

**А. В. Меженков**

**Автомобильно-дорожный институт**

**ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

## **НЕГАТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕТОФОРНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НА ПЕРЕКРЕСТКАХ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДА**

*Рассмотрен вопрос повышения безопасности движения транспортных потоков на регулируемых перекрестках транспортной системы города, заключающийся в непропорциональном снижении количества дорожно-транспортных происшествий по сравнению со снижением числа конфликтных точек, которое возникает из-за малого снижения аварийности при организации светофорного регулирования на перекрестках. Повышение безопасности движения на регулируемых перекрестках предполагается обеспечить путем выявления негативных последствий светофорного регулирования и их учета при проектировании светофорных объектов на перекрестках транспортной системы города.*

***Ключевые слова:** светофорное регулирование, безопасность движения, поток транспортный, регулируемый перекресток, происшествие дорожно-транспортное*

### ***Постановка проблемы***

Одной из острейших социальных проблем в мире является проблема высокого уровня аварийности на автомобильных дорогах: постоянно растущее число погибших и пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП); значительный материальный ущерб от повреждений транспортных средств, порчи и утраты грузов, повреждений дорожных сооружений. Проблема обеспечения безопасности дорожного движения становится глобальным вызовом для всего человечества. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) ежегодно на дорогах всего мира погибает более 1,2 млн чел. Это равнозначно ежедневным катастрофам восьми авиалайнеров типа Ил-96 (или Boeing-747), вмещающих по 350 пассажиров [1].

Очень высокой остается аварийность на дорогах в России и на Украине. Так, на дорогах Украины в 2020 году произошло 168 тыс. ДТП, что на 4,6 % больше, чем в предыдущем году [2]. В России за 2020 год зарегистрировано 145 073 ДТП, в которых погибли свыше 16 тыс. человек, еще 183 тыс. получили ранения [3].

### ***Анализ последних исследований и публикаций***

Проблему критериальности управления, решение которой позволит определить пути совершенствования технологии управления на перекрестке, в том числе и в направлении безопасности дорожного движения, решали известные ученые: Ф. Вебстер, Г. И. Клинковштейн, Ю. А. Кременец, Е. М. Лобанов, В. П. Полищук и др. В настоящее время при организации светофорного регулирования и определении его режимов работы используются данные об интенсивности транспортных потоков и значениях потоков насыщения полос движения на подходах к площади перекрестка. Эти параметры не учитывают изменение состояния безопасности движения через регулируемый перекресток.

***Целью исследования*** является выявление негативных последствий работы светофорного объекта и их учет при проектировании светофорного регулирования на перекрестках транспортной системы города.

### ***Изложение основного материала исследования***

Высокая аварийность свидетельствует о существенном отставании развития улично-дорожной сети (УДС) и организации дорожного движения на ней от быстрорастущего уров-

ня автомобилизации. Чем более развита УДС городов, тем меньше расстояние от пункта отправления до пункта назначения. При этом следует отметить, что чем больше улиц, тем больше и мест их пересечения – перекрестков. И хотя перекрестки занимают незначительную площадь УДС, они являются основными местами совершения ДТП. В связи с этим именно на перекрестках в первую очередь проводятся мероприятия по снижению аварийности, что в целом обуславливает актуальность решения научных задач, связанных с усовершенствованием безопасности движения транспортных средств в области перекрестков дорог.

Одним из самых распространенных мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на перекрестках является организация светофорного регулирования. Его введение позволяет уменьшить количество конфликтных точек на перекрестке разнесением их во времени в соответствующих фазах. Однако, как свидетельствует статистика ДТП, при снижении числа конфликтных точек в два раза количество ДТП снижается лишь на 30–40 %. Это связано с созданием дополнительных уплотнений транспортных потоков на регулируемых перекрестках, за счет которых повышается интенсивность взаимодействий транспортных потоков на площади перекрестка и, как следствие, снижается безопасность движения.

Указанное раскрывает необходимость решения научно-практической задачи повышения безопасности движения в транспортной системе города совершенствованием светофорного регулирования посредством уменьшения интенсивности взаимодействия транспортных потоков на регулируемых перекрестках.

Современные исследования безопасности дорожного движения на городских регулируемых перекрестках [4, 5] указывают на существенную необходимость совершенствования средств регулирования дорожным движением [6]. Системы регулирования и управления дорожным движением на перекрестках дорог в одном уровне используют информацию о приближающихся к перекрестку транспортных потоках, но большинство ДТП происходит в пределах площади самого перекрестка. Это свидетельствует об ограниченности сбора и применения указанными системами информации о движении транспортных средств в области площади перекрестка как места концентрации ДТП и, как следствие, работа этих систем имеет ограниченный эффект с точки зрения безопасности движения.

