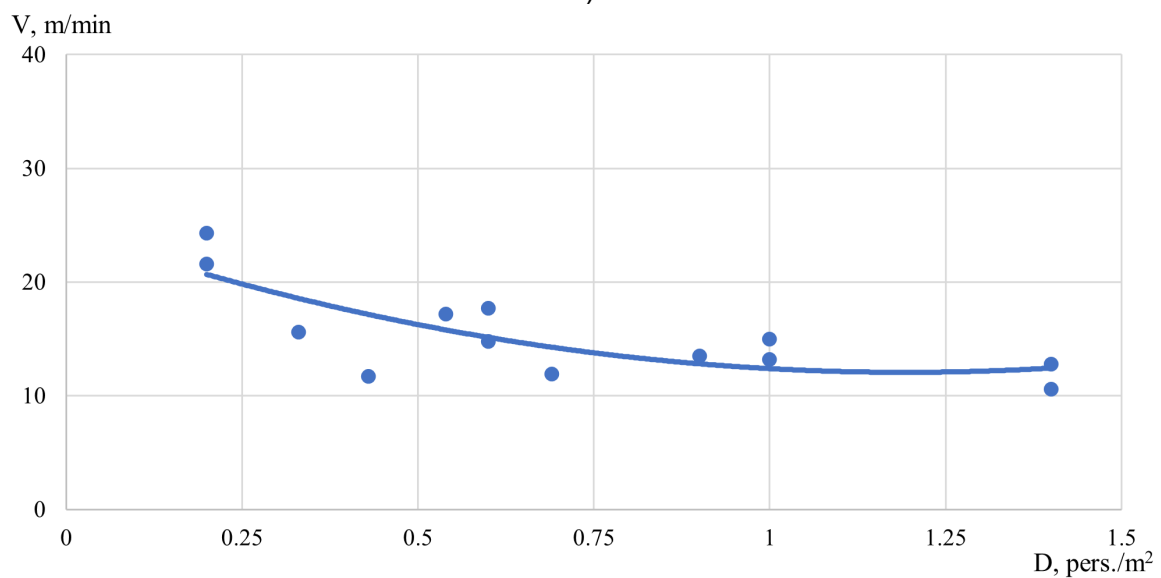
где v – скорость движения пассажиров группы мобильности М2 по горизонтальному участку, лестнице вниз и лестнице вверх соответственно, м/мин; D – плотность людского потока, чел/м².

3.3. Зависимости движения пассажиров группы мобильности М3

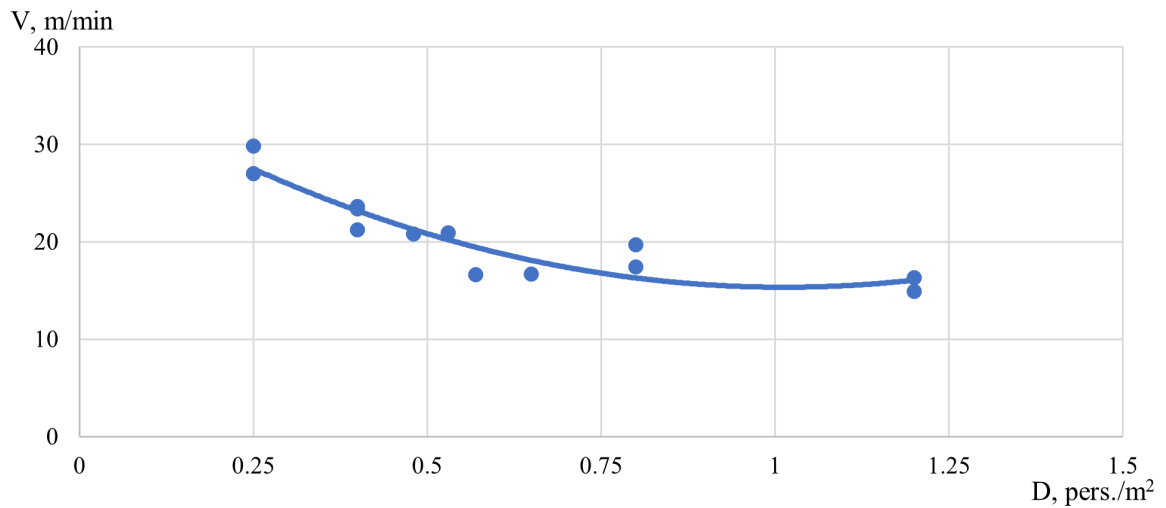
Наблюдение за движением пассажиров группы мобильности М3 приведены на рисунке 7.



