

DOI:
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ В
ПРОХОЖДЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ЧЕРЕЗ РЕГУЛИРУЕМЫЕ
ПЕРЕКРЕСТКИ**

Валуев А.М.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Бардина, д. 4
valuev.online@gmail.com*

Аннотация: Рассматривается проблема моделирования транспортных потоков при прохождении регулируемых перекрестков с учетом вероятностного характера транспортного процесса, причиной которого являются случайные отклонения статических и динамических параметров транспортных средств (ТС) и управления ими от средних показателей на коротких последовательностях ТС, проходящих по определенной трассе за фазу светофорного цикла. Кроме неоднородности транспортных потоков в отношении характеристик ТС и их водителей, учитывается разделение потоков по направлениям, осуществляемое непосредственно при прохождении перекрестка и также носящее случайный характер, и псевдослучайные факторы, действующие подобно стохастическим, — пульсация интенсивностей входящих потоков в силу светофорного регулирования на входных дорогах при продолжительностях светофорных циклов, отличных от продолжительности цикла на самом перекрестке, и ограничения на выезд, вызываемые асинхронным регулированием на исходящих дорогах. Моделирование перечисленных факторов осуществляется при представлении транспортных процессов на перекрестках и в их окрестностях в классе моделей, обобщающем ранее введенное представление транспортных потоков как динамических систем с гибридной, дискретно-непрерывной динамикой. Вводится общая модель в форме стохастически возмущенной гибридной системы, описывающей возникновение, исчезновение, качественную и количественную динамику кластеров — цепочек ТС на трассах между характерными точками старта, остановки и изменения характера движения. Рассматриваются эмпирические источники и формы представления вероятностных характеристик таких объектов и их динамики. Предлагаются способы расчета реализаций вероятностного транспортного процесса на перекрестке, представлены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, организация дорожного движения, схема пофазного разъезда, безопасность участка дорожной сети, мониторинг, информирование оптимизация, микроскопические модели транспортных потоков, вычислительные эксперименты.

Введение¹

Вероятностные модели автотранспортных потоков имеют широкое распространение [Буслаев и Ко 2003, Афанасьева и Булинская, Бланк, Клёнов новейшее], в т.ч. и для моделирования потоков на перекрестках [Живоглядов]. Сами по себе вероятностные представления транспортных процессов естественны, так как потоки транспортных средств (ТС) в городской дорожной сети (ГДС) или на междугородних автомагистралях представляют собой совокупность передвижений случайной смеси отдельных ТС или, точнее сказать, транспортных единиц (ТЕ) в составе ТС и его водителя (с индивидуальными статическими и динамическими характеристиками автомобиля и вождения). Эта неоднородность может нивелироваться на длинных однородных участках магистралей, но крайне существенна для регулируемых перекрестков. На последних осреднение индивидуальных характеристик движения ТЕ не вполне соответствует характеру транспортного потока, поскольку за одну фазу зеленого света по каждой трассе через перекресток проходит лишь короткая цепочка из 5–20 разнородных ТЕ, что приводит к колебаниям средних показателей трафика за отдельные светофорные циклы. Вместе с тем, введение в модель вероятностных взаимосвязей зачастую производится не с целью отразить и спрогнозировать действительный характер изменчивости трафика во времени, а лишь для преодоления грубости принятой в модели пространственно-временной дискретизации трафика, что особенно характерно для моделей на базе клеточных автоматов.

Типичные способы вероятностного представления трафика в терминах случайных потоков не вполне отражают наличие нескольких качественно различных состояний транспортного потока (теория трех фаз Кернера-Кленова [], подкрепленная огромным массивом наблюдений на автострадах Германии). Для регулируемых перекрестков сочетание детерминированной и стохастической изменчивости носит еще более сложный характер. В частности, поступление транспортных потоков на

¹ Работа выполнена в соответствии с программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт №27, в части «Динамика транспортных потоков, научные основы проектирования оптимальных дорожных сетей».