В настоящее время развитие светофорного регулирования направлено на создание интеллектуального светофорного регулирования [6], на связь алгоритмов регулирования с параметрами транспортного потока [7], на оптимизацию регулирования путем моделирования транспортных потоков [8, 9]. Указанные направления, несомненно, актуальны с точки зрения разработки мероприятий по совершенствованию светофорного регулирования, но они не предусматривают очень важного явления относительно существенных изменений транспортных потоков на подходах к перекрестку, на котором работает или начало работать светофорное регулирование. Светофорное регулирование имеет негативные последствия работы в виде увеличения аварийности на подходах к перекрестку на фоне уменьшения аварийности на площади перекрестка, что необходимо учитывать в общих мероприятиях.

Согласно предыдущим исследованиям [10], автором предложено для формулирования критерия оценки безопасности движения на городских регулируемых перекрестках учитывать возникновение дополнительных уплотнений транспортных потоков по отношению к нерегулируемому движению на этом же перекрестке (особенно на главном направлении, которое двигалось в свободном режиме, и к тому же является максимально нагруженным по интенсивности). Предлагалось [10] уплотнение рассматривать на подходах к перекрестку и определять, как уменьшение до минимального безопасного (вплоть до минимально возможной дистанции в очереди на красный сигнал), с точки зрения соответствующих водителей, значения дистанций между следующими друг за другом транспортными средствами при их движении на подходах к регулируемому перекрестку с соответствующим снижением скорости движения до полной остановки.

Это свидетельствует о необходимости усовершенствования мер по обеспечению безопасности движения на регулируемых перекрестках и раскрывает актуальность темы.

Таким образом, цель исследований состоит в рассмотрении наиболее существенного с точки зрения безопасности движения негативного явления при применении светофорного регулирования с жестким программным управлением. Указанное явление заключается в создании дополнительных уплотнений транспортных потоков на подходах к регулируемому перекрестку за счет работы соответствующего светофорного объекта. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: формализовать процесс образования дополнительных уплотнений транспортных потоков на подходах к регулируемому перекрестку при работе светофорного объекта; формализовать процесс образования дополнительных уплотнений транспортных потоков на подходах к регулируемому перекрестку при выключенном светофорном объекте или его работе в режиме желтого мигания.

Предлагается рассматривать уплотнение транспортного потока в виде значительного сокращения дистанций между транспортными средствами с выполнением маневра служебного торможения, что создает соответствующие предпосылки возникновения дорожно-транспортного происшествия.

В связи с тем, что количество уплотнений на подходе к перекрестку будет на 1 меньше чем автомобилей в очереди, предлагается указанные аспекты формализовать следующим образом:

$$\sum_k W_k = \sum_k (n_k - 1), \quad (1)$$

где  $\sum_k W_k$  – количество уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку в текущий момент времени, для  $k$  направлений формирования очередей, ед.;

$n_k$  – количество транспортных средств, которые находятся в  $k$ -й очереди на подходах к регулируемому перекрестку в текущий момент времени, ед.

Очередь транспортных средств на подходах к перекрестку в течение горения запрещающего сигнала на соответствующем направлении формируется по определенным закономерностям прибытия транспортных средств в определенное сечение дороги на подходах к перекрестку. Существующие исследования [11, 12] указывают наличие нескольких устойчивых закономерностей прибытия транспортных средств для условий городского движения. Все зависимости имеют существенную общность, которая раскрывается в использовании среднего значения интенсивности движения транспортных средств на подходах к перекрестку [13]. В течение горения красного сигнала на соответствующем направлении перед стоп-линией формируется очередь транспортных средств. Количество транспортных средств в очереди, отнесенное к длине участка дороги, где она сформировалась, дает усредненное значение плотности движения в соответствующем направлении после включения зеленого сигнала:

$$(N_k)_j = \frac{(n_k)_j}{(t_{kk})_j}, \quad (2)$$

где  $(N_k)_j$  – средняя интенсивность прибытия транспортных средств к очереди, собравшейся в течение горения запрещающего сигнала на  $k$ -м направлении движения, для  $j$ -й фазы регулирования, автомоб/с;

$(t_{kk})_j$  – длительность горения красного сигнала на  $k$ -м направлении движения, для  $j$ -й фазы регулирования, с.

