

Транспортные системы Transport systems

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 625.712.14
doi: 10.30987/2782-5957-2025-1-28-39

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ НА ОСНОВЕ СИНЕРГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

Ольга Сергеевна Фаина^{1✉}, Владимир Дмитриевич Шепелёв², Злата Викторовна Альметова³, Николай Константинович Горяев⁴

^{1,2,3,4} Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

¹ fadinaos@susu.ru

² shepelevvd@susu.ru

³ almetovazv@susu.ru

⁴ gorjaevnk@susu.ru

Аннотация

В работе обсуждаются новые подходы к организации безостановочного движения транспортных потоков на регулируемых перекрестках с использованием координированного управления дорожным движением. Целью исследования является разработка математической модели по определению рекомендованной скорости движения на перекрестках городской дорожной сети с использованием компьютерного зрения для обеспечения безостановочного движения группы транспортных средств (ТС) при пересечении регулируемого пересечения. Модель уникальна тем, что учитывает параметры очереди внегрупповых ТС, а также состояние дорожного покрытия. В исследовании представлена методика расчета времени безостановочного проезда автомобилей через пересечения улично-дорожной сети, с использованием системы мониторинга AIMS-Eco. Система применяет технологию анализа видеопотока в реальном времени, основанную на нейронной сети YOLOv4, для получения данных о параметрах трафика. Охарактеризованы

коэффициенты влияния структуры транспортного потока и состояния дорожного покрытия на время разбега очереди вне групповых ТС, что позволяет более точно оценивать влияние этих факторов на динамику движения. Установлены зависимости рекомендуемой скорости лидирующего автомобиля и пропускной способности участка улично-дорожной сети от количества внегрупповых ТС с учетом времени разбега очереди внегрупповых ТС. Разработанная математическая модель позволяет повысить на 10-15% средние скорости движения потока в сечении стоп-линии за счет организации безостановочного проезда регулируемых перекрестков групповыми ТС. Достигнутые результаты имеют практическое значение для повышения пропускной способности улично-дорожной сети, улучшения дорожной и экологической безопасности автомобильного движения.

Ключевые слова: динамические знаки, нейронные сети, мониторинг, потоки, способность, скорость, ускорение.

Ссылка для цитирования:

Фаина О.С. Повышение пропускной способности регулируемых перекрестков на основе синергии компьютерного зрения и адаптивного регулирования скорости / О.С. Фаина, В.Д. Шепелев, З.В. Альметова, Г.Н. Горяев // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 1. – С. 28-39. doi: 10.30987/2782-5957-2025-1-28-39.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта 24-21-20086: Конкурс 2024 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс).

Original article
Open Access Article

INCREASING THE TRAFFIC CAPACITY OF SIGNALLED CROSSINGS BASED ON COMPUTER VISION SYNERGY AND ADAPTIVE SPEED CONTROL

Olga Sergeevna Fadina^{1✉}, Vladimir Dmitrievich Shepelyov², Zlata Viktorovna Almetova³,
Nikolay Konstantinovich Goryaev⁴

^{1,2,3,4} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ fadinaos@susu.ru

² shepelevvd@susu.ru

³ almetovazv@susu.ru

⁴ goriaevnk@susu.ru

Abstract

The paper discusses new approaches to the arrangement of non-stop traffic flows at signaled crossings using coordinated traffic management. The study objective is to develop a mathematical model for determining the recommended traffic speed on the stretches of the urban road network using computer vision to ensure the non-stop traffic of a group of vehicles when crossing a signaled intersection. The model is unique because it takes into account the queue parameters of out-of-group vehicles, as well as the condition of the road surface. The study presents a method for calculating the time of non-stop passage of cars over crossings of the road network using AIMS-Eco monitoring system. The system uses real-time video stream analysis technology based on YOLOv4 neural network to obtain data on traffic parameters. The coefficients of influence of the traffic flow structure and the condition of the road surface on the time of queuing

outside the group vehicles are characterized, which makes it possible to more accurately assess the impact of these factors on traffic dynamics. The dependences studied include those of the recommended speed of the leading car and the capacity of the road network section on the number of extra-group vehicles, taking into account the travel time of the queue of extra-group vehicles. The developed mathematical model makes it possible to increase the average flow velocity in the section of the stop line by 10-15% due to the arrangement of non-stop passage of signaled intersections by group vehicles. The results achieved are of practical importance for increasing the traffic capacity of the road network, improving road and environmental safety of automobile traffic.

Keywords: dynamic signs, neural networks, monitoring, flows, ability, speed, acceleration.

Reference for citing:

Fadina OS, Shepelev VD, Almetova ZV, Goryachev GN. Increasing the traffic capacity of signaled crossings based on computer vision synergy and adaptive speed control. *Transport Engineering*. 2025;1: 28-39. doi: 10.30987/2782-5957-2025-1-28-39.

Funding: the study is carried out with the financial support of grant 24-21-20086: 2024 Competition "Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by small scientific teams" (regional competition).

