

## Моделирование транспортных потоков при помощи нейронных сетей

Кандидаты техн. наук, доценты В. В. Морозов<sup>1)</sup>, Е. М. Чикишев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Тюменский индустриальный университет (Тюмень, Российская Федерация)

**Реферат.** Объектом исследования является процесс движения транспортных потоков на городской улично-дорожной сети мегаполиса. В связи с возрастающей урбанизацией увеличиваются и негативные ее последствия, в числе которых – снижение скорости сообщения вплоть до образования заторов. Цель работы – разработка математического аппарата для управления нагруженными транспортными потоками на улично-дорожной сети городов при помощи нейронных сетей. Результаты исследования направлены на решение проблемы формирования транспортных заторов в городах, особенно в крупнейших. Методологическая база исследования включает в себя системный подход, системный анализ, синтез, теории транспортных потоков, систем, динамических систем, сложных систем и хаоса. Целевой функцией исследования определена максимизация кинетической энергии транспортного потока. В качестве оптимизационного критерия предложено использовать меру хаоса дорожного движения – энтропию транспортных потоков. По результатам исследования получена математическая модель изменения кинетической энергии транспортного потока под влиянием относительной энтропии занятости полос дорожным движением на регулируемых перекрестках. Для мониторинга транспортных потоков предложено использовать уличные (дорожные) камеры видеонаблюдения. Для этого разработаны математические модели, позволяющие измерять занятость полос движением на конкретных регулируемых пересечениях посредством обработки видеозображения нейронными сетями в режиме реального времени. Для подтверждения разработанного математического аппарата проводятся соответствующие экспериментальные исследования. В данной статье представлены текущие результаты эксперимента, которые подтверждают предлагаемые авторами математические модели. Полученные результаты исследования справедливы только с учетом соблюдения обозначенных ограничений и требований к транспортному потоку. С одной стороны, это значительно сужает возможность применения результатов на практике, с другой – позволяет повысить точность и чистоту экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** моделирование транспортных потоков, организация дорожного движения, нейросетевые технологии

**Для цитирования:** Морозов, В. В. (2025) Моделирование транспортных потоков при помощи нейронных сетей / В. В. Морозов, Е. М. Чикишев // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 317–326. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-317-326>

## Modeling Traffic Flows Using Neural Networks

V. V. Morozov<sup>1)</sup>, E. M. Chikishev<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup>Industrial University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation),

**Abstract.** The object of the study is the process of traffic flows on the urban street and road network of a metropolis. Due to increasing urbanization, its negative consequences are also increasing, including a decrease in the speed of communication, leading to the formation of traffic congestion. The aim of the work is to develop a mathematical apparatus for controlling congested traffic flows on the urban road network using neural networks. The results of the study are aimed at solving the problem of traffic congestion in cities, especially in the largest ones. The methodological basis of the research includes a systematic approach, systems analysis, synthesis, theories of traffic flows, systems, dynamic systems, complex systems and chaos. The objective function of the study is to maximize the kinetic energy of the transport flow. As an optimization criterion, it is proposed to use a measure of traffic chaos – the entropy of traffic flows. According to the results of the study, a mathematical model was obtained for changing the kinetic energy of the traffic flow under

### Адрес для переписки

Чикишев Евгений Михайлович  
Тюменский индустриальный университет  
ул. Володарского, 38,  
625000, г. Тюмень, Российская Федерация  
Тел.: +734 5-253-95-40  
[chikishevem@tyuiu.ru](mailto:chikishevem@tyuiu.ru)

### Address for correspondence

Chikishev Evgeniy M.  
Industrial University of Tyumen  
38, Volodarskogo str.,  
220072, Tyumen, Russian Federation  
Tel.: +734 5-253-95-40  
[chikishevem@tyuiu.ru](mailto:chikishevem@tyuiu.ru)

the influence of the relative entropy of the lane occupancy by traffic at controlled intersections. It is proposed to use street (road) video surveillance cameras to monitor traffic flows. For this purpose, mathematical models have been developed that allow measuring the occupancy of traffic lanes at specific controlled intersections by processing video images with neural networks in real time. Experimental studies are conducted to confirm the developed mathematical apparatus. The article presents the current results of the experiment, which confirm the proposed mathematical models. The obtained research results are valid only taking into account the specified restrictions and requirements for traffic flow. On the one hand, this significantly narrows the possibility of applying the results in practice, on the other hand, it allows to increase the accuracy and purity of experimental research.

**Keywords:** traffic flow modeling, traffic management, neural network technologies

**For citation.** Morozov V. V., Chikishev E. M. (2025) Modeling Traffic Flows Using Neural Networks. *Science and Technique*. 24 (4), 317–326. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-317-326> (in Russian)

## Введение

В настоящее время во многих городах мира продолжается рост автомобилизации. Постоянно увеличивающееся количество транспортных средств на городских улицах влечет за собой ряд сложных и нерешенных проблем. Одной из таких наиболее значимых проблем, безусловно, является формирование транспортных заторов [1–2].

