

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-60-66

УДК 004.942

## Исследование влияния человеческих факторов на скорость движения рельсового городского транспорта

Юлия Александровна Ляховенко<sup>1</sup>, Илья Юрьевич Попов<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>1</sup> [lyakhovenko.kam@gmail.com](mailto:lyakhovenko.kam@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7396-2831><sup>2</sup> [ilyapopov27@gmail.com](mailto:ilyapopov27@gmail.com)✉, <https://orcid.org/0000-0002-6407-7934>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлена модель оценки состояния транспортных узлов движения общественного рельсового транспорта. Исследована зависимость скорости движения рельсового городского транспорта от влияния внешних случайных факторов, зависящих от человека (human factors). Учтены такие факторы, как движение других транспортных средств и пешеходов, ремонтные работы на участках дорог, а также плотность потока транспортных средств и пешеходов. Предложенная модель оценки транспортного узла содержит множество перекрестков, линий движения рельсового транспорта и полос смешенного движения в рамках правил дорожного движения. **Метод.** Решение задачи построено на методологии мультиагентных систем. Основа предложенного подхода — определение архитектуры отдельных агентов, входных параметров предполагаемых откликов системы. Для построения модели движения транспортных потоков с различными видами транспортных средств использована программная платформа PTV Vissim. **Основные результаты.** В ходе симуляции мультиагентной системы выявлена значительная зависимость скорости движения городского рельсового транспорта от плотности потока движения и наличия ремонтных работ. Отличительная особенность предложенного подхода — учет влияния человеческого фактора. **Практическая значимость.** Полученный подход может быть использован при проектировании транспортных узлов беспрепятственного движения беспилотного рельсового городского транспорта.

### Ключевые слова

многоагентные системы, моделирование, железнодорожный транспорт, human factors, моделирование транспортных потоков

### Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта 2019-0898 «Многоуровневое управление сложными техническими системами».

**Ссылка для цитирования:** Ляховенко Ю.А., Попов И.Ю. Исследование влияния человеческих факторов на скорость движения рельсового городского транспорта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 1. С. 60–66. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-60-66

## A study of the influence of human factors on the speed of urban rail transport

Julia A. Lyakhovenko<sup>1</sup>, Ilya Yu. Popov<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>1</sup> [lyakhovenko.kam@gmail.com](mailto:lyakhovenko.kam@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7396-2831><sup>2</sup> [ilyapopov27@gmail.com](mailto:ilyapopov27@gmail.com)✉, <https://orcid.org/0000-0002-6407-7934>

### Abstract

The paper presents a model for assessing the state of transport hubs of public rail transport and investigates the dependence of the movement speed of urban rail transport on the influence of external random human-based factors. The study considers the following factors: the movement of other vehicles and pedestrians, repair on road sections, and the density of traffic of vehicles and pedestrians. The proposed model of the transport hub contains many intersections,

© Ляховенко Ю.А., Попов И.Ю., 2022

rail traffic lines, and mixed traffic lanes within the framework of the traffic rules. The solution to the problem is based on the methodology of multi-agent systems. The basis of the proposed approach is the definition of the architecture of individual agents and the input parameters of the expected system responses. The software platform PTV Vissim, which allows building models of traffic flows with various types of vehicles, is used. During the simulation of the multi-agent system, a significant dependence of the speed of urban rail transport on the traffic density and the presence of repair work was revealed. A distinctive feature of the proposed approach is that it considers the influence of the human factor. The obtained approach can be used to design transport hubs for the unimpeded movement of unmanned urban rail transport.

#### Keywords

multi-agent systems, modeling, railway transport, human factors, modeling of traffic flows

#### Acknowledgements

This work is partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation, state assignment No. 2019-0898.

**For citation:** Lyakhovenko Ju.A., Popov I.Yu. A study of the influence of human factors on the speed of urban rail transport. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 60–66 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-60-66

## Введение

Влияние человека способствует большому количеству инцидентов, которые в том числе происходят в железнодорожной системе [1]. Оперативное выявление и устранение человеческих факторов (human factors), а также сдерживание последствий, возникающих в результате их возникновения, позволяют сделать железнодорожный транспорт безопаснее [2]. Первый шаг в процессе обеспечения безопасности — выявление факторов, которые часто приводят к возникновению инцидентов, что позволяет разработать соответствующие стратегии предотвращения и/или смягчения последствий.