a)



б)



б)

Рис. 7 - Зависимость движения пассажиров группы мобильности М3: а) по горизонтальному участку; б) по лестнице вниз; в) по лестнице вверх
 Fig. 7 - Dependence of passenger movement of mobility group M3: a) on the horizontal site; b) on the downward staircase; c) on the upward staircase

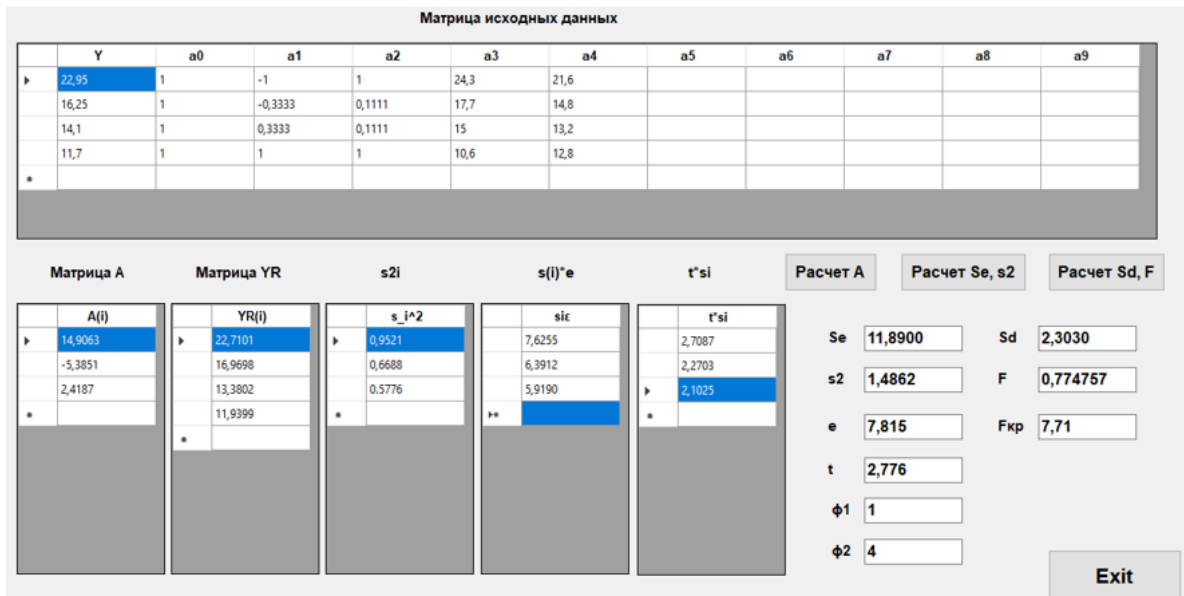
Результаты расчетов приведены на рисунке 8.