С учетом (1) и (2) получим

$$\underline{[(W_{\text{ч}})_k]_j} = (N_k)_j \cdot (t_{kk})_j - 1, \quad (3)$$

где  $\underline{[(W_{\text{ч}})_k]_j}$  – количество уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку по  $k$ -му

направлению при отработке на нем запрещающего сигнала, для  $j$ -й фазы регулирования, ед.

Кроме того, очередь на подходах к регулируемому перекрестку формируется за счет наличия транспортных средств на площади перекрестка, которые осуществляют движение в процессе разъезда очередей, сформировавшихся за предыдущий запрещающий сигнал. Значение количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку в текущий момент времени, для  $k$  направлений формирования очередей, можно определить для  $j$ -й фазы регулирования по следующей зависимости:

$$[(W_o)_k]_j = (N_k)_j \cdot (t_{ok})_j \cdot \Delta_{oj} - 1, \quad (4)$$

где  $[(W_o)_k]_j$  – количество уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку по  $k$ -му направлению при отработке на нем зеленого сигнала, для  $j$ -й фазы регулирования, ед;

$(t_{ok})_j$  – длительность основного такта по  $k$ -му направлению при отработке на нем зеленого сигнала, для  $j$ -й фазы регулирования, с;

$\Delta_{oj}$  – доля неэффективного времени основного такта по  $k$ -му направлению при отработке на нем зеленого сигнала для  $j$ -й фазы регулирования (на протяжении указанного времени в основной такт движутся очереди транспортных средств, сформировавшихся на предыдущий запрещающий сигнал), ед.

Следует учитывать, что указанные уплотнения транспортных потоков (3) и (4) имеют соответствующее время существования в течение работы светофорного объекта в режиме жесткого программного регулирования. Для указанного периода времени суток получим следующую запись скорректированного количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку:

$$W_r = \sum_{j=1}^{\varphi} \left[ \sum_k \left( (N_k)_j \cdot (t_{ok})_j + (N_k)_j \cdot (t_{ok})_j \cdot \Delta_{oj} - 2 \right) \right], \quad (5)$$

где  $W_r$  – усредненное значение количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку в период отработки одного цикла работы светофорного объекта, ед;

$\varphi$  – количество фаз регулирования светофорного объекта, ед.

Скорректируем значение (5) с учетом доли времени работы светофорного объекта в режиме регулирования движения в течение суток:

$$W_{pr} = \frac{t_{pr} \cdot 3600}{T_{ц}} \cdot \sum_{j=1}^{\varphi} \left[ \sum_k \left( (N_k)_j \cdot (t_{ok})_j + (N_k)_j \cdot (t_{ok})_j \cdot \Delta_{oj} - 2 \right) \right], \quad (6)$$

где  $W_{pr}$  – усредненное значение количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку за период работы светофорного объекта в течение суток, ед;

$T_{ц}$  – длительность цикла работы светофорного объекта, с;

$t_{pr}$  – время работы светофорного объекта в режиме жесткого программного регулирования в течение суток, ч.

Также в течение суток очередь на подходах к регулируемому перекрестку формируется в условиях отсутствия светофорного регулирования при выключенном светофорном объекте или при его работе в режиме желтого мигания. В режиме отсутствия светофорного регулирования (желтое мигание или выключенный светофорный объект) на площади перекрестка формируется одна схема разрешенного движения, предусмотренная существующей схемой организации дорожного движения, и определяется дорожной разметкой, дорожными знаками и направляющими устройствами. В таком случае образование очередей в соответствующих направлениях разрешенного движения происходит за счет появления необходимо-

го времени выполнения маневра на площади перекрестка.

Предлагается рассмотреть формирование элементарных составляющих траекторий маневров отдельно для получения необходимых зависимостей. Рассмотрим формирование траектории маневра движения направо через площадь перекрестка. Общая длина траектории маневра включает тормозной путь транспортного средства, который должен заканчиваться у стоп-линии, для случая, формирующего максимальную длину торможения.

Длина траектории маневра поворота направо с учетом отсутствия возможности выполнения остановки транспортного средства будет равна:

$$L_r = \Delta + 2 \cdot l_n + \frac{\alpha_r}{180} \pi \cdot R_r + L_{a_{\max}}, \quad (7)$$

где  $L_r$  – общая длина траектории маневра движения направо, м;

$\Delta$  – расстояние между пешеходным переходом и стоп-линией, м;

$l_n$  – ширина пешеходного перехода, м;

$\alpha_r$  – полный курсовой угол от начала до конца движения по круговой части траектории маневра движения направо на площади перекрестка, град.;

$R_r$  – радиус правого поворота, м;

$L_{a_{\max}}$  – максимальная габаритная длина транспортного средства в составе транспортного потока на площади перекрестка, м.