На сегодняшний день в России нет исследований, которые бы систематически изучали влияние человеческого фактора на систему железнодорожного движения.

В настоящей работе выполнен обзор существующих подходов к выявлению зависимости железнодорожного движения от человеческого фактора. Представлен анализ влияния внешних случайных факторов на скорость движения рельсового городского транспорта — трамвая, на основе которого составлена мультиагентная система зависимости скорости движения трамвая от этих факторов. Выполнено моделирование представленной системы и обсуждение его результатов.

## Обзор предметной области

Существует широкая область, охватывающая бдительность и восприятие машинистов поездов, их распознавание и действия в соответствии со знаками и сигналами. Это включает также исследования дизайна систем указателей и сигнализации. Из всех вопросов человеческого фактора на железнодорожном транспорте эта область была наиболее изучена на протяжении многих лет [3, 4]. Одна из причин данного изучения — связь с сильными исследовательскими программами, охватывающими те же темы, что и вождение автомобиля.

В работах [5, 6] изучено влияние человеческого фактора на работу планировщиков, например, в составлении расписания, организации владения (пути для технического обслуживания) и для работы в чрезвычайных ситуациях. В [7] рассмотрены модели системного уров-

ня, включая модели распределенного познания всей железнодорожной системы, а также взаимодействия и репрезентации человек-человек, и человек-артефакт. В [8] начат анализ руководств и стандартов безопасности, связанных с человеческим фактором для получения соответствия требованиям железнодорожных приложений и руководства ресурсами, планирующими и проектирующими сети завтрашнего дня [8]. В значительной степени связанный с подходом к общей системной эргономике, человеческий фактор на железнодорожном транспорте также дал дальнейшее развитие понятию и практике интеграции человеческого фактора при разработке систем. Достижения в этой области часто скрываются в документации по коммерческим проектам [9].

## Анализ факторов

Скорость движения трамвая в контексте представленной работы зависит от следующих факторов: от других участников дорожного движения (транспортных средств (ТС) и пешеходов (пассажиры), нуждающихся в посадке/высадке в/из трамвая); ремонтных работ и уровня загруженности участка дорожного движения.

Трамвай описывается следующим набором атрибутов параметров движения: координаты и направление; средняя скорость на участке; наличие остановки на участке.

Разрабатываемая для исследования модель имитирует процессы дорожного движения трамвая с влиянием на него всех перечисленных выше факторов.

Трамваи могут двигаться только по рельсам (на дороге или выделенных полосах), останавливаясь на перекрестках при запрещающем сигнале светофора, а также при высадке и посадке пассажиров.

Автомобили могут двигаться по любым участкам дороги, кроме тротуаров и выделенных полос, уступая дорогу трамваям.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма движения трамвая в условиях влияния human factors.

## Исследование зависимости скорости движения трамвая от human factors

Система дорожного движения с участием трамваев, ТС и пешеходов (далее — система) описана с помо-