Введение

Контроль и анализ ситуации на регулируемых пересечениях становятся крайне актуальными для разработки эффективных стратегий управления транспортными потоками. По этой причине исследование данных участков с целью оптимизации их работы и минимизации негативного влияния на экологическую и социальную среды представляет собой важную задачу в области городского планирования и транспортной инженерии. [1]. Для решения проблемы по повышению эффективности дорожного движения на регулируемых пересечениях предложено большое количество различных методов и моделей [2, 3, 4]. Стратегии управления светофорными объекта-

ми основаны на регулировании цикла работы светофора в зависимости от дня недели, времени суток на основе большого массива данных о движении транспортного потока (ТП) на данном участке дорожной сети [5, 6, 7]. Такие стратегии имеют ряд существенных недостатков – не учитываются погодные условия, наличие аварийных ситуаций и т.п. Стратегии по управлению скоростными режимами на перегонах между пересечениями основаны на установлении определенного скоростного режима в зависимости от длины перегона, уровня загрузки, наличию деформаций или препятствий на дорожном покрытии [8, 9]. Эти стратегии имеют те же не-

достатки, как и стратегии по регулированию фаз работы светофорного объекта.

Основная причина задержек движения и увеличение времени пути – очередь из ТС, формирующиеся при неэффективной организации движения на регулируемом пересечении. Исследования по оценке длины очередей основываются на довольно ограниченных предположениях, что приводит к закрытым теоретическим решениям. Эти предположения можно обобщить следующим образом: (а) известные настройки сигнала, (б) известный начальный размер очереди в начале цикла, (в) известная схема прибытия (например, равномерная, пуассоновская) и (г) ненасыщенные условия, при которых ожидаемое значение прибытия (постоянно) не превышает пропускную способность сигнала [10, 11, 12]. Модели по оценке очереди ТС имеют один общий большой недостаток – они не учитывают структуру очереди, ко-

торая представлена различными ТС, отличающимися по габаритам, скоростным и другим характеристикам [13, 14].

В последние годы наблюдается рост исследований, основанных на данных, полученных в режиме реального времени. Технологии компьютерного зрения помогли в разработке достаточно точных и надежных систем мониторинга дорожного трафика [15, 16, 17]. Искусственная нейронная сеть обрабатывает полученные видеозображения и формирует огромную базу данных о таких характеристиках ТП, как интенсивность, средняя скорость, плотность трафика, структура автотранспорта (рис. 1). Прогресс в разработке алгоритмов распознавания объектов движущегося транспорта и определения характеристик ТП позволяет управлять скоростью ТП в области регулируемых пересечений с целью снижения вероятности возникновения заторных ситуаций [18, 19, 20].



Рис. 1. Обнаружение и отслеживание ТС сверточной нейронной сетью
Fig. 1. Vehicle detection and tracking by convolutional neural network

Цель исследования – разработка математической модели по определению рекомендованной скорости движения на перекрестках городской дорожной сети с ис-

пользованием компьютерного зрения для обеспечения безостановочного движения группы ТС при пересечении регулируемого пересечения.

Задачи исследования:

1. Обосновать коэффициенты влияния структуры транспортного потока и состояния дорожного покрытия на время разезда очереди внегрупповых ТС на регулируемых пересечениях;

2. Установить зависимости рекомендуемой скорости лидирующего автомобиля и пропускной способности участка УДС от количества внегрупповых ТС;

3. Установить зависимости времени разезда очереди внегрупповых ТС от ускорения лидирующего автомобиля.

Методика расчета времени безостановочного проезда группы автомобилей через пересечения улично-дорожной сети

Чтобы обеспечить непрерывное движение групповых автомобилей при приближении к следующему перекрестку, рекомендуется заранее регулировать скорость до определенного уровня. Этот уровень, учитывающий среднюю скорость потока на участке между узлами улично-дорожной сети, должен быть отображен на динамическом дорожном знаке «б.2» как рекомендуемая скорость [21, 22].

В этом случае, если перед перекрестком наблюдаются внегрупповые автомобили, время $t(n_i)$ от момента активации зеленого сигнала светофора на предыдущем перекрестке до активации сигнала на следующем пересечении определяется с учетом ряда факторов:

- преодоление условным групповым транспортным средством (А1) участка разгона до достижения средней скорости потока на маршруте между перекрестками;

- проезд участка с данной средней скоростью потока между узлами улично-дорожной сети;

- уменьшение скорости до величины, рекомендованной динамическим знаком «б.2», которая обеспечивает безостановочный проезд через перекресток;

- длина участка пути, на котором необходимо скорректировать скорость в зависимости от скорости, которая набирается последним внегрупповым автомобилем в очереди на данной полосе (А2), начавшим движение на разрешающий сигнал светофора;

- времени, необходимого последнему внегрупповому автомобилю для разгона и пересечения стоп-линии.

