

Н.А. ГРЯЗНОВ  
**ОБМЕН НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ  
ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

*Грязнов Н.А. Обмен навигационной информацией для оперативного управления дорожным движением.*

**Аннотация.** Снижение эффективности грузопассажирских перевозок в условиях городской инфраструктуры определяется ростом числа автомобилей, опережающим развитие сети дорог. Моделирование неравномерности потоков во времени (час пик) выявило ключевое значение интервала движения транспортных средств как фактора борьбы с эффектом аккумуляции при снижении средней скорости в условиях загруженности дорог. Снижение эффективного времени реакции водителя, определяющего предельную дистанцию между транспортными средствами, требует минимизации влияния человеческого фактора. Для автоматизации процесса (реализации беспилотного управления транспортом) необходимо обеспечить эффективный обмен навигационной и маршрутной информацией между участниками движения. Совокупности требований к системе информационного обмена лучше всего отвечает коммуникационно-навигационная система (КНС) на базе принципов широкополосной радиосвязи. Ее применение позволяет одновременно повысить и безопасность, и эффективность дорожного движения. Рост безопасности обеспечивается за счет повышения предсказуемости действий соседних участников движения. Для увеличения эффективности в зоне высокой плотности потоков формируются Центры управления транспортом (ЦУТ). Распределенные сети приемо-передающих станций ЦУТ образуют локальную систему позиционирования на принципах трилатерации. Алгоритмы верификации корректности работы бортовых навигационных средств и автоматического разрешения коммуникационных конфликтов обеспечивают высокую надежность функционирования КНС. Отказ от принципов абонентской радиосвязи обеспечивает ее работоспособность даже в условиях очень высокой плотности транспортных средств (несколько тысяч на квадратный километр). В сочетании с передовыми технологиями организации дорожного движения (реализации решетки транспортных магистралей и режима «тотальной зеленой волны») КНС и ЦУТ способны обеспечить среднюю скорость в городских условиях более 45 км/ч. Совокупная экономия затрат на последнюю милю доставки в результате их внедрения оценивается на уровне единиц процентов ВВП даже без учета социальных и экологических эффектов только за счет снижения аварийности и сокращения числа пробок.

**Ключевые слова:** коммуникационно-навигационная система, широкополосная радиосвязь, локальная система позиционирования, транспорт, центр управления.

**1. Введение.** Численность населения Земли достигла 8 млрд. человек. Большинство людей живет в городах, при этом сохраняется устойчивая тенденция урбанизации [1, 2]. Общая обеспеченность всех жителей планеты легковым автотранспортом превышает 10 %. Городской автопарк приближается к 1 млрд. автомобилей. Средняя скорость движения в городской инфраструктуре составляет 30 км в час, которая в часы пиковой нагрузки снижается в 1,5-2 раза, а при наличии проблем, вызывающих образование заторов, и втрое [3 – 5].

Главной задачей автодорожной инфраструктуры является обеспечение высокой эффективности (низкой стоимости и малых временных затрат) грузопассажирских перевозок. Уменьшение затрат времени на транспортировку не только экономит личное время участников движения, но и снижает себестоимость перемещаемых товаров.

Помимо заторов к существенному снижению эффективности перевозок приводят аварии, в которых наносится ущерб людям и технике [6 – 8]. Повышение безопасности дорожного движения за счет снижения эффективности (например, необоснованного ограничения скорости) чаще всего не оправдано с экономической точки зрения.

По разным оценкам экономический ущерб от дорожных заторов и аварий, которые тоже являются причинами заторов, составляет несколько единиц (от 2 до 7 в разных странах) процентов ВВП [9 – 11]. Такой уровень потерь является серьезным вызовом и мотивацией для анализа и поиска методов существенного повышения эффективности дорожного движения, что и является целью данной работы.

**2. Автотранспортный коллапс в час пик.** Рассмотрим причины возникновения заторов и влияние зон сложения или пересечения потоков на них [12 – 15]. Для анализа пропускной способности магистрали  $P$  введем понятие скорости потока  $F$ , пропорциональной числу полос  $N$ , средней скорости  $V$  и обратно пропорциональной среднему интервалу между автомобилями  $R$ :

$$F = NV / R, \quad (1)$$

где  $R = L + D$ ,  $L$  – средняя длина транспортного средства (ТС), а  $D$  – средняя дистанция между ними, зависящая от скорости движения:

$$D(V) = D_0 + V\tau, \quad (2)$$

где  $D_0$  – средняя дистанция между стоящими автомобилями,  $\tau$  – среднее эффективное время реакции водителя. Интервал при нулевой скорости  $R_0 = L + D_0$  определяет максимальное число стоящих автомобилей  $M$ , которое помещается на полосе длиной  $S$ :  $M = S / R_0$ .

Пропускная способность дороги между пересечениями с другими дорогами определяется тем ее участком, на котором

скорость потока минимальна при максимально разрешенной скорости движения:

$$P = F_{\min} (V_{\max}). \quad (3)$$

Максимальная скорость реализуется лишь при малой плотности ТС. Для анализа реальной пропускной способности в условиях высокой плотности движения введем понятие скорости потока по полосе  $F_1$ :

$$F_1 = 1 / (\tau + R_0 / V). \quad (4)$$

Типичные значения  $R_0$  находятся в диапазоне 6-10 м (зависит от доли грузовых автомобилей и автобусов), а эффективное время реакции водителей в диапазоне 0,5-1,5 с. Для средних значений (8 м и 1 с) даже при скорости 40 км/ч полоса способна пропускать более 2000 автомобилей за час. Отношение интервала  $R_0$  и времени реакции, равное в данном случае 8 м/с (почти 30 км/ч), определяет точку перелома функции. Это означает, что увеличение скорости потока повышением средней скорости движения эффективно лишь в диапазоне малых скоростей. Например, увеличение разрешенной скорости движения на трассе с 90 до 120 км/час приводит к увеличению скорости потока на 6,6 %. В то же время снижение времени реакции (например, вдвое, с 1 с до 0,5 с за счет уменьшения интервала) на скорости 60 км/ч приводит к увеличению потока в 1,5 раза, а при снижении еще вдвое, до 0,25 с – в 2 раза.

Зависимость дистанции и интервала от скорости (2) приводит и к обратному эффекту, зависимости скорости от числа ТС. Если на трассах общей длиной полос  $S_i$  находится  $M$  автомобилей, то средний интервал движения составляет  $S_i / M$ , а средняя скорость:

$$V = (S_i / M - R_0) / \tau. \quad (5)$$

Подставив (5) в уравнение (4), получим выражение для скорости потока по полосе в зависимости от локальной плотности ТС:

$$F_1 = (1 - M / M_{\max}) / \tau, \quad (6)$$

где  $M_{\max} = S_t / R_0$  – максимальное число ТС на полосе длиной  $S_t$  с интервалом  $R_0$ . Введем понятие загруженности дорог  $z = M / M_{\max}$ , меняющейся от 0 до 1. Выражение (5) в этом случае примет вид:

$$V = \frac{(1-z)R_0}{\tau z}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) корректны лишь при высоких значениях  $z$ , так как на свободных дорогах вступает в действие ограничение на допустимую скорость движения (60 км/час для населенных пунктов, например). Как показали расчеты, на городских трассах без пересечений существенное снижение скорости потока наступает лишь при очень высоком уровне загруженности дорог (от 70 до 90 %). На практике пробки возникают при гораздо меньшей плотности машин на дорогах, и их причиной являются перекрестки. На основных транспортных магистралях города в дневные часы движение регулируют светофоры.

