

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ ПЕРЕД СТОП-ЛИНИЕЙ ГОРОДСКОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕКРЁСТКА

Макаричев А. В., Горбачёв П. Ф., Ву Д. М., Горбачёва Е. А.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Вводится понятие скорости движения автомобиля в поперечном сечении городской улицы как случайной величины, определяемой на основании времени проезда и габарита автомобиля. Выдвигается и проверяется гипотеза относительно закономерностей распределения скорости автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка.

Ключевые слова: скорость движения автомобиля, регулируемый перекрёсток, габарит автомобиля, случайная величина, закон распределения.

Введение

Условия движения транспортных средств (ТС) в украинских городах год за годом становятся всё сложнее для его участников и приводят ко всё большему негативному воздействию на городскую среду обитания людей. Для оценки качества организации дорожного движения (ОДД) и степени его воздействия на другие аспекты городской жизни в настоящее время используются различные методы планирования транспортного процесса, основанные на аналитических и имитационных моделях.

Скорость участников движения в имитационных моделях является случайной величиной, зависящей от большого количества факторов. Такие модели воспроизводят движение каждого его участника и позволяют проанализировать, как будет работать тот или иной вариант ОДД на относительно небольших фрагментах транспортной сети.

В аналитических моделях, предназначенных для составления более долгосрочных прогнозов функционирования городских или региональных систем в целом, скорость движения (СД) участников определяется особым способом для каждой системы транспорта, но во всех случаях она выступает как детерминированная величина, функционально зависящая от усреднённых параметров работы сети.

Обоснованность такого представления вызывает серьёзные сомнения во многих случаях, а особенно тогда, когда речь идёт об оценке скорости движения ТС в зоне влияния регулируемого или нерегулируемого перекрёстка. Используемые в этом случае модели расчёта средней скорости движения ТС в основном опираются на пропускную способность участков улично-дорожной сети

(УДС) [1], что не может считаться достаточным для точного описания скорости из-за отсутствия обоснованных методик определения пропускной способности [2]. Кроме того, для расчёта объёма выбросов моторными ТС вредных веществ в атмосферу знаний средней скорости недостаточно, так как интенсивность выброса сильно зависит от фактической скорости движения ТС [3].

Определение закона распределения (ЗР) случайной величины СД ТС является актуальной задачей для любых участков улично-дорожной сети (УДС), но особенно актуальной она становится в местах с затруднёнными условиями движения из-за значительного влияния таких условий на неё и на расход топлива. В первую очередь к числу таких мест следует отнести пересечения городских улиц в одном уровне, так как они являются самыми распространёнными объектами в УДС после перегонив и создают наибольшие препятствия для проезда ТС.

Анализ публикаций

Первый раз вопрос теоретического обоснования ЗР скорости движения ТС был поставлен в предыдущей работе [4] коллектива авторов данной статьи, где исследуется влияние ширины проезжей части на ЗР скорости. В ней сделана попытка объяснения результатов многочисленных наблюдений за СД ТС в свободных условиях движения на междугородных автомобильных дорогах (АД) и меньшего количества наблюдений за движением автомобилей в относительно стеснённых городских условиях.

В первом случае экспериментально подтверждённым фактом является нормальное распределение скоростей [5], которое при осложнении условий движения автомобилей

в городских УДС и снижении средней скорости движения несколько видоизменяется из-за смещения моды распределения влево от исходного математического ожидания [4].

В работе [4] проанализированы результаты более 20 предшествующих исследований, проведенных в разных странах и на разных континентах. Следует отметить, что практически все они предоставляют исключительно графическое описание закономерностей колебания СД в разных условиях и только некоторые из них – статистическое описание с критериальной оценкой соответствия эмпирического распределения теоретическому закону.

Наиболее близкими к рассматриваемому в данной статье вопросу являются работы [6–8], в которых изучаются закономерности городского движения, и в работе [8] отмечается близость эмпирического распределения скорости к теоретическому закону гамма-распределения.

На этот факт также указывает и работа [4], в которой выдвинута гипотеза о возможности использования гамма-распределения для описания ЗР СД ТС в любых условиях движения, т.е. для любой средней скорости ТС. Данная гипотеза проверена в условиях сильного сужения ширины проезжей части припаркованными у обочины автомобилями до 5,45 м в двух направлениях. Это привело к снижению средней скорости движения в узком месте до 21,57 км/ч и очевидному переходу распределения скорости от нормального к гамма-закону. Минимальная СД при этом зафиксирована на уровне менее 5 км/ч.

Такой результат не противоречит выдвинутой гипотезе и подтвердил целесообразность изучения распределения скорости автомобилей в ещё более сложных, с точки зрения скорости, условиях движения. Такие условия возникают перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка, где часть автомобилей просто вынуждена останавливаться в связи с регулированием дорожного движения.