Это время можно представить в виде целевой функции:

$$t(n_i) = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (1)$$

где t_1 – время, затраченное лидирующим автомобилем (А1), который был первым в очереди, начиная с момента включения разрешающего сигнала светофора на перекрестке, предшествующем исследуемому участку УДС, и заканчивая его достижением дальней границы пересекаемой проезжей части (с); t_2 – время, затраченное автомобилем А1 после того, как он преодолел дальнюю границу пересекаемой проезжей части на перекрестке, предшествующем исследуемому участку УДС, до момента, когда он достиг средней скорости ТП на перегоне (с); t_3 – время, затраченное автомобилем А1 с момента достижения средней скорости ТП на участке к следующему перекрестку до начала снижения скорости, установленной динамическим дорожным знаком «б.2» (с); t_4 – время, затраченное автомобилем А1 с момента достижения средней скорости ТП на участке к следующему перекрестку до начала снижения скорости, установленной динамическим дорожным знаком «б.2» (с).

Время t_1 в свою очередь зависит от длины перекрестка и времени реакции водителя и ускорения ТС А1:

$$t_1 = h_i^{sl} + \sqrt{\frac{2 \cdot S_{int}}{a_i^{int}}} + \tau_i^r, \quad (2)$$

где h_i^{sl} – время на достижение стоп-линии i -го ТС с момента включения разрешающего сигнала светофора (с); S_{int} – длина перекрестка (задается для каждого перекрестка отдельно) (м); a_i^{int} – ускорение i -го ТС при проезде участка перекрестка (м/с²); τ_i^r – время реакции водителя 1-го ТС (запаздывание старта первого ТС) (с).

После того, как первое стартовавшее на зеленый свет светофора ТС (А1) покинуло дальнюю границу пересекаемой проезжей части, оно как правило должно достигнуть скорости, максимально разре-

шенной на данном участке улично-дорожной сети. Как правило, эта скорость составляет 60 км/ч согласно [21].

Тогда время t_2 будет зависеть от скорости, на которой ТС А1 покинуло дальнюю границу пересекаемой проезжей части и рассчитывается по формуле:

$$t_2 = \frac{v_i^m - v_i^{int}}{a_i}, \quad (3)$$

где v_i^m – максимально разрешенная скорость i -го автомобиля на перегоне между перекрестками (м/с); v_i^{int} – скорость i -го автомобиля, достигнутая на дальней границе пересекаемой проезжей части), (м/с); a_i – ускорение i -го автомобиля за пределами конкретного узла УДС до момента достижения максимально разрешенной скорости потока ТС на отрезке пути между узлами УДС (м/с²).

Время t_3 рассчитывается по формуле:

$$t_3 = \frac{S_3}{v_i^m}, \quad (4)$$

где S_3 – расстояние до динамического знака с точки, в которой i -ое транспортное

$$S_2 = \frac{(v_i^m)^2 - (\sqrt{S_{int} \cdot a_i^{int}})^2}{2 \cdot a_i} = \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{int} \cdot a_i^{int})}{2 \cdot a_i} \quad (8)$$

Расстояние, необходимое первому из групповых ТС (А1) для снижения скорости до значения, указанного на динамическом дорожном знаке, определяется по формуле:

$$S_{dz} = \frac{(v_i^m)^2 - v_{ni}^2}{2 \cdot J_{dz}} \quad (9)$$

где v_{ni} – скорость, достигнутая последним ТС, стоящим в очереди (А2) к моменту достижения стоп-линии (м/с), J_{dz} – темп снижения скорости лидирующего автомобиля при приведении ее к величине, указанной на динамическом дорожном знаке (с/м).

$$v_{ni} = \sqrt{2 \cdot S_{ni} \cdot a_{ni}} \quad (10)$$

где S_{ni} – расстояние, преодолеваемое автомобилем А2 от места, занимаемого им в очереди внегрупповых ТС, до пересечения стоп-линии на пересечении (м), a_{ni} – ускорение, с которым автомобиль А2 набирает

средство достигло v_i^m , в связи с приближением к внегрупповому ТС (А2) (м) и определяется:

$$S_3 = L_i^n - S_2 + S_{dz}, \quad (5)$$

где L_i^n – длина i -го перегона (м); S_2 – отрезок пути, преодолеваемый лидирующим автомобилем от дальней границы пересекаемой проезжей части на перекрестке до места достижения средней скорости потока ТС на перегоне между узлами УДС (м); S_{dz} – участок пути, который лидирующий автомобиль проезжает начиная с момента снижения скорости от средней на данном отрезке до рекомендованной, установленной динамическим знаком (максимально близкой к скорости, которую должен достичь последний внегрупповой автомобиль (А2), возобновляющий движение на разрешающий сигнала светофора до достижения стоп-линии (м).

$$S_2 = \frac{(v_i^m)^2 - (v_i^{int})^2}{2 \cdot a_i} \quad (6)$$

$$v_i^{int} = \sqrt{2 \cdot S_{int} \cdot a_i^{int}} \quad (7)$$

скорость при приближении к стоп-линии (м/с²).