Первый взрывной рост автомобилизации произошел в 1930-е гг. в США и в 1950-е гг. в Западной Европе. По общеизвестным причинам темпы прироста автомобилей в Российской Федерации не наблюдались до начала 90-х гг. прошлого столетия [1–2]. Однако в начале XXI в. во многих регионах России произошел взрыв автомобилизации. Тюменская область, являющаяся одним из самых экономически развитых регионов, также не исключение [3].

Регрессионный анализ показал, что процесс изменения уровня автомобилизации в г. Тюмени может быть описан полиномиальной функцией второго порядка с коэффициентом детерминации, равным приблизительно  $R^2 \approx 0,92$  (рис. 1).

Следовательно, прогнозирование также может быть основано на продолжении линии тренда. Таким образом, возникают обоснованные предположения, что этот показатель к 2030 г. приблизится к отметке в 1000 авт./тыс. чел. Это означает, что в среднем у каждого жителя города будет личный автомобиль.

Вместе с тем установлено, что стабильный прирост транспортных средств помимо транспортных заторов провоцирует рост дорожно-транспортных происшествий различной степени тяжести. Для повышения уровня безопасности дорожного движения и решения данной проблемы в Российской Федерации, Беларуси и мире зачастую применяется светофорное регулирование. С одной стороны, это является эффективным способом снижения уровня аварийности, с другой – одним из факторов снижения пропускной способности уличных пересечений, что дополнительно усугубляет проблему. Анализ статистических данных также показал, что в течение десятилетнего периода количество регулируемых участков улично-дорожной сети в г. Тюмени выросло на 28 % (рис. 2).

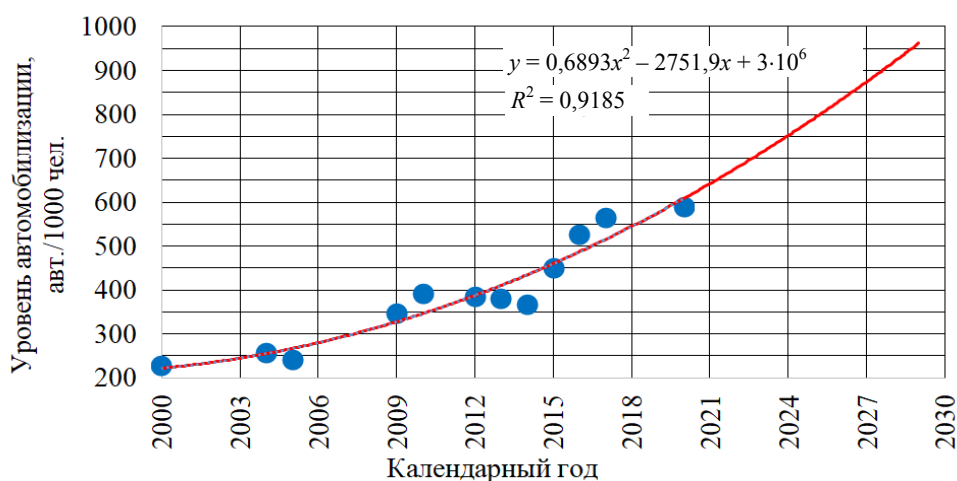


Рис. 1. Прогнозирование дальнейшего изменения автомобилизации в г. Тюмени

Fig. 1. Forecasting further changes in motorization in Tyumen

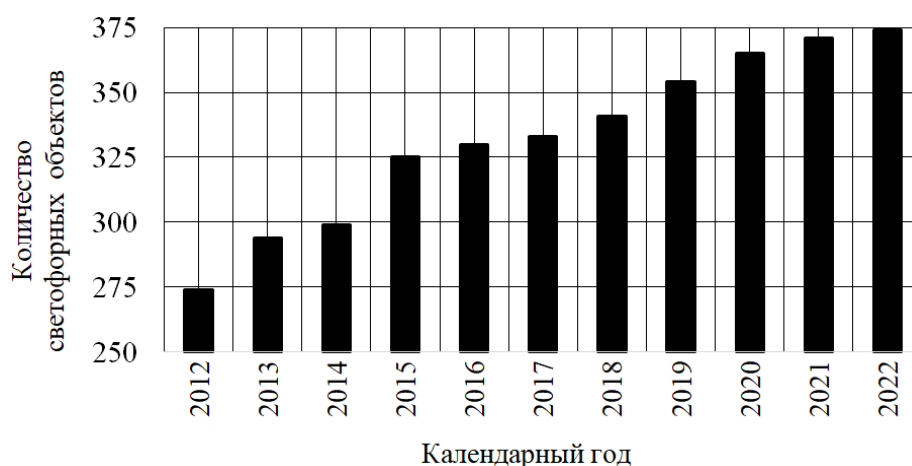


Рис. 2. Динамика изменения количества светофорных объектов на территории г. Тюмени

Fig. 2. Dynamics of changes in the number of traffic lights in the city of Tyumen

Посредством регулируемых пересечений возможно управлять дорожным движением. Современные светофорные системы используют детекторы, которые непрерывно отслеживают потоки трафика по сети в режиме реального времени и регулируют временные интервалы, смещения и время цикла, чтобы оптимизировать свою работу и сократить задержки. Это позволяет контролировать дорожную ситуацию и управлять целым рядом светофорных объектов (обычно для 6–12 смежных перекрестков). Эффективность таких систем, реагирующих на изменение транспортного спроса, намного выше, чем в системах с фиксированным временем работы. Процедуры оптимизации эффективны только в регионах сети в условиях недостаточного или близкого к насыщенному трафику, где очереди накапливаются во время красной фазы и рассеиваются во время зеленой. Они также могут сохраняться на более длинных линиях связи в сети путем соответствующей регулировки смещений, времени цикла или разбиений.