Матрица исходных данных

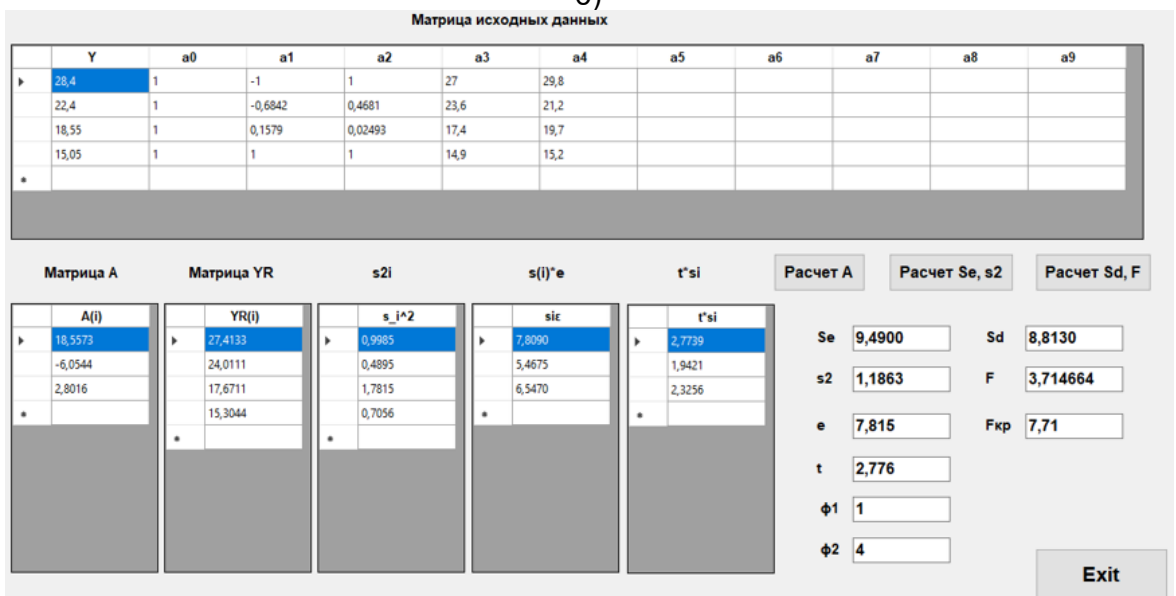
	Y	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
▶	50,25	1	-1	1	48,6	51,9					
	45,95	1	-0,6667	0,4444	47,6	44,3					
	41,7	1	-0,2667	0,07111	39,8	43,6					
	36,5	1	0,3333	0,1111	38,4	34,6					
	33,45	1	1	1	32,2	34,7					
*											

Матрица A	Матрица YR	s _{2i}	s(i)*e	t*si	Расчет A	Расчет Se, s2	Расчет Sd, F																										
<table border="1"> <thead> <tr><th>A(i)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>39,1331</td></tr> <tr><td>▶ -8,4336</td></tr> <tr><td>2,7120</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	A(i)	39,1331	▶ -8,4336	2,7120	*	<table border="1"> <thead> <tr><th>YR(i)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>▶ 50,2787</td></tr> <tr><td>45,9610</td></tr> <tr><td>41,5752</td></tr> <tr><td>36,6235</td></tr> <tr><td>33,4116</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	YR(i)	▶ 50,2787	45,9610	41,5752	36,6235	33,4116	*	<table border="1"> <thead> <tr><th>s_i*2</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>▶ 1,5323</td></tr> <tr><td>1,1146</td></tr> <tr><td>0,7569</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	s _i *2	▶ 1,5323	1,1146	0,7569	*	<table border="1"> <thead> <tr><th>s(i)*e</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>▶ 13,7033</td></tr> <tr><td>11,6869</td></tr> <tr><td>9,5381</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	s(i)*e	▶ 13,7033	11,6869	9,5381	*	<table border="1"> <thead> <tr><th>t*si</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>▶ 3,1826</td></tr> <tr><td>2,7143</td></tr> <tr><td>2,2152</td></tr> <tr><td>*</td></tr> </tbody> </table>	t*si	▶ 3,1826	2,7143	2,2152	*	Se <input type="text" value="28,4550"/>	Sd <input type="text" value="0,0665"/>
A(i)																																	
39,1331																																	
▶ -8,4336																																	
2,7120																																	
*																																	
YR(i)																																	
▶ 50,2787																																	
45,9610																																	
41,5752																																	
36,6235																																	
33,4116																																	
*																																	
s _i *2																																	
▶ 1,5323																																	
1,1146																																	
0,7569																																	
*																																	
s(i)*e																																	
▶ 13,7033																																	
11,6869																																	
9,5381																																	
*																																	
t*si																																	
▶ 3,1826																																	
2,7143																																	
2,2152																																	
*																																	
		s2 <input type="text" value="2,8455"/>	F <input type="text" value="0,005843"/>																														
		e <input type="text" value="11,07"/>	Fкр <input type="text" value="5,41"/>																														
		t <input type="text" value="2,571"/>																															
		φ1 <input type="text" value="2"/>																															
		φ2 <input type="text" value="5"/>																															
Exit																																	