В свою очередь, для снижения скорости в указанных выше пределах автомобилю А1 потребуется время:

$$t_{dz} = \frac{v_i^m - v_{ni}}{J_{dz}}. \quad (11)$$

Поскольку момент достижения последним стоящим в очереди внегрупповым ТС (А2) практически сопоставим с моментом достижения стоп-линии первым групповым транспортным средством (А1), можно сделать вывод о том, что $t_{dz} = t_{ni}$, где t_{ni} – время разезда очереди внегрупповых ТС, необходимое для освобождения полосы движения автомобиля А1, с момента включения разрешающего сигнала светофора до достижения стоп-линии (с) и рассчитывается по формуле:

$$t_{n_i} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z, \quad (12)$$

где t_i^z – время задержки начала старта движения ТС от начала разрешающего такта (с).

Из системы уравнений следует:

$$S_{dz} = \frac{(v_i^m)^2 - v_{n_i}^2}{2 \cdot J_{dz}} = \frac{(v_i^m)^2 - v_{n_i}^2}{v_i^m - v_{n_i}} = \frac{\left((v_i^m)^2 - v_{n_i}^2 \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - v_{n_i})} \quad (15)$$

Поскольку скорость, рекомендованная динамическим дорожным знаком (V_{cp}^i), равна скорости, достигнутой разгоняющимся автомобилем А2, к моменту дости-

$$\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z = \frac{v_i^m - v_{n_i}}{J_{dz}}, \quad (13)$$

$$J_{dz} = \frac{v_i^m - v_{n_i}}{\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z}, \quad (14)$$

жения стоп-линии v_{ni} , приведенная выше формула приобретает вид:

$$S_{dz} = \frac{\left((v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}) \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}))} \quad (16)$$

Тогда:

$$t_3 = \frac{L_i^n - \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i})}{a_i} + \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}))}}{v_i^m} \quad (17)$$

Продолжительность времени t_4 как времени, затраченного автомобилем А1 с момента достижения им скорости, рекомендованной динамическим дорожным знаком «6.2», до момента достижения стоп-линии равно продолжительности времени, необходимого последнему из внегрупповых ТС (А2), находящемуся перед ним, пересечь ту же стоп-линию:

$$t_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z, \quad (18)$$

$$S_{n_i} = 1,5 + D_i \cdot (n_i - 1), \quad (19)$$

где D_i – динамический габарит i -го ТС (м); n_i – порядковый номер в очереди i -го ТС (м).

Таким образом t_4 рассчитывается по формуле:

$$t_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_{n_i}}} + t_i^z, \quad (20)$$

Продолжительность времени $t(n_i)$ с момента включения разрешающего сигнала светофора на предыдущем узле УДС до момента включения разрешающего сигнала на следующем перекрестке определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
t(n_i) = & h_i^{sl} + \sqrt{\frac{2 \cdot S_{\text{int}}}{a_i^{\text{int}}}} + \tau_i^r + \frac{v_i^m - v_i^{\text{int}}}{a_i} + \\
& L_i^n \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i})}{a_i} + \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}))} + \\
& + \frac{L_i^n}{v_i^m} + \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_{n_i}}} + t_i^z
\end{aligned} \tag{21}$$

Данная методика уже была представлена в предыдущих наших работах, в данном исследовании были добавлены новые факторы, влияющие на время безостановочного проезда автомобилей, для более точной оценки динамики движения ТС [22].

вочного проезда автомобилей, для более точной оценки динамики движения ТС [22].

Закономерности влияния времени разезда очереди внегрупповых ТС

В процессе исследования транспортные средства были разбиты на группы в соответствии с их тягово-динамическими характеристиками (табл. 1).

соответствии с их тягово-динамическими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Классификация ТС

Table 1

Vehicle classification

Категория ТС	ТС
I	легковые автомобили
II	автофургоны и микроавтобусы до 3,5 тонн
III	грузовые автомобили от 3,5 до 12 тонн
IV	грузовые автомобили свыше 12 тонн
V	автобусы свыше 3,5 тонн

В ходе исследования движения транспортных потоков было обнаружено, что время разезда очереди зависит от ускорения первого автомобиля в очереди (лидера) (рис. 2), а также от присутствия в очереди ТС других категорий (рис. 3). Более низкое ускорение лидирующего автомобиля приводит к увеличению времени задержки для остальных ТС в очереди. Ускорение автомобиля может варьироваться в зависимости от состояния дорожного покрытия, включая колейность, ямы и трамвайные пути, а также от погодных условий, таких как снег и дождь. Более высокое ускорение лидирующего транспортного средства способствует быстрому разезду очереди внегрупповых автомобилей. Присутствие в очереди автомобилей

III, IV и V категорий снижает время разезда в среднем на 15–20 %. Исследования проводились для полосы движения только прямо.

На основании проведенных исследований были получены коэффициенты структуры ТП ($k_{кмс}$) и состояния дорожного покрытия ($k_{сн}$), влияющие на время разезда очереди внегрупповых ТС, в зависимости от ускорения первого автомобиля в очереди (табл. 2).

Данные коэффициенты позволяют более точно оценить влияние этих факторов на время разезда очереди внегрупповых ТС, и в свою очередь на рекомендуемую скорость, которая будет выводиться на динамический знак 6.2.

