

УДК 656.051

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.3>

Д.М. ВУ

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ORCID: 0000-0001-6436-6237

## ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ШУМА УСКОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

*Исследование направлено на поиск статистической зависимости для описания взаимосвязи между средней скоростью движения автомобилей на участках улично-дорожной сети и шумом ускорения, как обобщением концепции количества остановок и характеристикой качества обслуживания участников движения. Показано, что известные на данное время закономерности колебания скорости движения транспортных средств хорошо описываются с использованием средней скорости на участке улично-дорожной сети в качестве основного фактора, от которого зависят параметры её распределения. С другой стороны, современные программные пакеты, в которых создаются транспортные модели территориальных объектов, обеспечивают достаточно адекватные оценки средней скорости движения на участках улично-дорожной сети. Это создаёт хорошие предпосылки для создания модели шума ускорения в зависимости от средней скорости движения автомобилей.*

*Для получения искомой зависимости, однако, отсутствует полная статистическая информация, что обусловлено сложностью количественной оценки шума ускорения, требующего не одного, а нескольких моментных наблюдений для своего определения. Для решения этой проблемы в работе, на основе известной информации о ключевых точках, сделано предположение о показательном характере искомой зависимости, которое не противоречит результатам проведённых ранее исследований.*

*Параметр модели определён на основе наблюдений за разъездом очереди автомобилей на разрешающий сигнал светофора регулируемого перекрёстка, проведённых автором. При соблюдении условия, что все разъезжающиеся автомобили ожидали начала проезда перекрёстка, находясь в очереди, имеется возможность получить одномоментные данные о средней скорости движения автомобилей и шуме ускорения. В этом случае известна их стартовая скорость и скорость проезда через поперечное сечение перед стоп-линией перекрёстка. С помощью разработанного метода, было получено среднее ускорение каждого транспортного средства и рассчитано его стандартное отклонение, которое является оценкой шума ускорения.*

*Ключевые слова: скорость движения автомобилей, шум ускорения, стандартное отклонение, показательная зависимость, участок улично-дорожной сети, регулируемый перекрёсток*

Д.М. ВУ

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ORCID: 0000-0001-6436-6237

## ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ШУМУ ПРИСКОРЕННЯ НА ОСНОВІ СЕРЕДНЬОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ АВТОМОБІЛІВ

*Дослідження спрямовано на пошук статистичної залежності для опису взаємозв'язку між середньою швидкістю руху автомобілів на ділянках вулично-дорожньої мережі та шумом прискорення, як узагальненням концепції кількості зупинок і характеристикою якості обслуговування учасників руху. Показано, що відомі на даний час закономірності коливання швидкості руху транспортних засобів добре описуються з використанням середньої швидкості на ділянці вулично-дорожньої мережі як основного фактору, від якого залежать параметри її розподілу. З іншого боку, сучасні програмні пакети, в яких створюються транспортні моделі територіальних об'єктів, забезпечують досить адекватні оцінки середньої швидкості руху на ділянках вулично-дорожньої мережі. Це створює достатні передумови для створення моделі шуму прискорення в залежності від середньої швидкості руху автомобілів.*

*Для отримання шуканої залежності, однак, відсутня повна статистична інформація, що обумовлено складністю кількісної оцінки шуму прискорення, яка вимагає не одного, а декількох моментних спостережень для свого визначення. Для вирішення цієї проблеми в роботі, на основі відомої інформації про ключових точках, зроблено припущення про показовому характеру шуканої залежності, яка не суперечить результатам проведених раніше досліджень.*

Параметр моделі визначено на основі спостережень за роз'їздом черги автомобілів на развирішальний сигнал світлофора регульованого перехрестя, проведених автором. При дотриманні умови, що всі автомобілі, що роз'їжджаються, очікували початку проїзду перехрестя, перебуваючи у черзі, є можливість отримати одномоментні дані про середню швидкість руху автомобілів і шум прискорення. В цьому випадку відома їх стартова швидкість і швидкість проїзду через стоп-лінію перехрестя. За допомогою розробленого методу, було отримано середнє прискорення кожного транспортного засобу і розраховане його стандартне відхилення, яке являється оцінкою шуму прискорення.