Отдельно следует рассмотреть методы, используемые для определения СД. В большинстве существующих работ проводились замеры моментальной скорости автомобиля, для этого использовались различные методы, основанные на использовании [9, 10], а именно:

- метод радиолокационных приборов с использованием эффекта Доплера (радары);
- метод лазерных радаров;

- метод зеркал;
- метод датчиков, использующих различные физические явления (микроволновые, акустические, магнитные, инфракрасные и т. д.);
- метод пневматических трубок на проезжей части;
- метод индуктивных петель на проезжей части;
- метод видеофиксации движения и др.

Все перечисленные методы основаны на том, что приборы измеряют скорость за определенный промежуток времени (например, радары) или на какой-то дистанции (например, пневматические трубки). Наиболее приближённые к моментальной скорости измерения обеспечивают радары за счёт высокой частоты замеров. Однако и здесь расчёты проводятся на основе формулы вычисления скорости v как отношения пройденного объектом расстояния l ко времени его преодоления t :

$$v = \frac{l}{t}, \quad (1)$$

в которой и числитель, и знаменатель имеют определённые положительные значения.

В транспортной литературе также встречаются, хотя и гораздо реже, понятия скорости поездки и скорости перемещения [11]. Первая определяется как средняя скорость преодоления какой-то заранее определённой дистанции, вторая – как средняя скорость всего перемещения: от пункта отправления до пункта назначения. Как и моментальная скорость, они определяются по зависимости (1), только пройденное расстояние l и время его преодоления t определяются не измерительным прибором, а потребностями участников движения.

В предыдущих исследованиях большое внимание уделялось выбору соответствующего участка для проведения замеров скорости. В инструкции [10] прямо указывается на то, что необходимо избегать зону влияния светофоров, нерегулируемых пересечений, пешеходных переходов и другие объекты, вызывающие ускорение или замедление автомобилей. Однако в рассматриваемой в данной статье задаче эти условия заведомо не выполняются и необходимо найти подходящий для неё способ измерения СД ТС.

Некоторый ориентир в этом направлении можно почерпнуть из предыдущей работы [4], в которой также оценивалась не стабильная скорость автомобилей, а скорость дви-

жения вдоль преграды как с замедлением, так и с ускорением. Конкретный способ проезда узкого участка определялся каждым водителем самостоятельно, в зависимости от многих факторов, но в первую очередь он определяется манерой вождения, поэтому в качестве оцениваемого параметра в работе [4] была принята средняя скорость проезда узкого участка передней точкой проезжающего автомобиля. Длина участка равнялась длине припаркованного на обочине автомобиля, который создаёт эту преграду.

Обследование проводилось с помощью видеонаблюдения с последующей обработкой видеоряда, в ходе которой фиксировалось время проезда каждого автомобиля из транспортного потока мимо припаркованного. Скорость рассчитывалась по формуле (1) при известной длине припаркованного автомобиля.

Цель и постановка задачи

Выдвинутая в работе [4] гипотеза о возможности использования гамма-распределения для описания скорости приводит к заключениям о том, что при её подтверждении параметр формы гамма-распределения должен увеличиваться с ростом средней скорости движения (т.е. при сокращении количества ограничений на движение ТС). В предельном случае он должен стремиться к бесконечности при стремлении условий движения к абсолютно свободным. Так как нормальный закон является предельным случаем гамма-распределения с параметром формы, стремящимся к бесконечности [11], выдвинутая в [4] гипотеза объясняет близкий к нормальному характер распределения СД на междугородных АД.

Другим случаем гамма-распределения с параметром формы, равным 1, является экспоненциальное распределение [11], и, в соответствии с гипотезой [4], усложнение условий движения, оцениваемое средней СД ТС, будет приводить к уменьшению параметра формы гамма-распределения и приближать его к экспоненциальному.

Участок УДС перед стоп-линией регулируемого перекрёстка предоставляет заведомо худшие условия проезда, чем сужение проезжей части АД, поскольку вынуждает часть водителей полностью остановиться и простаивать некоторое время. Это и создаёт возможности для дальнейшей проверки выдвинутой гипотезы [4], так как должно привести к снижению параметра формы гамма-

распределения по сравнению с предыдущей ситуацией узкой проезжей части [4].

Но ситуация полной остановки автомобиля вызывает некоторые методические проблемы с определением СД, так как во всех предыдущих работах она определялась как моментальная скорость движения ТС в заданном сечении выбранного участка. Тогда при простое автомобиля в заданном сечении перед перекрёстком его моментальная скорость какое-то время будет равняться нулю и нужно решить, как учитывать это время в результатах наблюдений. При простое автомобиля числитель и знаменатель формулы (1) также равны нулю, и, хотя математическая неопределённость отношения двух нулей здесь легко разрешается, всё равно это создаёт основную проблему при фиксации моментальной скорости в ситуации с возможными простоями автомобилей. Необходимо определить способ замера СД автомобилей перед стоп-линией перекрёстка для проведения соответствующих замеров.