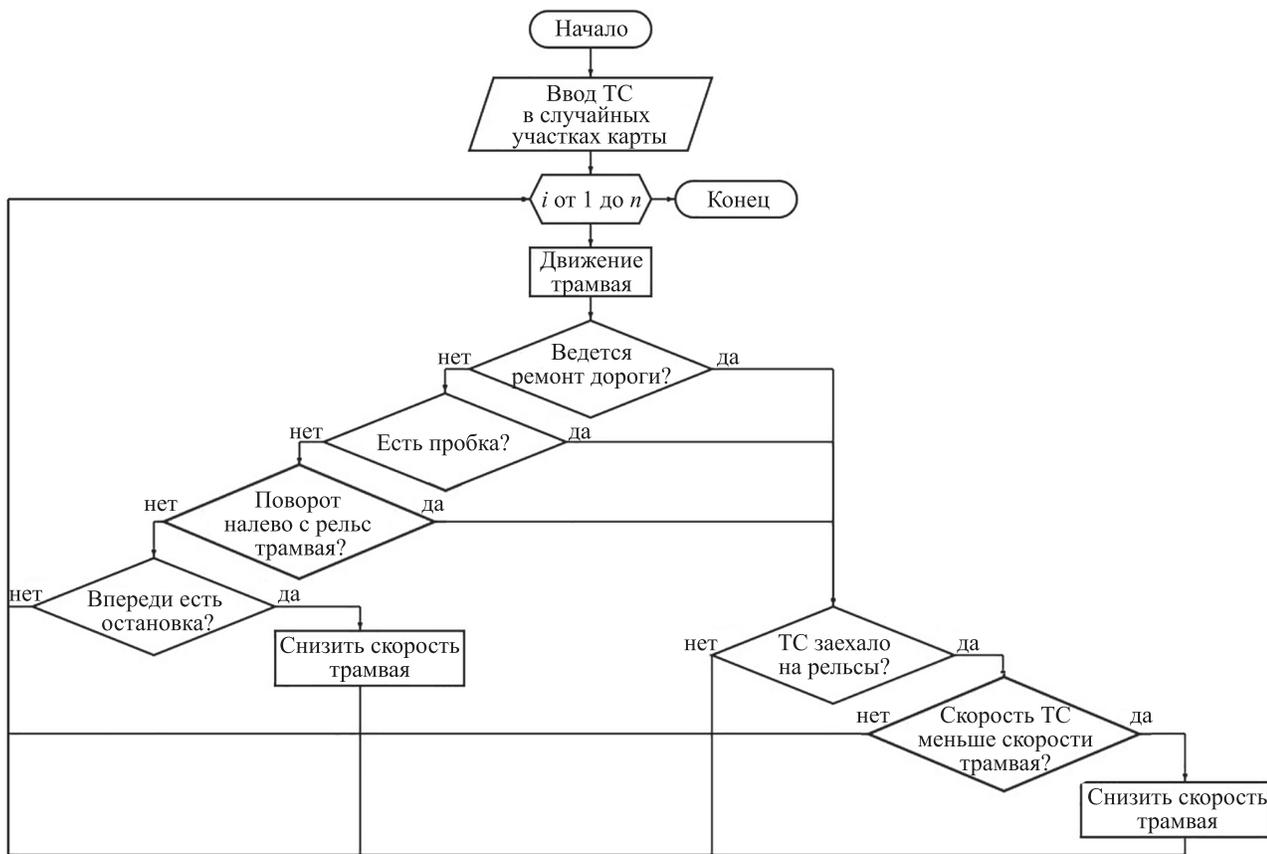


Рис. 1. Блок-схема алгоритма движения трамвая в условиях влияния human factors, где  $i$  — индекс итерации цикла движения  
 Fig. 1. The block diagram of the tram movement algorithm under the influence of external random factors, where  $i$  is the motion loop iteration index

стью мультиагентного подхода. Предлагаемая система рассматривает процесс дорожного движения как набор временных интервалов  $T = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$ , т. е. можно предположить о существовании системы в момент времени  $t_i$  и в предыдущий момент времени  $t_{i-1}$ .

Система имеет следующие виды агентов: трамвай; ТС; пешеходы.

Пусть группа трамваев состоит из  $n$  элементов:  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ . Каждый агент трамвай в момент времени  $t_j$  описывается следующим набором атрибутов:

$$a_{i,t_j} = \{(x, y)_{i,t_j}, v_{i,t_j}, stop_{i,t_{j+1}}\},$$

где  $(x, y)_{i,t_j}$  и  $v_{i,t_j}$  — местоположение и скорость агента  $a_i$  в момент времени  $t_j$ ;  $stop_{i,t_{j+1}}$  — наличие остановки в момент времени  $t_{j+1}$  для агента  $a_i$ .

Отметим, что обозначение  $fun$  представляет некоторую зависимость параметров, т. е.  $b = fun(c)$  — зависимость параметра  $b$  от параметра  $c$ .

Определим состояние участка дороги в момент времени  $t_j$ :

$$S_{x,y,t_j} = \{traffic\_jam_{road\_line_{x,y,t_j}}, repair_{x,y,t_j}\},$$

где  $traffic\_jam_{road\_line_{x,y,t_j}}$  — плотность потока на дороге в момент времени  $t_j$  в баллах на дороге  $road\_line_{x,y,t_j}$ ;  $repair_{x,y,t_j}$  — коэффициент, показывающий наличие ремонтных работ на участке  $(x, y)$ : при 1 — ведется ремонт дороги, 0 — в обратном случае.