а)



б)



в)

Рис. 8 - Результаты расчета движения пассажиров группы мобильности М3: а) по горизонтальному участку; б) по лестнице вниз; в) по лестнице вверх
Fig. 8 - Results of calculation of passenger movement of mobility group M3: a) on the horizontal site; b) on the downward staircase; c) on the upward staircase

Получены полиномиальные модели второго порядка (31)-(33).

$$y = 39.13 - 8.43 \cdot x + 2.71 \cdot x^2, \tag{31}$$

$$y = 14.91 - 5.39 \cdot x + 2.42 \cdot x^2, \tag{32}$$

$$y = 18.56 - 6.05 \cdot x + 2.80 \cdot x^2, \tag{33}$$

где y – скорость движения пассажиров М3 по горизонтальному участку, лестнице вниз и лестнице вверх соответственно, м/мин; x – плотность потока на горизонтальном участке, лестничном сходе (спуск), лестничном сходе (подъем) соответственно в безразмерном виде.

Условия $F = 0.006 < F_{кр} = 5.41$, $F = 0.775 < F_{кр} = 7.71$, $F = 3.71 < F_{кр} = 7.71$, следовательно, модели являются адекватными (рисунок 8).

Скорости движения пассажиров группы мобильности М3 как функция от плотности людского потока определяются зависимостями (34)-(36).

$$v = 50.279 - 23.096 \cdot D + 7.533 \cdot D^2, \quad (34)$$

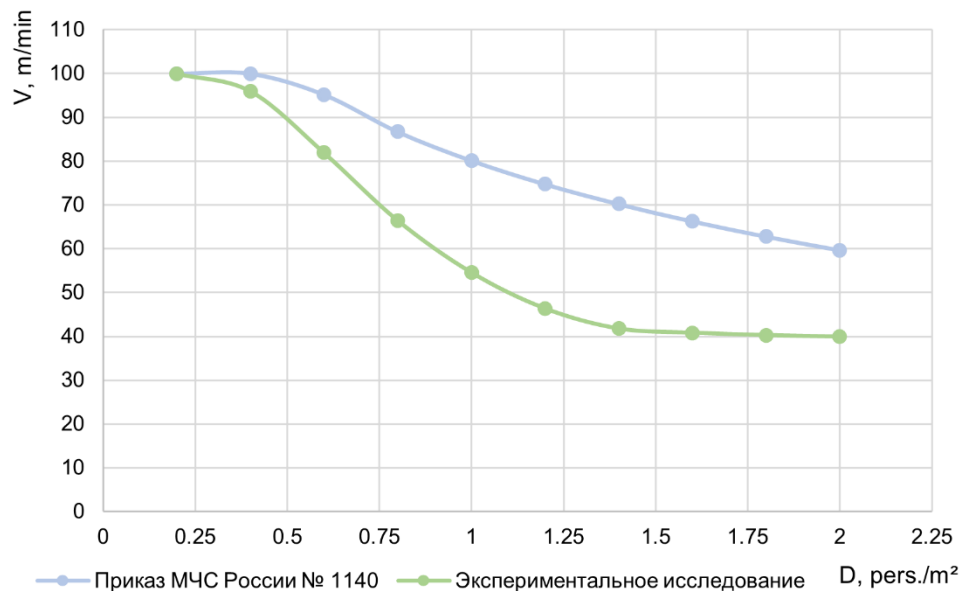
$$v = 26.386 - 19.725 \cdot D + 6.719 \cdot D^2, \quad (35)$$

