

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 625.712.14

doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-76-86

СНИЖЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДЕРЖЕК ПРИ УПРАВЛЕНИИ СКОРОСТНЫМИ РЕЖИМАМИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ

Ольга Сергеевна Фади́на^{1✉}, Владимир Дмитриевич Шепелёв², Евгений Дмитриевич
Ахма́деев³

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

¹ fadinaos@susu.ru

² shepelevvd@susu.ru

³ akhmadeeved@susu.ru

Аннотация

Современные города сталкиваются с проблемой неэффективного использования транспортной инфраструктуры в межпиковый период, когда интенсивность движения значительно ниже пиковых значений. Традиционные системы светофорного регулирования, не в полной мере учитывают изменяющуюся интенсивность движения и специфику транспортного потока в межпиковые часы. В результате автотранспортные средства вынуждены простаивать на регулируемых пересечениях даже при отсутствии автотранспортного потока на конфликтующем направлении движения. Это приводит к росту задержек, неоправданному увеличению времени в пути, дополнительному расходу топлива и, как следствие, к экономическим потерям и росту выбросов загрязняющих веществ. Целью данного исследования является оценка снижения задержек транспортных средств при организации безостановочного движения через пересечения улично-дорожной сети с использованием рекомендуемой скорости движения автотранспортных средств в

группе. Исследование построено на основе аналитического моделирования процесса разъезда очереди внегрупповых транспортных средств, расчета временных зависимостей при различных стартовых ускорениях (0,8...2,8 м/с²), оценки экологической и экономической эффективности предлагаемого подхода. Научная новизна работы заключается в разработанной расчетной модели определения рекомендуемой скорости движения, учитывающей влияние разъезда внегрупповых ТС и длины перегона на условия безостановочного проезда. Результаты моделирования показали, что движение с рекомендуемой скоростью позволяет сократить задержки транспортных средств до 9,5 %, снизить суммарные выбросы CO и PM2.5 на 14 % и уменьшить расход топлива до 25 % по сравнению со свободным режимом движения автотранспортных средств.

Ключевые слова: группа, транспортные средства, внегрупповые автомобили, задержка, поток, светофор, регулирование, выбросы.

Ссылка для цитирования:

Фади́на О.С. Снижение транспортных задержек при управлении скоростными режимами на регулируемых пересечениях / О.С. Фади́на, В.Д. Шепелев, Е.Д. Ахма́деев // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 12. – С. 76-86. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-76-86.

Original article

Open Access Article

REDUCTION OF TRAFFIC DELAYS IN SPEED CONTROL AT REGULATED INTERSECTIONS

Olga Sergeevna Fadina^{1✉}, Vladimir Dmitrievich Shepelev², Evgeny Dmitrievich Akhmadeev³

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

¹ fadinaos@susu.ru

² shepelevvd@susu.ru

³ akhmadeeved@susu.ru

Abstract

Modern cities face the problem of inefficient use of transport infrastructure during the off-peak period, when traffic intensity is significantly lower than peak values. Traditional traffic light control systems do not fully take into account the changing traffic intensity and the specific character of traffic flow during off-peak hours. As a result, vehicles are forced to stand idle at regulated intersections even if there is no traffic flow in the conflicting driving direction. This leads to increased delays, an unjustified increase in travel time, additional fuel consumption and, as a result, to economic losses and increased emissions of pollutants. The purpose of this study is to assess the reduction of vehicle delays when organizing non-stop traffic through intersections of the road network using the recommended speed of vehicles in the group. The study is based on analytical modeling of the process of

moving a queue of non-group vehicles, calculating time dependencies at various starting accelerations ($0.8 \dots 2.8 \text{ m/s}^2$), and evaluating the environmental and economic effectiveness of the proposed approach. The scientific novelty of the work lies in the developed computational model for determining the recommended speed, taking into account the influence of the departure of non-group vehicles and the length of the stage on the conditions of non-stop travel. The simulation results show that driving at the recommended speed reduces traffic delays by up to 9.5 %, reduces total CO and PM_{2.5} emissions by 14%, and reduces fuel consumption by up to 25 % compared with the free-range mode of vehicles.

Keywords: group, vehicles, non-group cars, delay, flow, traffic light, regulation, emissions.

Reference for citing:

Fadina OS, Shepelyov VD, Akhmadeev ED. Reduction of transport delays in speed control at controlled intersections. *Transport Engineering*. 2025;12:76-86. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-76-86.

Введение

Городские транспортные системы сталкиваются с все более серьезными вызовами: повышение эффективности использования транспортной инфраструктуры, снижение транспортных задержек и сокращение негативного влияния транспорта на качество атмосферного воздуха. Немаловажную роль в возникновении задержек играют регулируемые перекрестки, где транспортные потоки вынуждены останавливаться из-за неэффективных синхронизации фаз работы светофоров и несоответствия скоростных режимов на отдельных участках дорог. В качестве решения обозначенных проблем предлагается ряд подходов, которые основываются на адаптивном управлении светофорными циклами, динамической корректировке длительности фаз и использовании согласованных режимов движения [1, 2]. Стратегии «зелёной волны» и синхронизация светофорных объектов способствуют повышению пропускной способности главных дорог, но их результативность уменьшается при неблагоприятных погодных условиях, сбоях в структуре потока или появлении автомобилей, не входящих в основную группу, которые поворачивают с примыкающих улиц.