Ключові слова: швидкість руху автомобілів, шум прискорення, стандартне відхилення, показова залежність, ділянка вулично-дорожньої мережі, регульований перехрестя

D.M. VU

Kharkiv National Automobile and Highway University

ORCID: 0000-0001-6436-6237

## APPROACH TO ESTIMATING ACCELERATION NOISE BASED ON AVERAGE VEHICLE SPEED

The research is aimed to determine the statistical model representing the relationship between the average vehicle speed at road network sections and the acceleration noise, which generalizes the number-of-stops concept and characterizes the level of service for drivers. It is shown that the common regularities in vehicle speed values at a certain road section in a city can be well described using the average speed as the main characteristic deriving the speed distribution parameters. At the same time, modern transport modelling software allows obtaining adequate average speed estimates for road network sections, and it constitutes a good basis for the development of the model reflecting the relationship between acceleration noise and average vehicle speed.

Herewith, to establish the desired model, there is little statistical data because of the difficulties in quantitative estimation of acceleration noise – the estimation requires multiple but not a single observation. To solve this problem, it was assumed that the abovementioned model is the exponential one. The assumption was made based on the information about the behavior of the acceleration in a signalized environment and does not contradict the results of existing studies.

The parameter of the statistical model was estimated based on the results of the observations over the vehicles being in the queue at the stop line of the signalized intersection and departing when the signal turns green. Under the condition that all vehicles at the queue were stopped and waiting for green to pass through the intersection, there exists an opportunity to measure the values of average speed and acceleration – the vehicles have zero speed at the queue and a certain speed when they are crossing the chosen cross-section before the stop line. The developed measurement methodology allowed obtaining average acceleration of each vehicle departing from the queue and acceleration standard deviation, which is an estimate of acceleration noise.

Key words: vehicle speed, acceleration noise, standard deviation, exponential model, road network section, signalized intersection.

### Постановка проблемы

Скорость движения (СД) транспортных средств (ТС) является объектом внимания многих исследователей транспорта и важнейшим показателем качества организации дорожного движения, которая отражает как условия передвижения, так и конечный результат его реализации. Однако в городских условиях, не только она является характеристикой условий поездки для участников движения. К целям исследования СД добавляется шум ускорения (ШУ) [1], который используется для оценки качества транспортного обслуживания. Он определяется как среднее отклонение мгновенных значений ускорения и замедления транспортного средства в течение определенного времени и находится исключительно экспериментальным путём. В то же время ШУ тесно связан со скоростью ТС и установление зависимости между ними позволит дополнить этим показателем список характеристик транспортного процесса и расширить возможности инженеров при транспортном планировании территорий.

### Анализ последних исследований и публикаций

Информационной основой для установления искомой зависимости являются закономерности изменения СД ТС в разных условиях. Априори очевидным является тот факт, что её значение в данный момент времени, в конкретном месте, является случайным. Случайность скорости обусловлена влиянием на неё слишком большого количества факторов, чтобы их можно было достоверно предсказать – от манеры вождения водителя транспортного средства, которая сама по себе состоит из отдельных, сложно прогнозируемых действий, до большого количества и индивидуального поведения других участников движения. При этом основной характеристикой случайной величины (СВ) является закон ее

распределения (ЗР) – заданная в любой форме взаимосвязь между значением СВ и вероятностью его появления в серии испытаний [2].

Основные наработки по оценке ЗР скорости движения ТС носят экспериментальный характер и относятся к условиям достаточно свободного движения на междугородных автомобильных дорогах (АД). Цель таких исследований заключается в том, чтобы определить скорости, которые выбирают водители. В таких случаях, практически единственным ограничением на скорость является установленная местными правилами дорожного движения или локальными дорожными знаками максимально разрешённая на данном участке скорость. Основной целью её установки является задача выявления общих тенденций скорости в потоке ТС и установление её рациональных пределов, а также обеспечение безопасности дорожного движения.

Другие ограничения, вызванные такими причинами как рельеф местности, повороты автодороги, условия видимости и другие осложнения процесса движения ТС практически всегда нивелируются выбором соответствующих участков АД и времени проведения наблюдений. При этом максимально разрешенная скорость всегда оказывается достаточно высокой для того, чтобы случаи движения с крайне низкой скоростью, в несколько раз меньше максимальной и близкой к нулю, были маловероятными, практически невозможными событиями.

