This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
ISSN 2304-6295
Received: December 24, 2023 Accepted: January 9, 2024 Published: January 16, 2024

Capacity of metro station elements as a function of human traffic density

Sivakov, Ivan Anatolyevich [1]
Shabunina, Daria Evgenievna [1,2*]
Chizhikov, Vladimir Petrovich [1]

[1] LLC «Center for Research of Fire Hazardous Factors», Kudrovo, Russian Federation; i.a.sivakov@gmail.com (S.I.A.); d.shabunina00@gmail.com (S.D.E.); vovach1952@gmail.com (C.V.P.)
[2] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russian Federation;
Correspondence: email d.shabunina00@gmail.com; contact phone +79221559844

Keywords:

Escalator; Turnstile; Capacity; Experimental study; Subway; Passenger flow; Density of human traffic

Abstract:

The object of research is turnstiles and escalators of subway stations. The work aims to obtain dependence of turnstile and escalator capacity on human traffic density and to determine the maximum values of the capacity of escalators and turnstiles in the operational mode of the station. **Method.** To obtain the values of throughput capacities, experimental studies were conducted on observations of incoming passengers 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 turnstiles and escalators capacity on human traffic density were obtained. It was established that the maximum escalator capacity for ascent in the operational mode of the station is 5500 people/hour, for descent - 4200 people/hour. The maximum turnstile capacity at the operational mode of the station is 1430 people/hour. It was found that the Russian regulatory base overestimates the escalator capacity by 33.5% and underestimates the turnstile capacity by 43%.

1 Введение / Introduction

В последние десятилетия во всем мире присутствует тенденция к увеличению численности населения и площади городов, формированию новых жилых районов за пределами или на окраине агломераций. Данная тенденция вызывает необходимость развития объектов транспортной инфраструктуры [1], [2]. Для определения наиболее перспективной политики развития города первостепенный интерес представляет оценка взаимосвязей между сетевой инфраструктурой, социально-экономическими показателями и работой транспортной системы на основе опыта существующих городов. Недостаточное внимание к развитию общественного транспорта в городах ведет к падению качества жизни населения, что, следовательно, ведет к падению экономической привлекательности агломерации [3]–[5]. Таким образом, одной из приоритетных задач транспортной политики является развитие транспортной инфраструктуры в условиях стремительного роста населения и формирования мегаполисов.

Метрополитен – вид городского общественного транспорта, предназначенный для перевозки большого количества людей в условиях плотной жилой застройки. По сравнению с другими транспортами, метрополитен имеет отличительные характеристики, связанные с высокой пропускной и провозной способностями, расположением под землей и однозначными маршрутами (не подвержен влиянию других транспортов) [6]–[8]. Пропускная и провозная способности основных элементов метрополитена зависят от входного пассажиропотока, парности, технических характеристик подвижного состава и от объемно-планировочных решений

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

станций метрополитена [9]. Пассажиропоток – движение пассажиров по определенной траектории, определяемое как количество пассажиров, проходящих за единицу времени через рассматриваемую геометрию транспортной сети [10], [11]. Пассажиропоток определяет условия эксплуатации станции в утренний, вечерний «час пик» и при эксплуатационном режиме работы метрополитена (межпиковый период).

Платформы, вестибюли, эскалаторы, турникеты, входные двери и пересадочные узлы, непосредственно связанные с обслуживанием пассажиров, занимают значимое место в станционном комплексе метрополитена. Помимо выполнения своей основной функции, они должны обеспечивать безопасное и комфортное пребывание пассажиров на всем пути их передвижения [12], [13]. Безопасность нахождения пассажиров в метрополитене обуславливается следующими факторами [14], [15]:

– предотвращение повышенных скоплений людей на всех пассажирских топологиях станции;

– предотвращение общественно-опасного поведения пассажиров;

– обеспечение своевременной и безопасной эвакуации в случае возникновения чрезвычайной ситуации, в том числе пожара;

– проектирование необходимых с точки зрения прогнозного пассажиропотока размеров и количества вестибюлей, проходов, пандусов, дверей, турникетов, эскалаторов и платформ для обеспечения свободного передвижения пассажиров.

Комфортные условия нахождения пассажиров в метрополитене обуславливаются следующими факторами [16], [17]:

– создание благоприятной среды для пассажира на всем пути его следования;

– снижение уровня шума;

– предотвращение повышенных скоплений людей на всех пассажирских топологиях станции;

– достаточный уровень освещенности, необходимый для ориентации пассажиров на станциях и предотвращения переизбытка или недостатка освещенности, влияющей на самочувствие и здоровье пассажира.

Российский нормативный стандарт СП 120.13330.2022 «Метрополитены» регламентирует требования по пропускным и провозным способностям при проектировании метрополитенов (Таблица 1).

Таблица 1. Пропускная способность участков пути метрополитена
Table 1. Capacity of metro sites

Наименование участка пути	Ширина пути, м	Пропускная способность, чел./ч
Горизонтальный путь: одностороннее движение двустороннее движение через дверной проем	 1.0 1.0 0.8	 4000 3400 3200
Контрольный пункт: автоматический на входе автоматический на выходе	 0.5–1.0 0.5-1.0	 1200 2500
Эскалатор	1.0	8200
Лестница: одностороннее движение вверх одностороннее движение вниз двустороннее движение вверх и вниз	 1.0 1.0 1.0	 3000 3500 3200

Теоретическая пропускная способность эскалатора растет с увеличением скорости и/или с увеличением ширины ступени эскалатора [18–20]. Однако практическая пропускная способность эскалатора увеличивается только до скорости, равной 0.75 м/с, после достижения которой происходит снижение пропускной способности эскалатора по причине дискомфорта, с которым пассажиры сталкиваются на более высоких скоростях. В Российской Федерации, как правило, в метрополитене устанавливаются эскалаторы с шириной ленты 1 м и со скоростью движения 0.75 м/с [21]–[23].