Зависимость скорости от плотности потока многополосной и однополосной дорог приведена в работе [10]. Авторы предложили переход к усредненному представлению скорости и плотности потока дороги, по аналогии с многокомпонентной односкоростной моделью баротропного газа и решения численного интегрирования системы из  $S + 1$  уравнений для многоскоростной или односкоростной систем, где  $S$  — количество полос на дороге. Так, перенос концентрации ТС между разными полосами (в том числе заезд на полосы движения трамвая) описаны уравнениями конвективно-диффузного переноса.

В рамках настоящей работы под состоянием дороги понимается величина, сильно влияющая на скорость движения трамвая. Тогда скорость движения трамвая  $a_i$  в момент времени  $t_j$  на участке  $(x, y)$  определяется состоянием трамвая и внешними факторами (состоянием дороги  $S_{x,y,t_j}$ ):

$$v_{i,x,y,t_j} = fun(a_{i,t_j}, S_{x,y,t_j}).$$

Получим величину скорости, на которую влияет  $S_{x,y,t_j}$ :

$$\begin{aligned} v_{i,x,y,t_j} &= fun(S_{x,y,t_j}) \times fun(a_{i,t_j}) = \\ &= Z_{x,y,t_j} \times fun(repair_{x,y,t_j}) \times fun(a_{i,t_j}), \end{aligned}$$

где  $Z_{x,y,t} = \text{fun}(\text{traffic\_jam\_road\_line}_{x,y,t_j})$  — коэффициент линейной зависимости скорости движения трамвая от вероятности наезда ТС на трамвайные рельсы.

Определим коэффициент  $Z_{x,y,t_j}$  на основании исследования Яндекса изменения скорости движения транспорта от уровня загруженности дороги<sup>1</sup>:

$$Z_{x,y,t_j} = \begin{cases} \text{traffic\_jam}_{t_j} \in [1, 3]: [0,7, 1] \\ \text{traffic\_jam}_{t_j} \in [4, 6]: [0,3, 0,7] \\ \text{traffic\_jam}_{t_j} \in [7, 10]: [0, 0,3] \end{cases}$$

Аналогично, в контексте представляемой системы можно сказать, что  $k_{\text{repair}}_{x,y,t_j} = \text{fun}(\text{repair}_{x,y,t_j})$  — является коэффициентом зависимости наличия ремонтных работ на дороге от времени  $t_j$  и местоположения участка дороги  $(x, y)$ :

$$v_{i,x,y,t_j} = k_{\text{repair}}_{x,y,t_j} \times \text{fun}(a_i) \times Z_{x,y,t_j}$$

Так как  $a_{i,t_j} = \{(x, y)_{i,t_j}, v_{i,x,y,t_j}, \text{stop}_{i,t_{j+1}}\}$ , тогда:

$$v_{i,x,y,t_j} = Z_{x,y,t_j} \times k_{\text{repair}}_{x,y,t_j} \times v_{x,y} \times k_{\text{stop}_{t_{j+1}}}$$

где  $v_{x,y}$  — средняя скорость агента  $a_i$  на участке  $(x, y)$  в условиях отсутствия влияния human factors;  $k_{\text{stop}_{t_{j+1}}}$  — коэффициент скорости трамвая при наличии остановки трамвая в момент времени  $t_{j+1}$ :

—  $\text{stop}_{t_{j+1}} = \text{False}$ :  $k_{\text{stop}_{t_{j+1}}} = 1$ ,

—  $\text{stop}_{t_{j+1}} = \text{True}$ :  $k_{\text{stop}_{t_{j+1}}} \in [0, 1)$ .

### Описание симулятора

Для построения моделей транспортных потоков на микроуровне применяются средства: PTV Vissim, Quadstone Paramics и TTS Aimsun [11].

В качестве программной платформы для реализации рассматриваемой модели зависимости влияния внешних human factors на скорость движения трамвая выбран инструмент имитационного моделирования PTV Vissim Demo, позволяющий строить модели движения транспортных потоков. Система PTV Vissim позволяет имитировать и визуализировать взаимодействие любых видов транспорта в рамках единой модели с использованием правил дорожного движения, что говорит о приближении проведенного эксперимента к реальным условиям.

Система PTV Vissim обеспечивает реалистичное и всестороннее представление транспортных потоков, а также всех аспектов управления этими потоками, которые динамически адаптируются к дорожно-транспортной обстановке, определяя или воспроизводя индивидуальные параметры моделируемого участка.