входы перекрестка может быть приближенно представлено в виде стационарного случайного потока лишь в случае однородных входных дорог, не содержащих регулируемых перекрестков на длинных участках перед рассматриваемым перекрестком. Такая ситуация, однако, совершенно не характерна для ГДС. В действительности, перекрестки размещаются достаточно часто даже в отсутствие пересечений основных дорог (что показывает, в частности, пример Ленинского проспекта в Москве). Действие светофорного регулирования на входных дорогах приводит к закономерному волнообразному изменению входных потоков, а асинхронность регулирования на смежных перекрестках дополнительно приводит к псевдослучайной изменчивости трафика. Кроме того, ТЕ имеют возможность выбора между несколькими разрешенными направлениями движения через перекресток и далее. Пропорции распределения входящих потоков по направлениям дальнейшего движения устойчивы в течение временных интервалов, измеряемых часами, но реализуются они в виде выбора направления каждой отдельной транспортной единицей, который с позиции внешнего наблюдателя является случайным.

Характер динамики широкого круга транспортных процессов на автодорогах в детерминированном приближении представлен автором в работе ВСПУ2014 и конкретизирован в моделях движения на многополосной дороге ИиС2018 и через перекресток ? Введенные модели относятся к классу гибридных динамических систем — в терминах автора, событийно-переключаемых процессов (СПП). В настоящей работе вероятностная модель ТП на перекрестке представлена в виде стохастически возмущенного СПП.

При разработке предлагаемой модели имелась в виду определенная цель ее применения, родственная цели применения моделей систем массового обслуживания, а именно — прогноз пропускной способности перекрестка при определенном распределении входящих потоков по направлениям его прохождения и определенных параметрах светофорного регулирования. Как и в традиционных СМО, время обслуживания и длины очередей перед обслуживающими приборами колеблются во времени случайным образом, так и в гораздо более сложной СМО, которой является регулируемый перекресток, временная задержка на прохождение перекрестка и длины стоящих и движущихся очередей испытывают случайные колебания. Эмпирические данные, в т.ч. и личные наблюдения автора, показывают не только реальность, но и большой размах таких колебаний, начиная с неравномерного поступления ТС на входы перекрестка.

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода должно позволить выполнять оптимизацию этих параметров. Предлагаемое решение для последнего на основе детерминированной модели было ранее предложено (СоловьевВалуев2019-2020); сопоставление результатов обоих подходов должно показать область целесообразного применения вероятностного подхода. Это, в конечном счете, должно способствовать повышению эффективности светофорного регулирования, а тем самым — и эффективность использования ГДС в целом, повышению удовлетворения потребностей в передвижениях и перевозках населения и бизнеса.

1 Структура ГДС в области регулируемого перекрестка и организация движения на нем

Прежде, чем вводить модель трафика на перекрестке, необходимо охарактеризовать перекресток как участок ГДС — носитель транспортных потоков, организацию движения на нем. Городская дорожная сеть (ГДС) — это совокупность дорог (улиц) и их сопряжений. С точки зрения прохождения транспортных потоков перекресток рассматривается как система разрешенных трасс — осевых линий дорожных полос. Структура перекрестка определяется набором этих трасс, их связью с входными и выходными дорогами и взаимным расположением. У трасс имеются характерные точки — начало, конец и точки, в которых трассы пересекаются, соединяются или разделяются. В отношении динамики транспортных средств точки пересечения, слияния и разделения являются особыми точками (ОТ) и соответственно обозначаются здесь ОТП, ОТС, ОТР; с позиции организации дорожного движения это *конфликтные точки*. Начальная точка трассы на перекрестке (вход перекрестка) есть точка пересечения оси полосы со стоп-линией; такая точка называется далее входом перекрестка. Пересечение трассы с внутренней стоп-линией также является особой точкой. Концом трассы — выходом перекрестка — следует считать точку за последней ОТ трассы, расположенную от нее на таком расстоянии, при котором любое транспортное средство, передний бампер которого достиг этой ОТ, не препятствует прохождению ОТ в других направлениях. Транспортное средство (ТС), проехавшее последнюю конфликтную точку и удалившееся от нее (передним бампером) на расстояние, позволяющее другим транспортным средствам проезжать ее, завершило проезд перекрестка и может считаться выехавшим с него. Это заведомо безопасное расстояние складывается из максимальной

длины транспортного средства, и максимального отклонения от конфликтной точки корпуса ТС, проходящего ее в другом направлении (можно иллюстрировать рисунком). Точка на трассе на определенном таким способом безопасном расстоянии от конфликтной точки считается концом трассы на перекрестке — выходом перекрестка. Таким образом, определяются остальные ОТ на трассе ОТ входа (ОТВх), ОТ выхода (ОТВых) и ОТ внутренней остановки на ВСЛ — ОТВО.