В национальном стандарте GB 50157-2013 представлены зависимости пропускной способности эскалатора от скорости его движения: при 0.5 м/с максимальная пропускная способность составляет 6720 чел/ч, при 0.65 м/с – не более 8190 чел/ч. Исследование [24] указывает, что пропускная способность эскалатора в метрополитене зачастую ниже нормативного значения при эксплуатационном режиме работы по причине наличия или отсутствия

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

максимального пассажиропотока, неплотного распределения пассажиров (даже при максимальном пассажиропотоке люди не стоят вплотную друг к другу, всегда появляются пустые ступени эскалатора) и наличию спускающихся по эскалатору пассажиров (при размещении пассажиров в положении стоя в два ряда пропускная способность эскалатора увеличивается). В работе [25] определено, что максимально зафиксированные пропускные способности эскалаторов не наблюдаются в течение длительных периодов времени, поэтому пиковые значения не являются основополагающими для определения количества и размеров эскалаторов. Исходя из анализа имеющихся исследований, практическое значение пропускной способности эскалатора при эксплуатационном режиме работы станции ниже нормативного значения, приведенного в российском нормативном стандарте СП 120.13330.2022, что требует проведения дополнительных исследований для определения максимального значения пропускной способности эскалатора.

Створчатые и роторные турникеты используются в метрополитенах и оказывают существенное влияние на проход пассажиров к эскалаторам. Проведены исследования по влиянию турникетов на эвакуацию пассажиров на станциях метрополитена. Например, в работе [26] исследуется влияние створчатых турникетов на эвакуацию пешеходов. В программном комплексе Pathfinder (https://www.thunderheadeng.com/pathfinder) созданы две модели эвакуации с турникетами в виде плоских и клиновидных створок. Получено, что скорость эвакуации через турникеты клиновидной формы выше, чем через турникеты плоской формы. Исследование [27] направлено на определение параметров движения людских потоков через турникеты при максимальной плотности людского потока при эвакуации. При этом отсутствуют исследования, направленные на изучение пропускной способности турникетов и особенностей движения пассажиров через них при эксплуатационном режиме работы станции.

При плотном пассажирском потоке распределение пассажиров относительно турникетов осуществляется равномерно [28]; при превышении пропускной способности турникетов над пропускной способностью эскалаторов, скопление пассажиров происходит перед спуском пассажиров на платформу станции (Рисунок 1).

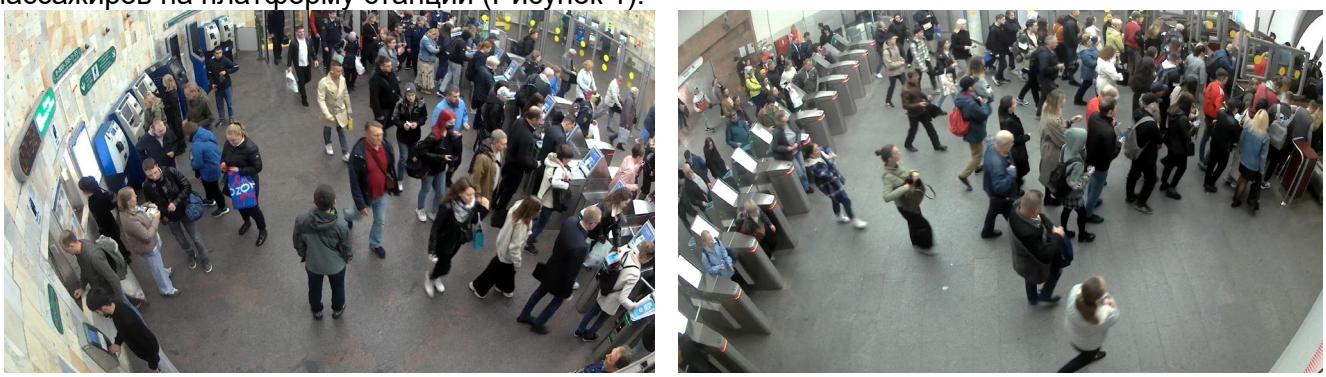


Рис. 1 - Скопление пассажиров перед турникетом и эскалаторами
Fig. 1 - Crowding of passengers before turnstiles and escalators

Целью работы является получение зависимости пропускной способности турникетов и эскалаторов от плотности людского потока и определение максимальных значений пропускной способности эскалаторов и турникетов при эксплуатационном режиме работы станции.

Для достижения цели решены следующие задачи: проведены экспериментальные исследования по наблюдениям в часы пиковой загруженности станции за входящими пассажирами на наиболее загруженных станциях Петербургского метрополитена, составлен алгоритм обработки экспериментальных данных, по которому получены зависимости пропускной способности турникетов и эскалаторов от плотности людского потока, проведено сравнение экспериментальных данных по пропускным способностям основных элементов станции с нормативными пропускными способностями.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

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 общим количеством прошедших через двери типа «метро», турникеты и эскалаторы.

Для определения пропускных способностей турникетов проведены экспериментальные исследования на станциях «Сенная площадь», «Площадь Восстания» и «Проспект Ветеранов» Петербургского метрополитена в утренний час «пик» (Рисунок 2).

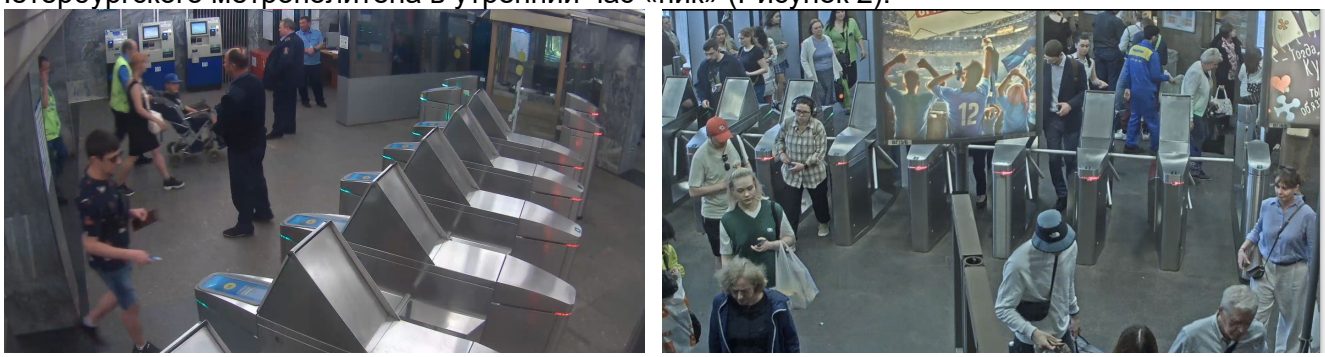


Рис. 2 - Расположение турникетов на станциях «Проспект Ветеранов» и «Сенная площадь»
Fig. 2 - Location of turnstiles at the stations «Prospekt Veteranov» and «Sennaya Ploshchad»

