

# ЗАДЕРЖКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА НЕРЕГУЛИРУЕМОМ ПЕШЕХОДНОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ С ВЫДЕЛЕННОЙ ПОЛОСОЙ

**Поспелов Павел Иванович,**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия, [pospelov@madi.ru](mailto:pospelov@madi.ru)

**Яшина Марина Викторовна,**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия;  
Московского технического и университета связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия, [yash-marina@yandex.ru](mailto:yash-marina@yandex.ru)

**Таташев Александр Геннадьевич,**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия;  
Московского технического и университета связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия, [a-tatashev@yandex.ru](mailto:a-tatashev@yandex.ru)

**Ле Дык Лонг,**

Технический университет им. Ле Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам, [longld@lqdtu.edu.vn](mailto:longld@lqdtu.edu.vn)

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-35-42

Manuscript received 30 September 2022;

Accepted 20 October 2022

Работа выполнена при поддержке гранта  
Российского Фонда Фундаментальных  
Исследований (РФФИ) № 20-01-00222а

**Ключевые слова:** наземный общественный транспорт, выделенная полоса, организация дорожного движения, задержка транспортных средств, одноканальная система массового обслуживания, нерегулируемое пересечение

Цель проектирования выделенных полос для наземного общественного транспорта – сократить время в пути и создать пользователям (пассажирам) максимально комфортные условия по сравнению с личными автомобилями или другими видами транспорта. Одной из проблем проектирования является наличие правых поворотов и пешеходных переходов на маршруте, которые могут в значительной степени определять скорости движения транспортных средств наземного общественного транспорта, отличающихся от проектируемой. Можно выделить три характерные схемы проектирования правых поворотов при наличии выделенной полосы: светофорное регулирование организации правого поворота; нерегулируемое пересечение, свободное от возможных задержек; нерегулируемое пересечение при организации пешеходного движения, определяющего в конечном итоге временные задержки наземного общественного транспорта при расположении на выделенной полосе автомобилей, ожидающих приемлемого интервала между пешеходами. Правила дорожного движения большинства стран мира предусматривают наивысший приоритет движению пешеходов в том числе и на нерегулируемых пешеходных переходах. Такое положение повышает уровень безопасности и обслуживания пешеходов, но в то же время снижает уровень обслуживания участников движения в транспортном потоке. В статье представлена методика оценки влияния пешеходов на задержки транспортных средств на нерегулируемом пересечении с выделенной полосой для средств наземного общественного транспорта на основе вероятностной модели. Для введенных ограничений построена конструкция одноканальной системы массового обслуживания, анализ которой позволяет получить оценку средней задержки потока транспортных средств у нерегулируемого пешеходного перехода. Результаты моделирования показали, что расхождения между значениями по модели и наблюдаемыми задержками не превышают 22% при интенсивности пешеходного движения менее 1500 пеш./ч. На основании полученных результатов предложены рекомендации по минимизации задержки транспортных средств на нерегулируемом пересечении, включая средства наземного общественного транспорта на выделенной полосе.

## Информация об авторах:

**Поспелов Павел Иванович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

**Яшина Марина Викторовна**, д.т.н., зав. кафедрой, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, (МАДИ); профессор Московского технического и университета связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия

**Таташев Александр Геннадьевич**, д. ф.-м.н., профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); профессор Московского технического и университета связи и информатики (МТУСИ), Москва, Россия

**Ле Дык Лонг**, к.т.н., преподаватель Технического университета им. Ле Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам

## Для цитирования:

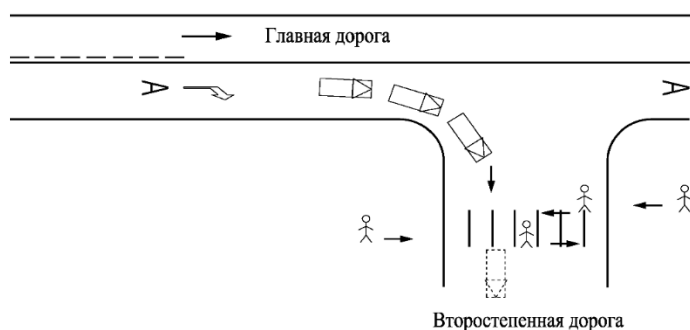
Поспелов П.И., Яшина М.В., Таташев А.Г., Ле Дык Лонг. Задержки транспортных средств на нерегулируемом пешеходном пересечении с выделенной полосой // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. № 11. С. 35-42.