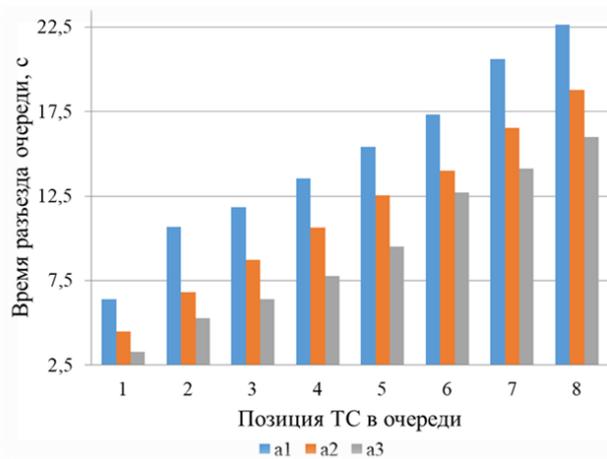


Рис. 2. Время разъезда очереди ТС при разных ускорениях лидирующего автомобиля, с (a1 – 0,5 м/с²; a2 – 1,1 м/с²; a3 – 1,5 м/с²)
 Fig. 2. Time of departure of the vehicle queue at different accelerations of the leading car, s (a1 – 0.5 m/s²; a2 – 1.1 m/s²; a3 – 1.5 m/s²)

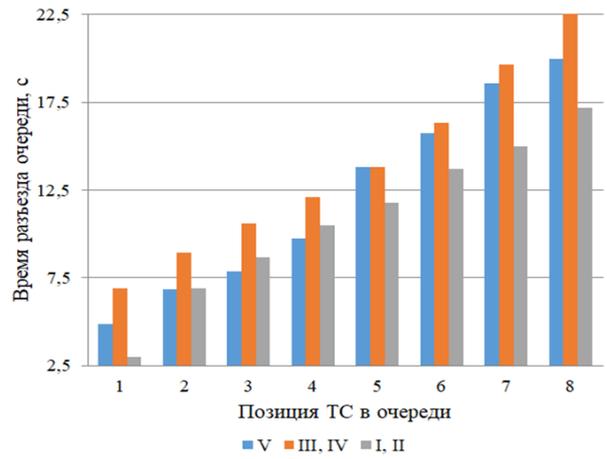


Рис. 3. Время разъезда очереди ТС при лидирующих автомобилях разных категорий, с
 Fig. 3. Time of departure of the vehicle queue for leading cars of different categories, s

Таблица 2

Коэффициенты влияния структуры ТП и состояния дорожного покрытия

Table 2

Coefficients of influence of the structure of traffic flow and the condition of the road surface

Ускорение лидирующего ТС, м/с ²	$k_{сн}$	$k_{кмс}$
0,5-1	1,35	1,3
1 - 1,5	1,15	1,2
1,5 - 2	1,05	-

Математическая модель расчета средней скорости лидирующего автомобиля для безостановочного проезда регулируемого пересечения при координированном управлении дорожным движением

Для оптимизации потока автомобилей, пересекающих перекресток во время зеленого сигнала светофора, а также для сокращения времени ожидания, в данном исследовании разработана математическая модель, которая позволяет рассчитать среднюю скорость лидирующего автомобиля для беспрепятственного проезда регулируемого перекрестка. Изменение скорости зависит от времени смещения разрешающего сигнала светофора в рамках координированного управления, а также от числа внегрупповых автомобилей в очереди, которое определяется на основе анализа видеопотока с использованием обучен-

ной нейронной сети. Полученные значения средней скорости помогут планировать скорость движения на участке между перекрестками, увеличивая вероятность получения зеленого сигнала при приближении к регулируемому перекрестку. Эта скорость должна быть указана как рекомендуемая на динамическом дорожном знаке «б.2». Математическая модель расчета средней скорости лидирующего автомобиля, для безостановочного проезда регулируемого пересечения при координированном управлении дорожным движением:

$$v_{cp}^l = \frac{3,6 \cdot L_i^n}{t_{cd} - \left(h_i^{sl} + \sqrt{\frac{2 \cdot S_{int}}{a_i^{int}}} + \tau_i^r \right) + \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_{n_i}}} + t_i^z \cdot k_{сн} \cdot k_{кмс}} \quad (21)$$

Результаты исследования

В результате расчетов были получены следующие зависимости (рис. 4, 5, 6).

Приняты следующие ограничения:

- принято межпиковое время, так как множество поездок совершается именно в это время;
- полоса движения только прямо;
- координированное управление движением.