Длина траектории маневра движения прямо с учетом отсутствия возможности выполнения остановки транспортного средства равна:

$$L_p = \Delta + 2 \cdot l_n + l_{\text{пш}} + L_{a_{\max}}, \quad (8)$$

где  $L_p$  – общая длина траектории маневра движения прямо, м;

$l_{\text{пш}}$  – расстояние между пешеходными переходами, м.

Длина траектории маневра поворота налево с учетом отсутствия возможности выполнения остановки транспортного средства будет равна:

$$L_l = \Delta + 2 \cdot l_n + \frac{\alpha_l}{180} \pi \cdot R_l + l' + l'' + L_{a_{\max}}, \quad (9)$$

где  $L_l$  – общая длина траектории маневра поворота налево, м;

$\alpha_l$  – полный курсовой угол от начала до конца движения по круговой части траектории маневра поворота налево на площади перекрестка, град.;

$R_l$  – радиус левого поворота, м;

$l'$ ,  $l''$  – расстояние между пешеходным переходом и началом поворота налево.

Длина траектории маневра разворота с учетом отсутствия возможности выполнения остановки транспортного средства будет равна:

$$L_{rr} = \Delta + 2 \cdot l_n + 2 \cdot \frac{\alpha'_r}{180} \pi \cdot R_r + \frac{\alpha_{rr}}{180} \pi \cdot R_{rr} + L_{a_{\max}}, \quad (10)$$

где  $L_{rr}$  – общая длина траектории маневра разворота на площади перекрестка, м;

$\alpha'_r$  – полный курсовой угол от начала до конца движения по круговой части траектории маневра движения по радиусу поворота направо на площади перекрестка, до условия сопряжения с кривой разворота, град.;

$\alpha_{rr}$  – полный курсовой угол от начала до конца движения по круговой части траектории маневра разворота на площади перекрестка, град.;

$R_{rr}$  – максимальный радиус разворота на площади перекрестка, м.

С учетом основного уравнения транспортного потока [5, 11], раскрывающего соотно-

шение между основными макроскопическими характеристиками транспортного потока, получим зависимость для расчета скорости транспортного средства в начале выполнения маневра движения на подходах к перекрестку по  $k$ -м направлениям:

$$V_k = \frac{N_k}{q_k}, \quad (11)$$

где  $V_k$  – скорость движения транспортных средств на подходах к перекрестку на  $k$ -м направлении движения при выключенном светофорном объекте, м/с;

$q_k$  – плотность движения транспортных средств на подходах к перекрестку на  $k$ -м направлении движения, при выключенном светофорном объекте, авт/м.

По схемам положения конфликтной точки разделение транспортных потоков при повороте вправо находится на расстоянии от стоп-линии, равном

$$(L_{kr})_k = \Delta_k + l_{пк}, \quad (12)$$

где  $(L_{kr})_k$  – расстояние от стоп-линии до конфликтной точки разделения транспортных потоков по  $1$ -му направлению при повороте направо, м.

Транспортные средства в соответствующем транспортном потоке движутся со скоростью, рассчитываемой по формуле (11), скорость принимается постоянной, поэтому соответствующее время движения определяется по формулам:

$$(t_{kr})_k = \frac{(L_{kr})_k}{V_k}; \quad (t_{kr})_k = \frac{q_k \cdot (\Delta_k + l_{пк})}{N_k}, \quad (13)$$

где  $(t_{kr})_k$  – время движения транспортных средств в соответствующем транспортном потоке от стоп-линии до конфликтной точки разделения транспортных потоков по  $k$ -му направлению при повороте направо, с.

Необходимо учесть уменьшение интенсивности движения на указанном расстоянии за счет разделения транспортных потоков при повороте направо. Разделение транспортных потоков предполагает сохранение скоростей транспортных средств после проезда соответствующей точки на некоторое время, а далее водители транспортных средств стремятся догнать предыдущие транспортные средства в пределах уменьшенной плотности движения транспортных потоков, прошедших соответствующее разделение. С учетом указанного, скорость движения транспортного потока, двигающегося прямо после разделения с поворачивающим направо потоком, будет рассчитываться по следующей формуле со значением (11):

– уменьшение интенсивности транспортного потока после разделения на повороте направо:

$$(N_k - (N_r)_k);$$

– уменьшение плотности транспортного потока после разделения на повороте направо:

$$q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k);$$

– значение скорости транспортного потока после разделения на повороте направо с учетом (11):

$$(V_{apl})_k = (N_k - (N_r)_k) \cdot \frac{1}{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}, \quad (14)$$

где  $(V_{apl})_k$  – скорость движения транспортного потока, двигающегося прямо после разделения с потоком, поворачивающим направо, м/с;

$(N_r)_k$  – интенсивность движения транспортного потока на кривой поворота направо

во, авт/с;

$(\Delta_r)_k$  – доля транспортных средств из общего транспортного потока, совершающих поворот направо в соответствующей точке разделения, ед.

