

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.051

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2025-3-94>

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ ПРИ НАЛИЧИИ ПОВОРОТНЫХ ПОТОКОВ

О. С. Гасилова

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия
e-mail: gasilovaos@m.usfeu.ru

М. В. Грязнов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия
e-mail: gm-autolab@mail.ru

О. А. Пыталева

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия
e-mail: pytalevaos@m.usfeu.ru

Аннотация. Настоящее исследование является итогом сотрудничества специалистов Уральского государственного лесотехнического университета и Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Сопоставив результаты собственных независимо проведенных исследований, авторы пришли к выводу, что обеспечение безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях в средних и в больших городах имеет общую научно-методическую основу. Существующие методики расчёта длительности циклов светофорного регулирования направлены на обеспечение максимальной пропускной способности по всем направлениям движения на пересечении. Специалисты также исходят из того, что главное в определении длительности цикла светофорного регулирования – это обеспечение безопасности дорожного движения. Однако в современной научной литературе мало работ, посвящённых моделированию движения транспортных средств с условием безаварийного прохождения пересечения.

Цель настоящего исследования состоит в разработке методического инструментария по обеспечению безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков путём совершенствования организации движения автомобилей. Основными результатами, имеющими научную новизну, являются:

- факторы, влияющие на обеспечение безопасности дорожного движения на пересечениях при наличии поворотных потоков;
- математическая модель движения транспортных средств на пересечении, определяющая дистанцию между автомобилями, обеспечивающую безопасность;
- методика обеспечения безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков, основанная на предложенной математической модели движения транспортных средств.

Статья написана по материалам автореферата диссертации Гасиловой О. С.¹, а также отчёта о НИР по проведению мониторинга дорожного движения на сети дорог в границах Магнитогорского городского округа². В процессе исследований авторами доработана методика визуализации результатов учёта интенсивности

¹ Гасилова О. С. Методика обеспечения безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2021. – 28 с.

² Отчёт о НИР на тему: «Мониторинг дорожного движения на сети дорог в границах Магнитогорского городского округа». – Магнитогорск, 2022, 65 с.



транспортного потока на городской дорожной сети, экспериментально подтверждено влияние замедления транспортного потока на длительность основных тактов преодоления автомобилями пересечения, структурирована математическая модель движения транспортных средств на пересечении, что обеспечивает возможность автоматизации расчётов.

Результаты исследования достигались анализом нормативно-технической и научной литературы, натурными наблюдениями за транспортными потоками по городской дорожной сети, статистической обработкой натурных данных, математическим моделированием движения транспортных средств.

Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении развития методологии обеспечения безопасности движения автомобильного транспорта по дорожной сети с регулируемыми пересечениями, а также развития интеллектуальных систем управления дорожным движением.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, регулируемое пересечение, организация дорожного движения, минимально безопасное расстояние, дорожно-транспортное происшествие.

Для цитирования: Гасилова О. С., Грязнов М. В., Пыталева О. А. Обеспечение безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2025. – № 3. – С. 94–106. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2025-3-94>.

Original article

ENSURING ROAD SAFETY AT REGULATED INTERSECTIONS IN THE PRESENCE OF TURNING FLOWS

O. S. Gasilova

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia
e-mail: gasilovaos@m.usfeu.ru

M. V. Gryaznov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
e-mail: gm-autolab@mail.ru

O. A. Pytaleva

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia
e-mail: pytalevaooa@m.usfeu.ru

Abstract. This study is the result of collaboration between specialists of the Ural State Forest Engineering University and the Nosov Magnitogorsk State Technical University. Having compared the results of their own independently conducted studies, the authors came to the conclusion that ensuring road safety at controlled intersections in medium and large cities has a common scientific and methodological basis. Existing methods for calculating the duration of traffic light control cycles are aimed at ensuring maximum throughput in all directions of traffic at the intersection. Experts also assume that the main thing in determining the duration of the traffic light control cycle is to ensure road safety. However, in modern scientific literature there are few works devoted to modeling the movement of vehicles with the condition of accident-free passage through the intersection.

The purpose of this study is to develop a methodological toolkit for ensuring road safety at regulated intersections in the presence of turning flows by improving the organization of vehicle traffic. The main results that have scientific novelty are:

- factors influencing the provision of road safety at intersections in the presence of turning flows;
- a mathematical model of vehicle traffic at the intersection, determining the distance between cars, ensuring safety;
- a methodology for ensuring road safety at regulated intersections in the presence of turning flows, taking into account the obtained mathematical model of vehicle traffic.