Для выявления влияния различных факторов на снижение средней скорости движения в городе из-за заторов на регулируемых перекрестках была разработана численная модель. В ее рамках были введены понятия следующих средних величин: расстояния между светофорами, длительностей полного цикла и разрешающего сигнала, дальности поездки и ускорения при разгоне. Для расчета задержки на светофоре пропускная способность перекрестка определялась в двух вариантах: при разгоне после полной остановки и при движении без замедления. При заданном проценте светофоров «зеленой волны» вычислялась длина очереди автомобилей  $S_1$ , пропускаемых за один такт светофора.

После определения загруженности дорог  $z$  через общее число ТС на дорогах города, интервал  $R_0$  и длину полос всех магистралей вычислялось число автомобилей на рассматриваемом участке. Эффективная длина очереди перед светофором определялась произведением среднего расстояния между светофорами  $S_0$  и степени загруженности дорог  $z$ :  $S_2 = S_0 z$ . В случае, когда  $S_2$  превышало  $S_1$ , время задержки на светофоре  $t_d$  рассчитывалось по формуле:

$$t_d = t_c (S_2 / S_1 - 1/2), \quad (8)$$

где  $t_c$  – средняя длительность цикла светофора. Иначе:

$$t_d = t_g (S_2 / S_1 - 1) (1 - t_g / 2t_c) + t_c / 2, \quad (9)$$

где  $t_g$  – средняя длительность разрешающего сигнала светофора. Формула (9) определяет среднюю величину задержки на светофоре при свободных дорогах (проезд перекрестка в период первого разрешающего сигнала светофора, а формула (8) учитывает число циклов, которое придется пропустить при высокой загруженности дорог.

Средняя скорость движения определялась делением расстояния между светофорами  $S_0$  на время прохождения дистанции с учетом максимально разрешенной скорости на свободном участке  $S_0 - S_2$ . Модельная функция источника (числа ТС, начинающих поездку) позволяла варьировать плотность стартующих автомобилей в дневные часы и в часы пик по отдельности. Для определения общего количества автомобилей на дорогах города в каждый момент времени вычислялось и вычиталось число ТС, достигших средней дальности поездки. Задержки, связанные с перестроениями из полосы в полосу, модель не учитывала.

На рисунке 1 приведена модельная функция источника, средняя скорость движения и время поездки средней дальности от времени суток для рабочих дней. Исходные данные по числу автомобилей и длине полос городских магистралей оценивались для расчета загруженности на примере Санкт-Петербурга (без пригородов).

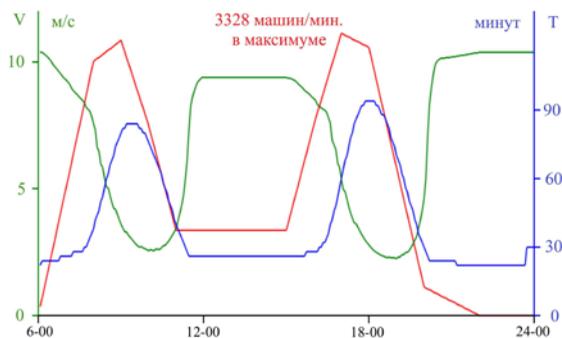


Рис. 1. Средняя скорость (зеленая кривая) и среднее время поездки (синяя кривая) в зависимости от времени суток. Красная кривая представляет модельную функцию источника (число стартующих машин)

При общей протяженности дорог более 3500 км [16] совокупная длина полос городских дорог с движением по двум и более полосам в одном направлении также находится в диапазоне от 3000 до 4000 км. В расчетах использовалось значение, равное 3400 км. По этим дорогам в часы пик передвигается более 50 процентов ТС, общая численность которых в городе превышает 2 млн. единиц. Приведенный пример с почти трехкратным увеличением времени поездки в часы пик соответствует случаю, когда число автомобилей, используемых для поездки на работу и обратно, составляет 360 тысяч единиц.

На рисунке 2 представлена зависимость потерь времени, вызванных загруженностью дорог, от общего времени движения всех ТС за сутки для трех значений средней реакции водителей. В первую очередь необходимо отметить близкий к пороговому характер перехода из состояния свободных дорог в состояние пробок и коллапса. Понятие «пробки» описывает состояние загруженности дорог, когда время на поездку средней дальности в час пик увеличивается в 2-4 раза (1-2 часа вместо 30 минут). При большей задержке фактически наступает коллапс. Дороги считаются свободными, если задержка не превышает 50 % от времени поездки (не более 45 минут для 30-минутной поездки).

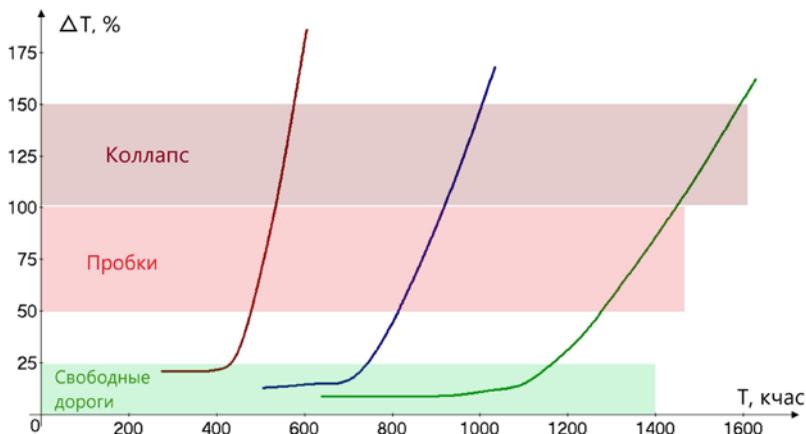


Рис. 2. Зависимость удельных потерь времени от общей загруженности дорог при разных значениях среднего времени реакции (0,5 с – зеленая кривая, 1 с – синяя кривая, 1,5 с – коричневая кривая)

При всех значениях среднего времени реакции водителей переход из состояния свободных дорог в состояние пробок происходит

при увеличении числа машин менее чем на 10 %. Для достижения состояния коллапса количество машин на дороге по сравнению со свободным трафиком должно возрасти не более чем на 20 %. Это вызвано эффектом аккумуляции (накопления), когда скорость освобождения трасс (достижения средней дальности поездки) падает из-за снижения средней скорости движения. В отличие от функции цели функция источника не зависит от загруженности трасс и средней скорости движения (время начала и окончания рабочего дня неизменно).