Количество данных, используемых в симуляторе: трамваев — 5; ТС — 80; пешеходов — 80; участков ремонтных работ — 2.

На рис. 2 представлен план карты дороги с участками 1–4. Участок 1 — дорога только для ТС, участки

2, 3 — трамвайные рельсы, на которые не могут заехать ТС. Участок дороги 4 является круговым по две полосы в каждую сторону: по обеим полосам могут двигаться ТС, а по внутренним полосам — трамваи.

Симуляция начинается с равномерного распределения агентов в помещении.

На рис. 3 показана работа симулятора: длинными овалами синего, зеленого и черного цвета обозначены трамваи, короткими овалами черного, белого, серого и синего — ТС, желтыми линиями обозначены стоп-линии на второстепенных участках, черными линиями обозначены места появления агентов симуляции.

На первом этапе выполнено 10 запусков системы с 5 агентами трамваями для получения значений средних скоростей на участках дороги.

На втором этапе проведено 10 запусков системы с 5 агентами трамваями, 20 агентами ТС, 80 агентами пешеходами для проверки влияния на скорость трамваев human factors без пробок и ремонтных работ, но с моделью поведения агентов ТС с заездом на трамвайные рельсы.

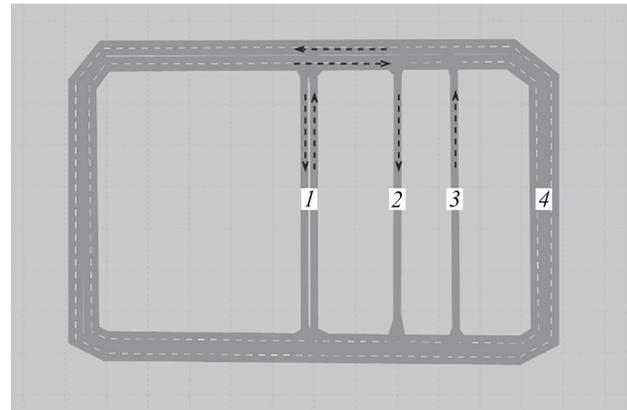


Рис. 2. План карты дороги. Движение правостороннее (направления движения вправо и влево обозначены пунктирными стрелками)

Fig. 2. Road map plan. Right-hand traffic (arrows stand for the direction of traffic)

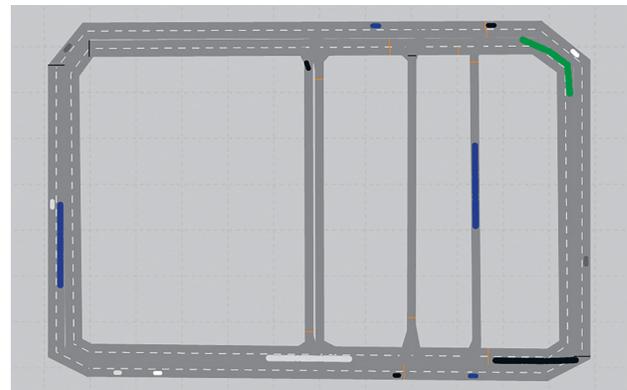


Рис. 3. Схема движения трамваев и транспортных средств по дороге

Fig. 3. The scheme of the movement of trams and cars on the road

<sup>1</sup> Исследование Яндекса – Пробки в Москве 2013–2017 [Электронный ресурс]. URL: [https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow\\_traffic\\_2017](https://yandex.ru/company/researches/2017/moscow_traffic_2017) (дата обращения: 30.11.2021).

На третьем этапе проведено 10 запусков системы с 5 агентами трамваями, 40 агентами ТС, 80 агентами пешеходами, а также с ремонтными работами на одном участке дороги для проверки влияния на скорость human factors с небольшими пробками (не более 5 баллов), а также влияния ремонтных работ.

На четвертом этапе выполнено 10 запусков системы с 5 агентами трамваями, 80 агентами ТС, 80 агентами пешеходами, а также с ремонтными работами на двух участках дороги для проверки влияния на скорость human factors на загруженной дороге (пробки более 5 баллов), а также влияния ремонтных работ на нескольких участках дороги.

На пятом этапе проведена агрегация полученных результатов, а также их оценка качества в результате эксперимента и формирование выводов.