Целью данной работы является проверка гипотезы о возможности описания колебаний СД перед стоп-линией регулируемого перекрёстка показательным законом распределения.

Достижение поставленной цели возможно за счёт определения понятия скорости движения ТС в определённом сечении АД с возможными ускорениями и замедлениями вплоть до полной остановки на некоторое время, прогноза значения параметров гамма-распределения при снижении средней СД ТС вплоть до ситуации, которая возникает перед стоп-линией регулируемого перекрёстка, проведения замеров фактической СД перед стоп-линией регулируемого перекрёстка и оценки параметров её распределения.

Как и в предыдущей работе [4], транспортные средства, для которых исследуется скорость движения, должны иметь схожие скоростные характеристики, чтобы избежать бимодальности распределения скорости их движения, поэтому объектом исследования в первую очередь являются легковые автомобили, к числу которых также относятся микроавтобусы и грузовые автомобили, полная масса которых менее 2,5 тонн.

Разработка методики измерения скорости движения ТС перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка

Основным вопросом методики измерения скорости движения ТС перед стоп-линией

городского регулируемого перекрёстка является разрешение противоречия с замером моментальной скорости в данных условиях.

Моментальная скорость как основной показатель для характеристики скорости движения автомобилей на АД, на наш взгляд, появилась как самое простое решение при стремлении охарактеризовать конкретный участок движения. Получение такой характеристики является самой актуальной задачей, связанной с замерами скорости в транспортных исследованиях, а для случая моментальной скорости не требуется задания дистанции, для которой осуществляется замер. Требуется только обеспечить выполнение соответствующих условий для проведения замеров [11], и с корректностью этих условий соглашаются все исследователи.

При рассмотрении участка УДС перед стоп-линией регулируемого перекрёстка становится понятно, что такие условия заведомо невыполнимы, тогда нужно задать некую дистанцию, время преодоления которой и будет создавать возможность для расчёта СД автомобиля по (1). Задание постоянного интервала времени для замеров положения ТС здесь не подходит из-за низких и переменных скоростей их движения. Выбор отрезка с постоянной длиной на местности, как в работе [4], также обязательно приведёт к возникновению непонятных ситуаций, вызванных неопределённостью дистанции от места остановки автомобилей до стоп-линии, поэтому в данной работе целесообразно в качестве дистанции, для которой измеряется время проезда, принять габариты самого проезжающего автомобиля.

Такой подход отличается от всех предыдущих замеров, так как в них один из элементов формулы (1) – числитель или знаменатель – был постоянным, а здесь оба они изменяются в каждом замере. Преимуществом данного способа замера СД является то, что он позволяет точно и однозначно определить поперечное сечение АД, в котором производится замер скорости, хотя и требует при этом дополнительных усилий для определения фактической длины каждого проезжающего мимо заданного поперечного сечения автомобиля. Тогда задачей экспериментальных исследований будет определение средней скорости проезда автомобилем дистанции, равной его длине, через заданное сечение АД. Средняя скорость в данной статье в дальнейшем будет именоваться просто скоростью движения.

Для проведения исследований нужно зафиксировать два момента времени – когда выбранное сечение пересекается передней и задней точками автомобиля, а также длину автомобиля (расстояние между этими точками). В условиях отсутствия специальных приборов для выполнения таких измерений наилучшим способом их проведения является видеофиксация процесса движения автомобилем с последующей обработкой соответствующего видеоряда. Такой способ, хотя и является весьма трудоёмким, но позволяет обеспечить достаточную, с учётом целей обследования, точность замеров и обеспечивает возможность проверки результатов эксперимента.

Поперечное сечение перед стоп-линией перекрёстка для измерения СД ТС нужно выбрать таким образом, чтобы во время простоя автомобиля на запрещающий сигнал светофора его корпус находился напротив этого сечения, тогда время ожидания разрешающего сигнала светофора будет учитываться в скорости проезда автомобиля, что является обязательным при оценке влияния регулируемого перекрёстка на СД.

При проведении обследования с учётом в некоторой степени свободного отношения к правилам дорожного движения украинских водителей и реальной длины ТС было выбрано сечение улицы на дистанции 1,5 метра перед стоп-линией для выполнения поставленного условия для первых автомобилей в очереди перед перекрёстком. Видеокамера при этом должна находиться непосредственно над выбранной линией сечения для адекватного отражения длины автомобиля на видео.