Для определения пропускных способностей эскалаторов проведены экспериментальные исследования на станциях «Сенная площадь», «Садовая», «Площадь Восстания» и «Московская» Петербургского метрополитена в утренний час «пик» (Рисунок 3).

Рис. 3 - Расположение эскалаторов на станциях «Московская» и «Садовая»
Fig. 3 - Location of escalators at the stations «Moskovskaya» and «Sadovaya»

Пропускная способность элемента $i-ого$ пути движения людей определяется как отношение количества людей N_i, проходящих через него в единицу времени, по формуле (1):

$$Q_i = \frac{N_i}{\Delta t}, \tag{1}$$

где N_i – количество пассажиров, прошедших через рассматриваемый элемент метрополитена, чел.; Δt – интервал времени, мин.

Необходимое количество наблюдений n для каждой выборки определяется по формуле (2):

$$n = \frac{\sigma^2 \cdot (t_\alpha)^2}{E^2}, \tag{2}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение величины наблюдения; t_α – критерий существенности при доверительной вероятности $(1-\alpha)$; E – максимальное значение ошибки для выборки.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

2.2. Обработка экспериментальных исследований / Processing of experimental studies

При обработке экспериментальных данных использовался метод наименьших квадратов, применяемый для процессов, характер которых детерминированным образом зависит от определенных причин [29]. Метод наименьших квадратов позволяет построить оптимальную оценку моментов распределения ошибки эксперимента, а также решить вопрос о том, является ли полученная модель адекватной [30], [31]. В общем случае предполагается, что между независимыми переменными и результатом процесса существует функциональная связь, описываемая уравнением (3):

$$y = y(x), \tag{3}$$

где $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)'$ – вектор значений независимых переменных.

Для использования при обработке результатов экспериментальных исследований принята полиномиальная модель второго порядка линейная относительно коэффициентов α_i вида (формула (4)):

$$y(a,x) = a_0 \cdot f_0(x) + a_1 \cdot f_1(x) + \ldots + a_k \cdot f_k(x). \tag{4}$$

Исходными данными при определении значений коэффициентов α_i являются:

– матрица, описываемая уравнением (5):

$$F = \left(f_k\left(x^N\right)\right) = \begin{bmatrix} f_0(x^1) & f_1(x^1) & \ldots & f_k(x^1) \\ f_0(x^2) & f_1(x^2) & \ldots & f_k(x^2) \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ f_0(x^N) & f_1(x^N) & \ldots & f_k(x^N) \end{bmatrix}; \tag{5}$$

– вектор результатов наблюдений, описываемый уравнением (6):

$$F\tilde{Y} = \left(\tilde{y}^1, \tilde{y}^2, \ldots, \tilde{y}^N\right)'. \tag{6}$$

Расчет коэффициентов производится из условия обеспечения минимального значения расширенной квадратичной формы согласно уравнению (7):

$$S = \left(\tilde{y}^i - y^i\right)^2 = \left|\tilde{Y} - Y\right|^2 = \left(\tilde{Y} - Y\right)'\left(Y - Y\right). \tag{7}$$

Оценка дисперсии наблюдений вычисляется с помощью суммы квадратов ошибок (формула (8)) с числом степеней свободы φ_2 (формула (9)) по формуле (10):

$$S_e = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{\gamma}(\tilde{y}^{ij} - \tilde{y}^i)^2, \tag{8}$$

$$\varphi_2 = N \cdot (\gamma - 1), \tag{9}$$

$$s^2 = \frac{S_e}{\gamma \cdot \varphi_2}, \tag{10}$$

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, характеризующая адекватность модели, рассчитывается по формуле (11) и имеет $\varphi_1 = N - k - 1$ степеней свободы.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

$$S_D = \sum_{i=1}^{N} \gamma \left(\tilde{y}^i - \hat{y}^i \right)^2 . \quad (11)$$

Величина F – критерия, характеризующего адекватность модели, определяется из соотношения (12):

$$F = \frac{S_D / \varphi_1}{S_e / \varphi_2}. \quad (12)$$

Доверительный интервал для коэффициентов с вероятностью P определяется из выражения (13):

$$\left| \hat{a}_i - a_i \right| < s_i \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

где ε – табличное значение коэффициента, определяемого из условия (14):

$$P\left(X < \varepsilon \right) = 1 - a. \quad (14)$$

$\hat{a}_i$ – вектор коэффициентов модели, определяемый по формуле (15):

$$\hat{a} = \left(F'F \right)^{-1} F'^{\tilde{Y}}, \quad (15)$$

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

Проверка значимости коэффициентов модели производится из условия (16):

$$\left| \hat{a}_i \right| > t_{кр} \cdot s_i, \quad (16)$$

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

Критерии выбора точек для статистической обработки:

– максимальная длительность интервала определения измеряемого значения;
– 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 данной методики обработки экспериментальных значений разработана программа, в которую вошли математические зависимости (1)-(16) для автоматизации процесса.