На пропускную способность перекрестка в значительной степени влияет задержка [3]. Задержка представляет собой

время, которое теряет транспортное средство при проезде через перекресток. Чем выше задержка, тем меньше количество автомобилей может проехать через перекресток за один и тот же период времени. Это снижает общую пропускную способность [4, 5].

Общая задержка транспортного потока зависит от множества факторов, включая тип транспортного средства, конфигурацию перекрестка, стиль вождения, время суток, категорию транспорта и доступность свободного пространства [6, 7]. Эффективность и качество движения на регулируемых перекрестках оцениваются в зависимости от общей задержки, создаваемой отдельными транспортными средствами.

Задержка является критическим фактором, который значительно влияет на эффективность работы перекрестков и их способность обрабатывать транспортные потоки. Уменьшение задержки может привести к повышению уровня пропускной способности и улучшению условий дорожного движения [8].

Для измерения задержки на регулируемых перекрестках в основном применяются два метода [9]. Это модель HCM [10] и модель Вебстера [11]. Эти модели задержки были разработаны в соответствии с условиями дорожного движения в

США и Великобритании. Модели рассчитаны на однородное движение и при условии движения транспортного потока в соответствии с правилами движения по полосам.

Сравнительный анализ моделей задержек Вебстера и Бэкманна проведен в исследовании [12], разработана новая модель, учитывающая время цикла работы светофора, интенсивность прибытия и разъезда, очередь транспортных средств на перекрестке.

В исследовании [13] была разработана модель путём модификации существующей модели НСМ в условиях неоднородного движения. Время задержки рассчитано с использованием правила одной трети Симпсона с учетом длины очереди.

В работе [14] построена модель *SIDE-R* для оценки задержки на регулируемом перекрестке. Задержка увеличивается с увеличением периода насыщенного зелёного цвета и уменьшается с увеличением

степени насыщения и соотношения зелёного цвета.

Применение искусственной нейронной сети используется в [15] для расчета оптимального режима работы светофоров, время задержки для двух часов пик снижается при имитационном моделировании в пределах 20...50 %.

Большинство существующих моделей оценки очередей и задержек не учитывают неоднородность состава потока и вариацию ускорений транспортных средств при выезде с перекрёстка, что приводит к заниженной оценке времени разъезда и снижению точности расчётов при практическом применении.

Цель исследования – оценка снижения задержки первого транспортного средства (ТС) лидирующей группы, обусловленной вынужденным замедлением или остановкой при проезде пересечения вследствие образования очереди внегрупповых ТС.

Методика расчета скорости проезда транспортного средства через регулируемый перекресток

Характер движения транспортного потока в городских условиях существенно отличается от потока на магистральных дорогах: в городе движение регулярно прерывается перекрёстками, пешеходными переходами, остановками общественного транспорта и ограничениями скорости, а основную координацию обеспечивает сигнализация. Светофорные циклы формируют периодические очереди и при возобновлении движения «выбрасывают» на следующую секцию не разрозненный поток, а компактную группу автомобилей, внутри которой интервалы между ТС незначительны и скорость задаёт лидирующий автомобиль [16].

Внегрупповые автомобили – это транспортные средства, которые не входят в текущую лидирующую группу основного потока, например, ТС, выезжающие с примыкающих улиц или поворачивающие на магистраль.

В случае интенсивного вхождения внешних машин может снижаться пропускная способность регулируемого перекрестка и увеличиваться вероятный риск

аварий. Внегрупповые автомобили формируют очередь на регулируемых пересечениях, что необходимо учитывать при организации координированного светофорного регулирования. [17, 18].

Компактные группы повышают пропускную способность в момент их прохода через контролируемый участок (перекрёсток). Однако если поток состоит из длинных групп с малыми промежутками между ТС, почти не остаётся возможностей для безопасного вхождения транспорта с примыкающих улиц, поэтому увеличиваются задержки и очереди ТС [19, 20].

Правильное формирование и управление группами (например, с помощью синхронизации светофоров) позволяет создать «зеленые волны» и повысить эффективность движения [21, 21, 23].

Интегральным показателем влияния множества факторов на выезд очереди ТС, стоящей перед запрещающим сигналом светофора, будем считать вариацию ускорения, с которым автомобили могут набирать скорость при выезде с перекрёстка. В общем случае, такими факторами могут

быть изменяющиеся метеоусловия, как, например, осадки, ветер, снижение видимости, а также изменение качества или повреждение дорожного покрытия.

Исходные данные, получены расчётным путём для трёх значений ускорения выезда ТС с перекрёстка и представлены в табл. 1.