В простом перекрестке транспортный поток по каждому возможному направлению проходит от соответствующей стоп-линии до выхода из области перекрестка за одну светофорную фазу, без промежуточных остановок, не считая задержек в точках слияния потоков при их наличии. Каждое направление регулируется одним светофором, светофорные устройства действуют согласованно, реализуя фазы одного светофорного цикла. Пересечение направлений на любой фазе исключается.

ОТП являются лишь потенциальными точками пересечения, так как организация светофорного регулирования предотвращает возможность проезда какой-либо точки по пересекающимся направлениям на любой фазе светофорного цикла. Тем не менее, поскольку проезд через перекресток цепочки ТС, начавшийся в течение зеленой фазы, требует времени, такая точка становится свободной для проезда в другом направлении не с начала соответствующей зеленой фазы, а лишь с момента, когда все ТС, двигавшиеся в предыдущем направлении, прошли ее. В связи с этим такая точка пересечения может быть назначена границей перекрестка — точкой выхода из него — поскольку движение за ее пределами уже не влияет явным образом на движение через перекресток.

2 Транспортный поток через перекресток как событийно-переключаемый процесс

Микромоделирование транспортных процессов предполагает описание движения каждого отдельного транспортного средства в их взаимосвязи. Наиболее естественным и достаточно точным при этом является описание движения автомобиля как материальной точки, подчиняющейся законам ньютоновой динамики. При этом размеры транспортных средств учитываются, но только как параметры взаимосвязей между положениями последовательных ТС (в общепринятой терминологии - лидера и преследователя), определяемых требованиями безопасности. Целостное представление автотранспортного потока как динамической системы было введено сравнительно недавно [Труды МФТИ2013], но основной элемент «микроскопических» моделей — представление движения преследователя в зависимости от движения лидера — вводилось разными способами и изучалось в течение ряда десятилетий; в монографии [Treiber2013] сформулирована его общая форма/ В таких моделях позиционным управлением преследователя служит ускорение, а его выбор определяется, в общем случае, в зависимости от скорости и ускорения обоих ТС.

Полагая, что условия безопасности (по отношению к лидеру, а при перестроении между полосами - и по отношению к автомобилям на новой полосе, между которыми встраивается рассматриваемый автомобиль) являются неудерживающими связями, имеющими форму нестрогого неравенства в объединенном фазовом пространстве взаимодействующих ТС, к этим связям добавляем в той же форме дополнительный ряд условий: ограничения на скорость на повороте по условиям безопасности и общее ограничение на скорость, определяемое ОДД, а также требование остановиться перед стоп-линией на красный свет. Из перечисленных все, кроме последнего, выражаются неравенствами на текущие значения фазовых переменных затрагиваемых ТС. Последнее также может быть выражено в такой форме, будучи сведено к следующему условию: ТЕ имеет скорость, позволяющую при текущем положении остановиться к моменту достижения стоп-линии. Как видно, последнее ограничение действует не всегда, а в зависимости от переключения светофора; дискретная динамика светофорного регулирования, следовательно, также включается в модель ТП на перекрестке как динамической системы.

Логично предположить — и это предположение в целом подтверждается данными наблюдений, что выбор управления изменяется, как только одно из ограничений-неравенств обращается в равенство (кроме автора, такой позиции придерживается, в частности, В.М. Еремин[]). Особенно это очевидно для случая достижения максимальной разрешенной скорости, после чего ускорение обращается в нуль. Но и самый важный переход, от свободного движения отдельного ТС к связанному, т.е. режиму поддержания близкого к минимальному безопасного расстояния до лидера, имеет место в подавляющем большинстве соответствующих случаев. Таким образом, управление ускорением в штатной ситуации, т.е. при отсутствии опасного сближения с другим ТС или препятствием, переключается между несколькими режимами: нормального разгона, равномерного движения, преследования лидера на минимальном безопасном расстоянии, нормального торможения и неподвижности. Общая форма детерминированных моделей транспортных потоков в форме

событийно-переключаемых процессов (класс гибридных динамических систем) предложена автором в [ВСПУ-2014] и конкретизирована для разных случаев, включая прохождение перекрестка [Валуев&Соловьев]. Что касается аварийных ситуаций, не завершающихся их быстрым локальным разрешением, весь международный опыт моделирования автотранспортных потоков показывает, что они не могут воспроизводиться общей моделью и учитываются иными способами [SSM]; все известные нам модели автотранспортных потоков суть *модели безопасного трафика*.