3 Результаты и обсуждение / Results and Discussion

3.1. Пропускная способность эскалатора / Escalator capacity

Результаты наблюдений, проведенных для определения пропускной способности эскалаторов, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Экспериментальные исследования пропускной способности эскалаторов
Table 2. Experimental studies on escalator capacity

Плотность потока перед эскалаторами D, чел/м^2	Количество перевозимых людей, чел/ч	Плотность потока перед эскалаторами D, чел/м^2	Количество перевозимых людей, чел/ч
Станция «Сенная площадь»			
3.6	4740	2.8	3766
3.6	5112	3.3	4778
3.5	4680	3.1	4708
3.5	4500		
Станция «Садовая»			
3.0	3893	3.5	4969

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

3.55	5124	2.9	4840
3.55	5184	2.9	5211
3.5	5002		
Станция «Площадь Восстания»			
1.0	4800	2.5	4937
1.2	5520	2.0	4500
1.0	4700	3.0	5236
1.0	4800	3.0	5049
1.5	5142	3.0	5216
1.5	5040	2.5	4922
1.0	3789	3.0	5203
1.0	3600	3.0	5224
1.5	5040	2.0	4629
1.0	3789	2.0	4423
1.0	3600	3.0	5445
1.5	5040	3.0	5340
1.0	3789	3.0	5160
1.0	3600	3.5	5600
2.0	3832	3.0	5449
1.5	3400	3.0	5300
1.0	3115	3.0	5280
2.0	3600	3.0	5192
2.0	3600	2.0	5073
1.5	3333	2.5	4779
2.0	3806	2.0	4645
2.0	3764	2.5	4832
1.5	3877	2.0	4560
2.0	4650	2.0	4431
1.5	4232	2.0	4582
2.0	4686	2.5	4800
3.0	5165	2.5	4900
1.5	4140		
Станция «Московская»			
2.3	4647	3.1	5328
3.1	5119		

Графическое представление множества точек и линия тренда, соответствующая квадратичному приближению, приведены на рисунке 4.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

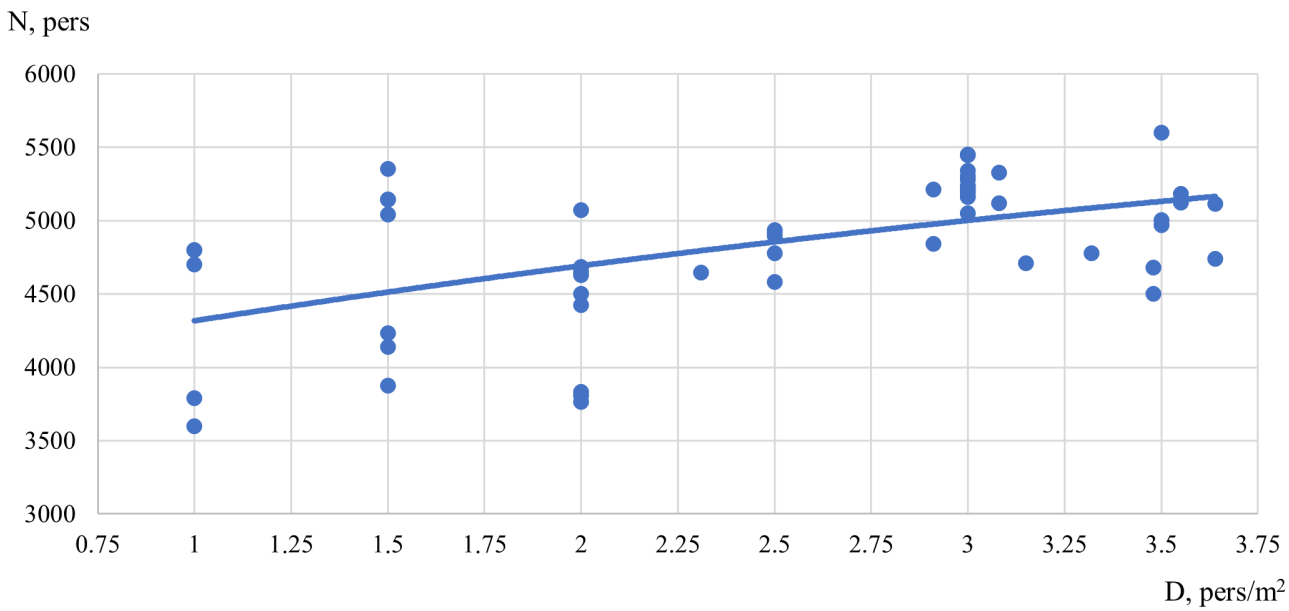


Рис. 4 - Зависимость количества людей, перевозимых эскалатором, от плотности потока перед эскалатором
Fig. 4 - Dependence of the number of people transported by the escalator on the flow density before the escalator

Исходная матрица для определения параметров модели, остаточной суммы квадратов, оценки адекватности модели и значимости коэффициентов модели представлена в таблице 3.

Таблица 3. Исходная матрица для определения параметров модели
Table 3. Initial matrix for determining model parameters

$f_0(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$\tilde{y}$	$\widetilde{y_1}$	$\widetilde{y_2}$
1	-1	1	3694	3600	3789
1	-0.6	0.36	4186	4232	4140
1	-0.2	0.04	4495	4560	4431
1	0.2	0.04	4929	4937	4922
1	0.6	0.36	5223	5119	5328
1	1	1	5440	5600	5280

Значения x_i представлены в безразмерном виде в виде уравнения (17):

$$x_i = \frac{D_i - 0.5 \cdot (D_{max} + D_{min})}{0.5 \cdot (D_{max} - D_{min})}, \quad (17)$$

где D_i – действительное значение переменной плотности людского потока; $D_{max} = 3.5 \frac{чел}{м^2}, D_{min} = 1.0 \frac{чел}{м^2}$ – максимальное и минимальное значения переменной плотности людского потока соответственно.