В таких условиях, с помощью соответствующих стационарных технических устройств, обычно определяется мгновенная скорость движения ТС в заданном сечении выбранного участка. Общность подходов к определению скорости движения привела также и к сходству полученных результатов, свидетельствующих о соответствии распределения скорости движения ТС в сечении междугородной АД нормальному ЗР Гаусса во всех странах [3].

Подобные обследования охватывают достаточно широкий интервал времени, который стартовал в начале 50-х годов прошлого века и продолжается в настоящее время [3]. Более того, количество таких наблюдений в последнее время только растёт, особенно с начала нынешнего тысячелетия. Поэтому в работе [4] нормальный закон приводится уже как типичное распределение моментальной скорости ТС в свободных условиях движения. Дальнейшие исследования, подробно описанные в работах [3, 4], только подтвердили эти результаты. И хотя только в некоторых работах приводится статистическая оценка степени соответствия между эмпирическим распределением скорости движения ТС и теоретическим нормальным распределением, общий вид приведённых в данных работах графиков не оставляет сомнений в их близости к кривой плотности нормального распределения [5, 6].

Такие же результаты приводятся в работах, посвященных установлению рационального ограничения на максимальную скорость движения [4]. Этой теме посвящено значительное количество работ, в которых вводится понятие 85-процентного перцентиля распределения фактических скоростей движения ТС в качестве основы для ограничения скорости движения на конкретном участке АД. Этот квантиль также основывается на нормальности распределения скоростей.

Нормальное распределение скорости, с учётом общеизвестных условий возникновения ЗР Гаусса, вполне логично объясняется поведением водителей, на которое, безусловно, влияет очень много факторов. Результаты принятия человеком тех или иных решений подвергаются продуктивному изучению только с помощью статистического описания [7], и нормальное распределение скоростей движения ТС в свободных условиях является тому очередным, пусть и косвенным подтверждением.

Но вопрос о виде распределения скоростей движения ТС в более жёстких условиях ограничения скорости, которые возникают обычно в городах и могут быть вызваны плотным трафиком, пересечениями улиц в одном уровне, доступной водителям шириной проезжей части, светофорным регулированием или другими причинами, долго оставался открытым [5, 6]. Изучению этого вопроса было уделено много внимания в работах [3, 4], в которых сделаны выводы о возможности описания гамма-распределением колебаний скорости ТС на всём реальном диапазоне её средних значений, для которого нормальный закон является асимптотическим случаем при росте носителя, в данном случае – СД [8]. Этот результат является шагом, который расширяет список результатов транспортного моделирования, где средняя скорость является одним из основных результатов расчетов. Он также подтверждает целесообразность использования средней СД в качестве базового фактора для изучения характера других параметров движения ТС по сети, в том числе и ШУ.

При этом СД является не только результатом транспортного моделирования, но одним из основных факторов, по которым распределяются потоки по транспортной сети [9], что вносит дополнительные сложности в аналитическое моделирование транспортных сетей. Но, при должной настройке, современные программные продукты, в которых создаются транспортные модели, на основе заданных потребностей в передвижениях и параметров транспортной сети способны рассчитывать среднюю СД с достаточной для решения задач транспортного планирования точностью [10]. Всё это создаёт возможности не только для формирования более полного списка характеристик, но и для получения в дальнейшем исчерпывающей характеристики о параметрах транспортных потоков в виде законов их распределения.

Шум ускорения, который отражает потери энергии, связанные с последовательными замедлениями и ускорениями в управляемой среде движения ТС [11] находится в числе таких параметров. Он характеризует плавность транспортного потока и, соответственно, уровень комфорта при движении в его составе. Шум ускорения представляет собой обобщение концепции количества остановок и подходит для её замены в качестве дополнительного показателя эффективности при проектировании и оценке работы систем управления дорожным движением [11]. Основной и, по сути, единственной мерой ШУ является стандартное (среднеквадратическое) отклонение ускорения – чем оно больше, тем больше непроизводительные потери энергии и ниже комфорт движения.