Таблица 1
Время преодоления перекрёстка каждым ТС из очереди при вариации ускорения

Table 1

Time to overcome the intersection by each vehicle from the queue with acceleration variation

n_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a_1 = 2,8 \text{ м/с}^2$										
$t_1^{a_1, n_i}, \text{ с}$	2,13	1,90	1,73	1,62	1,55	1,49	1,45	1,45	1,45	1,45
$t_{оч1}^{a_1, n_i}, \text{ с}$	2,13	4,03	5,76	7,38	8,93	10,42	11,87	13,32	14,77	16,22
$a_2 = 1,8 \text{ м/с}^2$										
$t_2^{a_2, n_i}, \text{ с}$	3,00	2,57	2,30	2,08	1,95	1,84	1,75	1,70	1,70	1,70
$t_{оч2}^{a_2, n_i}, \text{ с}$	3,00	5,57	7,87	9,95	11,90	13,74	15,49	17,19	18,89	20,59
$a_3 = 0,8 \text{ м/с}^2$										
$t_3^{a_3, n_i}, \text{ с}$	4,00	3,40	3,00	2,70	2,48	2,30	2,20	2,15	2,10	2,10
$t_{оч3}^{a_3, n_i}, \text{ с}$	4,00	7,40	10,40	13,10	15,58	17,88	20,08	22,23	24,33	26,43

Примечание. $t_{оч1}^{a_1, n_i}$, $t_{оч2}^{a_2, n_i}$, $t_{оч3}^{a_3, n_i}$ – время разезда очереди внегрупповых ТС, с; $t_1^{a_1, n_i}$, $t_2^{a_2, n_i}$, $t_3^{a_3, n_i}$ – время, затрачиваемое на проезд одного внегруппового ТС с учетом ускорения и места в очереди.

Временные зависимости времени выезда с перекрёстка каждым ТС из очереди в n автомобилей, представлены на рис. 1.

Как следует из рис. 1, при ускорении выезда в $2,8 \text{ м/с}^2$ время выезда становится постоянным, начиная с 7-го автомобиля, и составляет 1,45 с. Аналогично, при ускорении выезда в $1,8 \text{ м/с}^2$ время выезда ста-

новится постоянным, начиная с 8-го автомобиля, и составляет 1,7 с. И при ускорении выезда в $0,8 \text{ м/с}^2$ время выезда становится постоянным, начиная с 9-го автомобиля, и составляет 2,1 с.

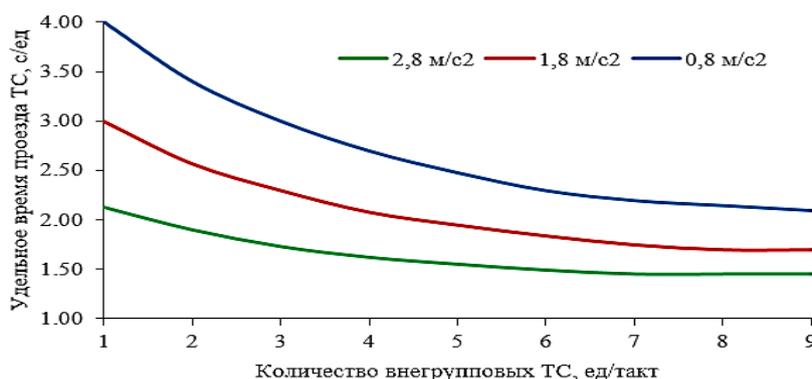


Рис. 1. Время проезда одного внегруппового ТС с учетом ускорения и места в очереди

Fig. 1. The time it takes for one out-of-group vehicle to travel, taking into account acceleration and queue space

Из диапазона времён выезда расчётных данных, следует, что расчётный диапазон установившегося времени выезда ТС с перекрёстка (1,45...2,1 с) включает в себя фактическую точку времени выезда в 2 с. Что говорит о корректности выбора ис-

ходных данных для проведения исследования.

Так, расчёт рекомендуемой скорости проведём из предположения неразрывности двух частей транспортного потока: выезда очереди ТС с перекрёстка и проезда

перекрёстка потоком ТС, подъезжающим к пересечению. При этом подъезжающая группа ТС не снижает своей скорости при проезде пересечения – это условие реализации «зелёной волны» в движении ТС:

$$V_{irek} = \frac{3,6 \cdot L_n}{t_{cd} - t_{int} + t_{оч_i}^{a_i, n_i}}, \quad (1)$$

где V_{irek} – средняя скорость лидирующего автомобиля на перегоне, км/ч; L_n – длина перегона до следующего пересечения, м; t_{cd} – время сдвига разрешающего сигнала светофора, с; t_{int} – время, затраченное лидирующим ТС, который был первым в очереди, начиная с момента включения разрешающего сигнала светофора на пересечении, предшествующем пересекаемому без остановки, и заканчивая его достижением дальней границы пересекаемой проезжей части, с; $t_{оч_i}^{a_i, n_i}$ – время разезда очереди внегрупповых ТС из n ТС, с; n_i – количество ТС в очереди перед следующим перекрёстком, ед; i – номер вариации исследования для трёх ускорений выезда ТС с перекрёстка: $2,8 \text{ м/с}^2$; $1,8 \text{ м/с}^2$; $0,8 \text{ м/с}^2$.