## For citation:

Pospelov P.I., Yashina M.V., Tatashev A.G., Le Duc Long (2022) Delays of traffic management at an unregulated pedestrian intersection with a dedicated lane. T-Comm, vol. 16, no. 11, pp. 35-42. (in Russian)

**Введение**

Организация движения правого поворота с главной дороги на второстепенную на нерегулируемых пересечениях с пешеходным движением является одной из задач в организации дорожного движения. Исследования показывают, что в условиях небольшой интенсивности пешеходов и транспортных средств задержка поворота автомобилей при движении направо незначительна, а конфликты между автомобилями и пешеходами случаются достаточно редко. Но по мере увеличения этих интенсивностей задержка имеет тенденцию к увеличению. Причиной такой ситуации, при которой на нерегулируемых пешеходных переходах движение пешеходов при пересечении проезжей части происходит практически без задержек, водитель транспортного средства, не обладающий преимущественным правом проезда, вынужден ожидать приемлемого интервала между пешеходами [1-3].



**Рис. 1.** Транспортный и пешеходный поток на нерегулируемом пешеходном переходе

**1. Оценка средней задержки транспортного средства у пешеходного перехода в предположении о малой интенсивности транспортного потока**

Начиная с классической работы Мауне [7], а также его последователей, [6] и [8], в задачах проектирования транспортных пересечений использовали методику оценки задержек на основе одноканальной системы массового обслуживания. При этом в указанных работах учитывались правила дорожного движения того времени, где приоритет движения оставался за транспортным средством, а пешеход должен был ожидать, когда дорожное полотно будет свободным.

В современных условиях правила изменились, и задержку испытывает транспортное средство, уступая дорогу пешеходному потоку. Поэтому в данном параграфе мы приводим вывод уточненной формулы для оценки задержки транспортного потока.

Предположим, что к пешеходному переходу прибывает транспортный поток малой интенсивности. Это предположение позволяет принять следующие допущения: поток транспортных средств, прибывающих к переходу пуассоновский; можно пренебречь вероятностью того, что транспортное средство не может остановиться из-за того, что за ним следует другое транспортное средство на таком расстоянии, что торможение транспортного средства, идущего впереди, нарушает требования безопасности; задержки транспортных средств у пешеходного перехода практически полностью обусловлены

ожиданием окончания занятости перехода пешеходами, а не очередью автомобилей.

Будем предполагать, что каждое транспортное средство останавливается у перехода, если с момента, когда к переходу подошел последний к текущему моменту пешеход, прошло не более  $\delta$  единиц времени, причем величину  $\delta$  будем считать постоянной (другим словами, считаем, что пешеход заканчивает движение по переходу через время  $\delta$  после того, как он подошел к переходу). Предполагаем, что моменты прихода пешеходов образуют пуассоновский поток с интенсивностью  $\lambda_p$ . Под задержкой транспортного средства у перехода понимаем время от момента, когда транспортное средство подошло к переходу, до момента, с которого транспортное средство может продолжать движение, а именно, до момента, с которого переход перестанет быть занятым пешеходами. Если транспортному средству не нужно останавливаться у перехода, то задержка этого транспортного средства равна нулю.

Опишем подход к оценке среднего значения  $\omega$  задержки транспортного средства у перехода.

В качестве модели работы перехода рассмотрим одноканальную систему массового обслуживания без мест ожидания, в которую поступает пуассоновский поток заявок с интенсивностью  $\lambda_p$ . Для обслуживания заявки требуется постоянное время  $\delta$ . Если заявка поступает в момент времени, в который обслуживается другая заявка, то поступившая заявка начинает обслуживаться, а обслуживание заявки, находившейся на приборе, прерывается и она теряется. Под виртуальной задержкой будем понимать случайную функцию  $\omega(t)$ , принимающую значение 0, если система свободна, и принимающую значение, равное длительности интервала времени от момента  $t$  до окончания периода занятости, если в момент  $t$  времени прибор занят. В силу эргодичности и системы существует стационарное распределение случайной функции  $\omega(t)$ , среднее значение которого естественно считать оценкой среднего значения задержки транспортного средства.