Кроме того, рисунок 2 демонстрирует сильную зависимость порога эффекта образования пробочного коллапса от времени реакции водителей. Чем меньше дистанция между ТС, тем выше скорость потока, тем быстрее происходит освобождение трасс, тем позже наступает перегруженность трасс из-за накопления автомобилей. Как показали расчеты, другие факторы (максимально разрешенная скорость, среднее ускорение, процент светофоров «зеленой волны» и т.п.) также влияют на величину порога, но в гораздо меньшей степени. Именно среднее время реакции и зависящая от него средняя дистанция между ТС являются ключевыми факторами эффективности автомобильных перевозок.

**3. Обмен информацией и время реакции водителей.** В настоящее время обмен информацией между участниками движения осуществляется исключительно с помощью простейших визуальных сигналов (указателей поворота и стоп-сигналов). Бинарный характер сигнала (включен или выключен) не позволяет ни оценить интенсивность торможения, ни дифференцировать маневры (перестроение, поворот, разворот). Экстренное торможение от плавного отличается лишь по скорости увеличения угловых габаритов ТС, что в сложных условиях приводит к существенной задержке реагирования на маневр. Другими словами, дистанция между автомобилями помимо факторов, характеризующих водителя (опытность, усталость, концентрация), определяется еще и внешними условиями (видимость, засветка, контраст).

В первом приближении состояние дорожного покрытия не влияет на выбор дистанции, но это верно лишь при одинаковой эффективности торможения следующих друг за другом ТС. Чем больше загруженность автомобиля и хуже состояние его покрышек, тем длиннее безопасная дистанция до впереди идущего автомобиля, особенно на скользком покрытии. Формируя требования к системе информационного обмена (СИО) между участниками движения, следует помимо предупреждения о маневрировании особо выделить

данные об эффективности тормозной системы. Эти сведения позволят бортовому компьютеру формировать рекомендации по выбору дистанции и предупреждать водителя об опасном сближении с соседними автомобилями.

С точки зрения обеспечения безопасности время реакции водителя, умноженное на скорость движения, определяет минимально допустимую дистанцию без учета других факторов, в том числе человеческих. Большинство аварий происходит по причине неверного распределения внимания водителя (потери из виду некоторых важных объектов, например, из-за чрезмерной его концентрации на других объектах). К таким объектам помимо соседних ТС относятся сигналы светофора, дорожные знаки, разметка, дефекты дорожного покрытия и другие предметы, влияющие на изменение вектора скорости автомобиля.

Контролируя обстановку, водитель обязан время от времени смотреть в заднее и боковые зеркала, отвлекаться на показания приборов (температура мотора, уровень топлива). На практике он совершает большое количество действий, не связанных с управлением движением (меняет режимы кондиционера, перемещает солнцезащитный козырек, пользуется навигатором). Ограничение в свободе действий водителя может негативно сказаться на сохранении тонуса и привести к сонливому состоянию на трассах с ограниченной потребностью в маневрировании. Поэтому в заботе о безопасности движения водителям рекомендуется соблюдать «правило двух секунд» при определении дистанции до впереди идущей машины [17].

К сожалению, данное правило, обеспечивая безопасность, радикально снижает эффективность, поскольку двухсекундный интервал соответствует времени реакции неопытного водителя. Для городских условий его соблюдение сегодня неприемлемо, поскольку соответствует очень низкому порогу образования пробок. На практике в условиях затрудненного движения в городе среднее время реакции водителя составляет 0,5-1,5 с (у профессионалов и опытных водителей оно не превышает 0,5 с). Это требует повышенной концентрации внимания и минимизации отвлечений, что с учетом человеческого фактора определяет высокий риск несущественных аварий. К сожалению, даже несущественные аварии, создавая серьезные помехи, являются дополнительным источником заторов и пробок.

Низкая эффективность перевозок в часы пиковой нагрузки определяется недостаточным количеством дорожных полос (для движения, а не для парковки) при существующем объеме автопарка в городах. Увеличение скорости потока за счет сокращения

дистанции между автомобилями невозможно из-за особенностей человеческой физиологии (совокупность факторов отвлечения и эффективная скорость реакции). Это выдвигает еще одно требование к СИО: она должна быть совместима со средствами автоматизации и роботизации управления транспортом. Переход к беспилотным ТС, минимизирующим влияние человеческого фактора, требует эффективного информационного обмена между ними.

Высокая скорость реакции водителю необходима не только для реагирования на экстренное торможение впереди идущего автомобиля. При плотном потоке любое маневрирование (поворот или перестроение) требует учета движения соседних ТС. Сегодня оценка их скорости и направления движения водителем производится визуально («на глазок»). Оценка ускорения или смещения (при том же перестроении) осуществляется практически по результату действия, что никак не способствует повышению безопасности. Другими словами, СИО должна способствовать повышению предсказуемости действий соседних участников движения.

Еще одним требованием к ней является слабая зависимость от погодных условий, что позволит компенсировать недостатки систем, собирающих информацию в оптическом диапазоне (глаз, видеокамер). Подобная зависимость от погоды характерна для электромагнитных волн радиочастотного диапазона. С их помощью в условиях ограниченной видимости (туман, дождь, снегопад) СИО должна обеспечивать дополнительный источник информации о дорожной обстановке.

При реализации перечисленных требований система обмена информацией о маневрировании позволит существенно повысить безопасность при одновременном сокращении интервала движения транспорта. Увеличение средней скорости движения и снижение стоимости перевозок определяется при этом сокращением времени реакции за счет автоматизации процесса соблюдения дистанции.

**4. Коммуникационно-навигационная система в качестве СИО.** В ряде изобретений [18, 19] авторы предлагают технологии обмена информацией (например, данными глобальной системы позиционирования) между ТС. Реализация СИО предполагает применение модулей связи, использующих существующие алгоритмы передачи информации типа протоколов мессенджеров, WLAN или им подобным. Беспроводные системы связи активно используются для роботизации транспортных операций или ассистирования водителям. В частности, для коммуникаций на дальности до 350 м разработан стандарт DSRC (dedicated short range communications) [20]. Он

использует протокол IEEE 802.11, предложенный Американским обществом интеллектуального транспорта и Департаментом транспорта США.

Недостатком подобных подходов является ориентация на формирование канала связи между двумя абонентами (каждого с каждым), в том числе с подтверждением корректности полученного пакета данных. Реализация интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на технологиях V2V и V2X должна обладать универсальностью и, прежде всего, работоспособностью в условиях высокой плотности движения.

Транспортные потоки могут состоять из тысяч участников движения, при абонентской организации связи между ТС возникает потребность в миллионах коммуникационных каналов. Радиочастотный диапазон обладает ограниченными возможностями по объему передаваемой информации. При большом количестве абонентов в рабочей зоне неизбежна интерференция передаваемых сигналов и потеря оперативности, что не позволит организовать централизацию управления.