Эффект от движения ТС по городским магистралям с рекомендуемой скоростью, рассчитываемой по полученной модели (1), целесообразно оценивать по снижению времени задержек ТС перед пересечениями. Снижение задержек времени при вариации количества внегрупповых ТС перед перекрёстком, определим как разницу между двумя расчётными временными отрезками для 1-го ТС лидирующей группы. Первый временной отрезок определяется как суммарное время:

- время проезда перегона длиной в 500 м со скоростью 50 км/ч при координированном движении;

- время ожидания проезда до стоп-линии перед пересечением, обусловленное выездом с пересечения внегрупповых ТС.

Второй временной отрезок определяется безостановочным временем проезда перегона с рекомендуемой скоростью, при которой проезд пересечения происходит без остановки перед стоп-линией.

Расчёт снижения задержки для 1-го ТС лидирующей группы может быть представлен следующим образом:

1. Время движения со средней скоростью транспортного потока при координированном движении V_{cp} (принято в исследовании 50 км/ч), с:

$$t_1^{n_i} = \frac{3,6 \cdot L_n}{V_{cp}} + t_{оч_i}^{a_i, n_i+1}, \quad (2)$$

где $t_{оч_i}^{a_i, n_i}$ – время разезда очереди внегрупповых ТС из n ТС с учетом остановки первого лидирующего ТС, с.

2. Время движения при рекомендуемой скорости V_{irek} , с:

$$t_2^{n_i} = \frac{3,6 \cdot L_n}{V_{irek}}. \quad (3)$$

3. Снижение задержки при движении с рекомендуемой скоростью, с:

$$\Delta t^{n_i} = t_1^{n_i} - t_2^{n_i}. \quad (4)$$

4. Снижение задержки, %:

$$t = \frac{\Delta t^{n_i}}{t_1^{n_i}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

При расчётах принято время сдвига фаз светофорного регулирования, обуславливающее безостановочный проезд первым ТС лидирующей группы последующего пересечения при отсутствии перед ним внегрупповых ТС, со скоростью 50 км/ч, что соответствует расчётной рекомендуемой скорости также 50 км/ч. Соответствующие расчёты уровня снижения задержек 1-го ТС лидирующей группы при вариации количества внегрупповых ТС, и ускорении их выезда с перекрёстка $0,8 \text{ м/с}^2$, отражены в табл. 2.

Следует заметить, что ускорение выезда ТС с перекрёстка в расчётах принято в градации трёх значений ($0,8 \text{ м/с}^2$; $1,8 \text{ м/с}^2$; $2,8 \text{ м/с}^2$), что обусловлено как различными метеоусловиями, так и состоянием дорожного покрытия пересечения.

Аналогичные расчёты, фрагмент которых отражен в табл. 2, проведены для различных ускорений выезда ТС с перекрёстка, а также при вариации длины перегона (300 м; 500 м; 700 м).

Прогнозная визуализация поля распределения анализируемого показателя – процента снижения задержек 1-го ТС лидирующей группы, отражена на рис. 2, где представлены 3 поверхности: верхняя соответствует дине перегона 300 м; средняя соответствует дине перегона 500 м; ниж-

няя соответствует дине перегона 700 м. Как следует из анализа рис. 2, каждая поверхность стремится к максимальным значениям при минимальном ускорении выезда ТС с перекрёстка и небольшом наличии внегрупповых ТС, что хорошо согласуется с априорными предположениями.

Общий диапазон снижения задержек, при вариации рассмотренных параметров в общепринятых пределах, варьируется от 2,2 % до 9,5 %. Такие оценки эффективности движения ТС с рекомендуемой скоростью можно считать существенными при решении задач оптимизации транспортного движения по городским магистралям.

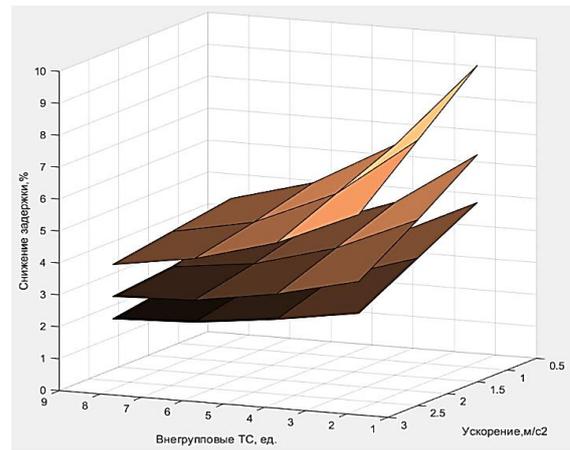


Рис. 2. Поле распределения снижения задержек
Fig. 2. Delay reduction distribution field