$$v = 34.325 - 30.751 \cdot D + 12.417 \cdot D^2, \quad (36)$$

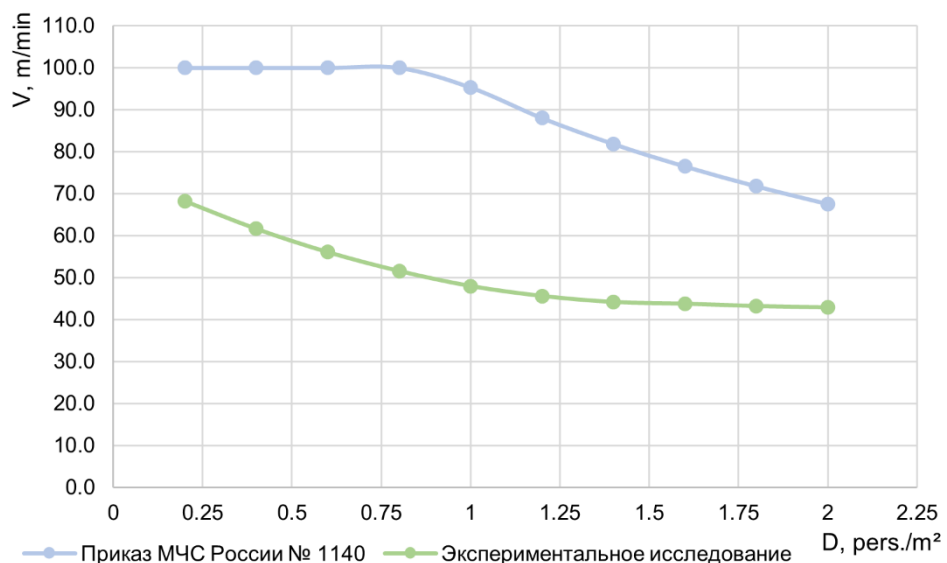
где v – скорость движения пассажиров группы мобильности М3 по горизонтальному участку, лестнице вниз и лестнице вверх соответственно, м/мин; D – плотность людского потока, чел/м².

3.3 Обсуждение / Discussion

По результатам экспериментальных исследований проведена оценка соотношения групп мобильности пассажиров и получено, что количество людей группы мобильности М2 и М3 на пассажирских топологиях метрополитена составляет 0,62% от общего входного и выходного пассажиропотоков. На рисунке 9 представлено сравнение полученных экспериментальных данных по скоростям движения пассажиров группы мобильности М0-3 со скоростями, приведенными в Приказе МЧС России № 1140.



а)



б)