Принимаем упрощение относительно постоянства значения скорости движения транспортных средств в транспортном потоке между конфликтными точками разделения направо и налево (14), тогда время движения транспортных средств на указанном участке будет равно:

$$(t_{rl})_k = \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{l'}{(N_k - (N_r)_k)}, \quad (15)$$

где  $(t_{rl})_k$  – время движения транспортного потока, движущегося прямо после разделения с поворачивающим направо потоком с.

В дальнейшем необходимо вывести значение скорости движения транспортных средств после разделения транспортных потоков при повороте налево. Согласно предварительным результатам вывод формулы производим аналогично. Принимаем упрощение относительно постоянства значения скорости движения транспортных средств в транспортном потоке после соответствующих точек разделения направо и налево (16), время движения транспортных средств на указанном участке будет равно по k-му направлению:

$$(t_p)_k = \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_l)_k)}{1} \cdot \frac{(l_{mn} - l' + l_n + L_{a_{max}})_k}{N_k - (N_r)_k - (N_l)_k}, \quad (16)$$

где  $(t_p)_k$  – время движения транспортного потока, движущегося прямо после разделения с поворачивающим направо потоком, с.

Таким образом, значение времени для обеспечения разъезда транспортных средств, двигающихся прямо с одной полосы разъезда (прямо, направо и налево) на подходах к перекрестку, будет рассчитываться по следующей формуле:

$$(t_{pp})_k = \frac{q_k \cdot (\Delta_k + l_{pk})}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{(l')_k}{(N_k - (N_r)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_l)_k)}{1} \cdot \frac{(l_{mn} - l' + l_n + L_{a_{max}})_k}{N_k - (N_r)_k - (N_l)_k}, \quad (17)$$

где  $(t_{pp})_k$  – время обеспечения разъезда транспортных средств, двигающихся прямо, с одной полосы (прямо, направо и налево) на подходах к перекрестку, с.

В случае отсутствия в соответствующей фазе регулирования маневров поворота направо, налево или всех указанных в формулу (17) соответствующие величины подставляются со значением 0. Для поворота направо выведем аналогичную (17) зависимость для времени выполнения указанного маневра. Значение такого времени имеет следующая запись:

$$(t_{rr})_k = (t_{kr})_k + (t_r)_k,$$

где  $(t_{rr})_k$  – время обеспечения разъезда транспортных средств, двигающихся направо с одной полосы разъезда (прямо, направо и налево) на подходах к перекрестку, с;

$(t_r)_k$  – время движения транспортного потока, двигающего направо после разделения с потоком, продолжающего движение прямо, с.

В указанной выше формуле известна первая составляющая, определяемая по (13), необходимо определить вторую составляющую  $(t_r)_k$ . Принимаем упрощение относительно постоянства значения скорости движения транспортных средств в транспортном потоке после соответствующей точки разделения направо, время движения транспортных средств на указанном участке будет равно:

$$(t_r)_k = \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_{pl})_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{\alpha_r}{180} \pi \cdot R_r + l_{\pi} + L_{a_{\max}} \right)_k}{N_k - (N_{pl})_k}, \quad (18)$$

где  $(t_r)_k$  – время движения транспортного потока, двигающегося направо после разделения с потоком, продолжающим движение прямо, с.

Таким образом, значение времени для обеспечения разъезда транспортных средств, двигающихся направо с одной полосы разъезда (прямо, направо и налево) на подходах к перекрестку, будет рассчитываться по следующей формуле с учетом (13) и (18):

$$(t_{rr})_k = \frac{q_k \cdot (\Delta_k + (l_{\pi})_k)}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_{pl})_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{\alpha_r}{180} \pi \cdot R_r + l_{\pi} + L_{a_{\max}} \right)_k}{N_k - (N_{pl})_k}, \quad (19)$$

где  $(t_{rr})_k$  – время обеспечения разъезда транспортных средств, двигающихся направо, с одной полосы разъезда (прямо, направо и налево) на подходах к перекрестку, с.