К сожалению, в условиях перенасыщенного движения они не в состоянии справиться с резкими скачками и возмущениями в транспортных потоках или пропускной способности, которые остаются незамеченными. Это сложная проблема, и она до сих пор относится для организаторов дорожного движения к числу самых серьезных. Современная практика управления дорожным движением основана на разработке

и внедрении управленческих решений, которые устраняют неблагоприятные сетевые условия только после их возникновения, вместо того чтобы заранее предупреждать перегрузку улично-дорожной сети [4].

Кроме того, за последние восемь лет средняя стоимость детекторов (например, видеодетекторов Traficam), по различным оценкам, возросла более чем в 2 раза и приближается к отметке 1 млн рос. руб. за 1 шт. При этом одних лишь детекторов недостаточно, чтобы полноценно реализовать процесс управления. Как минимум требуются прокладка линий связи для передачи данных от детектора к серверу, закупка и настройка сервера, специализированное программное обеспечение.

В совокупности это существенно повышает первоначальные затраты и увеличивает срок окупаемости технических решений [1–2, 5–6]. Также на данный момент большинство детекторов изготавливается зарубежными компаниями. Во-первых, это создает нежелательную зависимость Российской Федерации от импортных производителей. Во-вторых, в связи со сложной ситуацией в мире это в принципе ставит под вопрос дальнейшую работоспособность российских интеллектуальных транспортных систем. В случае поломки какого-либо из элементов или отказа в обновлении программного обеспечения возникают реальные риски полного прекращения их функционирования.

В конечном итоге возникает необходимость разработки новой, более надежной, менее затратной и независимой отечественной системы мониторинга и управления транспортными потоками на улично-дорожной сети городов. Во многих даже относительно небольших городах всегда есть камеры уличного наблюдения, которые могут быть использованы для сбора данных. В таком случае мониторинг транспортных потоков может производиться в режиме реального времени посредством обработки видеозображения нейросетевыми технологиями.

В связи с этим авторы определили целью данной статьи разработку математического аппарата для управления транспортными потоками на улично-дорожной сети городов при помощи нейронных сетей.

### Методология исследований

Методологической основой выбран системный подход, более частными инструментами в рамках данного подхода – системный анализ и синтез. Также исследование базировалось на теории транспортных потоков, теории вероятности и математической статистике. При дальнейшем формировании методологической базы исследования учитывалось сложное и нелинейное поведение транспортных потоков как объекта управления. Сложность управления, с точки зрения ряда отечественных и зарубежных исследователей, обуславливается недетерминированной и хаотичной природой транспортных потоков [1–2, 7–9].

Современный мировой опыт показывает, что главным инструментом управления транспортными потоками в городах являются различные автоматизированные и интеллектуальные транспортные системы (далее – ИТС). Благодаря интеграции ИТС с программными комплексами имитационного моделирования, например семейства PTV, Aimsun и др., появляется возможность прогнозировать развитие различных ситуаций и принимать наилучшие решения в части управления [3]. Также в части сбора, анализа большого количества данных и принятия решения способствуют различные технологии искусственного интеллекта: машинное обучение, глубокие нейронные сети и т.д.

Общая тенденция развития обозначенных систем заключается в том, что их принцип работы все больше удаляется от жестких режимов в пользу более адаптивных и гибких алгоритмов [2].

В связи с этим принято решение дополнить методологическую базу исследования и включить в нее теорию систем, теорию сложных систем, теорию динамических систем и теорию хаоса. Поэтому дальнейшие исследования также будут основываться на результатах работ [10–17].

Для разработки математических моделей управления транспортными потоками в городах проведен анализ [7–9] и других работ авторов, исследования которых связаны с математическим моделированием транспортных потоков.

Дальнейшее исследование также проводилось с учетом ряда ограничений: отсутствия влияния негативных факторов окружающей среды; однородности транспортного потока; отсутствия смешанных направлений движения и конфликтности с другими транспортными средствами и/или переходами.

В качестве основного критерия оптимизации использовалась энтропия движения транспортных потоков. Поскольку первоначальное понятие энтропии связано с передачей теплоты и энергии [10–17], авторы обратились к газодинамическим и газокINETическим моделям – аналогам транспортных потоков [7, 18]. В фундаментальной теории транспортных потоков отмечается, что суммарная энергия, которой обладает транспортный поток, может быть описана при помощи закона сохранения энергии. При этом в работе [7] определено, что в действительности энергия не теряется. Она просто превращается из кинетической энергии во внутреннюю. Из второго закона термодинамики известно, что кинетическая энергия более полезна, чем эквивалентное количество внутренней энергии. Это, безусловно, справедливо и в случае транспортных потоков. Таким образом, можно сказать, что силы трения (неудовлетворительные геометрические характеристики и взаимодействие между автомобилями) превращают желательные формы энергии (движение транспорта) в менее полезные формы.