Прогноз параметров распределения скорости для выбранных условий движения

Исходя из проверяемой гипотезы, при таком прогнозе необходимо дать ответ на вопрос: Как будет изменяться параметр формы гамма-распределения при изменении СД автомобилей, точнее при её снижении, вследствие возникновения препятствий движению на АД? Параметр формы n напрямую определяется основными моментами случайной СД – средней скоростью \bar{v} и стандартным отклонением σ [12]:

$$n = \left(\frac{\bar{v}}{\sigma} \right)^2, \quad (2)$$

поэтому для прогноза параметра формы гамма-распределения необходимо оценить эти моменты в разных условиях движения.

Известными на данный момент численными характеристиками распределения скорости автомобилей могут считаться её параметры в свободных условиях движения, приведенные в работе [13], и в условиях узкой проезжей части [4].

В частности, в [13] приводится регрессионная зависимость коэффициента вариации СД k_v от самой скорости в диапазоне между 18 и 35 миль/час (29 и 56,4 км/час):

$$k_v = 0,448 - 0,0078 \cdot v. \quad (3)$$

Данная модель построена на наблюдениях (около 100 ед.) за свободным движением автомобилей в городской черте. Фактические значения коэффициента вариации для этого диапазона изменения скоростей колеблются в пределах от 0,17 до 0,33. Это означает, что стандартное отклонение σ для данного диапазона скоростей составляет от 5,10 до 6,93 миль/час (8,21 и 11,16 км/час). Таким образом, для свободных условий движения и максимальных скоростей $\sigma_{\max} \ll \bar{v}_{\max}$, это, согласно зависимости (2), приводит к большому значению параметра формы гамма-распределения скорости:

$$n_{\max} \gg 1. \quad (4)$$

Для приведенных в работе [11] коэффициентов вариации значения параметра формы по (4) заключены в интервале $n_{\max} \in [9,2; 34,6]$. При них гамма-распределение имеет практически симметричную форму.

Такая ситуация соответствует эмпирическим наблюдениям нормального распределения СД, что с практической точки зрения равнозначно гамма-распределению с большим параметром формы [12].

Исходя из зависимости (3), стандартное отклонение увеличивается при сокращении СД, но очень медленно и в предельном случае: при $\bar{v} = 0$ оно составляет $\sigma = 0,448 \cdot \bar{v}$, а параметр формы распределения будет равняться $n = 4,982$. Таким образом, зависимость (3) показывает, что гамма-распределение не может принять форму экспоненциального. Но здесь нужно учесть ограниченные возможности регрессионной модели и необхо-

димость с осторожностью относится к результатам такого прогнозирования. Это особенно актуально, когда независимый признак, а в данном случае это СД, выходит за пределы статистического ряда, на котором модель была построена.

Поэтому для более точного прогнозирования параметров гамма-распределения в ситуации со скоростью автомобилей перед стоп-линией регулируемого перекрёстка необходимо рассмотреть «промежуточный» случай с узкой проезжей частью [4]. В нём средняя скорость автомобилей упала до 21,56 км/ч, а стандартное отклонение при этом осталось в пределах, указанных в работе [11], – 8,35 км/ч. Параметр формы гамма-распределения равен 6,666, он уменьшился за счёт падения СД и несколько приблизился к единице, по сравнению со свободными условиями движения. Эти тенденции соответствуют гипотезе о гамма-распределении СД, но предоставляют очень ограниченные указания для прогнозирования варианта распределения в других условиях.

Здесь нужно отметить, что значения обоих рассматриваемых моментов случайной СД являются результатом поведения разных водителей при различных условиях, а также сильно зависят от особенностей самих ограничений данных условий. На основании вышеизложенного, можно дать только весьма приблизительный прогноз значений этих моментов для ситуации со стоп-линией городского перекрёстка.

По сравнению с узкой проезжей частью, регулируемый перекрёсток будет причиной появления значений СД, очень близких к 0, за счёт автомобилей, которые подъехали к перекрёстку на запрещающий сигнал и ожидают включения разрешающего сигнала светофора. Но условия проезда автомобилей на разрешающий сигнал имеют ограничения только в виде других участников движения, поэтому можно ожидать появления в выборочной совокупности и весьма значительных скоростей. Эти соображения о расширении диапазона скоростей приводят к заключению о том, что стандартное отклонение СД должно заметно увеличиться, по сравнению с ситуацией узкой проезжей части. Ожидать значительного сокращения (или роста) средней скорости проезда автомобилями стоп-линии регулируемого перекрёстка, по сравнению с узким участком, нецелесообразно, поскольку диапазон скоростей расширяется в обе стороны. Из этих соображений можно сформу-

ликовать предположение, что в результате наблюдения за скоростью автомобилей перед стоп-линией регулируемого перекрёстка следует ожидать сокращения параметра формы гамма-распределения, по сравнению с узкой проезжей частью, за счёт роста стандартного отклонения скоростей в выборке. Насколько значительным будет это сокращение и как близко гамма-распределение скорости приблизится к своему частному случаю – экспоненциальному распределению – для подтверждения гипотезы [4] значения не имеет, а только предоставит некоторую оценку степени сложности рассматриваемой ситуации.