Обозначим через  $g$  и  $g^{(2)}$  – первый и второй момент периода занятости системы. Очевидно, что стационарная вероятность того, что в рассматриваемой системе прибор занят, будет такой, как для системы M/G/1/0, в которой при занятии прибора теряются поступающие заявки, причем среднее время обслуживания заявки равно  $g$  и интенсивность входящего потока равна  $\lambda_p$ . Таким образом, в соответствии с первой формулой Эрланга, стационарная вероятность того, что прибор занят, равна:

$$Q = \frac{\lambda g}{1 + \lambda g}, \tag{1}$$

В соответствии с теоремами теории восстановления [4] стационарная средняя виртуальная задержка  $\omega_1$  для момента времени, в который прибор занят, вычисляется по формуле:

$$\omega_1 = \frac{g^{(2)}}{2g}, \tag{2}$$

Нетрудно видеть, что значения  $g$ ,  $g^{(2)}$  будут такими же, как полное время пребывания на приборе заявки фиксированного приоритета, для обслуживания которой нужно время  $\delta$ , в одноканальной системе с дисциплиной абсолютных

приоритетов и обслуживанием прерванной заявки заново, при этом нужно считать, что суммарная интенсивность заявок приоритетов, более высоких, чем приоритет данной заявки, равна  $\lambda_p$ .

Система с такой дисциплиной и распределением времени обслуживания более общего вида рассматривалась в [5], а именно, в [5] распределение времени обслуживания заявки считалось произвольным и зависящим от приоритета. В [5] рассматривались два варианта дисциплины обслуживания, а именно, в одном из этих вариантов, заявка, обслуживание которой прервано, впоследствии обслуживается заново с новой длительностью, распределенной так же, как и первоначальная, а в другом варианте такая заявка впоследствии обслуживается заново с прежней длительностью. В рассматриваемом нами случае, в котором длина заявки с вероятностью 1 равна  $\delta$ , оба варианта не различаются между собой. Обозначим через  $\beta(s)$  преобразование Лапласа-Стилтьеса распределения времени обслуживания заявки рассматриваемого приоритета. Тогда приводимые в [5] формулы в наших обозначениях и нашей интерпретации имеют следующий вид. Для дисциплины с обслуживанием прерванной заявки с новой длительностью:

$$g = \frac{1 - \beta(\lambda_p)}{\lambda_p \beta(\lambda_p)}, \quad (3)$$

$$g^{(2)} = \frac{2}{\lambda_p^2 [\beta(\lambda_p)]^2} \cdot \left[ 1 - \beta(\lambda_p) - \lambda_p E \left( l e^{-\lambda_p l} \right) \right], \quad (4)$$

где  $E$  – знак математического ожидания,  $l$  – длина заявки. Для дисциплины с обслуживанием прерванной заявки с прежней длительностью

$$g = \frac{\beta(-\lambda_p) - 1}{\lambda_p}, \quad (5)$$

$$g^{(2)} = \frac{2}{\lambda_p^2} \left[ \beta(-2\lambda_p) - \beta(-\lambda_p) - \lambda_p E \left( l e^{-\lambda_p l} \right) \right], \quad (6)$$

Учитывая, что если время, нужное для обслуживания заявки, с вероятностью 1 равно  $\delta$ , то преобразование Лапласа-Стилтьеса времени обслуживания заявки имеет вид:

$$\beta(s) = e^{-\lambda_p s},$$

и

$$E \left( l e^{-\lambda_p l} \right) = E \left( -l e^{\lambda_p l} \right), E \left( l e^{\lambda_p l} \right) = E \left( l e^{\lambda_p l} \right),$$

получаем из (2), (3) или из (4), (5) следующие формулы:

$$g = \frac{e^{-\lambda_p \delta} - 1}{\lambda_p}, \quad (7)$$

$$g^{(2)} = \frac{2}{\lambda_p^2} \cdot \left[ e^{2\lambda_p \delta} - e^{\lambda_p \delta} - \lambda_p \delta e^{\lambda_p \delta} \right], \quad (8)$$

В соответствии с формулой полной вероятности имеем:

$$\omega = (1 - Q) \cdot 0 + Q \cdot \omega_1, \quad (9)$$

Из формул (1), (2), (7)-(9), получаем:

$$\omega = \frac{1}{\lambda_p} \left[ e^{\lambda_p \delta} - (1 + \lambda_p \delta) \right], \quad (10)$$

Таким образом, получена формула (10), дающая оценку для среднего времени задержки транспортного средства у перехода. Выведенная формула (10) сходна с классической формулой (14), [7], из раздела 3.

## 2. Экспериментальное исследование влияния пешеходов на задержку транспортных средств

Объектами исследования являются нерегулируемые пересечения на УДС г. Москвы, где на главной дороге выделена полоса для наземного общественного транспорта (НОТ) и расположен нерегулируемый пешеходный переход на второстепенной дороге (рис. 1 и табл. 1).