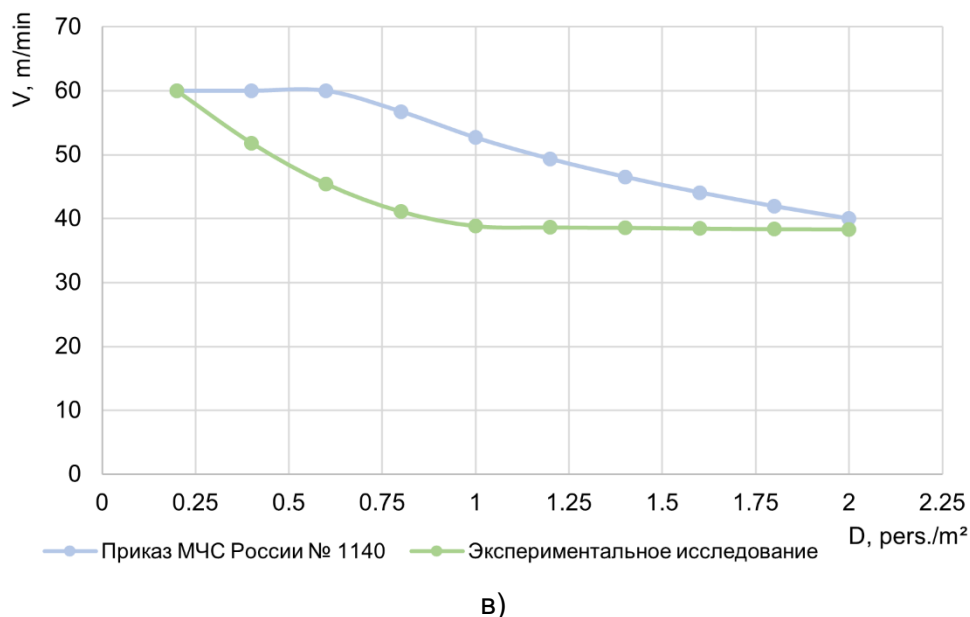


Рис. 9 - Сравнение экспериментальных скоростей движения пассажиров группы мобильности M0-3 со скоростями, приведенными в Приказе МЧС России № 1140 при движении по: а) горизонтальному участку; б) лестнице вниз; в) лестнице вверх
Fig. 9 - Comparison of experimental speeds of passengers of mobility group M0-3 with the speeds given in the Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 1140 on: a) horizontal site; b) the downward staircase; c) the upward staircase

Как видно из рисунка 9, скорость движения пассажиров по горизонтальному пути, при спуске и подъеме по лестничному сходу снижается при увеличении плотности людского потока. Согласно экспериментальному исследованию, при достижении плотности потока 1.5 чел./м² на горизонтальном участке скорость движения остается постоянной (40 м/мин); при достижении плотности потока 1.5 чел./м² при спуске на лестничном сходе скорость движения остается постоянной (43 м/мин); при достижении плотности потока 1.0 чел./м² при подъеме на лестничном сходе скорость движения остается постоянной (38 м/мин).

Значения скоростей, приведенные в Приказе МЧС России № 1140, в среднем завышены: на 75% по горизонтальному пути движения, на 20% при спуске на лестничном сходе, на 40% при подъеме на лестничном сходе по сравнению со скоростями, полученными по экспериментальному исследованию (рисунок 9). Данное расхождение связано с тем, что Приказ МЧС России № 1140 учитывает тип движения пассажиров при эвакуации, который относится к категории движения пассажиров «повышенная активность», а движение пассажиров при эксплуатационном режиме работы метрополитена – к спокойному или активному типу движения.

4 Заключение / Conclusions

К основным критериям формирования ОПР станций метрополитена относятся безопасность и комфорт пассажиров. Моделирование эксплуатационного режима работы метрополитена практически важно для принятия оптимальных ОПР, обеспечивающих непрерывное функционирование станции. По результатам проведения экспериментальных исследований:

1. Получены зависимости скоростей движения пассажиров группы мобильности M0-3, M2 и M3 от плотности людского потока;

2. Получены максимальные значения плотностей людских потоков, при которых скорости движения пассажиров остаются постоянными;

3. Проведено сравнение экспериментальных данных по скоростям движения пассажиров различных групп мобильности со значениями скоростей, приведенных в Приказе МЧС России № 1140.

4. Определен средний процент нахождения маломобильных групп населения в метрополитене в часы пиковой загруженности станции (утренний и вечерний «час пик») – 0,62% от общего входного и выходного пассажиропотоков.



На основании полученных зависимостей скоростей движения пассажиров группы мобильности М0-3, М2 и М3 от плотности людского потока сделаны следующие выводы:

1. При увеличении плотности людского потока уменьшается скорость движения пассажиров по горизонтальному пути, при спуске и подъеме по лестничному сходу.

2. При достижении максимальных значений плотностей людских потоков значение скоростей движения пассажиров остаются постоянными: на горизонтальном участке скорость движения принимается 40 м/мин при плотности, большей 1.5 чел./м²; при спуске на лестничном сходе скорость движения принимается 43 м/мин при плотности, большей 1.5 чел./м²; при подъеме на лестничном сходе скорость движения принимается 38 м/мин при плотности, большей 1.0 чел./м².

3. Применение скоростей, приведенных в Приказе МЧС России № 1140, недопустимо при моделировании эксплуатационного режима работы метрополитена по причине учета другого типа движения пассажиров (процесс эвакуации).

Полученные зависимости скоростей движения пассажиров группы мобильности М0-3, М2 и М3 от плотности людского потока могут использоваться в качестве исходных данных при разработке агентной модели движения пассажиров для решения следующих практических задач:

- Определение достаточности принятых ОПР метрополитена с точки зрения комфортного и безопасного нахождения пассажиров (моделирование эксплуатационного режима);

- Получение расчетной численности пассажиров, эвакуирующихся со станции при пожаре (получение исходных данных по количеству находящихся на пассажирских топологиях людей в момент начала эвакуации).