The article is written based on the materials of the dissertation abstract by Gasilova O.S.³, as well as the report

³ Gasilova O. S. Methodology for ensuring road safety at controlled intersections in the presence of turning flows: author's abstract. diss. candidate of technical sciences. – St. Petersburg, 2021. – 28 p.

on research work on monitoring road traffic on the road network within the boundaries of the Magnitogorsk urban district⁴. In the course of the research, the authors improved the methodology for visualizing the results of recording the intensity of traffic flow on the city road network, experimentally confirmed the effect of traffic flow deceleration on the duration of the main cycles of cars overcoming the intersection, structured the mathematical model of vehicle movement at the intersection, which provides the possibility of automating calculations.

Further research is expected to be conducted in the direction of developing a methodology for ensuring the safety of motor vehicle traffic on a road network with controlled intersections, as well as the development of intelligent traffic management systems.

Key words: road safety, controlled intersection, traffic management, minimum safe distance, traffic accident.

Cite as: Gasilova, O. S., Gryaznov, M. V., Pytaleva, O. A. (2025) [Ensuring road safety at regulated intersections in the presence of turning flows]. *Intellect. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 3, pp. 94–106. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2025-3-94>.

Введение

Рост автомобилизации актуализирует проблему эффективности функционирования дорожной сети при условии обеспечения безопасности дорожного движения. Вне населённых пунктов проблема во многом решается увеличением пропускной способности автодороги за счёт добавления числа полос для движения и минимизации конфликтных точек. Пользуется популярностью управление доступом на автомобильную дорогу путём ограничения возможностей въезда и съезда в зависимости от её класса. Сложившиеся архитектурно-планировочные решения делают практически невозможными перечисленные меры в населённых пунктах, поэтому одноуровневые пересечения на пути транспортного потока остаются основной причиной ограничения пропускной способности участков дорожной сети.

Аварии на пересечениях занимают третье место в общей массе дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на автомобильных дорогах. Сложившаяся практика расчёта длительности циклов светофорного регулирования направлена на обеспечение максимальной пропускной способности по всем направлениям движения на пересечении. В крупных городах наблюдается большой разброс превышения рекомендованной длительности циклов светофорной сигнализации, составляющей 150, 180, 200 и более секунд. При этом аварийность на пересечениях по-прежнему остается высокой, особенно на пересечениях с поворотными потоками.

Увеличение числа транспортных средств на дорожной сети в последние годы привело к необходимости научно обоснованной корректировки расчёта режимов работы светофорной сигнализации. Вопросы повышения эффективности функционирования дорожной сети и обеспечения безопасности дорожного движения на автомобильном транспорте рассматриваются в научных трудах Г. И. Клиновштейна, М. Б. Афанасьева, В. И. Коноплянко, Е. М. Лобанова, Ю. А. Кременца, М. П. Печерского, В. В. Сильянова, П. А. Кравченко, С. А. Евтюкова, В. В. Зырянова, С. В. Жанказиева, А. М. Плотнокова, А. Ю. Михайлова, И. Н. Пугачева, А. Э. Горева, А. И. Солодкого, А. В. Белова, Д. В. Лихачева и других учёных. Примерами являются работы [9; 11; 12; 13; 14; 16]. Следует также выделить зарубежные труды Д. Вардропа, Ф. Вебстера, Д. Дрю, Т. М. Мэтсона, У. С. Смита, Ф. В. Харта и др., например, работы [5; 10; 15].

Исследователями берётся во внимание интенсивность движения транспортных и пешеходных потоков, их состав. Движение разноклассовых автотранспортных средств сводится к потоку условных легковых автомобилей посредством коэффициентов приведения. Величина коэффициентов приведения регламентирована ГОСТ 32965-2014 «Дороги автомобильные общего пользования». В таблице 1 показан пример результатов приведения транспортного потока к потоку условных легковых автомобилей на пересечении ул. Зелёная – ул. Притяжения (г. Магнитогорск). К общей информации относятся: номер поста учета – 51; смежные улицы (проспекты) – ул. Зелёная, ул. Притяжения; в направлении от Западного шоссе; по направлению к ул. Притяжения; тип перекрестка – регулируемый; период суток – утро; номер поперечного профиля – 3; время начала замера, ч:мин. – 6:00; время окончания замера, ч:мин. – 6:10.

Значения коэффициентов в разных источниках не совпадают. Рядом нормативных документов рекомендовано использование коэффициентов приведения в диапазоне. Также в расчётах следует учитывать, что реальная пропускная способность на пересечениях не соответствует расчётной величине. Особенно это наблюдается при неблагоприятных погодных условиях, например, в дождь или в весеннюю распутицу, когда влага попадает на поверхности трения тормозных ме-

⁴ Research report on the topic: «Monitoring of road traffic on the road network within the boundaries of the Magnitogorsk urban district». – Magnitogorsk, 2022. – 65 p.

ханизмов. Помимо этого, большинством современных методик не предусмотрен инструментарий обеспечения безопасности дорожного движения на пересечении [6; 7; 8].