Результаты расчетов приведены на рисунке 5.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

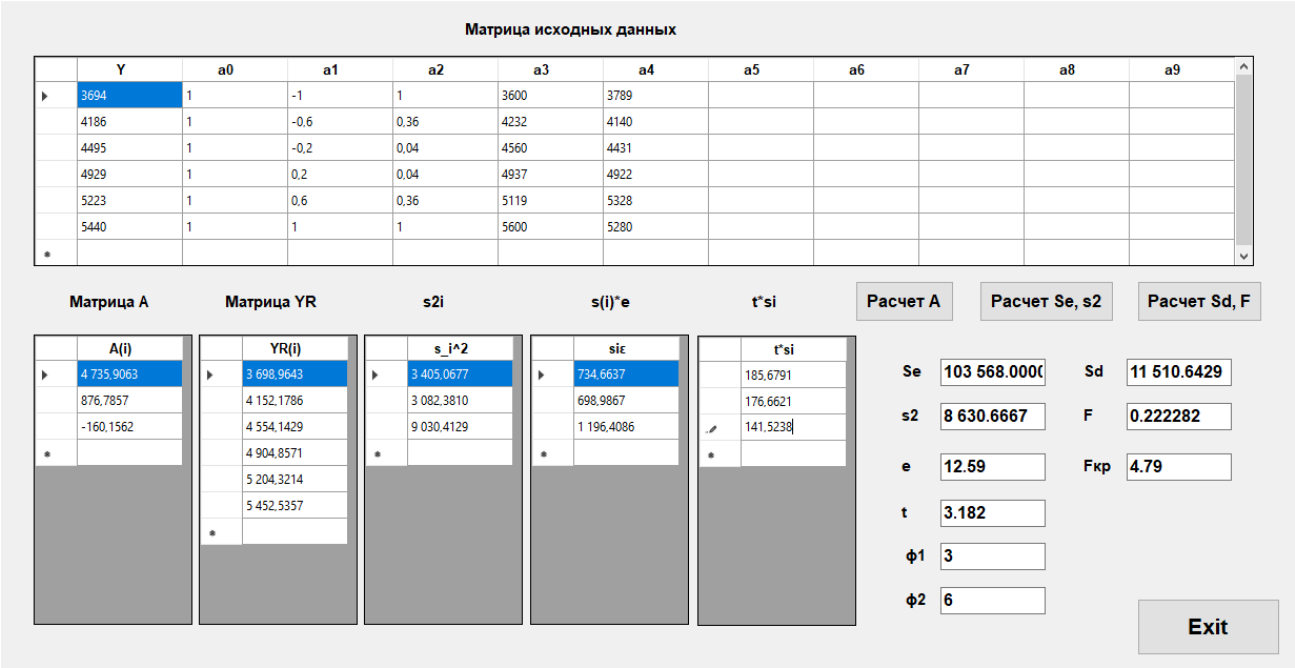


Рис. 5 - Результаты расчета пропускной способности эскалатора
Fig. 5 - Results of escalator capacity calculation

На основании результатов проведенных расчетов получена полиномиальная модель второго порядка, представленная уравнением (18):

$$y = 4735.9 + 876.8 \cdot x - 160.2 \cdot x^2, \tag{18}$$

где y – пропускная способность эскалатора, чел/ч; x – плотность потока перед эскалаторами в безразмерном виде.

Критическое значение критерия F для принятой вероятности $P = 0.95$ и степеней свободы $n_1 = \varphi_1 = 3$, $n_2 = \varphi_2 = 6$ составляет $F_{кр} = 4.79$ (рисунок 5).

Условие $F = 0.222 < F_{кр} = 4.79$, следовательно, модель является адекватной.

Критическое значение распределения Стьюдента для заданного уровня значимости $\alpha = 0.05$ и степени свободы $\varphi_2 = 6$ составляет $t_{кр} = 3.182$ (рисунок 5).

Оценка значимости коэффициентов модели определяется условием (16):

Коэффициент $a_0 = |4735.9| > 185.68$;

Коэффициент $a_1 = |876.8| > 176.66$;

Коэффициент $a_2 = |-160.2| > 141.52$.

Таким образом, условие значимости коэффициентов выполняется для всех значений.

Пропускная способность эскалатора как функция от плотности людского потока перед эскалаторами определяется зависимостью (19):

$$N = 2638.9 + 1162.83 \cdot D - 102.53 \cdot D^2, \tag{19}$$

где N – пропускная способность эскалатора, чел/ч; D – плотность людского потока, чел/м^2.

3.2. Пропускная способность турникета / Turnstile capacity

Результаты наблюдений, проведенных для определения пропускной способности турникетов, приведены в таблице 4.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Таблица 4. Экспериментальные исследования пропускной способности турникетов
Table 4. Experimental studies on turnstiles capacity

Плотность потока перед турникетами D, чел/м^2	Количество людей, проходящих через турникет, чел/ч	Плотность потока перед турникетами D, чел/м^2	Количество людей, проходящих через турникет, чел/ч
Станция «Сенная площадь»			
0.9	926	1.0	1010
0.9	933	1.0	920
1.0	1008		
Станция «Площадь Восстания»			
2.0	1110	1.5	1081
1.5	1063		
Станция «Проспект Ветеранов»			
2.5	1404	2.3	1368
2.5	1480	2.0	1232

Графическое представление множества точек и линия тренда, соответствующая квадратичному приближению, приведены на рисунке 6.