References

- 1 Han T., Zhao J. and Li W. (2020) Smart-Guided Pedestrian Emergency Evacuation in Slender-Shape Infrastructure with Digital Twin Simulations. *Sustainability*, **12**, 1–18. <https://doi.org/10.3390/su12229701>
- 2 Wang L., Xue X., Zhao Z. and Wang Z. (2018) The Impacts of Transportation Infrastructure on Sustainable Development: Emerging Trends and Challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, 1–24. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061172>
- 3 Karasev O.I. and Krivtsova A.O. (2019) Assessment of the Level of Metropolitan Cities Transport System Development. *Statistics and Economics*, **16**, 22–31. <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2019-1-22-31>
- 4 Kalmykov M., Korovyakovskiy E., Polyakov A. and Sholtysek J. (2022) Development of Kupchino Intermodal Passenger Transport Hub. *Proceedings of Petersburg Transport University*, Petersburg State Transport University, **19**, 56–67. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-19-1-56-67>
- 5 Gao Y. and Zhu J. (2022) Characteristics, Impacts and Trends of Urban Transportation. *Encyclopedia*, **2**, 1168–1182. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020078>
- 6 Billones R.K.C., Guillermo M.A., Lucas K.C., Era M.D., Dadios E.P. and Fillone A.M. (2021) Smart Region Mobility Framework. *Sustainability*, **13**, 1–29. <https://doi.org/10.3390/su13116366>
- 7 Peimbert M. and Alcaraz L.D. (2022) Where Environmental Microbiome Meets Its Host: Subway and Passenger Microbiome Relationships. *Molecular Ecology*, **10**, 1–17. <https://doi.org/10.1111/mec.16440>
- 8 Wang L., Chen Y. and Wang C. (2020) Research on Evolutionary Model of Urban Rail Transit Vulnerability Based on Computer Simulation. *Neural Computing and Applications*, **32**, 195–204. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3793-6>
- 9 Jia F., Jiang X., Li H., Yu X., Xu X. and Jiang M. (2021) Passenger-Oriented Subway Network Capacity Calculation and Analysis Based on Simulation. *Transportation Letters*, **13**, 1–13. <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1741778>
- 10 Gusakova N. V. and Filushina K.E. (2018) Optimum Selection of Space-Planning and Design Concepts of Low-Rise Construction. *Vestnik TGASU*, **20**, 71–85. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-3-71-85>
- 11 Bubalo T., Rajsman M. and Škorput P. (2022) Methodological Approach for Evaluation and Improvement of Quality Transport Service in Public Road Passenger Transport. *Tehnicki Vjesnik*, **29**, 139–148. <https://doi.org/10.17559/TV-20201031104641>
- 12 Zhang S., Sunindijo R.Y., Loosemore M., Wang S., Gu Y. and Li H. (2020) Identifying Critical Factors Influencing the Safety of Chinese Subway Construction Projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **28**, 1–41. [Shabunina, D.; Kudryavtsev, V.; Chizhikov, V.](https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2020-

</div>
<div data-bbox=)

Passenger speeds as a function of human traffic density in peak hours of subway operation;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11202. doi: 10.4123/CUBS.112.2