Кроме описанной логики смены режима движения отдельных ТС в микроскопической модели трафика на ограниченном участке ГДС (в т.ч. на перекрестке вместе с его ближайшими окрестностями) необходимо включать и условия изменения набора ТС, движущихся в пределах этого участка, а также на его отдельных сегментах, границами которого служат стоп-линии и точки разделения, слияния и пересечения потоков (последние благодаря светофорному регулированию являются лишь потенциальными точками пересечения, но могут играть, как было показано выше, роль выходов перекрестка). Все эти условия выражаются однотипно, как условия достижения передним бампером автомобиля определенной точки на предписанной трассе движения; для прохождения точки слияния к ним добавляется условие ее освобождения предыдущим ТС; это условие, однако, имеет такую же форму.

Общая формулировка модели в случае перекрестка.

В основе моделей ТП в форме динамических систем лежит один базовый элемент: описание движение пары движущихся друг за другом автомобилей («лидер—преследователь»), точнее говоря, выбор ускорения преследователем в зависимости от их взаиморасположения и скоростей (возможно, только скорости преследователя). Однако общих моделей ТП, объединяющих такие «модели следования за лидером» в единое целое, до недавних лет не существовало, а различные частные модели относятся лишь к элементарным случаям типа движения по неограниченной однополосной дороге или по кольцу. По-видимому, впервые целостная модель (для ограниченного участка однополосной дороги), описываемая дифференциально-функциональными уравнениями, с наложенными на них граничными и начальными условиями, была введена в [2] на основе модели следования за лидером частного вида. В работе [3] был предложен общий формализм модели ТП, в котором функциональные связи представлены как закон выбора управления в зависимости от текущего состояния наблюдения ряда условий безопасности, конкретное выражение которых может быть разным. Этот выбор управления по ускорению в виде зависимости от координат, скоростей и, возможно, ускорений и временных параметров светофорного регулирования, оказывается разным в зависимости от текущего режима управления — дискретной переменной, меняющей значение при достижении некоторых границ в объединенном фазовом пространстве лидера и преследователя. Для движения вдоль прямолинейной трассы со скоростным ограничением выделяются режимы разгона (1), равномерного движения с максимальной (или оптимальной для конкретного АТС) скоростью (2), поддержания минимального безопасного расстояния до лидера (3), неподвижности при неподвижном лидере (4) и — только для переднего автомобиля на трассе — торможения перед красным сигналом светофора (5). С учетом кривизны трассы выделяется также режим поддержания максимальной безопасной скорости на повороте (6).

Обозначим текущее положение АТС с номером i на трассе с номером $x_i(t)$, номер лидера для i -го АТС в момент времени t — $L(i,t)$ и текущий номер трассы — $r(i,t)$. В силу сказанного закон управления при режиме с соответствующим номером j выражается зависимостью:

$$(1) U_i(\Delta x_i(t), \dot{x}_{L(i,t)}(t), \dot{x}_i(t), \ddot{x}_{L(i,t)}(t), j),$$

где $\Delta x_i(t)$ — расстояние между задним бампером лидера и передним бампером преследователя, равное (в предположении, что лидер и преследователь находятся на одной и той же трассе) $x_{L(i,t)}(t) - x_i(t) - l_{L(i,t)}$ (здесь — длина АТС-лидера). При текущем режиме $j(i, t)$ движение i -го АТС подчиняется уравнениям

$$(2) \ddot{x}_i = U_i(\Delta x_i(t), \dot{x}_{L(i,t)}(t), \dot{x}_i(t), \ddot{x}_{L(i,t)}(t), j(i, t))$$

и должно удовлетворять ограничениям на скорость

$$(3) \dot{x}_i(t) \leq v_{max}(x_i(t))'$$

Форма и параметры зависимостей (1) определяется ограничениями

$$(4) -b_{norm\ max\ i} \leq \ddot{x}_i \leq a_{norm\ max\ i}$$

(при $j=1,2,4,5$ соответственно $U_i = a_{\text{norm max } i}, 0, 0, -b_{\text{norm max } i}$) и законом безопасной дистанции, который также должен постоянно выполняться:

$$(5) \Delta x_{01} \leq S_{SAFE}(v_0, v_1);$$

здесь Δx_{01} — расстояние между задним бампером лидера и передним бампером преследователя, v_0 и v_1 — соответственно скорость лидера и преследователя. Из (5) для U_i при $j=3$ вытекает формула

$$(6) U = \frac{(v_0 - v_1) - \dot{a}_0 \partial S_{SAFE}(v_0, v_1) / \partial v_0}{\partial S_{SAFE}(v_0, v_1) / \partial v_1}$$