Анализ выполненных работ показывает отсутствие современных моделей движения транспортных средств, обеспечивающих безаварийное прохождение пересечений, а также необходимость корректировки

существующих методик расчёта длительности светофорного цикла и организации дорожного движения на пересечениях [2]. Поэтому цель настоящего исследования состоит в разработке методического инструментария по обеспечению безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков путём совершенствования организации движения автомобилей.

Таблица 1. Результаты расчета транспортного потока на пересечении ул. Зелёная – ул. Притяжения (г. Магнитогорск)

Транспортные средства	Результаты замеров и расчёта				
	Направление движения транспортных средств			Итого	
	налево	прямо	направо	в физических единицах	в приведённых единицах
Легковые автомобили, небольшие грузовики (фургоны) и другие автомобили с прицепом и без него	912	180	0	1092	1092
Двухосные грузовые автомобили, автобусы особо малого класса	30	0	0	30	45
Трёхосные грузовые автомобили, автобусы малого класса	0	0	0	0	0
Четырёхосные грузовые автомобили	0	0	0	0	0
Четырёхосные автопоезда (двухосный грузовой автомобиль с прицепом), автобусы среднего класса	6	0	0	6	13
Пятиосные автопоезда (трёхосный грузовой автомобиль с прицепом)	0	0	0	0	0
Трёхосные седельные автопоезда (двухосный седельный тягач с прицепом)	0	0	0	0	0
Четырёхосные седельные автопоезда (двухосный седельный тягач с полуприцепом)	0	0	0	0	0
Пятиосные седельные автопоезда (двухосный седельный тягач с полуприцепом)	0	0	0	0	0
Пятиосные седельные автопоезда (трёхосный седельный тягач с полуприцепом)	0	0	0	0	0
Шестиосные седельные автопоезда, автобусы особо большого класса	0	0	0	0	0
Автомобили с семью и более осями и другие	0	0	0	0	0
Автобусы большого класса	0	0	0	0	0
Итого в физических единицах:	948	180	0	1128	
Итого в приведённых единицах:	970	180	0		1150

Источник: разработано Грязновым М. В.

Факторы, влияющие на обеспечение безопасности дорожного движения на пересечениях при наличии поворотных потоков

Главным в расчёте длительности светофорного цикла является определение потока насыщения. Некоторые авторы выделяют часть транспортного пото-

ка с постоянными характеристиками, принимая его за идеальный поток. Определяемая на основе идеального потока насыщения длительность светофорного цикла предполагает обеспечение расчётной пропускной способности пересечения. В реальных условиях при движении транспортных средств существует ряд

дополнительных факторов, определяющих безопасность дорожного движения и пропускную способность пересечения, приведенных в таблице 2.

Таблица 2. Дополнительные факторы, определяющие безопасность дорожного движения и пропускную способность пересечения

№ пп	Фактор	Распределение ДТП, %
1	Резкое замедление впереди движущегося автомобиля перед поворотом	21
2	Резкое замедление впереди движущегося автомобиля непосредственно за поворотом	29
3	Резкое замедление впереди движущегося автомобиля из-за внезапно возникшего препятствия в виде пешехода	43
4	Резкое замедление впереди движущегося автомобиля из-за неровности проезжей части	7

Источник: разработано Гасиловой О. С.

Существующими методиками при определении потока насыщения не учитывается влияние этих факторов, несмотря на их значимость, особенно при наличии поворотных потоков на пересечениях. Вместе с тем, указанные факторы влияют на длительность основных тактов преодоления транспортным средством пересечения, приводя к резким изменениям ско-

ростного режима, создают аварийные ситуации и не обеспечивают выхода на расчётную пропускную способность участка автодороги [1; 3]. Это подтверждается величиной средней задержки автомобилей на 42-х регулируемых пересечениях дорожной сети г. Магнитогорска, представленной на рисунке 1.

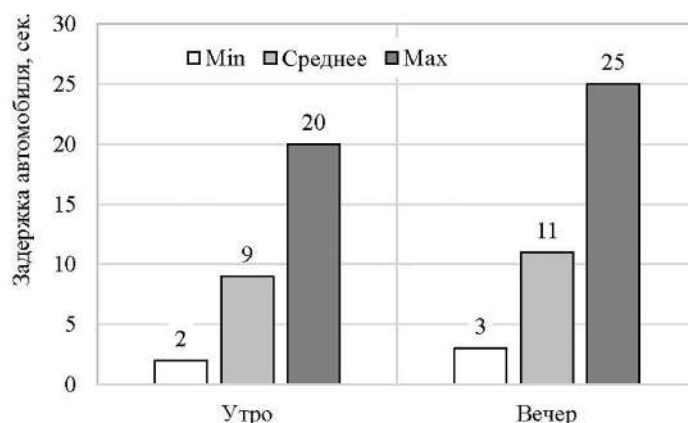


Рисунок 1. Величина средней задержки автомобилей на регулируемых пересечениях дорожной сети г. Магнитогорска

Источник: разработано Пыталевой О. А.