Экспериментальная оценка скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка

Ключевым моментом, определившим выбор перекрёстка для проведения наблюдений, стала возможность проведения видеонаблюдения в заданных условиях, т.е. за 1,5 метра перед стоп-линией под прямым углом к направлению движения проезжающих автомобилей.

Такая возможность была найдена на пересечении улиц Ярослава Мудрого с улицей Алчевских при подъезде со стороны улицы Сумской в г. Харькове (рис. 1).



Рис. 1. Участок улицы Ярослава Мудрого, выбранный для проведения эксперимента, с указанием сечения дороги для СД

Продолжительность цикла светофорного регулирования на перекрёстке составляет 60 с, из которых разрешающая фаза для выбранного направления движения (на рис. 1 – справа налево) равна 20 с. Обследование проводилось три часа (с 8¹⁵ до 11¹⁵) и охватило более четырёх сотен автомобилей.

Обработка видеонаблюдения включала в себя фиксацию времени пересечения выбранного сечения сначала передней, а затем

задней точками автомобиля, а также замер длины автомобиля с помощью бесплатной экранной линейки mySize. Общие результаты обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Статистическая характеристика значений скорости движения автомобилей перед стоп-линией перекрёстка

Характеристика выборки	Значение, м/с
Количество наблюдений, ед.	403
Минимум	0,07
Максимум	19,12
Средняя скорость	5,30
Стандартное отклонение	4,94
Параметр масштаба	4,602
Параметр формы	1,152

Из таблицы следует, что средняя скорость проезда участка, длиной в габарит автомобиля, через поперечное сечение ул. Ярослава Мудрого перед стоп-линией регулируемого перекрёстка с ул. Алчевских несколько снизилась, по сравнению со скоростью проезда «узкого места» [4]. Более чем в два раза возросло стандартное отклонение СД, что вполне можно объяснить заметным расширением диапазона её колебаний.

Такие серьёзные изменения основных моментов случайной величины СД указывают на значительное изменение параметров гамма-распределения: сильно вырос параметр масштаба, а параметр формы снизился и приблизился вплотную к 1.

Проверка соответствия полученного ряда значений скорости теоретическому гамма-распределению была проведена в программе STATISTICA 10 с помощью критерия Колмогорова-Смирнова (рис. 2).

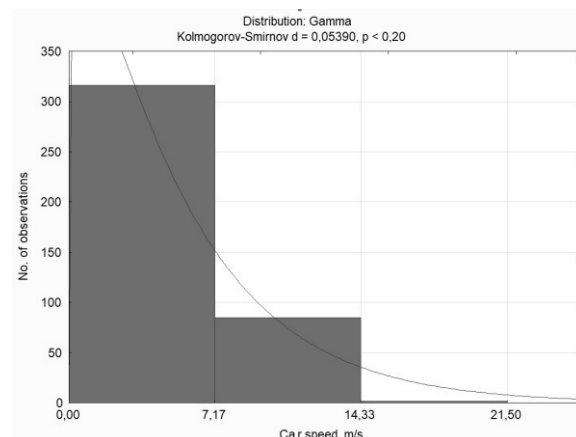


Рис. 2. Результат подбора гамма-распределения для скорости движения автомобилей перед стоп-линией регулируемого перекрёстка

Положительных результатов подбора для уровня значимости критерия Колмогорова-Смирнова, т.е. 5 %, удалось добиться только для разбиения статистического ряда на 3 интервала. Критерий Пирсона для таких условий не применим. Гипотеза о соответствии колебаний СД перед стоп-линией регулируемого перекрёстка на примере пересечения улиц Ярослава Мудрого и Алчевских гамма-распределению также не отвергается, вплоть до уровня значимости 15 %.

Такой результат проверки гипотезы о возможности описания колебаний СД гамма-распределением можно предварительно принять как положительный, хотя и несколько условно. Однократное неотвержение подобной гипотезы не может рассматриваться как её подтверждение, поэтому не самая высокая вероятность критерия Колмогорова-Смирнова (меньше 20 %) свидетельствует о необходимости проведения дополнительных наблюдений за скоростью автомобилей перед стоп-линией регулируемого перекрёстка. При этом обобщения результатов возможно добиться не только за счёт рассмотрения других циклов светофорного регулирования, но и за счёт поиска и исследования других препятствий свободному движению автомобилей.

Близость параметра формы гамма-распределения к единице также создаёт возможности для проверки гипотезы о соответствии полученного статистического ряда СД экспоненциальному закону (рис. 3).