Таблица 2

Расчёт снижения задержек 1-го ТС лидирующей группы

Table 2

Calculation of delay reduction for the 1st vehicle of the leading group

Количество внегрупповых ТС, ед.	0	2	4	6	8
Время для 1-го ТС лидирующей группы, с: – проезда перегона со скоростью 50 км/ч; – ожидания выезда внегрупповых ТС с перекрёстка	36,0	46,4	51,6	56,1	60,3
Задержка времени 1-го ТС лидирующей группы, с	0	10,4	15,5	20,1	24,3
Рекомендуемая скорость на перегоне, км/ч	50	41	37	33	31
Время для 1-го ТС лидирующей группы, движущегося с рекомендуемой скоростью, с	36,0	43,4	49,1	53,9	58,2
Снижение задержки, %	0	6,5	4,8	3,9	3,5

Экологическая и экономическая эффективность системы

В рамках дальнейшего исследования планируется оценить экологическую эффективность от снижения задержки первого ТС лидирующей группы путём расчёта выбросов вредных веществ. Анализ будет сосредоточен на двух ключевых загрязнителях: оксиде углерода (СО) и взвешенных частицах (PM2.5), оказывающих наиболее значительное негативное воздействие на здоровье человека.

Сравнительный анализ расчётных значений выбросов СО и PM2.5 для текущего режима движения и для режима, оптимизированного по рекомендуемой скорости (обеспечивающего безостановочный проезд), позволит количественно оценить экологический эффект от внедрения предложенной системы. Ожидается, что минимизация задержек и устранение режимов частых разгонов и торможений приведут к значительному снижению объёма вредных

выбросов в атмосферу на рассматриваемом пересечении.

Методология расчёта выбросов загрязняющих веществ будет основываться на положениях ГОСТ Р 56162-2019 [24]. Расчёт суммарных разовых выбросов i -го вещества (СО или PM2.5) для полосы движения на экспериментальном пересечении производится по формуле:

$$M_{Pi}^C = \frac{1}{1200} (M_{Pi}^3 + M_{Li}^P) \quad (6)$$

где M_{Pi}^3 – выброс i -го загрязняющего вещества ТС конкретного направления движения в районе пересечения при запрещающих движение сигналах светофора за 20-ти минутный период дополнительного обследования, г; M_{Li}^P – выброс i -го загрязняющего вещества ТС

конкретного направления движения в районе пересечения при разрешающих движениях сигналах светофора за 20-ти минутный период.

Выбросы в режиме остановки $M_{\Pi i}^3$:

$$M_{\Pi i}^3 = \frac{P_u}{60} \sum_1^{N_u} \sum_1^k (M_{\Pi i, k} \cdot G_{k, \Pi}), \quad (7)$$

где P_u продолжительность действия запрещающего движения сигнала светофора (включая желтый цвет) в течение 20 мин. с; N_u – количество циклов действия запрещающего движения сигнала светофора за 20-минутный период времени; $M_{\Pi i, k}$ – удельный выброс i -го загрязняющего вещества ТС, k -й группы, находящихся в очереди у запрещающего движения сигнала светофора, г/мин; $G_{k, \Pi}$ – количество ТС i -й группы, находящихся в очереди в районе пересечения в конце каждого цикла действия запрещающего движения сигнала светофора.

Выбросы в режиме движения (M_{Li}^p) будут определяться с учётом пройденного расстояния, количества ТС и поправочного коэффициента на скорость:

$$M_{Li}^p = L^{\Pi} \sum_1^{N'_u} \sum_1^k M_{k, i}^L \cdot G_{k, p} \cdot r_{V_{k, i}}, \quad (8)$$

где L^{Π} – расстояние, проходимое ТС в одном направлении при разрешающих движениях сигналах светофора в течение 20 мин, включающее в себя длину очереди ТС, образуемой при запрещающем движении сигнале светофора, и длину соответствующей зоны перекрестка, км; N'_u – количество циклов работы разрешающего движения сигнала светофора в течение 20 мин; k – число групп автомобилей; $M_{k, i}^L$ – удельный пробеговый выброс i -го загрязняющего вещества автомобилями k -й группы, г/км; $G_{k, p}$ – количество ТС каждой k -й группы, проходящих через зону пересечения в одном направлении при разрешающем движении сигнале светофора; $r_{V_{k, i}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения потока автотранспортных средств на конкретной автомобильной дороге (или ее участке).

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение выбросов загрязняющих веществ при разных скоростных режимах

Table 3

Comparison of pollutant emissions at different speed modes

n, ед	Средняя скорость			Рекомендуемая скорость			M_{CO+PM} , кг/сутки
	CO, г/цикл	PM2.5, г/цикл	M_{CO+PM} , кг/сутки	CO, г/цикл	PM2.5, г/цикл	M_{CO+PM} , кг/сутки	
1	1,98	0,06	1,40	1,60	0,01	1,38	0,02
2	1,77	0,07	1,26	1,55	0,02	1,19	0,07
3	1,96	0,07	1,39	1,82	0,02	1,27	0,12
4	2,15	0,08	1,52	1,88	0,03	1,35	0,17
5	2,34	0,08	1,66	1,76	0,04	1,43	0,23

Проведенное исследование показывает значительное снижение суммарных выбросов загрязняющих веществ (CO и PM2.5) при соблюдении ТС лидирующей группы рекомендуемой скорости движения по сравнению с движением со средней скоростью (50 км/ч). Графическое представление суммарных выбросов CO и PM2.5 при двух скоростных режимах представлено на рис. 3.