На основе натурных исследований установлено, что указанные в таблице 1 факторы за время горения разрешающего сигнала в течение одного светофорного цикла проявляются до пяти раз. Поэтому идеальный поток насыщения при определении длительности светофорного цикла не обеспечивает предполагаемую расчётную пропускную способность пересечения. Необходимо уточнить расчёт длительности светофорного цикла на пересечениях при наличии поворотных потоков в части разработки математической модели

движения транспортных средств на пересечении, определяющей минимально безопасное расстояние между движущимися автомобилями [4].

Математическая модель движения транспортных средств на пересечении

В научной литературе при изучении движения автомобиля *A* при экстренном торможении в основном рассматриваются две модели движения. В рамках этих моделей необходимо определить остановочный

путь транспортных средств. Изучением закономерностей изменения величин остановочного пути занимались такие авторы, как Евтюков С. А., Васильев Я. В., Иларионов В. А., Суворов Ю. Б., Боровский Б. Е. и др. В предлагаемой математической модели рассматрива-

ется движение автомобиля при экстренном торможении на основе второй модели, то есть, когда закон изменения ускорения $a(t)$ при экстренном торможении при выполнении неравенства $V^0 \leq \frac{j}{2}(T - t_3)$ задается равенством:

$$a(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_3; \\ -\alpha(t - t_3), & t_3 < t \leq t_{ост}^{(1)}, \end{cases} \quad (1)$$

или когда ускорение при выполнении неравенства $V^0 > \frac{j}{2}(T - t_3)$ задается равенством:

$$a(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_3; \\ -\alpha(t - t_3), & t_3 < t \leq T; \\ -j, & T < t \leq t_{ост}^{(2)}, \end{cases} \quad (2)$$

где

V^0 – скорость автомобиля A в начальный момент времени ($t_0 = 0$), м/с;

j – установившееся замедление автомобиля A в данных дорожных условиях, м/с²;

T – время остановки автомобиля A , с;

t_3 – время запаздывания автомобиля A , с;

$\alpha(t)$ – ускорение автомобиля A в момент времени t , м/с²;

$t_{ост}^{(1)}$ – время остановки автомобиля A при выполнении соответствующих неравенств, с.

Время остановки автомобиля определяется по формуле

$$T = t_p + t_{zn} + t_{нз}, \quad (3)$$

где

t_p – время реакции водителя автомобиля A , с;

t_{zn} – время запаздывания срабатывания тормозного привода автомобиля A , с;

$t_{нз}$ – время нарастания замедления автомобиля A , с.

Время запаздывания автомобиля A определяется по формуле

$$t_3 = t_p + t_{zn}. \quad (4)$$

Будем рассматривать движение двух автомобилей A_1 и A_2 , которые движутся в попутном направлении, в случае, когда автомобиль, A_1 , движущийся перед автомобилем A_2 и находящийся от него на расстоянии S^0 , применил экстренное торможение. Функции отклоне-

ния скоростей попутно движущихся по горизонтальному участку автомобилей $\Delta V(t)$ при условии

$0 < t_{1zn} < t_{ост}^{(1)} \leq t_{23} < t_{2ост}^{(1)}$ имеет аналитический вид:

$$\Delta V = \begin{cases} V_1^0 - V_2^0, & 0 \leq t \leq t_{13}; \\ \left(V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 \right) + \alpha_1 t_{13} t - \frac{\alpha_1}{2} t^2, & t_{13} < t \leq t_{1ocm}^{(1)}; \\ -V_2^0, & t_{1ocm}^{(1)} < t \leq t_{23}; \\ -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23} t + \frac{\alpha_2}{2} t^2, & t_{23} < t \leq t_{2ocm}^{(1)}, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\alpha = \frac{J}{T - t_3};$$

t_{13} – время запаздывания срабатывания тормозного привода автомобиля A_1 , с;

$t_{1ocm}^{(1)}, t_{2ocm}^{(1)}$ – соответственно время остановки автомобилей A_1 и A_2 , с;

t_{13}, t_{23} – соответственно время запаздывания автомобилей A_1 и A_2 , с;