#### Формулирование цели исследования

Целью работы является установление зависимости между средней СД ТС на участках транспортной сети и шумом ускорения, как характеристикой комфорта движения.

#### Изложение основного материала исследования

Принятие в качестве базовой величины, определяющей значения других параметров движения, средней СД ТС создаёт возможность для широкого использования в транспортных прогнозах построенных на ней зависимостей. Это утверждение полностью относится к ШУ, для количественной оценки которого необходимо получить зависимость, связывающую среднюю СД с колебаниями ускорения. Проблемой здесь является то, что работ, направленных на изучение собственно шума ускорения, совсем немного – результаты специального исследования отражают только отчёт [11] и статья [2], в которых, однако, отсутствуют количественные данные, пригодные для использования в данной работе. Отсутствие целенаправленных исследований в этом направлении обусловлено сложностью изучения вопроса ШУ как с теоретической, так и с практической точек зрения, так как стандартное отклонение ускорения статистически должно определяться на основе его нескольких фактических значений, что исключает из рассмотрения все точечные наблюдения за ТС.

В условиях недостатка фактических значений ШУ построить требуемую зависимость можно, используя характерные точки, связывающие между собой скорость движения ТЗ и его шум ускорения, для которых значения ШУ могут быть заранее спрогнозированы.

При решении вопроса о переходе от закономерностей изменения СД ТС к колебаниям ускорения следует осознавать, что в качестве аргумента искомой зависимости для шума ускорения необходимо

использовать среднюю СД  $\bar{v}$  разных транспортных средств в поперечном сечении АД при том, что обычно шум ускорения – это характеристика движения одного ТС по АД, отражающая колебания ускорения во времени. И в таком случае можно утверждать, что при повышении свободы движения ТС корректным выглядит допущение о том, что шум ускорения будет стремиться к нулю, так как водитель не будет ограничен в выборе желаемой для него СД. Этот же процесс, как было отмечено в обзоре литературы, сопровождается ростом средней скорости. Отсюда следует, что рост СД должен сопровождаться стремлением шума ускорения к нулю и нужно принимать во внимание, что даже автоматические системы поддержания постоянной скорости ТС (например, круиз-контроль) обеспечивают ее нахождение в каком-то заданном диапазоне, в пределах которого они допускают колебания. При этом наличие в установившемся режиме движения хоть и небольших, но всё-таки ненулевых колебаний скорости, означает наличие соответствующих колебаний ускорения относительно нуля (ускорений и замедлений), то есть ненулевого ШУ. Поэтому процесс приближения шума ускорения к нулю с ростом СД должен быть асимптотическим, что можно отобразить с помощью графика, на котором при  $\bar{v} \rightarrow \infty$  величина ШУ стремится к 0 и приближается к горизонтальной оси в точке, соответствующей максимальной в определённых условиях СД.

Второй характерной точкой для шума ускорения можно считать его значение при нулевой СД. Здесь логично будет предположить, что данное значение является максимальным для определенных условий движения, поскольку соответствует ситуации роста скорости с ее минимально возможным значения – нуля. Такое предположение подтверждается результатами ранее выполненных исследований процесса движения автомобилей, в том числе тем, что воплотилось в нормативный документ [12]. Руководство [12] указывает на «обычно большее ускорение» транспортных средств, когда скорость ниже, и наоборот, что соответствует сделанному предположению относительно шума ускорения в начале координат. Предположительный общий вид зависимости, описывающей поведение шума ускорения в описанных условиях и отражающей порядок его значений в окрестностях двух рассмотренных точек, приведён на рис. 1.

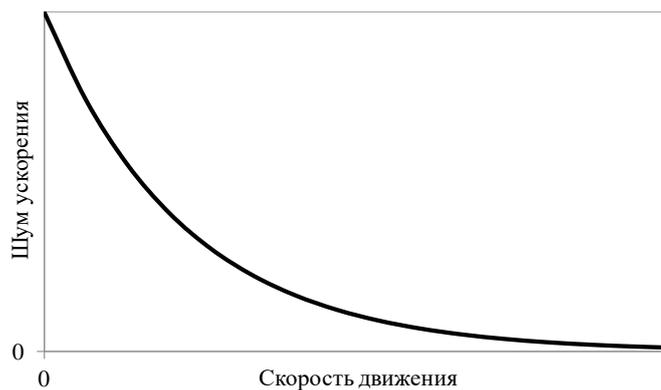


Рис.1. Гипотетический вид зависимости шума ускорения от СД ТС

Данное предположение является справедливым при убывании ускорения разгона с ростом скорости, что в значительной степени подтверждается графиками, приведенными в работе [2]. Дополнительно принятое предположение о монотонно убывающем показателе, свидетельствует в пользу как первоначально изложенных соображений о стремлении шума ускорения к нулю, так и последующих – о его максимальном значении в точке с нулевой скоростью.