На рис. 3 представлена зависимость суммарных выбросов загрязняющих ве-

ществ (CO и PM2.5) от количества внегрупповых транспортных средств. Соблюдение рекомендуемой скорости движения позволяет сократить суммарные выбросы CO и PM2.5 на 14 % (при 5 ТС в очереди) за счет минимизации времени простоя и устранения режимов частых разгонов и торможений.

Таким образом, проведенный расчет экологической эффективности наглядно демонстрирует, что оптимизация транспортных потоков обеспечивает комплекс-

ный положительный эффект, выражающийся не только в повышении пропускной способности пересечений и сокращении временных задержек, но и в существенном

улучшении экологической ситуации в городской среде путем снижения вредных выбросов.

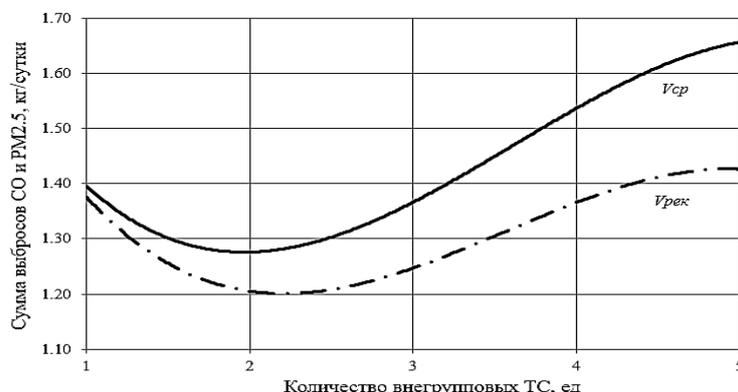


Рис. 3. Зависимость суммарных выбросов CO и PM2.5 от количества внегрупповых ТС и скоростного режима
 Fig. 3. The dependence of total CO and PM2.5 emissions on the number of extra-group vehicles and the speed limit

При оценке экономической эффективности основное внимание уделяется анализу снижения расхода топлива, являющегося прямым следствием минимизации времени задержек ТС и устранения режимов частых разгонов и торможений в транспортном потоке.

Для расчета расхода топлива ТС при движении без остановки и с остановками был использованы параметры:

- объем бензинового двигателя – 1.6 л;
- средний расход топлива при движении в городских условиях – 9 л/100 км [25];

Заключение

В результате исследований сформулированы следующие выводы:

– разработана математическая модель расчёта рекомендуемой скорости движения лидирующей группы транспортных средств, обеспечивающая безостановочный проезд регулируемых пересечений с учётом ускорения внегрупповых автомобилей и длины перегона;

– установлено, что применение движения с рекомендуемой скоростью позволяет снизить временные задержки первого транспортного средства

– средний расход топлива на холостом ходу – 0,8 л/час [25];

– дополнительный расход топлива при разгоне +15...20 % к движению [25].

Таким образом, средний расход топлива ТС при проезде пересечения с остановкой и последующим разгоном по полосе за один цикл составляет 0,05...0,16 л, что на 22...25 % превышает показатель безостановочного проезда (0,04...0,12 л). За рабочий день это приводит к перерасходу 6,86...27,44 л топлива ТС лидирующей группы на полосу движения.

лидирующей группы до 9,5 % по сравнению с режимом координированного движения;

– проведённая оценка показала, что соблюдение рекомендуемой скорости способствует снижению суммарных выбросов CO и PM2.5 на 14 % и уменьшению расхода топлива до 25 % за счет сокращения времени простоя и снижения количества режимов разгона-торможения;

– полученные результаты подтверждают, что регулирование скорости движения групповых ТС при

подъезде к пересечению является эффективным инструментом повышения пропускной способности улично-дорожной сети и снижения негативного экологического воздействия транспортных потоков;