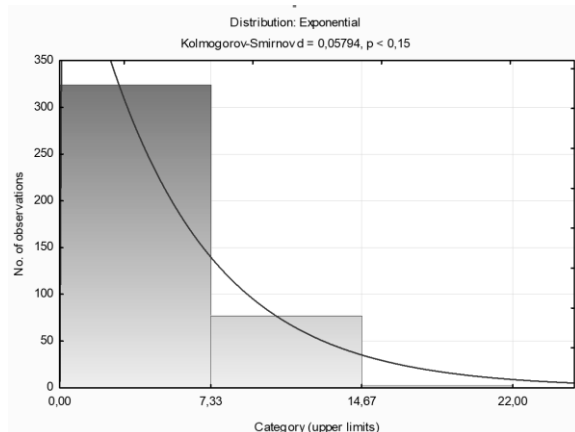


Рис. 3. Результат подбора экспоненциального распределения для скорости движения автомобилей перед стоп-линией регулируемого перекрёстка

В случае экспоненциального распределения значимость критерия Колмогорова-

Смирнова при том же разбиении статистического ряда на 3 интервала снизилась до уровня менее 15 %.

С точки зрения общей гипотезы о возможности описания эмпирического распределения скорости проезда автомобилями поперечного сечения перед стоп-линией регулируемого перекрёстка гамма-распределением, такой результат можно считать только предварительным неопровержением гипотезы, но не её подтверждением.

Таким образом, следует продолжить исследования распределения СД в различных условиях движения, то есть найти ещё более усложненные (стесненные) условия для проверки соответствия СД в них экспоненциальному распределению.

Выводы

Все существующие на сегодняшний день методики измерения СД ТС, основываясь на замерах времени проезда участка и его длины, предполагают рассмотрение полученного результата как моментальной скорости, выдвигая при этом жёсткие ограничения на выбор места проведения обследования. Ситуация со СД перед стоп-линией регулируемого перекрёстка требует перехода от моментальной скорости к её другому варианту – скорости преодоления поперечного сечения габаритом автомобиля, что позволяет избежать принятых в таких случаях ограничений на условия проведения наблюдений без потери сравнимости результатов с другими случаями усложнения условий движения ТС.

Результаты наблюдения за фактической СД на регулируемом пересечении улиц Ярослава Мудрого и Алчевских в г. Харькове приводят к выводу, что данный регулируемый перекрёсток заметно усложняет условия движения, по сравнению с узкой проезжей частью [4]. Это находит свое отражение в снижении средней скорости автомобилей и росте её стандартного отклонения.

Такие условия приводят к ожидаемым изменениям параметра формы гамма-распределения, пригодного для описания полученного ряда скоростей. При этом условия группировки случайной величины СД изменяются на три интервала, когда гипотеза об ее соответствии теоретическому распределению не опровергается на уровне значимости критерия согласия (15 %), а также само значение уровня значимости свидетельствуют о необходимости продолжения исследований в этом направлении.

К такому же выводу приводит и проверка соответствия СД перед регулируемым перекрёстком экспоненциальному распределению, дополнительно указывая на необходимость поиска ситуаций, ещё больше осложняющих условия движения, по сравнению с запретом движения, занимающим две трети времени цикла светофорного регулирования.

Литература

1. Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung / D. Lohse, L. Lätzsch // Band 2 Verkehrsplanung. Verlag für Bauwesen. Berlin. – 1997. – 432 P.
2. Наглиук І. С. Визначення пропускної спроможності смуги руху на автомобільних дорогах і міських вулицях / І.С. Наглиук, О.В. Макаричев, П.Ф. Горбачов, О.О. Горбачова – Автомобільний транспорт. Зб. наук. пр., – Харків: ХНАДУ. – 2018. – Вип. 42. – С. 89–97.
3. Говорущенко Н. Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчётные методы исследований) : монография / Н. Я. Говорущенко. – Харьков : ХНАДУ, – 2011. – 292 с.
4. Макаричев А. В. Влияние ширины проезжей части на скорость движения автомобилей в городских условиях / О. В. Макаричев, П. Ф. Горбачёв, В. Д. Минь, О. О. Горбачёва – Автомобильный транспорт. Сб. научн. тр., – Харьков: ХНАДУ. – 2019. – Вып. 43. – С. 93–102.
5. Berry D. S., Belmont D. M. Distribution of vehicle speeds and travel times // Proc. Second Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob. (Univ. of Calif. Press, 1951), pp. 589–602. <https://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200500257>
6. Minh C. C., Sano K., Matsumoto S. The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic / Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, 2005, pp. 1496–1508
7. Y N. C., Minh C. C., Sano K., Matsumoto S. Motorcycle Equivalent Units at Road Segments under Mixed Traffic Flow in Urban Road / Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7, 2009. – 14 P.
8. Maurya A. K., Dey S., Das S. Speed and Time Headway Distribution under Mixed Traffic Condition / Indian Institute of Technology Guwahati, India, 2015, – 19 P.
9. Spot speed study workshop instruction manual. Prepared for the Governor's Highway Safety Bureau Executive Office of Public Safety. Boston, 2005. – 15 P.
10. Hua C. Comparison of field speed data collection methods / 16th Road Safety on Four Continents Conference Beijing, China 15–17 May 2013. – 11 P.
11. Horbachov P., Svichynskyi S. Theoretical substantiation of trip length distribution for home-based work trips in urban transit systems / Peter