V_1^0, V_2^0 – соответственно скорость автомобилей A_1 и A_2 в начальный момент времени $t_0 = 0$, м/с;

$$\alpha_1 = \frac{j_1}{T_1 - t_{13}};$$

$$\alpha_2 = \frac{j_2}{T_2 - t_{23}}.$$

Минимально безопасное расстояние между автомобилями $s(t)$ в период времени $\left[0, t_{2ocm}^{(1)} \right]$ запишется в виде:

$$s(t) = \Delta S(t) - S^0 = \begin{cases} (V_1^0 - V_2^0)t, & 0 \leq t \leq t_{13}; \\ \frac{\alpha_1}{6} t_{13}^3 + \left[(V_1^0 - V_2^0) - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 \right] t + \frac{\alpha_1 t_{13}}{2} t^2 - \frac{\alpha_1}{6} t^3, & t_{13} < t \leq t_{1ocm}^{(1)}; \\ t_{13} V_1^0 + \frac{2}{3} V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - V_2^0 t, & t_{1ocm}^{(1)} < t \leq t_{23}; \\ t_{13} V_1^0 + \frac{2}{3} V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - \frac{\alpha_2}{6} t_{23}^3 - \left[V_2^0 - \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 \right] t - \frac{\alpha_2 t_{23}}{2} t^2 + \frac{\alpha_2}{6} t^3, & t_{23} < t \leq t_{2ocm}^{(1)}. \end{cases} \quad (6)$$

где

$\Delta S(t) = S_1(t) - S_2(t) \geq 0$, $S_1(t)$, $S_2(t)$ – соответственно путь, пройденный автомобилем A_1 и A_2 к моменту времени t , м;

S^0 – расстояние между автомобилями в момент времени $t_0 = 0$, м.

Исследуя функцию $s(t) = \Delta S(t) - S^0$ на каждом промежутке, а также учитывая, что $\Delta V(t) = \frac{ds(t)}{dt}$, наименьшее отрицательное значение функции $s(t)$, которое в данном случае равно:

$$s(t_{2ocm}^{(1)}) = - \left(V_2^0 t_{23} - V_1^0 t_{13} \right) - \frac{2}{3} \left[V_2^0 \sqrt{\frac{2V_2^0}{\alpha_2}} - V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right]. \quad (7)$$

Графический вид искомых функций приведён на рисунке 2.

Тогда минимально безопасное расстояние будет равно:

$$S_{\min}^0 = \left(V_2^0 t_{23} - V_1^0 t_{13} \right) + \frac{2}{3} \left[V_2^0 \sqrt{\frac{2V_2^0}{\alpha_2}} - V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right]. \quad (8)$$

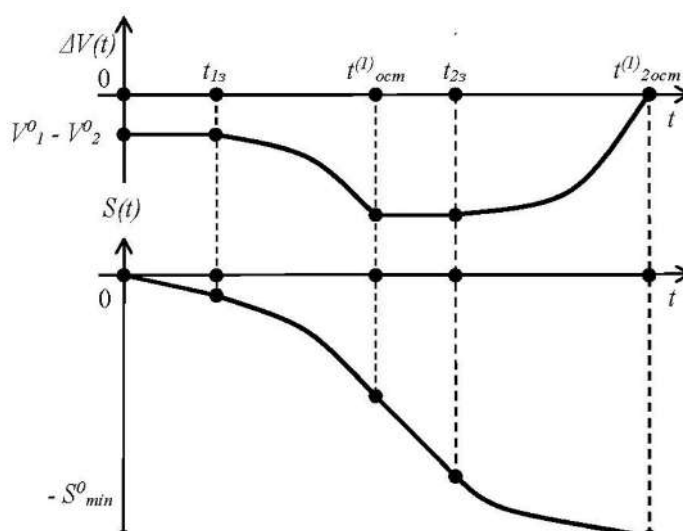


Рисунок 2. Графический вид функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$
 Источник: разработано Гасиловой О. С.

Методика обеспечения безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях

Методика обеспечения безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков на первом этапе предусматривает выполнение расчётов длительности светового цикла, изложенных в работе Кременца Ю. А., Печерского М. П., Афанасьева М. Б. Последовательность расчёта длительности светового цикла приведена на рисунке 3. На втором этапе определяются

величины скоростей движения транспортных средств и минимально безопасные расстояния между ними, аналитически установленными в настоящей работе. Вследствие действия дополнительных факторов, приведённых в таблице 2, автомобили проследуют пересечение с некоторым замедлением. При этом с указанным замедлением, как правило, движутся «пачки», состоящие от двух до четырех автомобилей. В результате фактическое число автомобилей, проследовавших пересечение с поворотными потоками, меньше расчётного их числа.



Рисунок 3. Последовательность расчёта длительности светового цикла и его элементов
 Источник: разработано Гасиловой О. С.

Значения величины минимально безопасного расстояния, определённые по предлагаемой математической модели, показывают, что в поворотных потоках безопасную дистанцию поддерживают всего 35–45% водителей. Это является одной из причин высокой аварийности на пересечениях с поворотными потоками. Действие дополнительных факторов на пересечениях с поворотными потоками проявляются не только при движении автомобилей в «пачках», но и в случае прямолинейно движущихся автомобилей, следующих за «пачкой».

Экспериментальные данные показали, что в большинстве случаев диапазон изменения скорости автомобилей A_1 и A_2 варьируется в пределах от 5,4 до 23,4 км/ч и от 6,5 до 27 км/ч соответственно на пересечениях с поворотными потоками. Для удобства использова-

ния на практике эти диапазоны изменения скорости автомобилей были разбиты на десять интервалов. В каждом интервале для минимальных и максимальных значений величин скорости определены минимально безопасные расстояния по математической модели.