### Вычислительный эксперимент

В ходе проведения эксперимента произведено по 10 запусков модели для каждого этапа. На третьем этапе на участок 4 был добавлен один участок ремонтных работ (направление вправо (рис. 2)). На четвертом эта-

пе — добавлены два участка ремонтных работ (обе стороны направления (рис. 2)).

В таблице представлены средние скорости для каждого участка дороги в зависимости от этапа эксперимента.

Из результатов эксперимента видно, что при добавлении небольшого количества машин (второй этап) скорость на участке 4 изменилась в среднем на 15 %. Скорость на выделенных для трамвая полосах (участки 2, 3) не изменилась — эти показатели можно выбрать как эталонные.

При появлении ремонтных работ (участок 4, направление вправо) средняя скорость движения трамвая значительно снизилась: примерно на 59 %. Это связано с общим снижением скорости потока, а также с заездом ТС на рельсы трамвая, при этом скорость на соседней полосе (участок 4, направление влево) снизилась на 20 %.

При добавлении ремонтных работ (участок 4, оба направления) скорость на участке 4 снизилась в среднем на 59 % (направление вправо) и на 69 % (направление влево). При этом скорость на выделенных полосах изменилась 21 % и 16 % для участков 2 и 3 соответственно.

Таблица. Средняя скорость движения трамвая, км/ч  
Table. Average speed of the tram, km/h

Номер участка дороги (рис. 2)	Результаты моделирования			
	Первый этап	Второй этап	Третий этап	Четвертый этап
2	25,32	25,32	23,41	20,16
3	22,99	20,16	23,32	19,53
4 (направление вправо)	24,32	17,26	11,20	10,04
4 (направление влево)	24,90	24,46	19,80	7,88

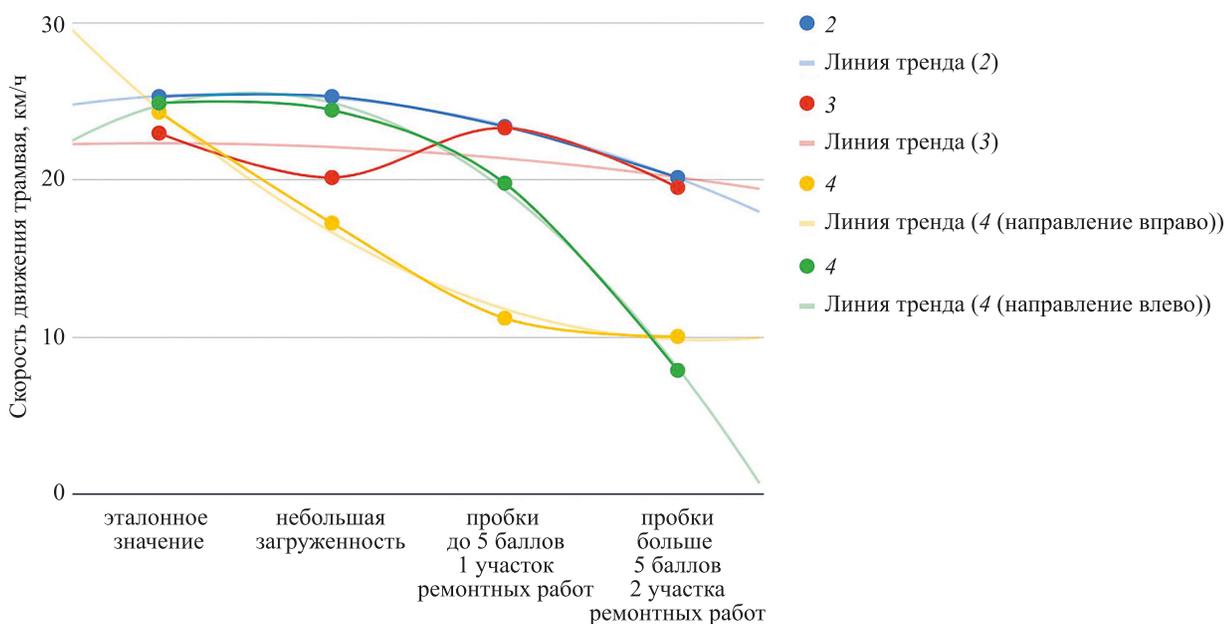


Рис. 4. Графики зависимости скорости на каждом участке дороги в зависимости от факторов, влияющих на скорость движения трамвая

Fig. 4. Graphs of the dependence of the speed on each section of the road, depending on the factors affecting the speed of the tram

На рис. 4 представлены графики изменения скорости на каждом участке дороги в зависимости от факторов, влияющих на скорость движения трамвая, а также линии тренда, используемые для выявления тенденций изменения скорости трамвая. Как видно из рис. 4 зависимость скорости от human factors является полиномиальной.