– предложенная методика может использоваться при проектировании и

оптимизации систем координированного управления дорожным движением, внедрении интеллектуальных транспортных систем построенных на основе обмена информацией между инфраструктурой и транспортными средствами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саргсян А. Т. Ситуация дорожного движения в Ереване и пути модернизации с помощью автоматизированной системы управления дорожным движением. Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21, № 3(97). С. 422-434. DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434.
2. Меженков А. В. Геометрический критерий оценки безопасности движения на городских регулируемых перекрестках, основанный на характеристиках взаимодействия транспортных потоков. Вести Автомобильно-дорожного института. 2017. № 1(20). С. 37-45.
3. Hsieh P.-C., Liu X., Jiao J., Hou I.-H., Zhang Y., Kumar P.R. Throughput-optimal scheduling for multi-hop networked transportation systems with switch-over delay. Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. 2017, Part F129153, art. no. a16, DOI: 10.1145/3084041.3084065
4. Писцов А. В. Петров А. И. Анализ стартовых задержек на регулируемых пересечениях улично-дорожной сети. Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. С. 177.
5. Фади́на О. С., Шепелев В. Д., Варворкин М. А., Плюхин Л. Э. Повышение пропускной способности на регулируемых пересечениях за счет оптимизации скоростных режимов транспортных потоков. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2023. Т. 17, № 3. С. 175-182. DOI 10.14529/em230317
6. Ройко Ю. Я. Исследование потерь времени в основных такта на регулируемых перекрестках. Наукові нотатки. 2016. № 55. С. 332-337.
7. Morozov V. V. Morozov G. N., Shepelev V. D. Modeling the formation of a vehicle queue at urban signal-controlled intersections. T-Comm. 2025. 19(3): 61-68. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-3-61-68.
8. Фади́на О. С., Глушков А. И., Варворкин М. А. Снижение транспортных задержек за счет оптимизации скоростных режимов транспортных потоков. Прогрессивные технологии в транспортных системах. Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Оренбург, 20–22 ноября 2024 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2025. – С. 418-426.
9. Кашталинский А. С. Снижение задержек на регулируемых перекрестках с учетом временной неравномерности транспортных потоков. Транспортное планирование и моделирование : сб. тр. Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26–27 мая 2016 года . Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; Ассоциация транспортных инженеров. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. – С. 74-82
10. Highway Capacity Manual. Washington, DC: TRB, 2000. 1134 p
11. Webster F. V., Cobbe B. M. Traffic Signals. London: Road Research Technical Paper N56, HMSQ, 1966. 111 p.
12. Антониади Г. Д. Архипов В. О., Цуприков А. А. Математическая модель задержки автотранспорта на регулируемом перекрестке. Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 4. С. 210-215. DOI 10.17587/it.25.210-215
13. Saha A., Chandra S., Ghosh I. Delay at signalized intersections under mixed traffic conditions. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems. 2017; 143 (8), art. no. 04017041.
14. Patel C.R., Joshi G.J., Katti B.K. Discharge and delay estimation for unsaturated signalised Urban intersection under mixed traffic condition. Proceedings of the 14th HKSTS International Conference: Transportation and Geography, 2009; 2: 697 – 703.
15. Фадюшин А. А., Писцов А. В. Применение нейросетевых технологий в управлении светофорными объектами. Транспортное машиностроение. 2024. № 4(28). С. 57-65. DOI 10.30987/2782-5957-2024-4-57-65.
16. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения : учебник для вузов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. М. : ИКЦ Академкнига, 2005. 279 с.
17. Худойбердиев Т. У. Анализ методов определения пропускной способности перекрестков. Вестник науки. 2023. Т. 5, № 12-2(69). С. 163-167.
18. Витолин С. В. Значение длины очереди автомобилей перед светофорным объектом и современные подходы к ее оценке. Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 4(50). С. 53-59.
19. Зверев Р. С. Методы управления и организации дорожного движения. Техника и технология транспорта. 2020. № 4(19). С. 11
20. Фади́на О. С., Шепелев В. Д., Альметова З. В., Горяев Н. К. Повышение пропускной способности регулируемых перекрестков на основе си-

нергии компьютерного зрения и адаптивного регулирования скорости. Транспортное машиностроение. 2025. № 1(37). С. 28-39. DOI 10.30987/2782-5957-2025-1-28-39.

21. Лянгасова С. «Зеленая волна» на рекомендованной скорости. Автомобильные дороги. 2025. № 1(1118). С. 18-20.
22. Тарасов О. В. Корнилов С. Н. Нейросетевое моделирование режимов работы светофорных объектов с целью организации движения транспортных потоков по принципу "зеленой волны". Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т. 1, № 70. С. 12-14.
23. ГОСТ Р 56162-2019. Выбросы загрязняющих

веществ в атмосферу. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории. – М.: Стандартиформ, 2019.

24. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р (ред. от 30.09.2021) «О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте"» КонсультантПлюс [Electronic resource]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009.