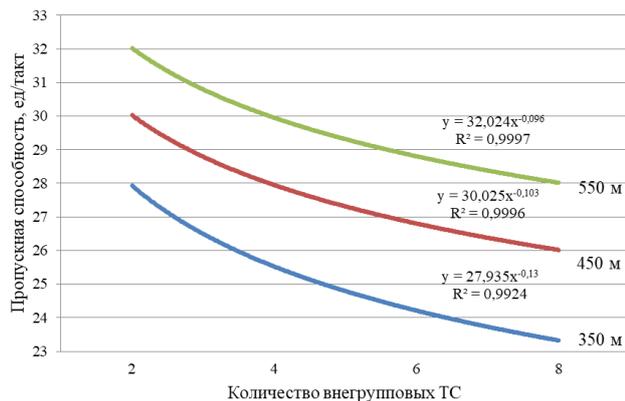


Рис. 4. Пропускная способность полосы движения в зависимости от количества автомобилей в очереди, при разной длине перегона, ед/такт
 Fig. 4. Bandwidth of the traffic lane depending on the number of cars in the queue, with different length of the stretch, unit/clock

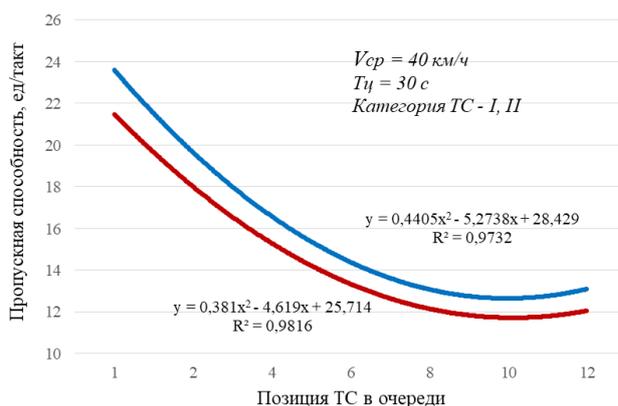


Рис. 5. Пропускная способность полосы движения при свободном движении ТС и с остановкой, ед/такт
 Fig. 5. The bandwidth of the traffic lane with free movement of vehicles and with a stop, unit/clock

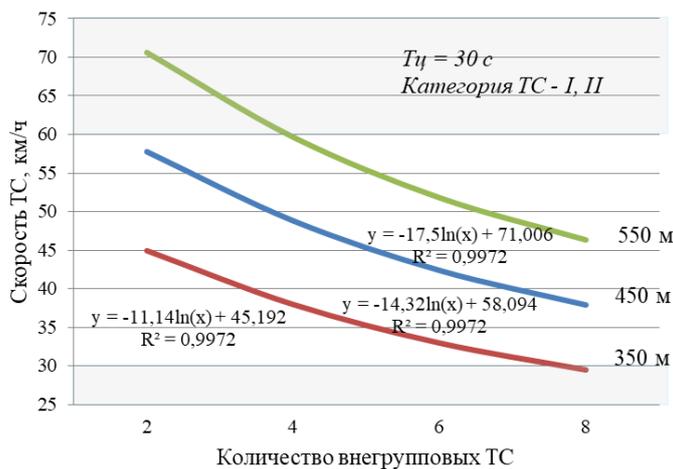


Рис. 6. Рекомендуемая скорость проезда перегона лидирующим автомобилем, в зависимости от количества внегрупповых автомобилей при длине перегона 350 м, 450 м, 550 м.
 Fig. 6. The recommended speed of driving a stage by a leading car, depending on the number of cars in the queue with a stage length of 350 m, 450 m, 550 m.

В результате проведенных расчетов с помощью разработанной математической модели, были выявлены зависимости (рис. 6), где видно, что при длине перегона в 450 м применение рассматриваемого подхода

оказывается наиболее эффективным при временных сдвигах в 30 с. Для 5-го транспортного средства оптимальная скорость составит 45 км/ч.

Заключение

В результате исследований сформулированы следующие выводы:

- использование компьютерного зрения является оптимальным инструментом для анализа характеристик и параметров транспортного потока, что значительно повышает точность их оценки;

- разработанная методика расчета рекомендуемой скорости для безостановочного проезда перекрестков групповыми автомобилями помогает устранить недостатки координированного движения в условиях «межпиковой» транспортной нагрузки;

- математическая модель позволяет сократить время задержки транспортных

средств до 10%, повысить среднюю скорость движения на 10–15%, в результате пропускная способность регулируемого перекрестка увеличится на 10–20 %;

- исследования позволили выявить зависимости средних скоростей групповых автомобилей от времени разбега очереди внегрупповых ТС, а также оценить влияние характеристик перекрестка на ускорение и скорость проезда;