Альтернативой абонентской радиосвязи (от каждого каждому) является широкоэвещательная (от каждого всем). Данный подход к организации коммуникационно-навигационной системы (КНС) для обеспечения безопасности и эффективности дорожного движения за счет СИО предложен автором статьи в патенте на изобретение [21]. Проблема интерференции в этом случае решается за счет временного, а не спектрального разделения сигналов. При единых для всех ТС частоте повторения и длительности сигнала (например, 1 Гц и 5 мкс) вероятность интерференции даже для 1000 автомобилей составляет доли процента.

Потребность в размерах зоны уверенного приема с точки зрения обеспечения предсказуемости маневрирования соседних ТС составляет от 150 до 300 метров. Эти расстояния соответствуют времени распространения радиоизлучения менее 1 мкс, что почти не увеличивает период приема сигнала. При случайном пересечении двух пакетов во времени бортовые модули КНС участников конфликта автоматически смещают свои сигналы в ближайшие свободные интервалы.

Передача радиочастотного излучения осуществляется по хорошо отработанным технологиям беспроводной высокочастотной связи. Для этого необходимо выделить полосу шириной 100 МГц в гигагерцовом диапазоне (от 4 до 8 ГГц) исключительно для обмена навигационной информацией между участниками движения.

В этом случае уже реализованные скорости передачи информации (40 Мбит в секунду) обеспечат за 5 мкс трансляцию пакета размером до 25 байт.

Всю передаваемую информацию целесообразно разделить на идентификационную, оперативную (навигационную) и экстренную. Так как идентификационная информация не меняется, ее можно передавать в течение нескольких сигналов (например, пяти секунд) по 1 байту. Для присвоения уникальных номеров всем транспортным средствам на Земле достаточно 5 байтов, что соответствует более чем триллиону комбинаций. В состав идентификационной информации целесообразно включать данные об эффективности тормозной системы автомобиля.

Навигационная информация в силу своей оперативности занимает основную часть передаваемого сигнала. Формат передачи данных зависит от режима движения и наличия электронных карт местности в бортовом оборудовании машины. При отсутствии привязки к существующей дорожной системе и использовании системы глобального позиционирования в качестве оперативной рассматриваются секунды и доли секунд долготы и широты места. Передача градусов и минут долготы и широты места не требует оперативности, достаточно трансляции по 1 байту в течение пяти сигналов. Оперативной также является информация о векторе движения ТС (передается ежесекундно).

При наличии электронных карт и привязке к транспортным магистралям формат передачи данных в КНС меняется на сетевой (номер дороги, номер полосы, расстояние от нулевой координаты трассы). В случае транспортного режима движения по навигатору указываются ближайшие две-три точки маневров (поворотов, остановок). Данная информация существенно повышает предсказуемость поведения участников движения с точки зрения перестроений ТС.

Экстренная информация о совершении незапланированного маневра (экстренное торможение, занос, уход от столкновения, смена полосы) передается в ближайший свободный интервал времени. Учитывая тот факт, что бортовой модуль КНС при отслеживании траекторий соседних ТС составляет расписание принимаемых сигналов в виде таблицы, задержка не превысит нескольких десятков микросекунд.

Корректность принимаемых сигналов проверяется по соответствию контрольным суммам. В случае отсутствия соответствия сигнал считается непринятым, и бортовой модуль

ожидает прихода следующего. Для оперативных данных период обновления информации составляет 1 с, для не оперативных – 5 с, а для экстренных – от 10 до 100 мс в зависимости от скорости реакции систем управления ТС.

**5. Оперативное управление дорожным движением при помощи СИО.** Для оперативного управления движением в зонах высокой плотности автотранспорта предлагается [21] создавать центры управления транспортом (ЦУТ). Ключевой задачей Центров является обеспечение высокой эффективности транспортных потоков (минимизация временных и финансовых затрат на перевозки) в зоне их ответственности.

Задача обеспечения безопасности остается главной для бортовых модулей КНС. ЦУТ не реализует прямого управления транспортом, а лишь вводит ограничения (обязательные для исполнения) и разрабатывает рекомендации (необязательные для исполнения). Выбор маршрута, режима движения и, самое главное, принятие решения о маневре с точки зрения безопасности остается за водителем (бортовой системой управления). ЦУТ же является ИТС с реализацией технологии V2X.

Целью деятельности Центров является не глобальная оптимизация всех транспортных потоков, а лишь разрешение локальных конфликтов, что позволяет им действовать почти независимо друг от друга. По своей сути ЦУТ является виртуальным регулировщиком движения (диспетчером), которому известна дорожная ситуация, режимы и цели всех ТС. При этом он может оперативно менять режимы всех светофоров в рабочей зоне и разрабатывать рекомендации по оптимизации движения для всех автомобилей с бортовыми модулями КНС.

Чтобы повысить надежность навигационной привязки, в зоне ЦУТ формируется локальная система позиционирования (ЛСП), базирующаяся на тех же принципах трилатерации, что и глобальная [22]. Ее принцип действия приведен на рисунке 3. По задержке прихода сигналов определяется разница в расстояниях до стационарных приемо-передающих станций (ППС), находящихся в зоне приема. Положение ТС определяется как точка на подстилающей поверхности, для которой сумма квадратов отклонений от измеренных разниц дистанций минимальна.

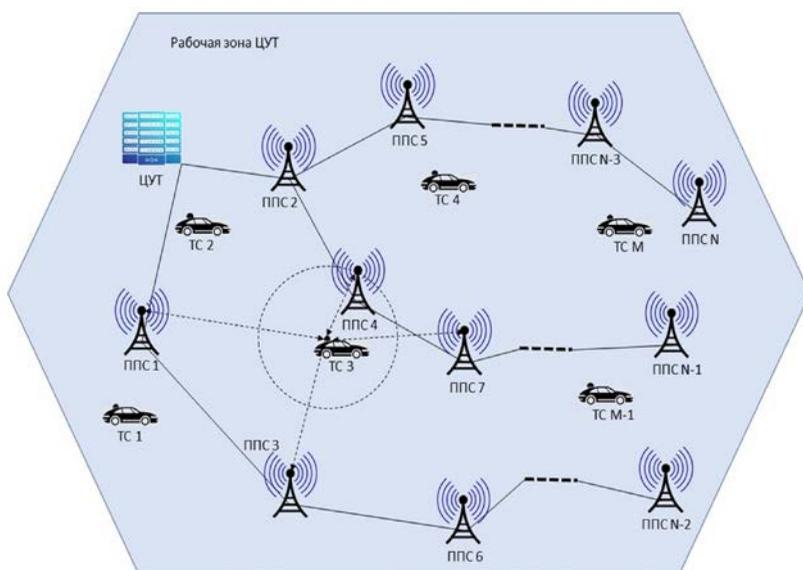


Рис. 3. Принцип функционирования локальной системы позиционирования

Реализация ЛСП потребует выделения еще одного частотного интервала в гигагерцовом диапазоне полосой порядка 100 МГц. Помимо позиционных сигналов данный интервал целесообразно использовать еще и для передачи команд управления индивидуального и группового характера. Стационарные ППС располагаются в зоне ЦУТ так, чтобы на всех основных магистралях погрешность позиционирования не превышала 20 – 25 см.