В случае отсутствия в соответствующей фазе регулирования маневров продолжения движения прямо в формулу (19) соответствующие величины подставляются со значением 0. Аналогично выводу формулы (19) проводим вывод формул для маневра поворота налево и разворота на перекрестке.

$$(t_{ll})_k = \frac{q_k \cdot (\Delta_k + (l_{\pi})_k)}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{(l')_k}{(N_k - (N_r)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_p)_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{\alpha_l}{180} \pi \cdot R_l + l'' + l_{\pi} + L_{a_{\max}} \right)_k}{(N_k - (N_r)_k - (N_p)_k)}. \quad (20)$$

$$(t_{rv})_k = \frac{q_k \cdot \left( \Delta_k + (l_{\pi})_k + \frac{\alpha'_r}{180} \pi \cdot R_r \right)}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R_{rr}}{(N_k - (N_r)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_p)_k)}{1} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R_{rr}}{(N_k - (N_r)_k - (N_p)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_p)_k - (\Delta_l)_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{1}{2} \pi \cdot R_{rr} + \frac{\alpha'_r}{180} \pi \cdot R_r + l_{\pi} + L_{a_{\max}} \right)_k}{(N_k - (N_r)_k - (N_p)_k - (N_l)_k)}. \quad (21)$$

Предлагается также учесть в формулах (17), (19), (20) и (21) время ожидания появления необходимого интервала в транспортном потоке следующим коэффициентом:

$$1 + \frac{Z_k}{1 - Z_k}, \quad (22)$$

где  $Z$  – уровень загрузки транспортным потоком соответствующих участков движения конфликтного направления на площади перекрестка, ед.

В условиях заторообразования  $Z = 1$  значение (22) равно  $\infty$ , что указывает на бесконечное время движения на маневре, то есть поток остановлен. В условиях свободного движения  $Z \rightarrow 0$ . Значение (22) приближается к единице, указывающей на сохранение соответствующего минимального времени, из расчета движения на маневре одного транспортного средства.

С учетом значения (6) для работы светофорного объекта в режиме желтого мигания

(или выключенный светофорный объект) скорректированное значение количества уплотнений транспортных потоков по времени существования указанного режима в течение суток:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_g = \sum_k \left[ \int_0^{t_g} \left( N_k(t) - \frac{1}{\left( t_{pp,rr,ll,rv} \right)_k} \right) dt - 1 \right], \\ N_k(t) \geq \frac{1}{\left( t_{pp,rr,ll,rv} \right)_k}, \end{array} \right. \quad (23)$$

где  $W_g$  – среднее значение количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку при режиме желтого мигания (или выключенного) светофорного объекта в течение суток, ед;

$t_g$  – время работы в режиме желтого мигания (или выключенного) светофорного объекта в течение суток, ед.;

$\frac{1}{\left( t_{pp,rr,ll,rv} \right)_k}$  – максимальная интенсивность движения по  $k$  направлениям до значения

которой уплотнения в потоке не рассматриваются автором, как вызванные наличием перекрестка, ед/с.

Формулы (6) и (23) позволяют рассчитать общее скорректированное значение количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку в течение суток:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \frac{t_{pr} \cdot 3600}{T_{II}} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \sum_k \left( (N_k)_j \cdot (t_{\kappa_k})_j + (N_k)_j \cdot (t_{o_k})_j \cdot \Delta_{oj} - 2 \right) \right] + \sum_k \left[ \int_0^{t_g} \left( N_k(t) - \frac{1}{\left( t_{pp,rr,ll,rv} \right)_k} \right) dt - 1 \right], \\ N_k(t) \geq \frac{1}{\left( t_{pp,rr,ll,rv} \right)_k}, \\ (t_{pp})_k = \left( 1 + \frac{Z_k}{1 - Z_k} \right) \cdot \left[ \frac{q_k \cdot (\Delta_k + I_{пк})}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{(I')_k}{(N_k - (N_r)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_l)_k)}{1} \cdot \frac{(I_{пм} - I' + I_{п} + L_{a_{max}})_k}{N_k - (N_r)_k - (N_l)_k} \right], \\ (t_{rr})_k = \left( 1 + \frac{Z_k}{1 - Z_k} \right) \cdot \left[ \frac{q_k \cdot (\Delta_k + I_{пк})}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_{pl})_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{\alpha_r}{180} \pi \cdot R_r + I_{п} + L_{a_{max}} \right)_k}{N_k - (N_{pl})_k} \right], \\ (t_{ll})_k = \left( 1 + \frac{Z_k}{1 - Z_k} \right) \cdot \left[ \frac{q_k \cdot (\Delta_k + I_{пк})}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{(I')_k}{(N_k - (N_r)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_p)_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{\alpha_l}{180} \pi \cdot R_l + I' + I_{п} + L_{a_{max}} \right)_k}{(N_k - (N_r)_k - (N_p)_k)} \right], \\ (t_{rv})_k = \left( 1 + \frac{Z_i}{1 - Z_i} \right) \cdot \left[ \frac{q_k \cdot \left( \Delta_k + I_{пк} + \frac{\alpha'_r}{180} \pi \cdot R_r \right)}{N_k} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k)}{1} \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R_{rr}}{(N_k - (N_r)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_p)_k)}{1} \cdot \right. \\ \left. \times \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R_{rr}}{(N_k - (N_r)_k - (N_p)_k)} + \frac{q_k \cdot (1 - (\Delta_r)_k - (\Delta_p)_k - (\Delta_l)_k)}{1} \cdot \frac{\left( \frac{1}{2} \pi \cdot R_{rr} + \frac{\alpha'_r}{180} \pi \cdot R_r + I_{п} + L_{a_{max}} \right)_k}{(N_k - (N_r)_k - (N_p)_k - (N_l)_k)} \right]. \end{array} \right. \quad (24)$$