После анализа полученных результатов можно сделать вывод, что образование пробок на дорогах в значительной степени влияет на скорость движения трамвая. Это связано с большим количеством заездов ТС на трамвайные рельсы. В результате работы видно, что на втором этапе скорость движения на участке дороги 4 снизилась при поворотах налево или обгона. Но скорость на втором этапе снижена не так сильно, как на третьем и четвертом этапах.

### Заключение

Предложен и протестирован анализ зависимости скорости движения пассажирского трамвая от человеческих факторов (human factors). Анализ учитывает воздействие внешних human factors, таких как выезд на трамвайные рельсы, проведение ремонтных работ на дороге.

На основе методологии исследования на основе мультиагентных систем выполнен анализ зависимости скорости движения пассажирского трамвая от human

factors. Определены множества входных параметров: агентов модели и их атрибутов, а также вида предполагаемого отклика скорости. Проведен итеративный процесс разработки структуры системы посредством визуального моделирования и проверка гипотезы зависимости скорости движения трамвая от human factors на тестовых данных в среде, приближенной к целевой.

Выполнен анализ полученных результатов и сравнение с данными, полученными при тестировании модели без влияния human factors. В результате тестирования видно, что при добавлении транспортных средств и одного участка ремонтных работ скорость трамвая снижается на 16 %, а при увеличении числа ремонтных работ и значительных пробках – 69 %.

Также отмечено, что скорость трамвая почти не изменяется при движении по специальным выделенным полосам.

Исходя из перечисленных этапов, можно говорить о том, что исследование проведено качественно, выдвинута гипотеза, формализован объект исследования, гипотеза подтверждена экспериментом. Работа имеет практическую значимость в области проектирования дорожного движения.

Представленное исследование может быть использовано при проведении анализа проектируемых транспортных узлов для беспрепятственного движения беспилотного городского рельсового транспорта.

### Литература

1. Krokos K.J., Baker D.P. Preface to the special section on classifying and understanding human error // *Human Factors*. 2007. V. 49. N 2. P. 175–177. <https://doi.org/10.1518/001872007X312414>
2. Cacciabue P.C. Human error risk management methodology for safety audit of a large railway systems // *Rail human factors: supporting the integrated railway* / ed. by J.R. Wilson, B. Norris, T. Clarke, A. Mills. London: Ashgate Publishing, 2005. P. 353–365. <https://doi.org/10.4324/9781315089201-32>
3. Branton R. Investigations into the skills of train driving // *Ergonomics*. 1979. V. 22. N 2. P. 155–164. <https://doi.org/10.1080/00140137908924600>
4. Buck L. Errors in the perception of railway signals // *Ergonomics*. 1963. V. 6. N 2. P. 181–192. <https://doi.org/10.1080/00140136308930688>
5. Rosmuller N., Beroggi G.E.G. Group decision making in infrastructure safety planning // *Safety Science*. 2004. V. 42. N 4. P. 325–349. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00046-8)
6. Slamen A., Schock A., Ryan B., Wilson J.R. Human factors analysis of the work of the engineering supervisor: restricted report of Network Rail. London, 2004.
7. Hale A.R., Heijer T., Koornneef F. Management of safety rules: the case of railways // *Proc. of the Third International Symposium on Safety and Hygiene*. Porto, Portugal, March 2003.
8. Slamen A., Coleman N. The application of ergonomics to standards development for VDU based signalling control systems // *Rail human factors: supporting the integrated railway* / ed. by J.R. Wilson, B. Norris, T. Clarke, A. Mills. London: Ashgate Publishing, 2005. P. 239–250. <https://doi.org/10.4324/9781315089201-22>
9. Bourne A., Carey M. Integrating human factors into the development of railway systems // *People in Control: The Second International Conference on Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres*. Manchester, 19–21 June 2001. P. 25–30. <https://doi.org/10.1049/cp:20010427>
10. Морозов И.И., Гасников А.В., Тарасов В.Н., Холодов Я.А., Холодов А.С. Численное исследование транспортных потоков на основе гидродинамической модели // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2011. Т. 3. № 4. С. 389–412.