На третьем этапе в зависимости от соотношения минимально безопасных расстояний и значений дистанции, поддерживаемой водителями между автомобилями в «пачках» при поворотном движении на пересечениях, полученных при натурных исследованиях, определяются значения поправочных коэффициентов k_n для корректировки длительности основного такта, указанных в таблице 3. Эти коэффициенты позволяют учесть влияние дополнительных факторов на пересечении с поворотными потоками на определение длительности основного такта.

Таблица 3. Величина поправочного коэффициента k_n с учётом минимально безопасного расстояния

№ пп	Величина скорости автомобиля A_1 , км/ч	Величина скорости автомобиля A_2 , км/ч	Минимально безопасное расстояние по математической модели $S_{\min}^0$, м	Значение поправочного коэффициента k_n , %
1	5,4–16,2	6,5–18,0	2,6–7,6	7
2	7,2–14,4	9,0–16,2	3,9–6,8	8–10
3	9,0–10,8	10,8–12,6	4,6–5,3	9
4	10,8–18,0	12,6–21,6	5,3–10,2	9–13
5	12,6–14,4	13,7–16,2	5,4–6,8	6–8
6	14,4–16,2	16,2–19,8	6,8–9,4	8–13
7	16,2–18,0	18,0–21,6	7,6–10,2	8–13
8	18,0–19,8	19,8–23,4	8,3–11,0	7–12
9	19,8–21,6	23,4–27,0	11,0–13,9	12–15
10	21,6–23,4	25,2–27,0	11,8–12,6	11

Источник: разработано Гасиловой О. С.

В зависимости от длительности основного такта при движении автомобилей на пересечении с одной и той же полосы, его время должно быть увеличено в среднем на 6–15%, что учитывается введением поправочного коэффициента в существующую методику определения длительности светофорного цикла. После корректировки длительности основного такта в рассматриваемых направлениях движения необходимо скорректировать длительность цикла.

Последовательность расчёта длительности цикла и его элементов по предлагаемой методике приведена на рисунке 4.

Натурные наблюдения показали, что для каждого пересечения характерны свои условия движения и соответствующие им минимально безопасные расстояния. С использованием поправочных коэффициентов на каждый диапазон значений скоростей движущихся автомобилей были определены соответствующие им минимально безопасные расстояния. Движение транспортных средств на пересечении с дистанцией, соответствующей минимально безопасному расстоянию, может быть обеспечено посредством установки дорожного знака 3.16 «Ограничение минимальной дистанции».



Рисунок 4. Предлагаемая последовательность расчёта длительности цикла и его элементов
 Источник: разработано Гасиловой О. С.

Заключение

На основе проведённых исследований получены следующие выводы:

1. Результаты анализа влияния конфигурации пересечений и транспортных потоков на безопасность дорожного движения показали, что более половины всех ДТП происходит на четырёхсторонних пересечениях, около 40% – на трёхсторонних пересечениях. Менее всего располагают к ДТП многосторонние пересечения. Существенно снижает безопасность движение транспортных потоков с одной полосы в разных направлениях.

2. Дополнительно на безопасность дорожного движения на пересечениях при наличии поворотных потоков, оказывает влияние резкое замедление впереди движущегося автомобиля перед поворотом, непосредственно за поворотом, перед внезапно возникшим препятствием (пешеход), из-за неровности

проезжей части. Учёт этих дополнительных факторов позволит повысить достоверность определения потока насыщения и длительности основных тактов преодоления автомобилями пересечения.

3. Разработана математическая модель движения транспортных средств на пересечении, определяющая дистанцию между автомобилями, обеспечивающую безопасность дорожного движения, основанная на определении остановочного пути транспортных средств и минимально безопасного расстояния между автомобилями. Структура математической модели обеспечивает возможность автоматизации расчётов.

4. Предложена методика обеспечения безопасности дорожного движения на регулируемых пересечениях при наличии поворотных потоков, основанной на предложенной математической модели движения транспортных средств. Введён поправочный коэффициент для корректировки длительности основного

такта и цикла в зависимости от условий движения на пересечениях и соответствующих им минимально безопасным расстояниям.

Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении развития методологии обеспечения

безопасности движения автомобильного транспорта по дорожной сети с регулируемым пересечениями, а также развития интеллектуальных систем управления дорожным движением.