Таким образом, в работе были решены поставленные задачи по формализации процесса образования дополнительных уплотнений транспортных потоков на подходах к регулируемому перекрестку при работе светофорного объекта; формализации процесса образования дополнительных уплотнений транспортных потоков на подходах к регулируемому перекрестку при выключенном светофорном объекте или его работе в режиме желтого мигания.

### **Выводы**

Получены формулы общего скорректированного значения количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку в течение суток по соответствующим режимам работы светофоров и фазам регулирования. Результаты работы позволяют проводить дальнейшее развитие теоретических положений по оценке и уменьшению негативных явлений при работе светофорного регулирования на перекрестке.

### **Список литературы**

1. Проблема высокого уровня аварийности на автомобильных дорогах мира. – Текст : электронный // КрУДор : [сайт]. – URL: <https://krudor.ru/news/goodknow/5598-Проблема+высокого+уровня+аварийности+на+автомобильных+дорогах+мира> (дата обращения: 24.01.2022).
2. Статистика ДТП в Украине и основные причины аварий на дорогах в 2020 году. – Текст : электронный // Forinsurer : [сайт]. – URL: <https://forinsurer.com/news/21/01/19/39063> (дата обращения: 24.01.2022).
3. В МВД назвали число погибших и пострадавших в ДТП за 2020 год. – Текст : электронный // ТВ-Новости : [сайт]. – URL: <https://russian.rt.com/russia/news/853565-rossiya-dtp-pogibshie> (дата обращения: 24.01.2022).
4. Рябчинский, А. И. Повышение безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности республики Белоруссия / А. И. Рябчинский, Д. В. Капский // Вестник ТОГУ. – 2012. – № 3(26). – С. 91–98.
5. Improving global road safety. Note by the Secretary-General. – Текст : электронный // United Nations General Assembly Norway. – 2011. – URL: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp1/Improving\\_Global\\_Roady\\_Safety\\_2011.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp1/Improving_Global_Roady_Safety_2011.pdf).
6. Sinhmar, P. Intelligent Traffic Light and Density Control Using IR Sensors and Microcontroller / P. Sinhmar. – Текст : электронный // Journal of Advanced Technology & Engineering Research. – 2012. – Vol. 2, Issue 2. – P. 30–35.
7. Агуреев, И. Э. Исследование алгоритмов светофорного регулирования перекрестка при различных параметрах транспортного потока / И. Е. Агуреев, А. Ю. Кретов, И. Ю. Мацур // Известия Тульского государственного института. Технические науки. – 2013. – № 7–2. – С. 54–59.
8. Ахмадинуров, М. М. Оптимизация светофорного регулирования с помощью программы моделирования транспортных потоков / М. М. Ахмадинуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – № 22(198). – С. 78–89.
9. Mobility Week United Nations Global Road Safety Week : 6–12 May, 2013. – P. 18–32.
10. Дудников, А. Н. Формализация изменения площади конфликтных областей регулируемого перекрестка с учетом изменений интенсивности взаимодействия транспортных потоков / А. Н. Дудников, А. В. Меженков // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2012. – № 2(15). – С. 96–105.
11. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю ; перевод с английского. – Москва : Транспорт, 1972. – 424 с.
12. Вол, М. Анализ транспортных систем / М. Вол, Б. Мартин. – Москва : Транспорт, 1981. – 516 с.
13. Полищук, В. П. Теория транспортного потока: методы и модели организации дорожного движения / В. П. Полищук, О. П. Дзюба. – Киев : Знание Украины, 2008. – 175 с.