Кроме того, автор [7] также отмечает, что применительно к транспортным потокам (ТП)

кинетическая и внутренняя энергия имеют размерность ускорения [7]

$$T = E + I, \quad (1)$$

где  $T$  – суммарная энергия ТП,  $\text{м/с}^2$ ;  $E$  – кинетическая энергия транспортного потока,  $\text{м/с}^2$ ;  $I$  – внутренняя энергия транспортного потока,  $\text{м/с}^2$ .

Объясняется это тем, что если в транспортном потоке происходит потеря внутренней энергии, то она должна выражаться через потерю движения или ошибочное движение вследствие неудовлетворительных геометрических характеристик дороги или неблагоприятных взаимодействий между автомобилями в потоке [7].

В свою очередь, кинетическая энергия транспортного потока определяется по формуле [7]

$$E = \alpha k u^2, \quad (2)$$

где  $k$  – плотность ТП,  $\text{авт./м}$ ;  $u$  – скорость ТП,  $\text{м/с}$ ;  $\alpha$  – безразмерный коэффициент.

Введение коэффициента  $\alpha$  обусловливается следующим. На практике чаще всего плотность и скорость транспортного потока измеряются в  $\text{авт./км}$  и  $\text{км/ч}$ . Соответственно требуется преобразовать значения к необходимым единицам измерения:  $\text{авт./м}$  и  $\text{м/с}$ . Исходя из этого значение коэффициента  $\alpha = (3,6^2 \cdot 1000)^{-1}$ .

Показателем неравномерности движения является внутренняя энергия, которая представляет собой шум ускорения. Поэтому данный показатель можно интерпретировать как внутренние потери энергии в системе:

$$I \approx \delta, \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – шум ускорения,  $\text{м/с}^2$ ;  $x_i$  – значение ускорения на исследуемом участке улично-дорожной сети в момент времени  $i$ ,  $\text{м/с}^2$ ;  $\bar{x}$  – среднее значение ускорения,  $\text{м/с}^2$ .

Следовательно, коэффициент полезной работы транспортного потока можно выразить следующим образом [7]:

$$\eta = \frac{T - I}{T} = \frac{E}{T}, \quad (5)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезной работы транспортного потока.

Исходя из вышеописанного для повышения коэффициента полезной работы транспортного потока процесс должен быть направлен на максимизацию его кинетической энергии  $E$

$$E \rightarrow \max. \quad (6)$$

Данное выражение будет представлять собой целевую функцию дальнейшего исследования.

Формулы (1)–(5) разработаны по аналогии с механикой движения молекул газа и жидкости. Однако транспортный поток как объект управления не обладает сжимаемостью. Это свидетельствует о риске возможных дорожно-транспортных происшествий. И для того чтобы предотвратить столкновения, участники дорожного движения вынуждены варьировать скорость автомобилей [7].

Таким образом, уже на данном этапе работы формируется представление о том, что кинетическая энергия также будет иметь нелинейный характер зависимости от показателей скорости и плотности транспортного потока.

## Результаты исследований

В первую очередь авторы посчитали необходимым модифицировать формулу (2) с учетом интенсивности движения транспортного потока. Для этого целесообразно воспользоваться гидродинамической моделью Лайтхилла–Уизема–Ричардса [2, 7, 9, 19, 20]:

$$\begin{cases} u'(p) < 0; \\ Q(p) = pu(p), \end{cases} \quad (7)$$

где  $u$  – скорость транспортного потока,  $\text{км/ч}$ ;  $p$  – плотность транспортного потока,  $\text{авт./км}$ ;  $Q$  – интенсивность движения транспортного потока,  $\text{авт./ч}$ ;  $u(p)$  – функция зависимости скорости транспортного потока от его плотности;  $Q(p)$  – функция зависимости интенсивности

сти движения транспортного потока от его плотности.

С учетом системы уравнений (7) формула кинетической энергии транспортного потока (2) принимает вид

$$E = Q(p) p u(p). \quad (8)$$

Результаты исследований [2, 7, 9, 19, 20] показали, что в современных условиях для оценки концентрации транспортного потока перспективнее использовать показатели временной концентрации. Таким показателем является занятость полосы. Модель влияния занятости полосы на интенсивность движения транспортного потока разработана и экспериментально подтверждена на предыдущих этапах исследования [2, 19, 20]:

$$Q(\theta) = b_1 \theta - a_1 \theta^2, \quad (9)$$

где  $a_1$ ,  $b_1$  – параметры модели, авт./ч;  $\theta$  – занятость полосы.

Непосредственно сама занятость полосы является долей или процентным выражением времени, в течение которого в контрольной зоне на полосе движения находились транспортные средства [2, 19, 20]:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i + d) / u_i}{T}, \quad (10)$$

где  $\theta$  – занятость полосы;  $L_i$  – длина  $i$ -го ТС, проходящего через контрольную зону детектора, м;  $d$  – то же контрольно-измерительной зоны детектора, м;  $u_i$  – скорость  $i$ -го транспортного средства в потоке, м/с;  $T$  – продолжительность измерения, с.