Horbachov, Stanislav Svichynskyi // The Journal of Transport and Land Use. – Center for Transportation Studies at the University of Minnesota, Vol. 11, No 1 (2018). – pp. 593 – 632.

12. Peacock B., Hastings N., Evans M., Forbes C. Statistical Distributions, 4th Edition, Wiley, 2010, 212 P.
13. Taylor M. C., Lynam D. A. and Baruya A. The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents // TRL REPORT 421. Transport Research Laboratory, Crowthorne, England, 2000. – 56 P.

References

1. Lohse D. Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung / D. Lohse, L. Lätzsch // Band 2 Verkehrsplanung. Verlag für Bauwesen. Berlin. – 1997. – 432 P.
2. Nahliuk I. S. Vyznachennia propusknoi spromozhnosti smuhy rukhu na avtomobilnykh dorohakh i misykykh vulytsiakh / I.S. Nahliuk, O.V. Makarichev, P.F. Horbachov, O.O. Horbachova – Avtomobilnyi transport. Zb. nauk. pr., – Kharkiv: KhNADU. – 2018. – Vyp. 42. – S. 89–97.
3. Govoruschenko N. Ya. Sistemotekhnika avtomobilnogo transporta (raschyotnyie metodyi issledovaniy) : monografiya / N.Ya. Govoruschenko. – Kharkov : KhNADU, – 2011. – 292 s.
4. Makarichev A. V. Vliyanie shiriny proezzhey chasti na skorost dvizheniya avtomobiley v gorodskih usloviyah / O. V. Makarichev, P. F. GorbachYov, V. D. Min, O. O. GorbachYova – Avtomobilnyi transport. Sb. nauchn. tr., – Harkov: HNADU. – 2019. – Vyip. 43. – S. 93 – 102.
5. Berry D. S., Belmont D. M. Distribution of vehicle speeds and travel times // Proc. Second Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob. (Univ. of Calif. Press, 1951), pp. 589–602. <https://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200500257>
6. Minh C. C., Sano K., Matsumoto S. The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic / Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, 2005, pp. 1496–1508
7. Y N. C., Minh C. C., Sano K., Matsumoto S. Motorcycle Equivalent Units at Road Segments under Mixed Traffic Flow in Urban Road / Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7, 2009. – 14 P.
8. Maurya A. K., Dey S., Das S. Speed and Time Headway Distribution under Mixed Traffic Condition / Indian Institute of Technology Guwahati, India, 2015, – 19 P.
9. Spot speed study workshop instruction manual. Prepared for the Governor's Highway Safety Bureau Executive Office of Public Safety. Boston, 2005. – 15 P.
10. Hua C. Comparison of field speed data collection methods / 16th Road Safety on Four Continents

- Conference Beijing, China 15–17 May 2013. – 11 P.
11. Horbachov P., Svichynskiy S. Theoretical substantiation of trip length distribution for home-based work trips in urban transit systems / Peter Horbachov, Stanislav Svichynskiy // The Journal of Transport and Land Use. – Center for Transportation Studies at the University of Minnesota, Vol. 11, No 1 (2018). – pp. 593–632.
 12. Peacock B., Hastings N., Evans M., Forbes C. Statistical Distributions, 4th Edition, Willey, 2010, 212 P.
 13. Taylor M. C., Lynam D. A. and Baruya A. The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents // TRL REPORT 421. Transport Research Laboratory, Crowthorne, England, 2000 – 56 P.