0525

- 13 Zhang N., Liang Y., Zhou C., Niu M. and Wan F. (2022) Study on Fire Smoke Distribution and Safety Evacuation of Subway Station Based on BIM. *Applied Sciences*, **12**, 1–19. <https://doi.org/10.3390/app122412808>
- 14 Wei Z., Chu S., Huang Z., Qiu S. and Zhao Q. (2020) Optimization Design of X-Ray Conveyer Belt Length for Subway Security Check Systems in Beijing, China. *Sustainability (Switzerland)*, **12**, 1–14. <https://doi.org/10.3390/su12052133>
- 15 Qiao Y., Weng Y., Shi X., Zhu Z., Li C., Zhang X. and Liu J. (2023) Fault Tree Analysis for Subway Fire Evacuation with Agent-Based Modeling. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, **4**, 1–12. <https://doi.org/10.1186/s43065-023-00073-w>
- 16 Yan W., Meng X., Zhou H., Yang C., Chen Q., Oh S.J. and Cui X. (2022) Recent Developments in Evaluation Methods and Characteristics of Comfort Environment in Underground Subway. *Frontiers in Built Environment*, **8**, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1033046>
- 17 Marzouk M. and Abdelaty A. (2014) Monitoring Thermal Comfort in Subways Using Building Information Modeling. *Energy and Buildings*, **84**, 252–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.006>
- 18 Cheng C.H., Chow C.L. and Chow W.K. (2021) A Simulation Study of Tenability for Passengers in a Railway Tunnel with Arson Fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **108**, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103679>
- 19 Kuznetsov A. V., Shishkina E.L. and Rataj M. (2022) Comparison of Simulation and Analytical Models for the Distribution of a Group of Agents Moving in Random Directions. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, **46**, 8560–8572. <https://doi.org/10.1002/mma.9000>
- 20 Sakai T., Romano Alho A., Bhavathrathan B.K., Chiara G.D., Gopalakrishnan R., Jing P., Hyodo T., Cheah L. and Ben-Akiva M. (2020) SimMobility Freight: An Agent-Based Urban Freight Simulator for Evaluating Logistics Solutions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **141**, 1–36. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102017>
- 21 Fernandes J.V., Henriques E., Silva A. and Pimentel C. (2017) Modelling the Dynamics of Complex Early Design Processes: An Agent-Based Approach. *Design Science*, **3**, 1–34. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.17>
- 22 Kim I., Galiza R. and Ferreira L. (2013) Modeling Pedestrian Queuing Using Micro-Simulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **49**, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.018>
- 23 Zheng X., Li H.Y., Meng L.Y., Xu X.Y. and Yang Y.H. (2017) Simulating Queuing Behaviour of Pedestrians in Subway Stations. *Institution of Civil Engineers: Transport*, **170**, 1–8. <https://doi.org/10.1680/jtran.16.00084>
- 24 Akhter S., Ahsan M.N. and Sadeek Quaderi S.J. (2019) Modeling Ant Colony Optimization for Multi-Agent Based Intelligent Transportation System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, **10**, 277–284. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0101039>
- 25 Dashamirov F. and Javadli U. (2021) Development of a Methodology for Creating an Agent Based Model of Transport Hubs in Suburban Area. *Problems of Logistics, Management and Operation*, 153–156. <https://plmo.cyber.az/2021/papers/153-156.pdf>
- 26 Ballano A., Al-Rahamneh A., Serrano-Hernandez A. and Faulin J. (2023) Agent-Based Modelling and Simulation for Hub and Electric Last Mile Distribution in Vienna. *Computer Science*, **220**, 718–723. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.094>
- 27 Zou Q., Fernandes D.S. and Chen S. (2021) Agent-Based Evacuation Simulation from Subway Train and Platform. *Journal of Transportation Safety and Security*, **13**, 1–22. <https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1634661>
- 28 Russian Normative Standard SP 120.13330.2022. Subways. <https://docs.cntd.ru/document/1300886470>
- 29 Dembinski H., Schmelling M. and Waldi R. (2019) Application of the Iterated Weighted Least-Squares Fit to Counting Experiments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **940**, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.086>
- 30 Willberg M., Zingerle P. and Pail R. (2020) Integration of Airborne Gravimetry Data Filtering into Residual Least-Squares Collocation: Example from the 1 Cm Geoid Experiment. *Journal of Geodesy*, **94**, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01396-2>
- 31 Ovchinnikov A., Krasnochub E. and Bronstein V. (2010) Processing of Experimental Data by the

Shabunina, D.; Kudryavtsev, V.; Chizhikov, V.

Passenger speeds as a function of human traffic density in peak hours of subway operation;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11202. doi: 10.4123/CUBS.112.2



Least Squares Method. *Bulletin of SGAU*, 227–237. <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-eksperimentalnyh-dannyh-metodom-naimenshih-kvadratov/viewer>