Величина  $d$  контрольной зоны измерения в рамках конкретной полосы движения является постоянной. Для однородного транспортного потока длина транспортного средства будет постоянной величиной  $L$ . Для гетерогенного транспортного потока длина транспортного средства может быть рассмотрена как произведение среднего значения длины транспортного средства  $\bar{L}$  на количество произведенных измерений  $i$ . Искомое выражение скорости  $u$  так-

же необходимо рассматривать как среднее значение пространственной скорости  $\bar{u}$ . В совокупности это позволяет преобразовать исходную формулу (10) в выражении

$$\theta = \frac{(\bar{L} + d) i}{T \bar{u}}. \quad (11)$$

Можно заметить, что в формуле (11) отношение количества измерений к периоду наблюдения  $\frac{i}{T}$  представляет собой не что иное, как интенсивность движения транспортного потока. Следовательно, формула (11) может быть представлена

$$\theta = (\bar{L} + d) \frac{Q}{\bar{u}}. \quad (12)$$

Таким образом, скорость движения транспортного потока может быть определена функцией зависимости от занятости полосы

$$u(\theta) = k_0 \frac{Q(\theta)}{\theta}, \quad (13)$$

где  $k_0$  – коэффициент взаимосвязи скорости движения транспортного потока и занятости полосы.

В конечном итоге была получена математическая модель кинетической энергии транспортного потока с учетом интенсивности движения и занятости полосы

$$E = k_0 \frac{Q^2}{\theta}. \quad (14)$$

На основании сформированной методологической базы исследования ранее было принято решение использовать энтропию транспортных потоков в качестве оптимизационного критерия управления дорожным движением. В свою очередь энтропия транспортного потока от занятости полосы может быть представлена как функция зависимости

$$H(\theta) = - \sum_{i=1}^n w_i \ln(w_i), \quad (15)$$

где  $H(\theta)$  – функция зависимости энтропии транспортного потока от занятости полосы;  $w_i$  – удельный вес занятости  $i$ -й полосы на рас-

смаатриваемом регулируемом пересечении;  $n$  – количество полос на регулируемом пересечении.

При этом удельный вес занятости каждой полосы будет определяться следующим отношением:

$$w_i = \frac{\theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i}. \quad (16)$$

Для перехода к удельным и безразмерным показателям удобнее использовать относительную энтропию. Относительная энтропия транспортного потока от занятости полос на регулируемом пересечении определяется следующим образом:

$$H_n(\theta) = \frac{H(\theta)}{\ln n}. \quad (17)$$

Модель (9) позволяет выразить формулу (14) через занятость полосы

$$\begin{aligned} E &= \alpha k_0 \frac{(b_1 \theta - a_1 \theta^2)^2}{\theta} = \\ &= k_0 \frac{b_1^2 \theta^2 - 2a_1 b_1 \theta^3 + a_1^2 \theta^4}{\theta} = \\ &= a_1^2 k_0 \theta^3 - 2a_1 b_1 k_0 \theta^2 + b_1^2 k_0 \theta, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $a_1, b_1, c_1$  – параметры взаимосвязи относительной энтропии занятости полос и кинетической энергии транспортного потока, м/с<sup>2</sup>.

Формулы (14)–(18) позволили получить математическую модель влияния относительной энтропии занятости полос  $H_n(\theta)$  на суммарную кинетическую энергию ТП  $E$  на регулируемом пересечении

$$Y = aX^3 - bX^2 + cX + d, \quad (19)$$

где  $Y$  – функция зависимости кинетической энергии транспортного потока  $E$  от относительной энтропии занятости полос  $H_n(\theta)$ , м/с<sup>2</sup>;  $X$  – относительная энтропия занятости полос  $H_n(\theta)$ ;  $a, b, c, d$  – параметры взаимосвязи относительной энтропии занятости полос и кинетической энергии транспортного потока, м/с<sup>2</sup>.

В рамках данного исследования было предложено производить мониторинг транспортных потоков посредством обработки видеоизображения камер уличного наблюдения нейронны-

ми сетями. В связи с этим, чтобы измерить занятость полосы для каждого транспортного средства, необходимо вычислить общее время его нахождения в контрольной зоне. Для этого в каждом временном интервале определяется нахождение транспортного средства в контрольной зоне. Если текущая  $(x_i, y_i)$  и предыдущая  $(x_{i-1}, y_{i-1})$  координаты находятся в зоне, то время нахождения в ней принимается равным времени между кадрами  $t_i$  и учитывается в общем времени. Если одна из координат  $(x_i, y_i)$  или  $(x_{i-1}, y_{i-1})$  находится вне контрольной зоны, то вычисляется скорость  $i$ -го транспортного средства на данном участке [20]

$$u_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{t_i}. \quad (20)$$

В свою очередь время нахождения транспортного средства в контрольной зоне измерения представляется возможным вычислить по формуле [20]

$$t' = \frac{\sqrt{(x'_i - x'_{i-1})^2 + (y'_i - y'_{i-1})^2}}{u_i}, \quad (21)$$

где  $x'_i, y'_i$  – измеряемое расстояние координаты пересечения траектории движения  $i$ -го транспортного средства и контрольной зоны измерения.