Макаричев Александр Владимирович, д.ф.-м.н., вед. научн. сотр. каф. транспортных систем и логистики, тел. +38 098-468-31-97, amsol2904@gmail.com,

Горбачёв Пётр Фёдорович, д.т.н., зав. каф. транспортных систем и логистики, тел. +38 050-303-26-22, gorbachov.pf@gmail.com,

Ву Дык Минь, аспирант, тел. +84 090-429-34-18, vdmih1969@yahoo.com.vn,

Горбачева Елена Александровна, аспирант, тел. +38 050-300-11-43, goeal@gmail.com,

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

Розподіл швидкості руху автомобілів перед стоп-лінією міського регульованого перехрестя
Анотація. Проблема. Швидкість автомобіля є найважливішим показником рівня організації дорожнього руху в умовах сформованої вулично-дорожньої мережі. Швидкість автомобіля у певному місці та в конкретний час безумовно є випадковою, а тому має описуватися законом розподілу. Загально відомий закон розподілу швидкості автомобілів у вільних умовах руху трансформується в інший розподіл у випадку ускладнення цих умов. Найгіршими умовами можуть вважатися ті, за яких автомобіль змушений повністю зупинитися та стояти деякий час в очікуванні дозволу на подальший рух. Одним з таких випадків є регульовані перехрестя, а тому встановлення розподілу швидкості автомобіля в цих умовах є актуальним завданням, для рішення якого необхідно впровадити нове поняття швидкості руху автомобіля. **Мета:** перевірка гіпотези про можливість опису коливань СД перед стоп-лінією регульованого перехрестя показовим законом розподілу. **Методологія:** розроблення методики вимірювання швидкості руху транспортних засобів перед стоп-лінією міського регульованого перехрестя на підставі її поняття як середньої швидкості проїзду габариту автомобіля через поперечний переріз дороги. Внаслідок спостереження за фактичною СД на регульованому пере-

хресті можна дійти висновку про те, що регульоване перехрестя може помітно ускладнити умови руху, на відміну від вузької проїжджої частини, і це знаходить своє відображення у зниженні середньої швидкості руху автомобілів і зростанні її стандартного відхилення, що наближує гамма-розподіл швидкості до форми показового закону. **Оригінальність:** запропонований новий метод оцінки швидкості руху автомобілів, на основі якого розроблена методика та перевірена гіпотеза щодо показникового розподілу швидкості руху автомобілів перед стоп-лінією регульованого перехрестя. **Практичне значення:** Отриманий результат дозволяє підвищити точність прогнозів швидкості руху в аналітичних та імітаційних моделях функціонування транспортних мереж.

Ключові слова: швидкість руху автомобіля, регульоване перехрестя, габарит автомобіля, випадкова величина, закон розподілу.

Макаричев Александр Владимирович, д.ф.-м.н., пров. наук. співр. каф. транспортних систем і логістики, тел. +38 098-468-31-97, amsol2904@gmail.com,

Горбачов Петро Федорович, д.т.н., зав. каф. транспортних систем і логістики, тел. +38 050-303-26-22, gorbachov.pf@gmail.com

Ву Дик Минь¹, аспирант, тел. +84 090-429-34-18, vdmih1969@yahoo.com.vn

Горбачова Елена Александрівна, аспірант, тел. +38 050-300-11-43, goeal@gmail.com,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Car Speed Distribution in Front of a Stop-Line of Urban Regulated Intersection

Abstract. Problem. Car speed is a very important indicator of the traffic organization level in conditions of the formed street-road network. The car speed in a particular place and at a specific time is definitely random, and therefore should be described by the distribution law. The generally well-known normal distribution of the car speed in free traffic conditions is transformed into another distribution when these conditions complicate. The strictest conditions are those where the car is forced to stop completely and stand for some time in anticipation of permission for further movement. One such case is regulated intersections, and therefore the establishment of a car speed distribution in these conditions is an urgent task for which a new concept of a car speed should be introduced. **Goal.** The goal is testing the hypothesis about the possibility of describing the car speed fluctuations in front of the stop-line of a regulated intersection by an exponential distribution law. **Methodology.** Development of the method for the car speed measuring in front of the stop-line of the city regulated intersection on the basis of understanding the speed as the average speed of a car passing distance through the road cross-section.

Results. The results of observing the actual speed at a regulated intersection lead to the conclusion that a regulated intersection can significantly complicate the traffic conditions in comparison with the narrow passageway and this is reflected in the decrease of the average speed of vehicles and the growth of its standard deviation, that brings the gamma-distribution close to the exponential form. **Originality.** A new method of a car speed estimating was proposed, on the basis of which the method was developed and the hypothesis was tested regarding the indicator distribution of the car speed in front of the stop-line of the regulated intersection. **Practical value.** The obtained result allows to increase accuracy of the car speed prediction in analytical and simulation models of transport network functioning.

Keyword: car speed, regulated intersection, car length, random variable, statistical distribution.

Makarychev Aleksandr, Doct. of Science (Phys. & Math.), Leading Researcher, Transport Systems and Logistics Department, amsol2904@gmail.com,

Horbachov Peter, Prof., Doct. of Science (Transport Systems), Head of Transport Systems and Logistics Department, tel. +380503032622, gorbachov.pf@gmail.com,

V.D. Minh, Ph.D. student, tel. +840904293418, vdmnh1969@yahoo.com.vn,

Gorbachova Olena, Ph.D. student, tel. +380503001143, goleal@gmail.com,

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.