Для более полной проверки допустимости использования предполагаемой зависимости шума ускорения от СД нужна количественная оценка не ускорения, а его стандартного отклонения при разной скорости. Такие данные можно найти в работе [13], где описываются результаты наблюдений за разгоном автомобилей по рампе второстепенной АД на междугородней магистрали в округе Сакраменто (Калифорния, США). Для оценки СД и ускорения ТС в восьми точках рампы авторы использовали несколько различных техник, включающих видеосъемку и магнитные датчики. Это дало им основания утверждать, что полученные средние значения ускорения и СД ТС достаточно надёжны для дальнейшего анализа [13].

Представляющие интерес значения ускорения из статьи [13] приведены в зависимости от времени следования мимо контрольной точки. Поэтому, с целью оценки зависимости шума ускорения от СД в данной работе, вначале для каждой точки графиков из работы [13] были получены искомые значения СД и ускорения ТС. Шум ускорения рассчитывался как среднеквадратическое отклонение значений ускорения в трёх соседних точках, начиная со второй точки рампы. Результат приведён на рис.2.

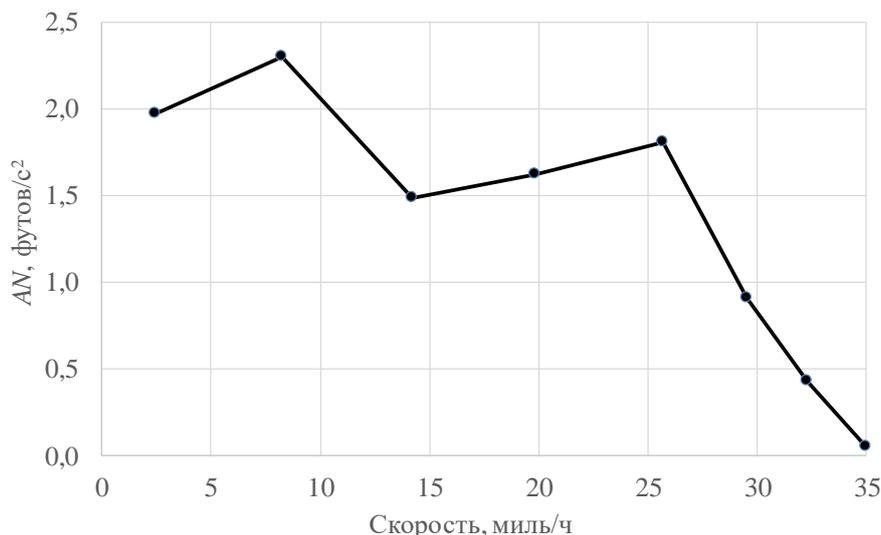


Рис.2. Зависимость шума ускорения от СД ТС по данным работы [13]

Эти данные, несмотря на свой не совсем монотонный характер, не могут считаться опровержением сделанных выше предположений о характере зависимости между ШУ и средней СД ТС (рис.1), с учётом их эмпирического характера. Поэтому для её описания в дальнейшем будет принята экспоненциальная функция, полностью совпадающая по своим свойствам с введенной гипотетической зависимостью, рис. 1:

$$AN = e^{-\lambda_a \bar{v}}, \quad (1)$$

где  $AN$  – шум ускорения, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda_a$  – параметр зависимости шума ускорения от средней СД.

Чтобы установить реальное значение параметра в зависимости (1), необходимы фактические наблюдения за шумом ускорения и СД, которые на данный момент отсутствуют. Считать таковыми значения, полученные из работы [13], было бы неправильным по многим соображениям, основным из которых является место их получения и невозможность получить данные в одном поперечном сечении АД.