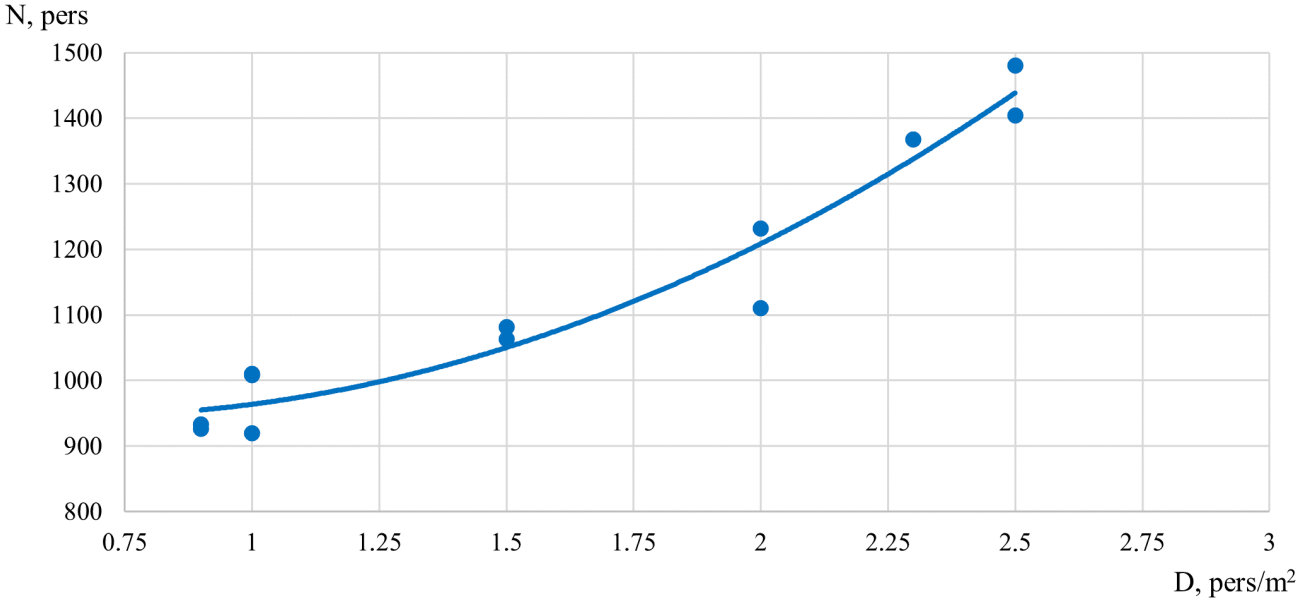


Рис. 6 - Зависимость количества людей, проходящих через турникет, от плотности потока перед турникетами
Fig. 6 - Dependence of the number of people passing through the turnstile on the flow density before the turnstile

Исходная матрица для определения параметров модели, остаточной суммы квадратов, оценки адекватности модели и значимости коэффициентов модели представлена в таблице 5.

Таблица 5. Исходная матрица для определения параметров модели
Table 5. Initial matrix for determining model parameters

$f_0(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$\tilde{y}$	$\widetilde{y_1}$	$\widetilde{y_2}$
1	-1	1	926	920	933
1	-0.875	0.7656	1009	1008	1010
1	-0.25	0.0625	1072	1063	1081
1	0.375	0.1406	1171	1232	1110
1	1	1	1442	1480	1404

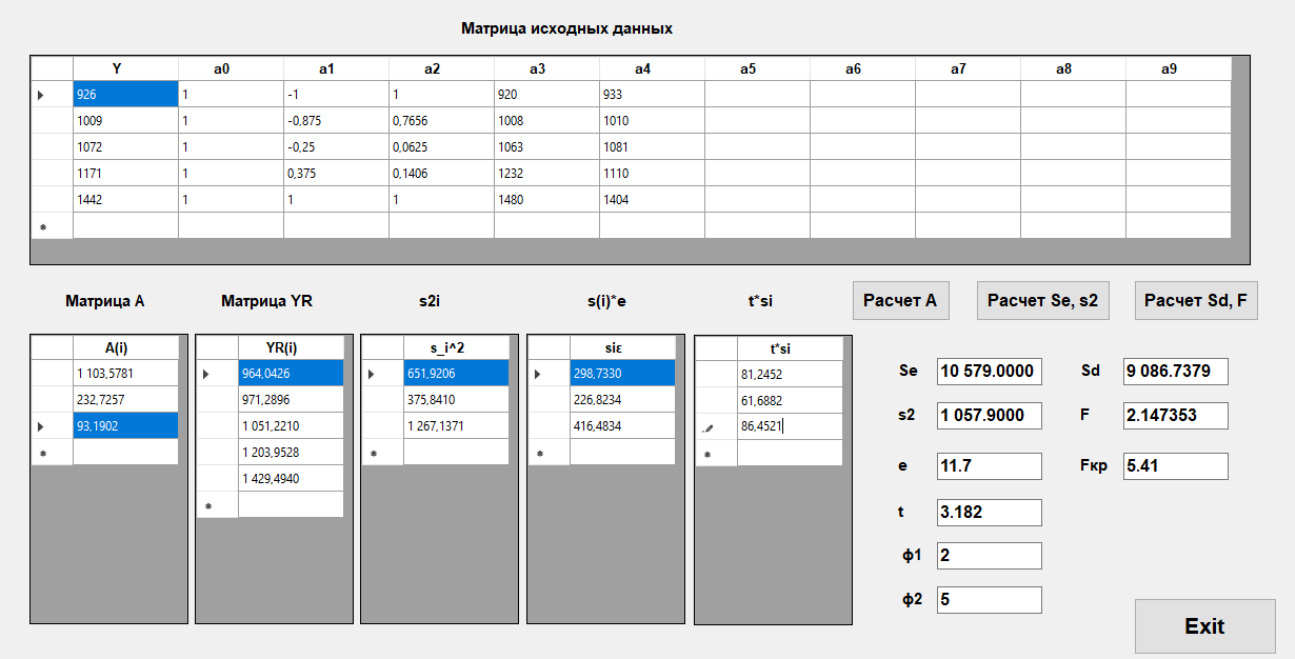
Значения x_i представлены в безразмерном виде в виде уравнения (20):

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

$$x_i = \frac{D_i - 0.5 \cdot (D_{max} + D_{min})}{0.5 \cdot (D_{max} - D_{min})}, \tag{20}$$

где D_i – действительное значение переменной плотности людского потока; $D_{max} = 2.5 \frac{чел}{м^2}, D_{min} = 0.9 \frac{чел}{м^2}$ – максимальное и минимальное значения переменной плотности людского потока соответственно.

Результаты расчетов приведены на рисунке 7.