ЛСП позволяет реализовать режим временной привязки всех сигналов (и позиционных, и КНС) к синхроимпульсу Центра. Для этого все ППС имеют порядковый номер, определяющий временную задержку относительно синхроимпульса их позиционного сигнала. Позиционный сигнал служит для определения бортовым модулем КНС положения ТС. Информация о положении всех ППС размещается в открытых источниках и загружается в бортовой модуль КНС заранее (или при въезде в зону ЦУТ). Из момента времени получения позиционного сигнала вычитается интервал задержки, умноженный на номер станции, и время распространения сигнала от станции до транспорта, полученное делением расстояния на скорость света.

Интервал генерации навигационных сигналов бортовыми модулями КНС делится на такты (например, период в 1 с – на 200 000 тактов по 5 мкс), привязанные к синхроимпульсу Центра. При нахождении в зоне ЦУТ каждому ТС выделяется номер такта для передачи сигнала КНС, что упрощает задачу идентификации. При въезде в зону Центра ТС сообщает ЦУТ свой идентификационный номер, после чего его регистрация завершается выделением ему свободного номера такта.

Другим упрощением информационного обмена в зоне ЦУТ является регистрация транспортных коридоров (полос движения) и парковочных мест. Это позволяет сигнал КНС в зоне ЦУТ ограничить одним байтом признака навигационного сигнала с описанием режима движения, четырьмя байтами описания текущего местоположения транспорта (с субметровой точностью), четырьмя байтами описания ближайших точек маневра (смены транспортного коридора) и одним байтом контрольной суммы. Требования к погрешности описания точек маневра лежат в метровом и декаметровом диапазонах.

Функциональная схема системы, состоящей из бортовых модулей КНС, центра управления транспортом и его приемо-передающих станций приведена на рисунке 4. Для определения позиции автомобиля вне зоны ЦУТ в состав бортового модуля входит приемник глобальной системы позиционирования. Расчет положения автомобиля на момент передачи сигнала КНС осуществляется с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и навигационного вычислителя.

Информация со всех ЦУТ города поступает в городской аналитический центр (ГАЦ) для выявления транспортных проблем, требующих оперативного решения на уровне муниципальных властей. Связь ЦУТ с сетью ППС осуществляется по волоконным кабелям, обеспечивающим высокую надежность синхронизации часов станций, генерации позиционных сигналов и привязки сигналов КНС. При необходимости ЦУТ обращается в дорожную службу для оперативного разрешения конфликтов (патруль) и восстановления рабочего состояния дорожной инфраструктуры (ремонт).

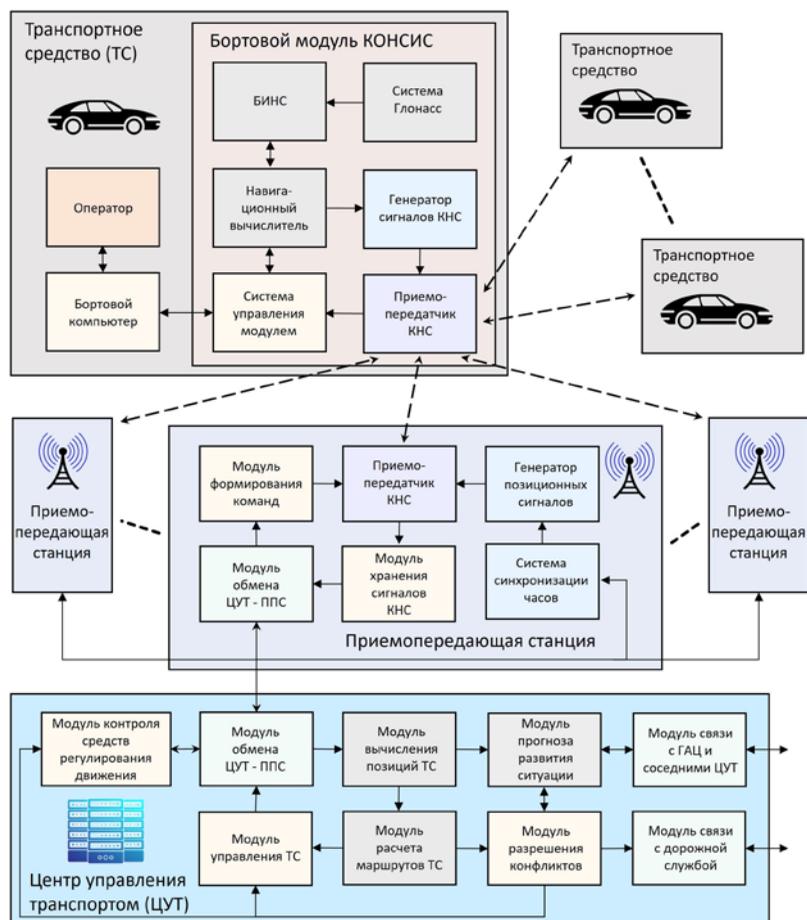


Рис. 4. Функциональная схема коммуникационно-навигационной системы

Реализация ЛСП на базе ППС позволяет осуществлять контроль работоспособности бортовых модулей. Благодаря дуплексному характеру связи не только ТС получает позиционные сигналы нескольких ППС, но и несколько ППС регистрируют сигнал КНС модуля ТС. Это обстоятельство позволяет ЦУТ тоже определять позицию ТС. Алгоритм верификации данных бортового модуля по времени получения сигнала КНС приемо-передатчиками станциями ЦУТ (сравнение расчетов позиции на борту ТС и в ЦУТ) приведен на рисунке 5.