Извлечь необходимые значения возможно из собранных автором, в ходе предыдущих наблюдений за СД автомобилей перед стоп-линией регулируемого перекрёстка, данных. Здесь возможность получить одномоментные данные о ШУ и СД возникает в ситуации, когда очередь автомобилей разъезжается на разрешающий сигнал светофора регулируемого перекрёстка. Условие, что все разъезжающиеся ТС ожидали возможность проезда находясь в очереди, является при этом обязательным. В этом случае известна их стартовая скорость – 0 м/с, и скорость проезда через поперечное сечение перед стоп-линией перекрёстка. Тогда для каждой полосы движения можно рассчитать ускорение ТС, если задать длину проезжей части, которую занимает один автомобиль.

Для этого случая разработан метод расчёта ускорений, по которым определяется шум ускорения. Он требует, чтобы значения ШУ и СД рассчитывались отдельно для каждого количества автомобилей, покинувших регулируемый перекрёсток за разрешающий сигнал светофора. Это значит, что в результате должно получиться несколько значений ШУ и СД, для каждой длины очереди своё, и для определения параметра  $\lambda_a$  нужно будет применить регрессионный анализ, что является положительным свойством метода, так как повышает надёжность оценки параметра искомой зависимости шума ускорения от средней СД.

Для этого вначале необходимо сделать предположение о характере распределения достигнутой автомобилями скорости к стоп-линии. С учётом того, что движение первого автомобиля всегда начинается с нулевой СД, это распределение должно иметь ненулевую вероятность в 0 и нулевую вероятность в отрицательной области значений СД. Для описания таких условий хорошо подходит показательное распределение, на основе которого и создаётся искомый метод.

Предположим, что  $V_1, V_2, \dots, V_n$  есть выборка показательного распределённых скоростей с параметром

$$\lambda = \bar{v}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_k$  и  $v_k = -\bar{v} \ln \left( 1 - \frac{k}{n+1} \right)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ , для автомобиля с номером  $k$  в очереди.

Для достижения из состояния покоя скорости движения  $v_k$ , необходимо равноускорено проехать расстояние  $S_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Необходимо по этой выборке скоростей  $\{v_k\}$  и расстояний  $\{S_k\}$  определить распределение ускорений  $\{a_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Так как движение автомобилей принимается равноускоренным, то за время  $T_k = \frac{v_k}{a_k}$ , автомобиль

со средней скоростью  $\frac{v_k}{2}$  проезжает расстояние  $S_k$ , то есть

$$S_k = \frac{v_k}{2} T_k = \left( \frac{v_k}{2} \right) \cdot \left( \frac{v_k}{a_k} \right). \quad (3)$$

Отсюда

$$a_k = \frac{v_k^2}{2S_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Следовательно, с равными вероятностями  $\frac{1}{n}$  величина ускорения принимает значения

$$a_k = \frac{\left[ -\bar{v} \ln \left( 1 - \frac{k}{n+1} \right) \right]^2}{2S_k} = \frac{\left[ \bar{v} \ln \left( 1 - \frac{k}{n+1} \right) \right]^2}{2S_k}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Полагая все значения ускорений в выборке равновероятными, можно определить шум ускорения для каждого количества автомобилей, покинувших регулируемый перекрёсток за разрешающий сигнал светофора:

$$MX = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k; \quad MX^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k^2; \quad MX^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k^2, \quad DX = MX^2 - (MX)^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k \right)^2, \quad AN = \sqrt{DX} \quad (6)$$

Расчёты параметра модели (1) проводились для перекрёстка улиц Ярослава Мудрого и Алчевских в г. Харьков, на котором автомобили разъезжаются в одну линию (по одной полосе). Расстояние, которое занимает один автомобиль, было определено исходя из максимального количества автомобилей в очереди перед светофором, равного 22 ед., которые в час пик размещаются на одной полосе улицы Ярослава Мудрого между улицами Алчевских и Чернышевской. Так как длина этого участка составляет 154 метра, то каждый автомобиль занимает в среднем 7 м проезжей части.