Матрица исходных данных

Y	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9
926	1	-1	1	920	933					
1009	1	-0,875	0,7656	1008	1010					
1072	1	-0,25	0,0625	1063	1081					
1171	1	0,375	0,1406	1232	1110					
1442	1	1	1	1480	1404					

Матрица A

A(i)
1 103,5781
232,7257
93,1902

Матрица YR

YR(i)
964,0426
971,2896
1 051,2210
1 203,9528
1 429,4940

s2i

s_i^2
651,9206
375,8410
1 267,1371

s(i)*e

si∈
298,7330
226,8234
416,4834

t*si

t*si
81,2452
61,6882
86,4521

Расчет A | Расчет Se, s2 | Расчет Sd, F

Se	10 579.0000	Sd	9 086.7379
s2	1 057.9000	F	2.147353
e	11.7	Fкр	5.41
t	3.182		
ϕ1	2		
ϕ2	5		

Exit

Рис. 7 - Результаты расчета пропускной способности турникета
Fig. 7 - Results of turnstile capacity calculation

На основании результатов проведенных расчетов получена полиномиальная модель второго порядка, представленная уравнением (21):

$$y = 1103.6 + 232.7 \cdot x + 93.2 \cdot x^2, \tag{21}$$

где y – пропускная способность турникета, чел/ч; x – плотность потока перед турникетом в безразмерном виде.

Критическое значение критерия F для принятой вероятности $P = 0.95$ и степеней свободы $n_1 = \varphi_1 = 2$, $n_2 = \varphi_2 = 5$ составляет $F_{кр} = 5.41$ (рисунок 7).

Условие $F = 2.147 < F_{кр} = 5.41,$, следовательно, модель является адекватной.

Критическое значение распределения Стьюдента для заданного уровня $\alpha = 0.05$ и степени свободы $\varphi_2 = 5$ составляет $t_{кр} = 3.182$ (рисунок 7).

Оценка значимости коэффициентов модели определяется условием (16):

Коэффициент $a_0 = |1103.6| > 81.24;$

Коэффициент $a_1 = |232.7| > 61.69;$

Коэффициент $a_2 = |93.2| > 86.45.$

Таким образом, условие значимости коэффициентов выполняется для всех значений.

Пропускная способность турникета как функция от плотности людского потока перед эскалаторами определяется зависимостью (22):

$$N = 1030.0 - 204.3 \cdot D + 145.6 \cdot D^2, \tag{22}$$

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

где N – пропускная способность турникета, чел/ч; D – плотность людского потока, чел/м^2.

3.3. Обсуждение / Discussion

В таблицах 6-7 представлено сравнение полученных экспериментальных данных по пропускным способностям эскалаторов и турникетов с пропускными способностями, представленными в российском нормативном стандарте СП 120.13330.2022.

Таблица 6. Сравнение экспериментальных и нормативных пропускных способностей эскалаторов
Table 6. Comparison of experimental and normative escalator capacities

Плотность потока, чел/м^2	Экспериментальная пропускная способность, чел/ч	Нормативная пропускная способность, чел/ч	Расхождение, %
1.00	3700	8200	54.9
1.25	3932	8200	52.0
1.50	4152	8200	49.4
1.75	4360	8200	46.8
2.00	4554	8200	44.5
2.25	4736	8200	42.2
2.50	4905	8200	40.2
2.75	5061	8200	38.3
3.00	5205	8200	36.5
3.25	5335	8200	34.9
3.50	5453	8200	33.5

Таблица 7. Сравнение экспериментальных и нормативных пропускных способностей турникетов
Table 7. Comparison of experimental and normative turnstile capacities

Плотность потока, чел/м^2	Экспериментальная пропускная способность, чел/ч	Нормативная пропускная способность, чел/ч	Расхождение, %
1.00	971	1000	2.9
1.25	1002	1000	-0.2
1.50	1051	1000	-5.1
1.75	1118	1000	-11.8
2.00	1204	1000	-20.4
2.25	1307	1000	-30.7
2.50	1429	1000	-42.9

Максимальная зафиксированная плотность перед эскалаторами – 3.5 чел/м^2, перед турникетами – 2.5 чел/м^2. СП 120.13330.2022 приводит значение пропускной способности: 8200 чел/ч – для эскалатора, 1000 чел/ч – для турникета (Таблица 1).

По экспериментальному исследованию выявлено, что пропускная способность эскалатора повышается с увеличением плотности людского потока (Таблица 6). Максимальная плотность, зафиксированная в утренний и вечерний час пики перед эскалаторами, составляет 3.5 чел/м^2, при которой пропускная способность эскалатора равняется 5453 чел/ч. Следовательно, для дальнейших расчетов применяется пропускная способность эскалатора 5500 чел/ч. Таким образом, нормативное значение пропускной способности эскалатора, приведенное в СП 120.13330.2022, завышено на 33.5% по сравнению с экспериментальным значением.

По экспериментальному исследованию выявлено, что пропускная способность турникета повышается с увеличением плотности людского потока (Таблица 7). Максимальная плотность, зафиксированная в утренний и вечерний час пики перед турникетами, составляет 2.5 чел/м^2, при которой пропускная способность турникета равняется 1429 чел/ч. Следовательно, для дальнейших расчетов применяется пропускная способность турникета 1430 чел/ч. Таким образом, нормативное значение пропускной способности турникета, приведенное в СП 120.13330.2022, занижено на 43% по сравнению с экспериментальным значением.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

4 Заключение / Conclusions

Пропускная и провозная способность основных элементов метрополитена зависит от принятых объемно-планировочных решений станции и входного пассажиропотока. Определение пропускных способностей практически важно для обеспечения комфортного и безопасного пребывания пассажиров в метрополитене и непрерывного функционирования станции. По результатам проведения экспериментальных исследований:

1. Получены зависимости пропускной способности турникетов и эскалаторов от плотности людского потока;
2. Получены максимальные значения пропускной способности турникетов и эскалаторов при эксплуатационном режиме работы станции;
3. Проведено сравнение экспериментальных данных по пропускным способностям основных элементов станции с нормативными пропускными способностями.