Литература

1. Андронов Р. В., Елькин Б. П., Гензе Д. А. Понятие затора и формирование очередей на регулируемом пересечении в условиях плотного транспортного потока // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 39–41.
2. Виталин С. В. Влияние изменений интенсивности дорожного движения на качество функционирования проблемных регулируемых перекрестков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 159–166.
3. Гасилова О. С., Бородулин И. В., Старков В. В. Анализ интенсивности движения транспортных средств в местах разделения транспортных потоков // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 2 (76). – С. 250–254. – <https://doi.org/10.34771/UZCEPU.2022.2.76.050>. – EDN: KRGJGD.
4. Гасилова О. С. Нахождение минимально безопасного расстояния между прямолинейно движущимися транспортными средствами на регулируемых пересечениях // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 4. – С. 49–63. – <https://doi.org/10.15593/24111678/2017.04.04>. – EDN: YLBFT.
5. Дрю Д. Р. Теория транспортных потоков и управление ими / Пер. с англ. Е. Г. Коваленко и Г. Д. Шермана; Под ред. чл.-кор. АН СССР Н. П. Бусленко. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
6. Наумова Н. А., Домбровский А. Н., Данович Л. М. Метод управления светофорной сигнализацией в условиях функционирования интеллектуальных транспортных систем // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9–1. – С. 64–68. – EDN: ZHVMAJ.
7. Пугачев И. Н., Шешера Н. Г., Каменчуков А. В. Совершенствование методов оценки качества и безопасности дорожного движения: монография. – Хабаровск : Изд-во «Тихоокеанский государственный университет», 2018. – 160 с.
8. Chang T. H., Lin J.-T. (2000) Optimal signal timing for an oversaturated intersection, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 34, No. 6, pp. 471–491. – [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00034-X). (In Eng.).
9. Gorev A., Gasilova O., Sidorov B. (2021) Prerequisite for accident-free traffic at signal-controlled intersections. *Architecture and Engineering*. Vol. 6. № 1. pp. 73–80. – <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2021-6-1-73-80>.
10. Highway capacity manual 2010 // Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA. 2010. pp. 17–25. (In Eng.).
11. Karmanov D., Zakharov D., Fadyushin A. (2018) Evaluation of changes in traffic parameters for various types of traffic signal regulation. *Transportation research pro-cedia*. pp. 274–280. – <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.082>.
12. Morozov V., Iarkov S. (2018) The application of lane occupancy parameter for solving tasks of traffic management. *Transportation research procedia*. pp. 520–526. – <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.141>.
13. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. (2019) Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city. *Journal of Applied Engineering Science*. Vol. 17. № 2, pp. 175–181. – <https://doi.org/10.5937/jaes17-18117>.
14. Pistov A., Zakharov D. (2021) Analysis of methods of providing public transport priority in cities. *WIT Transactions on the Built Environment*. 27. Сер. «Urban and Maritime Transport XXVII». pp. 291–298. – <https://doi.org/10.2495/UT210241>.
15. Webster F. V., Wardrop J. P. (1962) Capacity of Urban intersection. *Traffic Eng-ging and Control*, Vol. 4. № 4, pp. 17–21. (In Eng.).
16. Zakharov D. A., et al. (2018) Simulation modeling of traffic for various types of traffic lights regulation in conditions of intensive traffic of vehicles. *Journal of mechanical engineering research and devel-opments*. Vol. 4. № 4. pp. 58–61. – <https://doi.org/10.26480/jmerd.04.2018.58.61>.

References

1. Andronov, R. V., El'kin, B. P., Genze, D. A. (2015) [The concept of congestion and queuing at a controlled intersection under dense traffic flow conditions]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. Vol. 1, pp. 39–41. (In Russ.).