- регулирование скорости движения групповых ТС при подъезде к регулируемому перекрестку позволяет повысить пропускную способность перекрестка и снизить негативное влияние на экологию города.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. P.Fernandes, K. Salamati, N.M. Roupail, M.C. Coelho, «Identification of emission hotspots in roundabouts corridors» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 37, pp. 48–64, 2015.
2. Ярков, С. А. Повышение эффективности организации дорожного движения в городах : монография / С. А. Ярков, В. В. Морозов. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. 161 с.
3. Левашев А.Г. Исследование временных интервалов между транспортными средствами на регулируемых пересечениях / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов // Сборник Научных Трудов Ангарского Государственного Технического Университета. 2014., вып. 1, № 1, С. 204-211,
4. Левашев А.Г. Современные программные продукты в области организации дорожного движения / А.Г. Левашев // Сборник Научных Трудов Ангарского Государственного Технического Университета. 2014, вып. 1, № 1, С. 201–203.
5. Benhamza K., Seridi H. «Adaptive traffic signal control in multiple intersections network», *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 28, no. 6, P. 2557–2567, 2015.
6. Qadri S.S.S.M., Gökçe M.A., Öner E. «State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities» *European Transport Research Review*, vol. 12, no. 1, P. 55, 2020.
7. Morozov V., Shepelev V., Kostyrchenko V. «Modeling the Operation of Signal-Controlled Intersections with Different Lane Occupancy» *Mathematics*, vol. 10, no. 24, P. 4829, 2022.
8. Алексиков С. В. Повышение скорости автотранспорта на основе регулирования движения по «зеленой волне» / С. В. Алексиков, Г. И. Белико, В. А. Пшеничкина, С. В. Волченко // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27).
9. Peng Z., Wang, J., Gao, Z., Huang, H. «Modelling and Simulation of Speed Guidance of Multi-Intersection in a Connected Vehicle Environment» // *Green Transportation and Low Carbon Mobility Safety*, vol. 944, pp. 161-176, 2023.
10. (Jeff) Ban X., Hao P., Sun Z. «Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no. 6, pp. 1133–1156, 2011.
11. C. Tan, J. Yao, K. Tang and J. Sun, «Cycle-Based Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Sparse Vehicle Trajectory Data» *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 91–106, 2021.
12. Parmar D. Gore, N., Rathva, D., Dave, S., Jain, M. «Modelling Queuing of Vehicles at Signalized Intersection» // *Transportation Research» Transportation Research. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 45, pp. 557–565. 2020.
13. Singh S., Santhakumar S.M. «Platoon-Based Impact Assessment of Heavy-Duty Vehicles on Traffic Stream Characteristics of Highway Lanes Under Mixed Traffic Environment» *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, vol. 20, no.1, pp. 29–45, 2022.
14. Li B., Cheng W., Li L. «Lane-Based Queue Length Estimation in Heterogeneous Traffic Flow Consisting of Cars and Buses» *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 146, no.2, pp. 04019065, 2020.
15. V. Barth, R. de Oliveira, M. de Oliveira and V. do Nascimento «Vehicle Speed Monitoring using Convolutional Neural Networks» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 1000–1008, 2019.
16. J. Lan, J. Li, G. Hu, B. Ran, L. Wang, «Vehicle speed measurement based on gray constraint optical flow algorithm» *Optik*, vol. 125, no.1, pp. 289–295, 2014.

17. Huang, Y.-Q., Zheng, J.-C., Sun, S.-D., Yang, C.-F., Liu, J. «Optimized YOLOv3 Algorithm and Its Application in Traffic Flow Detections» *Applied Sciences*, vol. 10, no. 9, p. 3079, 2020.
18. Delavarian M., Marouzi O.R., Hassanpour H., Parizi R.M., Khan M.S. «Multi-camera multiple vehicle tracking in urban intersections based on multilayer graphs» *IET Intelligent Transport Systems* vol. 14, no. 12, pp. 1673–1690, 2020.
19. Fadina O., Shepelev V., Vorobyev A. «Optimizing the Speed of Traffic Flows Taking into Account the Operating Modes of Traffic Lights and Environmental Aspects» 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, Russian Federation: IEEE, pp. 294–298, 2023.
20. Shepelev V., Glushkov A., Vorobyev A. «Using Computer Vision to Analyze the Sequence of Vehicles Passing Through Regulated Intersections» 2023 International Russian Smart Industry Confer-

ence (SmartIndustryCon). Sochi, Russian Federation: IEEE, pp. 311–316, 2023.

21. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 “О Правилах дорожного движения” (ПДД) (последняя редакция) (вместе с “Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности \ КонсультантПлюс [Electronic resource]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LA_W_2709/ (accessed: 27.11.2024).
22. Шепелева Е.В. Обеспечение безостановочного движения организованного транспортного потока по узлу улично-дорожной сети на основе применения компьютерного зрения и динамических дорожных знаков / Е.В. Шепелева, В.А. Городокин, В.Д. Шепелев, З.В. Альметова // *Транспорт Урала*. 2020. № 4(67). С. 60-67.

REFERENCES

1. Fernandes P, Salamati K, Roupail NM, Coelho MC. Identification of emission hotspots in roundabouts corridors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015;37:48–64.
2. Yarkov SA, Morozov VV. Improving the efficiency of traffic management in cities: monograph. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2020.
3. Levashev AG, Mikhailov AYU. Study of time intervals between vehicles at controlled intersections. *Collection of Scientific Papers of Angarsk State Technical University*. 2014;1(1):204-211,
4. Levashev AG. Modern software products in the field of traffic management. *Collection of Scientific Papers of Angarsk State Technical University*. 2014;1(1):201-203.
5. Benhamza K, Seridi H. Adaptive traffic signal control in multiple intersections network. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2015;28(6):2557–2567.
6. Qadri SSSM, Gökçe MA, Öner E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European Transport Research Review*. 2020;12(1):55.
7. Morozov V, Shepelev V, Kostyrchenko V. Modeling the operation of signal-controlled intersections with different lane occupancy. *Mathematics*. 2022;10(24):4829.
8. Aleksikov SV, Belikov GI, Pshenichkina VA, Volchenko SV. Increasing the speed of vehicles based on the regulation of traffic on the "green wave". *Internet-vestnik VolgGASU*. 2013;2(27).
9. Peng Z, Wang J, Gao Z, Huang H. Modelling and simulation of speed guidance of multi-intersection in a connected vehicle environment. *Green Transportation and Low Carbon Mobility Safety*. 2023;944:161-176.
10. Ban X, Hao P, Sun Z. Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2011;19(6):1133–1156.
11. Tan C, Yao J, Tang K, Sun J. Cycle-based queue length estimation for signalized intersections using