В конечном итоге появляется возможность определить занятость полосы по следующей формуле [20]:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} t_i + \sum_{j=1}^k t'_j}{T}, \quad (22)$$

где  $n$  – количество кадров, в течение которых обнаруженное транспортное средство находилось в контрольной зоне измерения частично или полностью;  $k$  – то же кадров, в течение которых обнаруженное ТС находилось в контрольной зоне измерения частично;  $t_i$  – время между кадрами, с;  $t'_j$  – время, в течение которого транспортное средство находилось в контрольной зоне между кадрами, с;  $T$  – продолжительность измерения, с.

Предложенные математические модели (20)–(22) позволяют определить занятость полосы посредством обработки потока видеоизображения нейронной сетью.

В настоящее время для подтверждения математической модели (19) проводятся экспериментальные исследования. Сбор исходных данных о занятости полосы производится посредством обработки видеоизображения камер уличного наблюдения ООО «Русская компания», которые расположены практически во всех наиболее проблемных участках улично-дорожной сети г. Тюмени. Обработка видеоизображения осуществляется авторским программным обеспечением, разработанным на базе модели нейронной сети YOLOv8 [21]. При запуске программы контрольно-измерительные зоны для мониторинга задаются поль-

зователем вручную. Определение интенсивности выполняется с учетом направления движения и класса транспортного средства (рис. 3).

Обработка исходных экспериментальных данных осуществляется с использованием программного комплекса STATISTICA 12 при помощи метода группировки по средним значениям. Результаты регрессионного анализа показали, что теоретическая кривая описывает рассеивание экспериментальных данных с коэффициентом детерминации  $R^2 \approx 0,93$  (рис. 4), что подтверждает высокую достоверность разработанной математической модели (19).

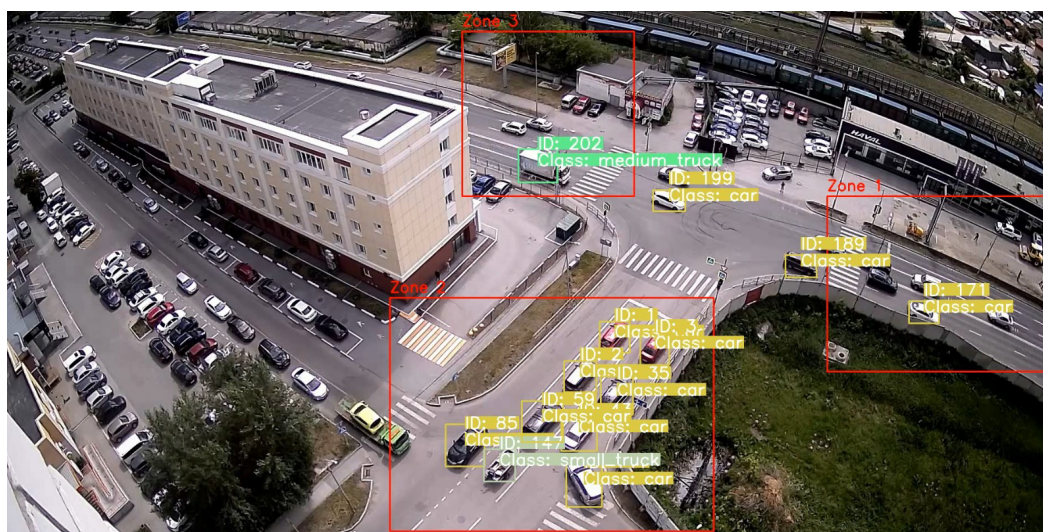


Рис. 3. Пример обработки видеоизображения уличной камеры наблюдения разработанным программным обеспечением на основе нейронных сетей

Fig. 3. Example of processing a video image of a street surveillance camera by developed software based on neural networks

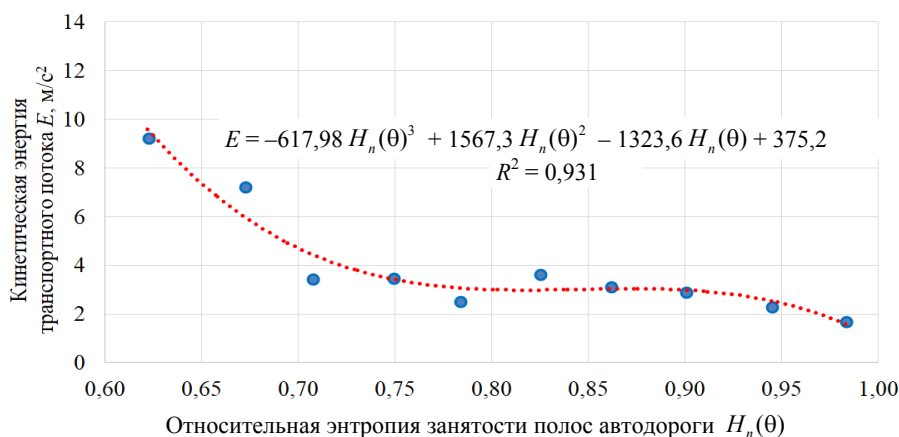


Рис. 4. Изменение кинетической энергии транспортного потока  $E$  на регулируемом пересечении под влиянием относительной энтропии занятости полос  $H_n(\theta)$

Fig. 4. Change in kinetic energy of traffic flow at a controlled intersection under the influence of relative entropy of lane occupancy  $H_n(\theta)$

## ВЫВОДЫ

1. В ходе проведения исследования целевой функцией определена максимизация кинетической энергии транспортного потока, выраженная через интенсивность движения и занятость полосы. В качестве критерия оптимизации обозначена относительная энтропия занятости полос на регулируемом пересечении.