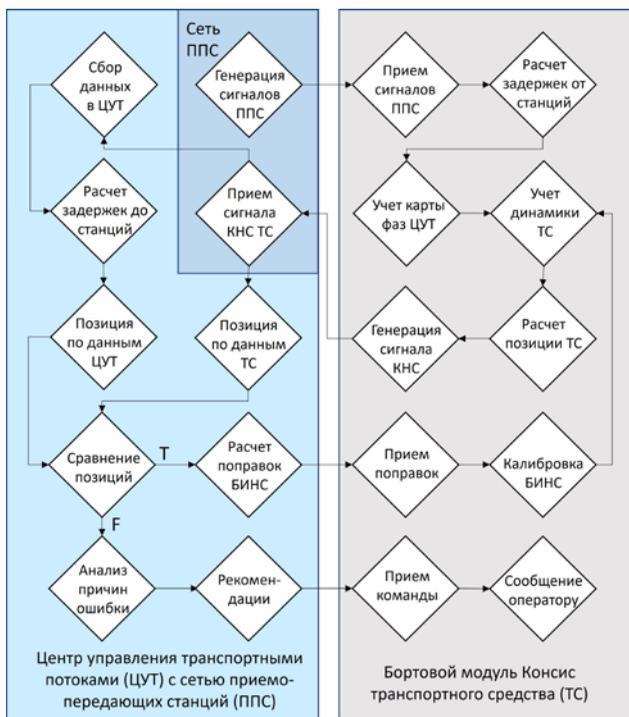


Рис. 5. Алгоритм верификации навигационных расчетов

Для решения ключевой задачи минимизации временных потерь в местах сужения дорог (уменьшения числа полос) необходимо обеспечить увеличение скорости потока, компенсирующее снижение сечения. В первую очередь это можно осуществлять за счет сокращения интервала движения, а при возможности и за счет увеличения скорости. В местах сужения дорог ЦУТ должен осуществлять управление очередностью перестроения и прохождения зоны потенциального затора.

На перекрестках ЦУТ играет роль виртуального регулировщика, который формирует транспортные пакеты сразу после прохождения предыдущего перекрестка. Режим движения рассчитывается так, чтобы к моменту включения разрешающего сигнала светофора передний фронт пакета достиг границ перекрестка на максимальной скорости. Внутри транспортного пакета автомобили располагаются по дальности движения без поворотов (т.е., кому дальше ехать прямо, выдвигаются вперед).

Если по техническим или иным причинам несколько автомобилей из пакета не в состоянии успеть пересечь перекресток по разрешающему сигналу, то команды управления ЦУТ замедляют их заранее. Дальнейший режим движения рассчитывается по алгоритму, описанному выше, но замедление осуществляется при возможности без полной остановки автомобиля.

Наличие бортовых модулей КНС позволяет существенно сократить дистанцию между ТС без снижения уровня безопасности благодаря надежному каналу информирования об экстренной ситуации. По оценкам прохождение перекрестка на максимальной скорости с уменьшением дистанции между автомобилями позволяет втрое увеличить его пропускную способность. Это практически снимает проблему регулируемого перекрестка как основного источника заторов, связанных с эффективным сужением дороги (не в пространстве, а во времени).

Внедрение радиочастотного информационного обмена и централизация управления создает инфраструктуру, необходимую для роботизации автотранспорта. Видеокамеры и лидары собирают большой объем информации, требующей многоэтапной обработки, что накладывает серьезные ограничения на оперативность автономного управления. Для движения в регламентированных условиях городской дорожной инфраструктуры при наличии радиочастотного управления видеопоток играет вспомогательную роль обнаружения нестандартных ситуаций.

**6. Информационный обмен как помощь при организации дорожного движения.** Внедрение технологий информационного обмена и централизация управления движением с его помощью существенно упрощает решение проблем пробок и эффективного использования магистралей. Между тем, достижение максимальной эффективности транспортных перевозок в городских условиях требует изменения подхода к организации движения. В частности, организация режима зеленой волны на подавляющем большинстве транспортных магистралей по простейшим оценочным расчетам позволяет увеличить среднюю скорость с 25-35 км/ч до 45-50 (ниже представлено моделирование режима).

Авторы изобретения [23] предлагают в городах формировать решетки основных дорог и организовывать синхронную работу светофоров на всех регулируемых перекрестках решетки. Для реализации режима «тотальной зеленой волны» половина светофоров на перекрестках работает в фазе А, а вторая половина – в противофазе

В (со сдвигом на 180 градусов). На пересечениях основных дорог фазы А и В чередуются.

На практике сеть существующих магистралей имеет большое количество дефектов прямоугольной решетки. В частности, к ним относятся элементы радиальной структуры и светофоры на перекрестках основных дорог со второстепенными. Данное обстоятельство снижает эффективность движения, но главным достоинством предложения является повышение предсказуемости работы средств регулирования.

В среднем период цикла сигналов у светофоров составляет 120 с. Если расстояние между перекрестками дорог с противофазными сигналами находится в диапазоне от 660 до 1320 м, рекомендуемая скорость ТС для реализации режима «тотальной зеленой волны» варьируется в диапазоне от 40 до 80 км/ч. На длинных участках дорог, где требуется скорость выше допустимой в городе, можно поставить ограждения.

На рисунке 6 проанализирована возможность формирования решетки транспортных магистралей и режима «тотальной зеленой волны» на примере северной части Санкт-Петербурга. В рассмотренной зоне площадью 130 кв. км проживает четверть населения города (более 1 млн. 300 тысяч жителей, приблизительно 500 тысяч машин). Общая длина полос дорог, выбранных в качестве основных транспортных магистралей, составляет 750 км, что подтверждает оценку, сделанную выше.



Рис. 6. Вариант формирования решетки транспортных магистралей с двухфазным режимом работы светофоров для организации «тотальной зеленой волны» на примере северных районов Санкт-Петербурга

В режиме, предложенном авторами изобретения [23], расстояние между центрами эллипсов разного цвета (зонами синхронно работающих светофоров) преодолевается за 1 минуту. Таким образом, по прямой в любом направлении на проезд 8-13 км тратится от 8 до 13 минут, что соответствует средней скорости в 60 км/ч. На каждом повороте затрачивается в среднем 1 дополнительная минута с соответствующим замедлением без полной остановки.

При средней дистанции поездки в 15 км с учетом выезда из улиц на магистральную решетку, поворотов и съезда на улицы время поездки сокращается до 18-20 минут (45-50 км/ч). На 750 км полос со средней скоростью 60 км/ч при времени реакции водителей 1 с помещаются 30 тысяч ТС (40 автомобилей на 1 км с интервалом в 25 м). С учетом длительности пикового периода в три часа это соответствует пропускной способности магистралей за указанное время в 300 тысяч ТС (более половины автомобилей, базирующихся в рассматриваемой зоне).

Централизация управления движением за счет информационного обмена на базе КНС позволяет обеспечить максимальные преимущества режима «тотальной зеленой волны». Даже при наличии дорожных указателей рекомендуемой скорости трудно ожидать от водителей точного соблюдения рекомендаций, а любое отклонение приводит к снижению пропускной способности перекрестков. Также идея чередования противофазных сигналов не решает проблему сужения дороги перед перекрестком из-за выстраивания очереди автомобилей, осуществляющих повороты (налево или направо) и разворот.

Команды ЦУТ осуществляют между перекрестками перестроение ТС по упомянутому выше принципу: т.е., кому дальше ехать по прямой, выдвигаются вперед. Сформированный транспортный пакет замыкают поворачивающие на ближайшем перекрестке. При этом появляется возможность при достаточной длине перекрестка использовать для поворотов три полосы (правая – направо, центральная – направо и налево, левая – налево и на разворот). ЦУТ имеет возможность менять длительность поворотной части зеленого сигнала в зависимости от числа машин, осуществляющих смену транспортного коридора.