Что касается смены значения $j(i, t)$ соответственно на 2, 3, 4, они происходят в моменты обращения в равенство неравенств (3), (5), обращения в ноль скорости преследователя. Условие, подобное обращению в равенство (5), определяет для первого АТС в цепочке (при красном свете) момент, начиная с которого $j(i, t) = 5$, а с момента включения зеленого света $j(i, t) = 1$ для лидера цепочки и $j(i, t) = 3$ для остальных стоящих неподвижно АТС в цепочке.

Для полноты описания ТП в пределах одной трассы как динамической системы, кроме очевидных начальных условий — известных положений и скоростей всех АТС в пределах трассы, — требуется определить условия появления АТС в ее начале и выхода в конце, но их уместно рассматривать здесь уже для всего перекрестка. Для моделирования потоков через перекресток нужно также задать направление движение на нем (в виде указания целевого выхода) для каждого АТС, находящегося в пределах перекрестка или во входных очередях.

Сама по себе логика смены качественных состояний транспортного процесса и его отдельных элементов, основными из которых служат ТЕ, не зависит от того, описываются ли соотношения, определяющие наступление событий и количественную динамику, детерминированными или случайными зависимостями. По нашему убеждению, из нее должна исходить форма вероятностных моделей трафика так же, как и детерминированных. Это, кстати, относится не только к микроскопическим, но и к мезоскопическим моделям, в которых переменные описывают не отдельные ТС, а их группы. Группы ТС, движущиеся в определенном смысле как единое целое — цепочки ТС, обычно называемые кластерами, особенно характерны именно для движения через перекресток. Таким кластером является неподвижная очередь на одной дорожной полосе перед стоп-линией, а ее динамика выражается в присоединении к ее хвосту новых ТС. После включения зеленого света очередь приходит в движение, но не распадается — во всяком случае, до достижения ОТР или ОТР, на исходящих трассах которых формируются новые кластеры.

3. Случайные факторы в модели трафика на перекрестке в форме событийно-переключаемого процесса

Источниками случайного характера транспортного процесса на участке ГДС являются: 1) случайный (или псевдослучайный) характер поступления ТС на входы участка; 2) индивидуальные статические и динамические характеристики отдельных ТС, участвующих в моделируемых ТП, и их вождения; 3) вероятностный характер принятия решений водителями (например, в отношении смены полосы; для перекрестка существенной роли не играет); 4) случайные ошибки оценивания параметров локальной транспортной обстановки, в т.ч. расстояния до лидера, координат и скоростей лидера и преследователя. Заметим, что первый и второй источник имеют место не только для ТС, управляемых водителями, но и, в перспективе, для автопилотируемых ТС; в последнем случае роль индивидуального стиля вождения играет алгоритм управления, заложенный в определенную модель автоматического ТС.

В настоящее время, однако, нет возможности на уровне эмпирических данных достоверно отделить случайные отклонения в оценивании водителем безопасного расстояния в конкретный момент времени от его субъективного восприятия безопасного расстояния (в зависимости от скоростей автомобиля-преследователя и лидера) при использовании им определенного ТС с известными характеристиками. Кроме того, встречающиеся отклонения от тренда в обе стороны даже на сравнительно коротких цепочках ТС в известной степени нивелируются и во всяком случае, играют второстепенную роль. В противоположность этим незначительным отклонениям, сам факт наличия в цепочке одного длинного и маломобильного транспортного средства или малоопытного, чрезмерно осторожного водителя существенно изменяет ее динамику.

В то же время наблюдение за транспортным потоком позволяет выделить набор реально встречающихся стилей вождения, выражаемых характерными зависимостями фактического расстояния преследования (в плотном потоке) от скорости транспортной единицы, а также установить

частоты, с которыми они встречаются [Яшина и Ко]. Заметим, что в плотном потоке скорости последовательных ТС быстро выравниваются и нет необходимости отдельно фиксировать скорости лидера и преследователя. Дальнейшая обработка данных наблюдения позволит устанавливать зависимости частот стилей вождения от размеров транспортных средств. Другие параметры стилей вождения связаны с конкуренцией за прохождение ОТС.