2. В результате моделирования получена математическая модель изменения кинетической энергии транспортного потока под влиянием относительной энтропии занятости полос. Данная модель представляет собой полином третьей степени.

3. Разработан математический аппарат для мониторинга транспортных потоков посредством обработки изображения уличных камер видеонаблюдения посредством нейронных сетей. Результаты эксперимента подтверждают достоверность разработанных теоретических положения с коэффициентом детерминации  $R^2 \approx 0,93$  (рис. 3).

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта гранта РФ № 23-79-01021 «Исследование процесса управления транспортными потоками в городах на основе нейросетевых технологий», 2023–2025.

## ЛИТЕРАТУРА

- Морозов, В. В. Закономерности изменения характеристик транспортных потоков / В. В. Морозов, Д. А. Захаров, С. А. Ярков. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. 166 p.
- Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. М.: Логос, 2013. 188 p.
- РОССТАТ: Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 08.06.2024).
- Do New Sources of Traffic Data Make the Application of Chaos Theory to Traffic Management a Realistic Possibility? / A. T. Narh, N. Thorpe, M. C. Bell, G. A. Hill // *Transport Reviews*. 2016. Vol. 36. P. 635–658. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1140687>
- Анализ совокупной стоимости владения детекторов транспорта // Системы хранения, серверное оборудование, информационная и физическая безопасность – ИТЦ-М. URL: <https://www.itc.by/analiz-sovokupnoj-stoi-mosti-vladieniya-detektorov-transporta/> (дата обращения: 17.06.2024).
- Анализ детектирования параметров дорожного движения / Д. В. Капский, Д. В. Леванович, В. П. Иванов, А. К. Головнич // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2022. № 3. P. 63–71.
- Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управления ими / Д. Дрю. М.: Транспорт, 1972. 424 p.
- Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамсада. М.: Транспорт, 1983. 248 p.
- Моделирование процесса распада координированной пачки автомобилей при движении по перегону магистральной улицы / Г. М. Кухаренок, Д. В. Капский, Д. В. Навой, Д. В. Рожанский // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2010. № 6. P. 51–57.
- Chaos: Classical and Quantum / P. Cvitanović, R. Artuso, R. Mainieri [et al.]. Copenhagen, Denmark: Niels Bohr Institute, 2020. 1089 p.
- Murray, R. M. Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems / R. M. Murray // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2007. Vol. 129. P. 571–583. <https://doi.org/10.1115/1.2766721>.
- Kumari, S. A Novel Four-Step Feedback Procedure for Rapid Control of Chaotic Behavior of the Logistic Map and Unstable Traffic on the Road / S. Kumari, R. Chugh // *Chaos*. 2020. Vol. 30. <https://doi.org/10.1063/5.0022212>
- Martinovič, T. Chaotic Behaviour of Noisy Traffic Data / T. Martinovič // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2018. Vol. 41, No 6. P. 2287–2293. <https://doi.org/10.1002/mma.4234>.
- Modelling Road User Perceptions towards Safety, Comfort, and Chaos at Shared Space: The via Maqueda Case Study, Italy / N. Akgun-Tanbay, T. Campisi, T. Tanbay [et al.] // *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Vol. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4979496>.
- Quek, W. L. An Analysis on the Traffic Processing Efficiency of a Combination of Serial and Parallel Bottle-necks / W. L. Quek, N. N. Chung, L. Y. Chew // *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2018. Vol. 503. P. 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.081>.
- Senkerik, R. Chaos-Based Optimization A Review / R. Senkerik, I. Zelinka, M. Pluhacek // *Journal of Advanced Engineering and Computation*. 2017. Vol. 1. P. 68–79. <https://doi.org/10.25073/jaacc.201711.51>.
- Капский, Д. В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города / Д. В. Капский, Д. В. Навой // *Наука и техника*. 2017. Т. 16. № 1. P. 38–47. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48>.
- Aljamal, M. A. Estimation of Traffic Stream Density Using Connected Vehicle Data: Linear and Nonlinear Filtering Approaches / M. A. Aljamal, H.M. Abdelghaffar, H. A. Rakha // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No 15. P. 4066 <https://doi.org/10.3390/s20154066>.
- Morozov, V. Formation of the Traffic Flow Rate Under the Influence of Traffic Flow Concentration in Time at Controlled Intersections in Tyumen, Russian Federation /