Из 403 зафиксированных на перекрёстке улиц Ярослава Мудрого и Алчевских значений СД в расчёте ускорений участвовали 378 наблюдений, соответствующих автомобилям, которые находились в очередях длиной от 5 до 9 авто и разъезжались на разрешающий сигнал светофора, табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчёта шума ускорения ТС на перекрёстке улиц Ярослава Мудрого и Алчевских в г. Харьков**

Показатель	Количество проехавших перекрёсток автомобилей, ед.				
	5	6	7	8	9
Количество наблюдений, ед.	20	42	161	128	27
Средняя скорость, м/с	4,439	4,978	5,321	5,560	6,836
Шум ускорения, м/с <sup>2</sup>	0,725	0,416	0,472	0,489	0,557

Расчитанный по этим данным параметр зависимости шума ускорения от средней СД получился равным 0,118, и она приобрела следующий вид:

$$AN = e^{-0,118\bar{v}}. \quad (7)$$

Статистические характеристики полученной модели оказались достаточно высокими:

- а)  $r^2 = 0,916$  ;
- б) информационная способность модели подтверждена;
- в) коэффициент модели оказался значимым, с  $t$ -статистикой, равной -6,59.

Это обуславливает возможность использования модели (7) для прогнозирования шума ускорения, в зависимости от средней СД, в городских условиях. Максимальное его значение в точке  $\bar{v} = 0$  составляет 1, что обеспечивает удобную основу для сравнительной оценки качества организации дорожного движения в разных условиях движения ТП.

**Выводы**

1. Широкое использование средней СД ТС на участках УДС в качестве основного фактора, определяющего параметры её распределения и значения других характеристик транспортного процесса, создаёт возможности не только для расширения списка оцениваемых параметров движения ТС, но и для получения в дальнейшем исчерпывающей характеристики о параметрах транспортных потоков в виде

законов их распределения.

2. Сделанное в работе предположение о показательном характере зависимости шума ускорения от средней СД не противоречит результатам проведённых ранее исследований ускорения и может быть использовано как основа для получения статистической оценки параметра искомой зависимости.

3. Разработанный метод оценки значений ускорения автомобилей при разезде очереди, накопившейся перед стоп-линией регулируемого перекрёстка, обеспечивает получение индивидуального набора случайных значений ускорения для каждого значения длины очереди, что определяет возможность статистической оценки параметра показательной зависимости шума ускорения от средней СД с помощью регрессионного анализа полученного набора данных.

4. Полученная в результате исследования показательная модель зависимости шума ускорения от средней СД с параметром, равным 0,118; является первой попыткой установления искомой закономерности, сделанной в условиях ограниченного набора статистических данных, поэтому она требует проверки путём практического использования в реальных проектах транспортного планирования городов.

#### Список использованной литературы

1. Mary C. Meyer Probability and Mathematical Statistics: Theory, Applications, and Practice in R. SIAM. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2019. 707 p. ISBN: 1611975778
2. Babu, Y.S. Acceleration Noise and Level of Service of Urban Roads – A Case Study / Babu Y.S., Pattnaik S.B. // Journal of Advanced Transportation, № 31(3), 2010, pp. 325–342. <https://doi.org/10.1002/atr.5670310307>
3. Горбачёв, П. Ф. Влияние ширины проезжей части на скорость движения автомобилей в городских условиях / Горбачёв П. Ф., Макаричев А. В., Горбачёва Е. А., Ву Д. М. // Автомобильный транспорт / Сб. науч. тр. Вып. 44. – Харьков : ХНАДУ, 2019. – С. 50-58. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.24>
4. Макаричев, А. В. Распределение скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка / Макаричев А.В., Горбачёв П.Ф., Ву Д. М., Горбачёва Е.А. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета / Сб. науч. тр. Вып. 85. – Харьков : ХНАДУ, 2019. С. 107–116. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.1072>
5. Dhamaniya, A. Speed Characteristics of Mixed Traffic Flow on Urban Arterials / Dhamaniya A., Chandra S. // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2013. № 7(11). P. 883–888. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1089419>
6. Rao, A.M. Free Speed Modeling for Urban Arterials – A Case Study on Delhi / Rao A.M., Rao K.R. // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. № 43(3). 2015. P. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.7599>
7. Horbachov, P. Framework for designing sample travel surveys for transport demand modelling in cities / Horbachov P., Makarichev O., Svichynskiy S., Ivanov I. Transportation, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10168-6>
8. Horbachov, P. Theoretical substantiation of trip length distribution for home-based work trips in urban transit systems / Horbachov, P., Svichynskiy, S. // The J. of Trans. and Land Use, № 11 (1), 2018. P. 593–632. DOI: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.916>
9. Капский, Д.В. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города / Капский Д.В., Навой Д.В., Пегин П.А. // Наука и техника. № 18(1). – Минск : БНТУ, 2019. С. 47–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>
10. Ugirumurera, J. A unified software framework for solving traffic assignment problems / Ugirumurera J., Gomesy G., Xiaoye S.L., Bayen A. // CoRR, 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.11026>
11. Gartner, N. Acceleration Noise as a Measure of Effectiveness in the Operation of Traffic Control Systems : working paper // Chung C.C., Gartner N. / Cambridge: Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, 1973. 41 p.
12. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets : Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004. 82 p.
13. Yang, G. Acceleration Characteristics at Metered On-Ramps / Yang G., Xu H., Tian Z., Wang Z., Zhao Y. // Transportation Research Record. № 2484(1). 2015. P. 1-9. <https://doi.org/10.3141/2484-01>