2. Vitolin, S. V. (2018) [Influence of changes in traffic intensity on the quality of functioning of problematic regulated crossings]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. Vol. 3 (23), pp. 159–166. (In Russ.).
3. Gasilova, O. S., Borodulin, I. V., Starkov, V. V. (2022) [Analysis of the intensity of vehicle traffic in places where traffic flows are separated]. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* [Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University]. Vol. 2 (76), pp. 250–254. (In Russ.).
4. Gasilova, O. S. (2017) [Finding the minimum safe distance between straight ahead vehicles at controlled intersections]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology]. Vol. 4, pp. 49–63. – <https://doi.org/10.15593/24111678/2017.04.04>. (In Russ.).
5. Drew, D. R. (1968) *Teoriya transportnykh potokov i upravleniye imi* [Traffic flow theory and control]. New York: MacGraw-Hill Book Company, 467 p. (In Russ., transl. from Eng.).
6. Naumova, N. A., Dombrovsky, A. N., Danovich, L. M. (2017) [A method of control of traffic light signaling in the conditions of functioning of intelligent transport systems]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research]. Vol. 9–1, pp. 64–68. (In Russ.).
7. Pugachev, I. N., Sheshera, N. G., Kamenchukov, A. V. (2018) *Sovershenstvovanie metodov ocenki kachestva i bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [Improvement of methods for assessing the quality and safety of road traffic], Pacific State University, Khabarovsk, Russia, 160 p.
8. Chang, T. H., Lin, J.-T. (2000) Optimal time for the alarm to an oversaturated intersection, transportation Research, Part b: *Methodological*, Vol. 34, No. 6, pp. 471–491. – [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00034-X). (In Eng.).
9. Gorev, A., Gasilova, O., Sidorov, B. (2021) Prerequisite for accident-free traffic at signal-controlled intersections. *Architecture and Engineering*. Vol. 6. No 1. pp. 73–80. – <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2021-6-1-73-80>. (In Eng.).
10. Highway capacity manual 2010 (2010) Transportation Research Board, National Research Council. *Washington, D.C., USA*, pp. 17–25. (In Eng.).
11. Karmanov, D., Zakharov, D., Fadyushin, A. (2018) Evaluation of changes in traffic parameters for various types of traffic signal regulation. *Transportation research procedia*, pp. 274–280. – <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.082>. (In Eng.).
12. Morozov, V., Iarkov, S. (2018) The application of lane occupancy parameter for solving tasks of traffic management. *Transportation research procedia*, pp. 520–526. – <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.141>. (In Eng.).
13. Novikov, A., Novikov, I., Shevtsova, A. (2019) Simulation of traffic light signaling depending on the quality of traffic flow in the city. *Journal of Applied Engineering Sciences*. Vol. 17. No. 2, pp. 175–181. – <https://doi.org/10.5937/jaes17-18117>. (In Eng.).
14. Pistsov, A., Zakharov, D. (2021) Analysis of methods of providing public transport priority in cities. *WIT Transactions on the Built Environment*. 27. Ser. «Urban and Maritime Transport XXVII». pp. 291–298. – <https://doi.org/10.2495/UT210241>. (In Eng.).
15. Webster, F. V., Wardrop, J. P. (1962) Capacity of Urban intersection. *Traffic Egging and Control*, Vol. 4, No. 7, pp. 17–21. (In Eng.).
16. Zakharov, D. A., et al. (2018) Simulation modeling of traffic for various types of traffic lights regulation in conditions of intensive traffic of vehicles. *Journal of mechanical engineering research and developments*. Vol. 4. No. 4. pp. 58–61. – <https://doi.org/10.26480/jmerd.04.2018.58.61>. (In Eng.).

Информация об авторах:

Ольга Сергеевна Гасилова, кандидат технических наук, доцент, и.о. директора Высшей школы транспортно-технологических систем, Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

ORCID iD: 0000-0002-6767-2544, **Scopus Author ID:** 57223044589

e-mail: gasilovaos@m.usfeu.ru

Михаил Владимирович Грязнов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

ORCID iD: 0000-0003-3142-1089

e-mail: gm-autolab@mail.ru

Ольга Анатольевна Пыталева, кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспортно-технологических систем, Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

ORCID iD: 0009-0007-5221-988X

e-mail: pytalevaao@m.usfeu.ru

Вклад соавторов:

Гасилова О. С. – проведение натурных замеров, формирование массива исходной информации, установление искомым эмпирических и расчётных зависимостей, разработка математической модели, написание статьи.

Грязнов М. В. – координация работ при проведении анализа литературных источников, обоснование концепции исследования; планирование теоретической части исследования; обобщение результатов исследования, формулировка выводов, интерпретация результатов моделирования, редактирование и переработка рукописи.

Пыталева О. А. – анализ научной и нормативно-правовой литературы по изучаемому вопросу, организация и проведение оценки значимости факторов, обоснование их измерителей.

Статья поступила в редакцию: 11.03.2025; принята в печать: 22.05.2025.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Olga Sergeevna Gasilova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Director of Higher School of Transport and Technological Systems, Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

ORCID iD: 0000-0002-6767-2544, **Scopus Author ID:** 57223044589

e-mail: gasilovaos@m.usfeu.ru

Mikhail Vladimirovich Gryaznov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Logistics and Management of Transport Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

ORCID iD: 0000-0003-3142-1089

e-mail: gm-autolab@mail.ru

Olga Anatolyevna Pytaleva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Transport and Technological Systems, Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

ORCID iD: 0009-0007-5221-988X

e-mail: pytalevaao@m.usfeu.ru

Contribution of the authors:

Gasilova O. S. – conducting field measurements, forming an array of initial information, establishing the desired empirical and computational dependencies, developing mathematical models to determine the minimum safe distance, writing an article.

Gryaznov M. V. – coordination of work during the analysis of literary sources, substantiation of the research concept; planning of the theoretical part of the study; generalization of research results, formulation of conclusions, interpretation of modeling results, editing and revision of the manuscript.

Pytaleva O. A. – analysis of scientific and regulatory literature on the issue under study, organization and conduct of an expert assessment of the significance of factors, justification of their measurements.

The paper was submitted: 11.03.2025.

Accepted for publication: 22.05.2025.

The authors have read and approved the final manuscript.