### References

1. Krokos K.J., Baker D.P. Preface to the special section on classifying and understanding human error. *Human Factors*, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 175–177. <https://doi.org/10.1518/001872007X312414>
2. Cacciabue P.C. Human error risk management methodology for safety audit of a large railway systems. *Rail human factors: supporting the integrated railway* / Ed. by J.R. Wilson, B. Norris, T. Clarke, A. Mills. London: Ashgate Publishing, 2005, pp. 353–365. <https://doi.org/10.4324/9781315089201-32>
3. Branton R. Investigations into the skills of train driving. *Ergonomics*, 1979, vol. 22, no. 2, pp. 155–164. <https://doi.org/10.1080/00140137908924600>
4. Buck L. Errors in the perception of railway signals. *Ergonomics*, 1963, vol. 6, no. 2, pp. 181–192. <https://doi.org/10.1080/00140136308930688>
5. Rosmuller N., Beroggi G.E.G. Group decision making in infrastructure safety planning. *Safety Science*, 2004, vol. 42, no. 4, pp. 325–349. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00046-8)
6. Slamen A., Schock A., Ryan B., Wilson J.R. *Human factors analysis of the work of the engineering supervisor: Restricted report of Network Rail*. London, 2004.
7. Hale A.R., Heijer T., Koornneef F. Management of safety rules: the case of railways. *Proc. of the Third International Symposium on Safety and Hygiene*, Porto, Portugal, March 2003.
8. Slamen A., Coleman N. The application of ergonomics to standards development for VDU based signalling control systems. *Rail human factors: supporting the integrated railway* / Ed. by J.R. Wilson, B. Norris, T. Clarke, A. Mills. London: Ashgate Publishing, 2005, pp. 239–250. <https://doi.org/10.4324/9781315089201-22>
9. Bourne A., Carey M. Integrating human factors into the development of railway systems. *People in Control: The Second International Conference on Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres*, Manchester, 19–21 June 2001, pp. 25–30. <https://doi.org/10.1049/cp:20010427>
10. Morozov I.I., Gasnikov A.V., Tarasov V.N., Kholodov Y.A., Kholodov A.S. Numerical study of traffic flows by the hydrodynamic models. *Computer Research and Modeling*, 2011, vol. 3, no. 4, pp. 389–412. (in Russian)

11. Захаров Ю.И., Карнаух Е.С. Основные современные инструменты имитационного моделирования транспортных потоков // Вiсник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 1(190). С. 46–51 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-sovremennye-instrumenty-imitatsionnogo-modelirovaniya-transportnyh-potokov> (дата обращения: 15.10.2021).

#### Авторы

**Ляховенко Юлия Александровна** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0001-7396-2831) 57216353188, <https://orcid.org/0000-0001-7396-2831>, [lyakhovenko.kam@gmail.com](mailto:lyakhovenko.kam@gmail.com)

**Попов Илья Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0002-6407-7934) 57202195632, <https://orcid.org/0000-0002-6407-7934>, [ilyapopov27@gmail.com](mailto:ilyapopov27@gmail.com)

*Статья поступила в редакцию 02.11.2021*  
*Одобрена после рецензирования 15.12.2021*  
*Принята к печати 20.01.2022*

11. Zakharov U., Karnaukh E. The main modern traffic simulation tools. *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2014, no. 1(190), pp. 46–51. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-sovremennye-instrumenty-imitatsionnogo-modelirovaniya-transportnyh-potokov> (accessed: 15.10.2021). (in Russian)

#### Authors

**Julia A. Lyakhovenko** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0001-7396-2831) 57216353188, <https://orcid.org/0000-0001-7396-2831>, [lyakhovenko.kam@gmail.com](mailto:lyakhovenko.kam@gmail.com)

**Ilya Yu. Popov** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0002-6407-7934) 57202195632, <https://orcid.org/0000-0002-6407-7934>, [ilyapopov27@gmail.com](mailto:ilyapopov27@gmail.com)

*Received 02.11.2021*  
*Approved after reviewing 15.12.2021*  
*Accepted 20.01.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»