sparse vehicle trajectory data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021;22(1):91–106.

12. Parmar D, Gore N, Rathva D, Dave S, Jain M. Modelling queuing of vehicles at signalized intersection. *Transportation Research. Lecture Notes in Civil Engineering*. 202;45:557–565.
13. Singh S, Santhakumar SM. Platoon-based impact assessment of heavy-duty vehicles on traffic stream characteristics of highway lanes under mixed traffic environment. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2022;20(1):29–45.
14. Li B, Cheng W, Li L. Lane-based queue length estimation in heterogeneous traffic flow consisting of cars and buses. *Journal of Transportation Engineering*. 2020;146(2):04019065.
15. Lan J, Li J, Hu G, Ran B, Wang L. Vehicle speed measurement based on gray constraint optical flow algorithm. *Optik*. 2014;125(1):289–295.
16. Huang Y-Q, Zheng J-C, Sun S-D, Yang C-F, Liu J. Optimized YOLOv3 algorithm and its application in traffic flow detections. *Applied Sciences*. 202;10(9):3079.
17. Delavarian M, Marouzi OR, Hassanpour H, Parizi RM, Khan MS. Multi-camera multiple vehicle tracking in urban intersections based on multilayer graphs. *IET Intelligent Transport Systems*. 2020;14(12):1673–1690.
18. Delavarian M, Marouzi OR, Hassanpour H, Parizi RM, Khan MS. Multi-camera multiple vehicle tracking in urban intersections based on multilayer graphs. *IET Intelligent Transport Systems*. 2020;14(12):1673–1690.
19. Fadina O, Shepelev V, Vorobyev A. Optimizing the speed of traffic flows taking into account the operating modes of traffic lights and environmental aspects. 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE; 2023.
20. Shepelev V, Glushkov A, Vorobyev A. Using computer vision to analyze the sequence of vehicles passing through regulated intersections. 2023 Inter-

national Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). Sochi: IEEE; 2023.

21. The Government of the Russian Federation, Decree, On Road Laws [Internet]. [place unknown]: October 23, 1993 [cited 2024 Nov 27]. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/

Информация об авторах:

Фадина Ольга Сергеевна – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильный сервис», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Scopus-Author ID 57742587000, ORCID ID: 0000-0001-7580-2452, Author-ID-РИНЦ 1194160.

Шепелёв Владимир Дмитриевич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильный сервис», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Scopus-Author ID 57170112500, ORCID ID:0000-0002-1143-2031, Author-ID-РИНЦ 650373.

Fadina Olga Sergeevna - Postgraduate Student of the Department of Automobiles and Automotive Engineering, South Ural State University (National Research University), Scopus-Author ID 57742587000, ORCID ID: 0000-0001-7580-2452, Author-ID-RSCI 1194160

Shepelyov Vladimir Dmitrievich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Automotive Engineering, South Ural State University (National Research University), Scopus-Author ID 57170112500, ORCID ID:0000-0002-1143-2031, Author-ID-RSCI 650373.

22. Shepeleva EV, Gorodokin VA, Shepelev VD, Almetova ZV. Ensuring non-stop movement of organized traffic flow along the road network using computer vision and dynamic road signs. *Transport of the Urals*. 2020;4(67):60-67.

Альметова Злата Викторовна - кандидат технических наук, доцент «Передовая инженерная школа двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала»» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Scopus-Author ID: 56809402000, ORCID ID:, Author-ID-РИНЦ 653847.

Горьяев Николай Константинович - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильный сервис» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Scopus-Author ID 56557073000, ORCID ID:0000-0002-7556-6522, Author-ID-РИНЦ 618209.

Almetova Zlata Viktorovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Advanced Engineering School of Engine Building and Interior Engineering "Heart of the Urals", South Ural State University (National Research University), Scopus-Author ID: 56809402000, ORCID ID, author-ID-Rinc 653847.

Goryaev Nikolay Konstantinovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Automotive Engineering, South Ural State University (National Research University), Scopus-Author ID 56557073000, ORCID ID:0000-0002-7556-6522, Author-ID-RSCI 618209.

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 03.12.2024; одобрена после рецензирования 20.12.2024; принята к публикации 27.12.2024. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 03.12.2024; approved after review on 20.12.2024; accepted for publication on 27.12.2024. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.