#### References

1. Mary C. Meyer Probability and Mathematical Statistics: Theory, Applications, and Practice in R. SIAM. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2019. 707 p. ISBN: 1611975778
2. Babu Y.S., Pattnaik S.B. Acceleration Noise and Level of Service of Urban Roads – A Case Study. *Journal of Advanced Transportation*. 2010. no 31(3). P. 325–342. <https://doi.org/10.1002/atr.5670310307>
3. Horbachov P.F., Makarichev O.V., Horbachova O.O., Min V.D. Vliyanie shirinyi proezzhey chasti

na skorost dvizheniya avtomobiley v gorodskih usloviyah [Influence of a carriageway width on the car speed under urban conditions]. *Avtomobilnyy transport. Sbornik nauchnykh trudov [The collection of scientific works]*. Kharkov. 2019. no 43. P. 93 – 102. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.24>

4. Makarichev O. V., Horbachov P. F., Min V. D., Horbachova O. O. Raspredelenie skorosti dvizheniya avtomobiley pered stop-liniej gorodskogo reguliruemogo perekryotka [Car Speed Distribution in Front of a Stop-Line of Urban Regulated Intersection]. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University]*. no. 85. Kharkov. 2019. P. 107 – 116. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.1072>

5. Dhamaniya A., Chandra S. Speed Characteristics of Mixed Traffic Flow on Urban Arterials. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2013. no 7(11). P. 883–888. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1089419>

6. Rao A.M., Rao K.R. Free Speed Modeling for Urban Arterials – A Case Study on Delhi. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. no 43(3). 2015. P. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.7599>

7. Horbachov, P., Makarichev, O., Svichynskyi, S. et al. Framework for designing sample travel surveys for transport demand modelling in cities, *Transportation*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10168-6>

8. Horbachov, P., Svichynskyi, S. Theoretical substantiation of trip length distribution for home-based work trips in urban transit systems, *The Journal of Transport and Land Use*. no 11 (1), 2018. 593–632. DOI: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.916>

9. Kapskii D.V., Navoi D.V., Pegin P.A. Razrabotka modeli transportnykh potokov na ulichno-dorozhnoi seti goroda [Development of a model of traffic flows on the urban road network]. *Nauka i tekhnika Science and technology*. 2019. no 18(1). P. 47–54. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54>

10. Ugirumurera, J. A unified software framework for solving traffic assignment problems / Ugirumurera J., Gomesy G., Xiaoye S.L., Bayen A. // *CoRR*, 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.11026>

11. Chung C.C., Gartner N. Acceleration Noise as a Measure of Effectiveness in the Operation of Traffic Control Systems : working paper. Cambridge: Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, 1973. 41 p.

12. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets : Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004. 82 p.

13. Yang G., Xu H., Tian Z., Wang Z., Zhao Y. Acceleration Characteristics at Metered On-Ramps. *Transportation Research Record*. 2015. № 2484(1). P. 1-9. <https://doi.org/10.3141/2484-01>