На основании полученных зависимостей пропускной способности турникетов и эскалаторов от плотности людского потока сделаны следующие выводы:

1. При увеличении плотности людского потока увеличивается пропускная способность элементов станции, при этом практической значимостью обладает максимальное значение пропускной способности: для турникета – 1430 чел/ч, для эскалатора – 5500 чел/ч.
2. Скопление перед эскалатором на спуск происходит при большей суммарной пропускной способности турникетов, перед эскалатором на подъем – при большей суммарной провозной способности подвижных составов по линиям.
3. При малом значении плотности людского потока получена низкая пропускная способность турникетов и эскалаторов по причине равномерного распределения людей.

Полученные максимальные пропускные способности основных элементов станции могут быть применены при решении практических задач:

- Для определения необходимого и достаточного количества турникетов и эскалаторов при проектировании и реконструкции станций метрополитена;
- Для оценки максимальной пропускной и провозной способности станции метрополитена.

References

1 Han, T., Zhao, J. and Li, W. (2020) Smart-Guided Pedestrian Emergency Evacuation in Slender-Shape Infrastructure with Digital Twin Simulations. *Sustainability (Switzerland)*, **12**. 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**. https://doi.org/10.3390/ijerph15061172

3 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

4 Gao, Y. and Zhu, J. (2022) Characteristics, Impacts and Trends of Urban Transportation. *Encyclopedia*, **2**. https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020078

5 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 (Switzerland)*, **13**. https://doi.org/10.3390/su13116366

6 Liang, X., Qin, H. and Xie, M. (2016) Simulation Study of Passenger Flow Characteristics in Subway Passage. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. https://doi.org/10.12783/dtcse/cmsam2016/3565

7 Xue, G., Gong, D., Zhang, J., Zhang, P. and Tai, Q. (2020) Passenger Travel Patterns and Behavior Analysis of Long-Term Staying in Subway System by Massive Smart Card Data. *Energies*, **13**. https://doi.org/10.3390/en13102670

8 Qiao, R., Wu, Z., Gao, S., Jiang, Q., Liu, X., Huang, C., Xia, L. and Chen, M. (2023) Towards Inclusive Underground Public Transportation: Gender Differences on Thermal Comfort. *Building and Environment*, **242**. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110569

9 Peimbert, M. and Alcaraz, L.D. (2022) Where Environmental Microbiome Meets Its Host: Subway and Passenger Microbiome Relationships. *Molecular Ecology*. https://doi.org/10.1111/mec.16440

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

10 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**. https://doi.org/10.1007/s00521-018-3793-6

11 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**. https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1741778

12 Zhang, B., Xu, Z.S., Zhao, Q.W. and Liu, Y.Y. (2014) A Study on Theoretical Calculation Method of Subway Safety Evacuation. *Procedia Engineering*, **71**. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.085

13 Piltan, F., Kim, C.H. and Kim, J.M. (2022) Influence of Fastener Failure on Dynamic Performance of Subway Vehicle. *Applied Sciences (Switzerland)*, **12**. https://doi.org/10.3390/app12136769

14 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**. https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2020-0525

15 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 (Switzerland)*, **12**. https://doi.org/10.3390/app122412808

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**. 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**. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.006

18 Kahali, D. and Rastogi, R. (2021) Comparative Analysis of Escalator Capacity at Metro Stations: Theory versus Practice. *Transportation*, **48**. https://doi.org/10.1007/s11116-020-10160-6

19 Wang, Z., Pang, Y., Gan, M., Skitmore, M. and Li, F. (2022) Escalator Accident Mechanism Analysis and Injury Prediction Approaches in Heavy Capacity Metro Rail Transit Stations. *Safety Science*, **154**. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105850

20 Gnendiger, C., Chraibi, M. and Tordeux, A. (2023) Come Together: A Unified Description of the Escalator Capacity. *PLoS ONE*, **18**. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282599

21 Bardyshev, O., Popov, V. and Filin, A. (2018) On the Safety of Escalators in Subways. *Bulletin IAELS*, **3**, 10–14. https://elibrary.ru/item.asp?id=36310024

22 Lee, J.M. (2022) Urban Design in Underground Public Spaces: Lessons from Moscow Metro. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **21**. https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1941978

23 Osipov, V., Zhukova, N., Subbotin, A., Glebovskiy, P. and Evnevich, E. (2022) Intelligent Escalator Passenger Safety Management. *Scientific Reports*, **12**. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09498-x

24 Lu, Y. (2022) Research on the Capacity of the Escalator in Subway Station. *Advances in Transportation and Logistics*, **1**, 1–4. https://www.sandermanpub.com/uploads/20220719/4c714e8f679d1f5ddbaefbad20e23bdc.pdf

25 Bodendorf, H., Osterkamp, M., Seyfried, A. and Holl, S. (2014) Field Studies on the Capacity of Escalators. *Transportation Research Procedia*, **2**, 213–218. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.037

26 Ding, Y., Liu, X., Weng, F., Li, Q. and Li, W. (2021) Influences of Wing Gate Turnstiles' Characteristics on Pedestrian Evacuation Based on Agent-Based Egress Model. *Science Progress*, **104**. https://doi.org/10.1177/00368504211018058

27 Parfenenko, A. and Semenenko, E. (2022) Study of Turnstiles Capacity at Subway Stations. *Natural and technical sciences*, **168**, 294–299. https://elibrary.ru/item.asp?id=48658662

28 Fathi-Kazerooni, S., Rojas-Cessa, R., Dong, Z. and Umpaichitra, V. (2021) Correlation of Subway Turnstile Entries and COVID-19 Incidence and Deaths in New York City. *Infectious Disease Modelling*, **6**. https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.11.006

29 Ovchinnikov, A., Krasnochub, E. and Bronstein, V. (2010) Processing of Experimental Data by the Least Squares Method. *Bulletin of SGAU*, 227–237. https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-eksperimentalnyh-dannyh-metodom-naimenshih-kvadratov/viewer

30 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**.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.086

31 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**. https://doi.org/10.1007/s00190-020-01396-2