**А. В. Меженков**

*Автомобильно-дорожный институт*

*ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка*

**Негативные явления в светофорном регулировании на перекрестках  
транспортной системы города**

Повышение уровня автомобилизации приводит не только к повышению комфорта передвижения, но и к появлению транспортных проблем, среди которых можно выделить: загруженность движением городских магистралей и появление заторов, повышение уровня аварийности. На данное время эти проблемы являются самыми актуальными в мире, поэтому их решение является важным и первоочередным.

Несмотря на то, что перекрестки занимают незначительную площадь улично-дорожной сети, они являются основными местами совершения ДТП. В связи с этим именно на перекрестках в первую очередь вводятся мероприятия по снижению аварийности, что в целом обуславливает актуальность решения научных задач, связанных с усовершенствованием безопасности движения транспортных средств в области перекрестков дорог.

Одним из самых распространенных мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на перекрестках является организация светофорного регулирования. Его введение позволяет уменьшить количество конфликтных точек на перекрестке разнесением их во времени в соответствующих фазах. Однако, как свидетельствует статистика ДТП, при снижении числа конфликтных точек в два раза количество ДТП снижается лишь на 30–40 %. Это связано с созданием дополнительных уплотнений в транспортных потоках на регулируемых перекрестках, за счет которых повышается интенсивность взаимодействий транспортных потоков на площади перекрестка и, как следствие, снижается безопасность движения.

В работе рассмотрены и проанализированы процессы создания дополнительных уплотнений транспортного потока в виде значительного сокращения дистанций между транспортными средствами с выполнением маневра служебного торможения, которые создают соответствующие предпосылки возникновения дорожно-транспортного происшествия.

Полученные формулы общего значения количества уплотнений на подходах к регулируемому перекрестку в течение суток по соответствующим режимам работы светофоров и фазам регулирования позволяют проводить дальнейшее развитие теоретических положений по оценке и уменьшению негативных явлений при работе светофорного регулирования на перекрестке.

**СВЕТОФОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ, ПОТОК ТРАНСПОРТНЫЙ, РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПЕРЕКРЕСТОК, ПРОИСШЕСТВИЕ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЕ**

*A. V. Mezhenkov*  
**Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka**  
**Negative Phenomena in the Traffic Light Regulation at the Intersections**  
**of the City Transport System**

The motorization level increase leads not only to an increase in the comfort of movement, but also to the transport problems, among which the traffic congestion of city highways and the jam appearance, an increase in the level of accidents can be distinguished. Today, these problems are the most pressing in the world, so their solution is important and the top priority.

Although intersections occupy a small area of the road network, they are the main places of accidents. In this regard, it is at intersections that measures are first introduced to reduce accidents, and in general it determines the relevance of solving scientific problems related to improving the safety of vehicles in the field of road intersections.

One of the most common measures to improve road safety at intersections is the organization of the traffic light regulation. Its introduction makes it possible to reduce the number of conflict points at the intersection by spreading them in time in the corresponding phases. However, according to the statistics of accidents, with a 2-fold decrease in the number of conflict points, the number of accidents decreases only by 30–40 %. This is due to the creation of additional compaction in the traffic flows at regulated intersections, due to which the intensity of interactions between traffic flows at the intersection area increases and, as a result, traffic safety decreases.

The work considers and analyzes the processes of creating additional traffic flow compaction in the form of the significant reduction in the distances between vehicles with the performance of the service braking maneuver, which create the appropriate prerequisites for the traffic accident occurrence.

The obtained formulas for the total value of the compaction number on the approaches to the regulated intersection during the day according to the corresponding traffic light operating modes and control phases allow further development of the theoretical provisions for assessing and reducing negative phenomena during the operation of the traffic light control at the intersection.

**TRAFFIC LIGHT REGULATION, TRAFFIC SAFETY, TRAFFIC FLOW, SIGNAL-CONTROLLED INTERSECTION, TRAFFIC ACCIDENTS**

**Сведения об авторе:**

**А. В. Меженков**

SPIN-код РИНЦ:

3845-0179

Телефон:

+38 (071) 338-20-85

Эл. почта:

ekar8481@mail.ru

*Статья поступила 14.02.2022*

*© А. В. Меженков, 2022*

*Рецензент: Д. Н. Самисько, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*