Для предлагаемого варианта реализации вероятностного подхода случайный характер прохождения автотранспорта через перекресток определяется случайным в количественном и качественном отношении поступлением транспортных средств на входы перекрестка. Во входном потоке, во-первых, случайно распределены временные промежутки между прибытием последовательных ТС (причем, наряду с этим, могут наблюдаться сравнительно длительные промежутки без прибывающих ТС из-за светофорного регулирования на входящих дорогах). Во-вторых, прибывающие транспортные единицы случайным образом распределены по своим размерам и типам вождения. Если входная дорога является многополосной, то распределение прибывающих ТС по полосам также является случайным. Наконец, если с определенной полосы допускается проезд перекрестка по двум (а иногда и трем) направлениям, то направление движения каждого ТС также является дискретной случайной величиной.

Поступающие потоки на входных дорогах будем рассматривать не как последовательности отдельных ТС. Такое представление годится только в случае низкоинтенсивных потоков, притом не затронутых регулированием на значительных расстояниях от рассматриваемого перекрестка; но такой случай не создает проблем и для прохождения перекрестка. В общем случае входной поток содержит, кроме свободно передвигающихся ТС, цепочки ТС (кластеры), движущиеся как одно целое, на минимальном расстоянии безопасного преследования друг от друга (однако это расстояние даже при равномерном движении неодинаково, поскольку субъективно трактуется разными водителями). Свободно передвигающихся ТС, если они вообще наблюдаются, располагаются между этими кластерами. Причиной их появления в потоке служит въезд на основную (для перекрестка — входную) дорогу с мест парковки, внутриквартальных территорий и второстепенных боковых дорог. При определенном соотношении между длительности красной фазы (по отношению к движению по основной дороге) на предыдущем перекрестке, расстоянием между этими перекрестками и скоростном режиме входной дороги между поступлением последовательных кластеров циклически образуются временные промежутки.

Литература

1. Europe: Atlas routier et touristique. Paris: Michelin – Editions des Voyages, 2006.– 234 p. ISBN 978-2-06-711233-9.
2. АвтоАтлас Москвы с дорожными знаками средний. – Вып. 13. – М.: ООО «АГТ Геоцентр», 2013. – 104 с. ISBN 5-94050-003-Х.
3. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Оптимизация структуры и параметров светофорного цикла в целях повышения безопасности // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2018): труды Одиннадцатой междунар. конфер., 1–3 окт. 2018 г. Москва: в 3 т. М.: ИПУ РАН, 2018. – Т. 2. – С. 143–148.
4. *Самутина А.В.* Мультикоптеры как способ решения проблем городской инфраструктуры // Города и местные сообщества. 2017. Т. 1. – С. 140–152.
5. *Ермаченков Д.И., Фазли Т.Г., Петренко Е.О.* Мониторинг и контроль состояния объекта квадрокоптером с воздуха. Разработка управляющей платы // Автоматизация и управление в машиностроении. 2016. № 2 (24). – С. 58–62.
6. *Валуев А.М., Соловьев А.А.* Моделирование зависимостей, характеризующих динамику автотранспортных потоков // Информатизация и связь. – 2018. – №2. – С. 106–113.
7. *Valuev A.M.* Modeling of the Transport Flow Through Crossroads with Merging and Divergence Points // Proceedings of 2018 Eleventh International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD). Russia, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, October 1-3, 2018. Ed. by Anatoly Tsvirkun. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551915. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551915>. – P 1–3.
8. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении: Отчет о НИР за 2015 г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика транспортных потоков, научные основы проектирования оптимальных дорожных сетей / Перминов М.Д., Соловьев В.О., Панкова Н.В., Соловьев А.А., Кельнер М.С., Бармина О.В., Валуев А.М., Евин И.А., Воробьев А.Э., Тищенко В.С. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. 2015. – 57 с.

9. *Vasconcelos L., Neto L., Seco Á., Silva, A.* Validation of the Surrogate Safety Assessment Model for Assessment of Intersection // Safety. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2014, № 2432. – P. 1–9.
10. Вибр-е процессы, виброзащита в машин-и. Отчет о НИР за 2018г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика мехатронных роботот-х комплексов, динамика транспортных потоков./Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Овчинников Н.М. и др. – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2018. – 126 с.