Подводя итог изложенному выше, необходимо отметить техническую реализуемость концепции, поскольку все потребные технологии существуют и отработаны. В данной статье не рассматриваются экономические, социальные, экологические и другие,

не технические, аспекты внедрения технологий обмена навигационной информацией между ТС. Увеличение эффективности перевозок при одновременном повышении их безопасности определяет экономическую перспективность подхода. Оценка затрат оказывается гораздо ниже потенциальной выгоды, что обеспечивает инвестиционную привлекательность. Механизму внедрения технологии, экономическим, социальным и экологических эффектам будет посвящена отдельная статья.

**7. Заключение.** Основной причиной снижения эффективности дорожного движения в часы пик в городе является накопление ТС на магистралях из-за недостаточной пропускной способности магистралей. Расчеты показали, что доминирующим фактором, определяющим пропускную способность регулируемых перекрестков, является интервал между ТС. Сокращение дистанции между автомобилями требует автоматизации ее соблюдения за счет применения эффективной системы обмена информацией на базе широкополосной радиосвязи.

Разделение сигналов не по спектру, а во времени в этом случае позволяет сформировать коммуникационно-навигационную систему, сохраняющую работоспособность при высокой плотности ТС. На ее базе появляется возможность формировать центры управления транспортом для оперативного управления дорожным движением. Распределение приемо-передающих станций ЦУТ по рабочей зоне обеспечивает формирование локальной системы позиционирования, обеспечивающей оперативный контроль всех ТС с модулями КНС.

Сочетание технологий ИТС с рациональной организацией дорожного движения позволяет добиться положительного синергетического эффекта в вопросе повышения его эффективности. Формирование решетки транспортных магистралей в городах с синхронизацией всех светофоров на ней с чередованием противофазных режимов позволит увеличить среднюю скорость движения до значений, близких к максимально разрешенным. Экономический, социальный и экологический эффект от такого повышения эффективности оценивается в несколько единиц процентов ВВП мира, их более подробному анализу будет посвящена следующая статья.

### **Литература**

1. Babu A.M. Study of Urban Cities Traffic Problems Due to Delay and Overcrowding // International Journal of Latest Engineering and Management Research. 2017. vol. 02, no. 11. pp. 01-08.

2. Parupalli S.C. Trends in global urbanization // *Engineering Review*. 2022. URL: [engmag.in/trends-in-global-urbanization](https://engmag.in/trends-in-global-urbanization) (дата обращения: 17.09.2022).
3. Cheevarunothai P., Kaewpikul R. Empirical Study on Maximum Traffic Throughputs at Intersections // *MATEC Web of Conferences*. 2019. vol. 259. art. no.02008.
4. Dhamaniya A., Chandra S. Influence of Operating Speed on Capacity of Urban Arterial Midblock Sections // *International Journal of Civil Engineering*. 2017. vol. 15, pp. 1053–1062.
5. Sardari R., Hamidi S., Pouladi R. Effects of Traffic Congestion on Vehicle Miles Traveled // *Transportation Research Record*. 2018. vol. 2672(47). pp. 92-102.
6. Zhenga Z., Wanga Z., Zhub L., et al. Determinants of the congestion caused by a traffic accident in urban road networks // *Accident Analysis & Prevention*. 2020. vol. 136, art. no. 105327.
7. Retallack A.E., Ostendorf B., Current Understanding of the Effects of Congestion on Traffic Accidents // *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019. vol. 16. iss. 18. art. no. 3400.
8. Sharifi, A. Urban form resilience: A meso-scale analysis // *Cities*. 2019. vol. 93, pp. 238-252.
9. Wijnen W., Weijermars W., Vanden Berghe W., et al. Crash cost estimates for European countries // Report “Deliverable 3.2 of the H2020 project SafetyCube”. 2017. URL: [swov.nl/nl/publicatie/crash-cost-estimates-european-countries](https://swov.nl/nl/publicatie/crash-cost-estimates-european-countries) (дата обращения: 17.09.2022).
10. Suwa A., Iguchi M. Sustainability and the Automobile Industry in Asia: Policy and Governance // *Routledge*. 2020. 178 p.
11. Черемисина Н.В., Черемисина Т.Н., Гришко Ю.С. Дорожно-транспортные происшествия в России: экономико-статистический анализ // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2020. № 3 (78). С. 113-121.
12. Sun C., Pei X., Hao J., Wang Y., et al. Role of road network features in the evaluation of incident impacts on urban traffic mobility // *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018. vol. 117. pp. 101-116.
13. Koźlak A., Wach D. Causes of traffic congestion in urban areas. Case of Poland // *SHS Web of Conferences*. 2018. vol. 57, art. no. 01019.
14. Song J., Zhao C., Zhong S., et al. Mapping spatiotemporal patterns and detecting the factors of traffic congestion with multi-source data fusion and mining techniques // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2019. vol. 77. art. no. 101364.
15. He F., Yan X., Liu Y., et al. A traffic congestion assessment method for urban road networks based on speed performance index // *Procedia Engineering*. 2016. vol. 137, pp. 425-433.
16. Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга. URL: [www.gov.spb.ru](http://www.gov.spb.ru) (дата обращения: 17.09.2022).
17. Toma S. Take your time for the two-second rule: This is what it means and how it's done // *Autoevolution*, 2022. Apr 16. URL: [www.autoevolution.com/news/take-your-time-for-the-two-second-rule-this-is-what-it-means-and-how-it-s-done-186579.html](http://www.autoevolution.com/news/take-your-time-for-the-two-second-rule-this-is-what-it-means-and-how-it-s-done-186579.html) (дата обращения: 17.09.2022).
18. Stählin U., Menzel M.Dr., Baier R. Communication device for vehicle for wireless transmission of vehicle-relevant data to another vehicle or to infrastructure, has communication unit for transmitting vehicle-relevant data to other vehicle. Patent DE102008009330A1. Germany. 2008.
19. Hee B.L. Navigation system and method for exchange mutual location information using messenger. Patent CN101910797A, China, 2007.
20. Kenney J.B. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States // *Proceedings of the IEEE*. 2011. vol. 99. no. 7. pp. 1162-1182.

21. Грязнов Н.А. Коммуникационно-навигационная система для управления транспортными потоками. Патент на изобретение № 2770938. Россия. 2022.
22. Djuknic G.M., Richton R.E. Geolocation and Assisted GPS // Computer. 2001. pp. 123-125.
23. Huixi Z., Yuhuai W., Kang A. et al. Urban road traffic control signal generation method. Patent CN113763729A. China. 2021.

**Грязнов Николай Анатольевич** — канд. физ.-мат. наук, директор, институт цифровой безопасности, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Область научных интересов: робототехника, автоматизация технологических процессов, лазерные системы, сбор и обработка информации, сенсорное оснащение роботов, подводные и космические роботизированные системы, навигация и связь. Число научных публикаций — 110. gna@corp.smtu.ru; Лоцманская улица, 3, 190121, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)495-2648.