Таблица 1

Участки проведения измерений влияния пешеходов на задержку транспортных средств

| № уч. | Наименование участка проведения измерений |                          |
|-------|---|--------------------------|
|       | Главная дорога                            | Второстепенная дорога    |
| 1     | Ленинградский проспект, д. 64             | Шебашёвский переулок     |
| 2     | Ленинградский проспект, д. 60к1           | 1-я Аэропортовская улица |
| 3     | Ленинградский проспект, д. 66             | ул. Лизы Чайкиной        |
| 4     | Ленинградский проспект, д. 52             | ул. Константина Симонова |
| 5     | Ленинградский проспект, д. 44             | ул. Серёгина             |
| 6     | Ленинградский проспект, д. 49             | ул. Викторенко           |
| 7     | Ленинградский проспект, д. 37к3           | ул. Генерала Сандалова   |

Оценка влияния пешеходов на задержку транспортных средств на нерегулируемом пешеходном пересечении в условии ненасыщенного транспортного потока может производиться в соответствии с руководством Highway capacity manual 2010, в соответствии с которым среднюю задержку транспортных средств оценивают путем подсчета количества автомобилей в очереди на пересечении через равные промежутки времени 15 с.

На каждом пересечении измерения проведены с продолжительностью 15 минут в разное время суток. Состояние транспортного и пешеходного потока фиксировали путем видеосъемки и затем данные обрабатывали в камеральных условиях. Результаты исследования представлены на рисунке 2.

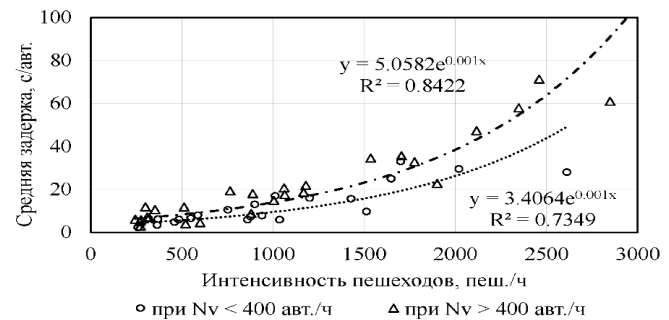


Рис. 2. Задержка транспортных средств на нерегулируемых пешеходных переходах

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- задержка транспортных средств увеличивается с увеличением интенсивности движения пешеходного и транспортного потоков. Регрессионный анализ позволил установить, что величина задержки транспортных средств начинает увеличиваться при интенсивности движения транспортного потока более 400 авт./ч и экспоненциальная зависимость наиболее подходит в качестве функции связи интенсивности пешеходного потока и задержки транспортных средств;
- исследования также показали, что пропускная способность пересечений значительно снижается, когда интенсивность движения пешеходного потока увеличивается в часы пик и при их расположении рядом со станциями метро или торговыми центрами. Это объясняется тем, что допустимые для маневра временные интервалы между пешеходами на переходе появляются крайне редко. В результате на главной дороге будут образовываться очередь автомобилей, что может привести к задержкам средств НОТ на выделенной полосе.

### 3. Методика оценки влияния пешеходов на задержку автомобилей

Распределение интервалов между транспортными средствами является одной из важных характеристик при анализе состояния транспортного потока. Результаты натурных исследований авторов показывают, что на нерегулируемых пересечениях с низкой интенсивностью движения функция смещенного экспоненциального распределения лучше всего подходит для описания распределения интервалов между автомобилями, поворачивающих направо. В этом случае функция плотности распределения имеет вид:

$$f(t_v) = 0; t_v < t_m,$$

$$f(t_v) = \lambda_v e^{-\lambda_v(t_v - t_m)}; t_v \geq t_m,$$

где  $\lambda_v = \frac{N_v}{1 - t_m \cdot N_v}$  – параметр распределения;  $N_v$  – интенсивность движения транспортных средств, авт./сек.;  $t_v$  – временной интервал между транспортными средствами, сек.;  $t_m$  – параметр смещения (величина минимального интервала в транспортном потоке), сек.

На пересечениях пешеходный поток как правило движется в двух противоположных направлениях. В большинстве ранее выполненных исследованиях прибытие пешеходов в каждом направлении рассматривалось как процесс Пуассона, в котором интервалы между пешеходами подчинялись отрицательному экспоненциальному закону. Поэтому можно предполагать, что пешеходные потоки в обоих направлениях также подчиняются закону Пуассона с параметром, равным сумме параметров составляющих потоков. Функция плотности распределения интервала между пешеходами имеет вид:

$$f(t_p) = \lambda_p e^{-\lambda_p t_p}; t_p > 0,$$

где  $\lambda_p$  – суммарная интенсивность пешеходов в обоих направлениях, пеш./сек.;  $t_p$  – интервал между пешеходами, сек.