REFERENCES

1. Sargsyan AT. Traffic situation in Yerevan and ways to modernize with the help of current problem of traffic congestion. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024;21(3(97)):422-434. DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-3-422-434.
2. Mezhenkov AV. Geometric criterion for assessing traffic safety at urban controlled intersections based on the characteristics of traffic flows interaction. Bulletin of the Automobile and Highway Institute. 2017;1(20):37-45.
3. Hsieh P-C, Liu X, Jiao J, Hou I-H, Zhang Y, Kumar PR. Throughput-optimal scheduling for multi-hop networked transportation systems with switch-over delay. Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2017;:6. DOI: 10.1145/3084041.3084065
4. Pistsov AV, Petrov AI. Analysis of starting delays at regulated intersections of the road network. Modern Problems of Science and Education. 2015;2-2:177.
5. Fadina OS, Shepelev VD, Varvorkin MA, Plyukhin LE. Increasing the throughput at regulated intersections by optimizing the speed modes of traffic flows. Bulletin of the South Ural State University. Economics and Management. 2023;17(3):175-182. DOI 10.14529/em230317
6. Royko YuYa. Study of time loss in main clock cycles at regulated intersections. Nauki Nitatki. 2016;55:332-337.
7. Morozov VV, Morozov GN, Shepelev VD. Modeling the formation of a vehicle queue at urban signal-controlled intersections. T-Comm. 2025;19(3):61-68. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-3-61-68.
8. Fadina OS, Glushkov AI, Varvorkin MA. Reducing traffic delays by optimizing the speed modes of traffic flows. Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, November 20-22, 2024: Progressive Technologies in Transport Systems; Orenburg: Orenburg State University; 2025.
9. Kashtalinsky AS. Reducing delays at regulated intersections, taking into account the temporary unevenness of traffic flows. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, May 26-27, 2016: Transport Planning and Modeling; Saint Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2016.
10. Highway Capacity Manual. Washington DC: TRB; 2000.
11. Webster FV, Cobbe BM. Traffic Signals. London: Road Research Technical Paper N56, HMSQ; 1966.
12. Antoniadis GD, Arkhipov VO, Tsuprikov AA. Mathematical model of vehicle delay at a controlled intersection. Information Technologies. 2019;25(4):210-215. DOI 10.17587/it.25.210-215
13. Saha A, Chandra S, Ghosh I. Delay at signalized intersections under mixed traffic conditions. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems. 2017;143(8).
14. Patel CR, Joshi GJ, Katti BK. Discharge and delay estimation for unsaturated signalised Urban intersection under mixed traffic condition. Proceedings of the 14th HKSTS International Conference: Transportation and Geography. 2009;2:697 – 703.
15. Fadyushin AA, Pistsov AV. Application of neural network technologies for control of traffic lights. Transport Engineering. 2024;4(28):57-65. DOI 10.30987/2782-5957-2024-4-57-65.
16. Kremenets YuA, Pechersky MP, Afanasyev MB. Technical means of traffic management: textbook for universities. Moscow: Akademkniga; 2005.
17. Khudoiberdiev TU. Analysis of methods for determining the capacity of intersections. Vestnik Nauki. 2023;5(12-2(69)):163-167.
18. Vitolin SV. The value of the car queue length in front of a traffic light object and modern approaches to its assessment. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2016;4(50):53-59.
19. Zverev RS. Methods of traffic management and organization. Technique and Technology of Transport. 2020;4(19):11
20. 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.
21. Lyangasova S. "Green wave" at the recommended speed. Avtomobilnie Dorogi. 2025;1(1118):18-20.
22. Tarasov OV, Kornilov SN. Neural network modeling of operating modes of traffic lights for the purpose of organizing traffic flows according to the "green wave" principle. Aktual'nye Problemy Sovremennoj Nauki, Tehniki i Obrazovaniâ [Actual Problems of Modern Science, Technology and Ed-

- ucation]. 2012;1(70):12-14.
23. GOST R 56162-2019. Emissions of polluting substances into the atmosphere. Method for calculating the amount of pollutant emissions generated by motor vehicle flows on roads of various categories. Moscow: Standartinform; 2019.
24. Ministry of Transport of the Russian Federation,

Order No. AM-23-p, On the implementation of the methodological recommendations "Consumption rates of fuels and lubricants in automotive transport" [Internet]. [place unknown]: Consultant-Plus; 2008 March 14. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009.

Информация об авторах:

Фадина Ольга Сергеевна – старший преподаватель Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала», 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 Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники

Fadina Olga Sergeevna – Senior Lecturer at the Advanced Engineering School of Engine Engineering and Special Equipment "Heart of the Urals", South Ural State University (National Research University), Scopus-Author ID 57742587000, ORCID ID: 0000-0001-7580-2452, Author-ID-RSCI 1194160

Shepelev Vladimir Dmitrievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Advanced Engineering School of Engine Engineering and Special

«Сердце Урала», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Scopus-Author ID 57170112500, ORCID ID:0000-0002-1143-2031, Author-ID-РИНЦ 650373.

Ахмадеев Евгений Дамирович – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильный сервис», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет).

Equipment "Heart of the Urals", South Ural State University (National Research University), Scopus-Author ID 57170112500, ORCID ID:0000-0002-1143-2031, Author-ID-RSCI 650373.

Akhmadeev Evgeny Damirovich – Postgraduate Student at the Department of Automobiles and Automotive Service, South Ural State University (National Research University).

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 21.11.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 27.11.2025. Рецензент – Морозов В.В., кандидат технических наук, доцент Тюменского индустриального университета.

The article was submitted to the editorial office on 21.11.2025; approved after review on 24.11.2025; accepted for publication on 27.11.2025. The reviewer is Morozov V.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Tyumen State Industrial University.