N. GRYAZNOV  
**NAVIGATION DATA EXCHANGE FOR TRAFFIC CONTROL**

*Gryaznov N. Navigation Data Exchange for Traffic Control.*

**Abstract.** An increase in the number of cars is higher than rates of transport infrastructure development, resulting in a reduction of cargo and passenger transportation efficiency in city conditions. Simulation of flow irregularity in time (peak hour) shows the key role of a car motion interval as a factor of overcoming accumulation at average speed reduction in conditions of highly loaded roads. To reduce the effective time of driver reaction, defining the least distance between cars, it is necessary to minimize the influence of human factors. Automation of the process (unmanned control) requires an effective exchange of navigation and route data between traffic participants. A summary of requirements for such an information exchange system defines the priority of the suggested communication and navigation system (CNS) on the base of radio broadcast communication. Its application gives an opportunity to rise simultaneously traffic safety and efficiency. An increase in neighbor driver action predictability leads to traffic safety ensuring. The exchange of data with traffic control centers (TCC) enables the centralization of motion regulation. A distributed network of transceiver stations forms a local positioning system based on trilateration principles. Algorithms of onboard positioning result verification and automatic resolution of communication conflicts ensure high reliability of CNS functioning. Refusal from point-to-point communication principles allows it to operate even in conditions of high car density up to several thousand per square kilometer. In cooperation with advanced technologies of traffic organization (formation of city highway grid and “total green wave” mode), CNS and TCC are capable of rising the average speed in city conditions higher than 45 km/hour. The aggregate economy of expense on last mile transportation because of the suggested innovations is to be at the level of several GDP percent due to a decrease in accidents and congestion even without accounting for social and ecological effects.

**Keywords:** communication and navigation system, broadcast communication, local positioning system, transport control center, transport, control center.

### References

1. Babu A.M. Study of Urban Cities Traffic Problems Due to Delay and Overcrowding. *International Journal of Latest Engineering and Management Research*. 2017. vol. 02, no. 11, pp. 01-08.
2. Parupalli S.C. Trends in global urbanization. *Engineering Review*. 2022. URL: [engmag.in/trends-in-global-urbanization](http://engmag.in/trends-in-global-urbanization) (дата обращения: 17.09.2022).
3. Cheevarunothai P., Kaewpikul R. Empirical Study on Maximum Traffic Throughputs at Intersections. *MATEC Web of Conferences*. 2019. vol. 259. art. no.02008.
4. Dhamaniya A., Chandra S. Influence of Operating Speed on Capacity of Urban Arterial Midblock Sections. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. vol. 15, pp. 1053–1062.
5. Sardari R., Hamidi S., Pouladi R. Effects of Traffic Congestion on Vehicle Miles Traveled. *Transportation Research Record*. 2018. vol. 2672(47). pp. 92-102.
6. Zhenga Z., Wanga Z., Zhub L., et al. Determinants of the congestion caused by a traffic accident in urban road networks. *Accident Analysis & Prevention*. 2020. vol. 136, art. no. 105327.

7. Retallack A.E., Ostendorf B., Current Understanding of the Effects of Congestion on Traffic Accidents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019. vol. 16. iss. 18. art. no. 3400.
8. Sharifi, A. Urban form resilience: A meso-scale analysis. *Cities*. 2019. vol. 93, pp. 238-252.
9. Wijnen W., Weijermars W., Vanden Berghe W., et al. Crash cost estimates for European countries. Report "Deliverable 3.2 of the H2020 project SafetyCube". 2017. Available at: [swov.nl/nl/publicatie/crash-cost-estimates-european-countries](http://swov.nl/nl/publicatie/crash-cost-estimates-european-countries) (accessed: 17.09.2022).
10. Suwa A., Iguchi M. Sustainability and the Automobile Industry in Asia: Policy and Governance. Routledge. 2020. 178 pages.
11. Cheremisina N.V., Cheremisina T.N., Grishko Yu.S. [Road transport accidents in Russia: economical statistical analysis]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta [North-Caucasus federal university bulletin]*. 2020. no. 3 (78). pp. 113-121. (In Russ.).
12. Sun C., Pei X., Hao J., Wang Y., et al. Role of road network features in the evaluation of incident impacts on urban traffic mobility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018. vol. 117. pp. 101-116.
13. Kozlak A., Wach D. Causes of traffic congestion in urban areas. Case of Poland. *SHS Web of Conferences*. 2018. vol. 57, art. no. 01019.
14. Song J., Zhao C., Zhong S., et al. Mapping spatiotemporal patterns and detecting the factors of traffic congestion with multi-source data fusion and mining techniques. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2019. vol. 77. art. no. 101364.
15. He F., Yan X., Liu Y., et al. A traffic congestion assessment method for urban road networks based on speed performance index. *Procedia Engineering*. 2016. vol. 137, pp. 425-433.
16. Oficial'nyi sait Administratsii Sankt-Peterburga [Official site of St. Petersburg Administration]. Available at: [www.gov.spb.ru](http://www.gov.spb.ru) (accessed: 17.09.2022). (In Russ.).
17. Toma S. Take your time for the two-second rule: This is what it means and how it's done. *Autoevolution*, 2022. Apr 16. Available at: [www.autoevolution.com/news/take-your-time-for-the-two-second-rule-this-is-what-it-means-and-how-it-s-done-186579.html](http://www.autoevolution.com/news/take-your-time-for-the-two-second-rule-this-is-what-it-means-and-how-it-s-done-186579.html) (accessed: 17.09.2022).
18. Stählin U., Menzel M.Dr., Baier R. Communication device for vehicle for wireless transmission of vehicle-relevant data to another vehicle or to infrastructure, has communication unit for transmitting vehicle-relevant data to other vehicle. Patent DE102008009330A1. Germany. 2008.
19. Hee B.L. Navigation system and method for exchange mutual location information using messenger. Patent CN101910797A, China, 2007.
20. Kenney J.B. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States. *Proceedings of the IEEE*. 2011. vol. 99. no. 7. pp. 1162-1182.
21. Gryaznov N.A. Kommunikatsionno-navigatsionnaya Sistema dlya upravleniya transportnymi potokami [Communication and navigation system for traffic control]. Patent RU2770938C1. Russia. 2022. (In Russ.).
22. Djuknic G.M., Richton R.E. Geolocation and Assisted GPS. *Computer*. 2001. pp. 123-125.
23. Huixi Z., Yuhuai W., Kang A. et al. Urban road traffic control signal generation method. Patent CN113763729A. China. 2021.

**Gryaznov Nikolay** — Ph.D., Director, Digital safety institute, State Marine Technical University. Research interests: robotics, automation of technological processes, laser systems, data gathering and processing, robot sensorics, undersea and space robotic systems, navigation and communication. The number of publications — 110. [gna@corp.smtu.ru](mailto:gna@corp.smtu.ru); 3, Lotsmanskaya St., 190121, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)495-2648.