- V. Morozov, S. Iarkov // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 15. P. 8234. <https://doi.org/10.3390/su13158324>.
20. Morozov, V. Modeling the Operation of Signal-Controlled Intersections with Different Lane Occupancy / V. Morozov, V. Shepelev, V. Kostyrchenko // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, № 24. P. 4829.
  21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619154 Российская Федерация. Программа для мониторинга транспортных потоков на основе нейронных сетей: заявл. 31.03.2025; опубл. 14.04.2025 / Морозов В. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».
- Поступила 10.01.2025  
Подписана в печать 14.03.2025  
Опубликована онлайн 31.07.2025
- ## REFERENCES
1. Morozov V. V., Zakharov D. A., Yarkov S. A. (2020) *Patterns of Change in Characteristics of Transport Flows*. Tyumen, Industrial University of Tyumen. 166 (in Russian).
  2. Yakimov M. R. (2013) *Transport Planning: Creating Transport Models of Cities*. Moscow, Logos Publ. 188 (in Russian).
  3. ROSSTAT: Federal State Statistics Service. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 08 Juny 2024) (in Russian).
  4. Narh A. T., Thorpe N., Bell M. C., Hill G. A. (2016) Do New Sources of Traffic Data Make the Application of Chaos Theory to Traffic Management a Realistic Possibility? *Transport Reviews*, 36 (5), 635–658. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1140687>.
  5. Total Cost of Ownership Analysis of Vehicle Detectors. *Storage Systems, Server Equipment, Information and Physical Security – ITTs-M*. Available at: <https://www.itc.by/analiz-sovokupnoy-stoimosti-vladieniya-detektorov-transporta/> (accessed 17 Juny 2024) (in Russian).
  6. Kapsky D. V., Levanovich D. V., Ivanov V. P., Golovnich A. K. (2022) Analysis of Traffic Parameter Detection. *Vestnik Polotskogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. = Vestnik of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences*, (3), 63–71 (in Russian).
  7. Drew D. (1972) *Traffic Flow Theory and Control*. Moscow, Transport Publ. 424 (in Russian).
  8. Inose H., Hamada T. (1975) *Road Traffic Control*. University of Tokyo Press.
  9. Kukharyonok G. M., Kapsky D. V., Navoy D. V., Rozhansky D. V. (2010) Modeling the Process of Disintegration of a Coordinated Pack of Cars When Moving along a Section of a Main Street. *Vestnik BNTU [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (6), 51–57 (in Russian).
  10. Cvitanović P., Artuso R., Mainieri R., Tanner G., Vattay G. (2020) *Chaos: Classical and Quantum*. Copenhagen, Denmark, Niels Bohr Institute. 1089.
  11. Murray R. M. (2007) Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129 (5), 571–583. <https://doi.org/10.1115/1.2766721>.
  12. Kumari S., Chugh R. (2020) A Novel Four-Step Feedback Procedure for Rapid Control of Chaotic Behavior of the Logistic map and Unstable Traffic on the Road. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30 (12). <https://doi.org/10.1063/5.0022212>.
  13. Martinović T. (2016) Chaotic Behaviour of Noisy Traffic Data. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 41 (6), 2287–2293. <https://doi.org/10.1002/mma.4234>.
  14. Akgün-Tanbay N., Campisi T., Tanbay T., Tesoriere G., Dissanayake D. (2022) Modelling Road User Perceptions towards Safety, Comfort, and Chaos at Shared Space: The via Maqueda Case Study, Italy. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/4979496>.
  15. Quek W.-L., Chung N. N., Chew L. Y. (2018) An Analysis on the Traffic Processing Efficiency of a Combination of Serial and Parallel Bottlenecks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 503, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.081>.
  16. Senkerik R., Zelinka I., Pluhacek M. (2017) Chaos-Based Optimization – A Review. *Journal of Advanced Engineering and Computation*, 1 (1), 68. <https://doi.org/10.25073/jaec.201711.51>.
  17. Kapskiy D. V., Navoy D. V. (2017) Development of the automated Road Traffic Control Systems in Minsk as Part of the Intellectual City Transport System. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (1), 38–48. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48> (in Russian).
  18. Aljamal M. A., Abdelghaffar H. M., Rakha H. A. (2020) Estimation of Traffic Stream Density Using Connected Vehicle Data: Linear and Nonlinear Filtering Approaches. *Sensors*, 20 (15), 4066. <https://doi.org/10.3390/s20154066>.
  19. Morozov V., Iarkov S. (2021) Formation of the Traffic Flow Rate under the Influence of Traffic Flow Concentration in Time at Controlled Intersections in Tyumen, Russian Federation. *Sustainability*, 13 (15), 8324. <https://doi.org/10.3390/su13158324>.
  20. Morozov V., Shepelev V., Kostyrchenko V. (2022) Modeling the Operation of Signal-Controlled Intersections with Different Lane Occupancy. *Mathematics*, 10 (24), 4829. <https://doi.org/10.3390/math10244829>.
  21. Morozov V. V. (2025) *Program for Monitoring Traffic Flows Based on Neural Networks*. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025619154 Russian Federation (in Russian).

Received: 10.01.2025

Accepted: 14.03.2025

Published online: 31.07.2025