В соответствии с правилами дорожного движения (ПДД) водители обязаны уступать дорогу пешеходам на нерегулируемых пешеходных переходах, но фактическое поведение водителей часто отличается от требований в зависимости от многих факторов, таких как разумная организация движения и планировка пересечения. В статье представлена методика оценки влияния пешеходов на задержку транспортных средств на нерегулируемых пешеходных переходах на основе теории вероятности [6]. При построении модели предположим, что все водители дожидаются, когда все пешеходы перейдут улицу, то есть пешеходы получают максимальный приоритет.

Приближаясь к переходу, пешеходы наблюдают временные интервалы между пешеходным переходом и транспортным средством, приближающимся к пересечению. Пешеходы будут продолжать движение, если эти интервалы больше минимального интервала  $\delta$  (безопасный интервал) – время, необходимое пешеходам, чтобы перейти улицу. Влияние пешеходов на задержку транспортных средств можно представить в виде пространственно-временной диаграммы (рис. 3а,б,в). Задержка автомобиля “2” состоит из двух компонентов: первый компонент – минимальный интервал  $\delta$ ; второй компонент – задержка из-за ускорения и замедления  $\rho$ .

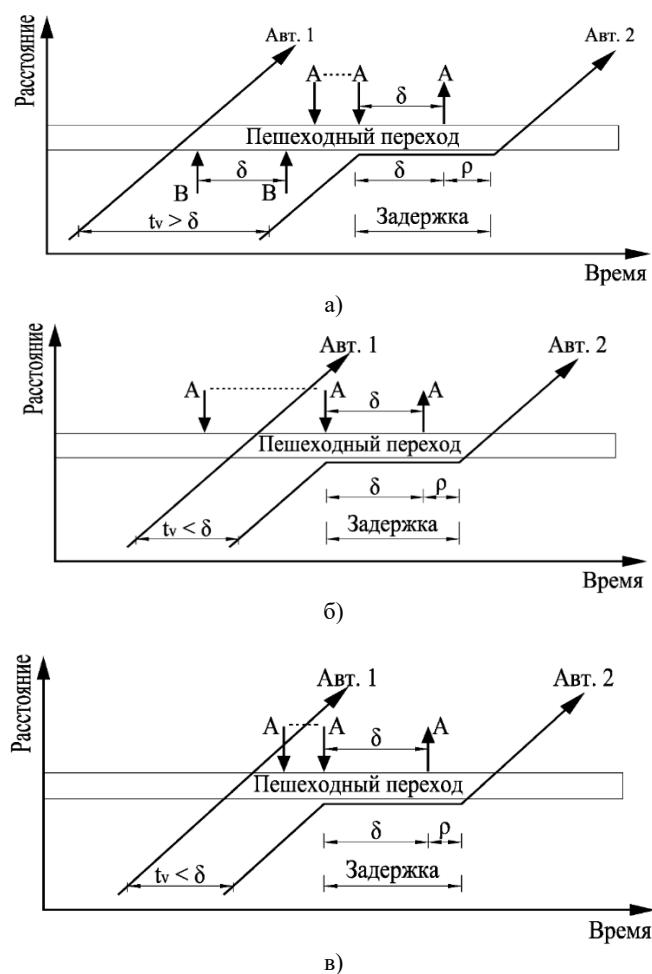


Рис. 3. Схема вычисления задержки автомобилей на пешеходном переходе: а – случай 1; б – случай 2; в – случай 3

Минимальное время  $\delta$  для пешеходов, переходящих улицу, можно определить по формуле руководства Highway capacity manual, 2010:

$$\delta = \frac{b}{V_p} + t_d$$

где  $b$  – длина пешеходного перехода, м;  $V_p$  – средняя скорость передвижения пешехода, принимается равной 1,4 м/с;  $t_d$  – дополнительное время необходимое для обеспечения большей безопасности движения пешеходов при переходе проезжей части, принимается равным 2-3 с.

Анализ дорожно-транспортных ситуаций на нерегулируемых пешеходных переходах показывает, что задержка транспортных средств, вызванных движением пешеходами, зависит от вероятности того, что они находятся на пешеходном переходе. Эта вероятность зависит от корреляции между интервалом транспортных средств и интервалов между пешеходами и может быть разделена на следующие три случая:

- первый случай (рис. 3а) – когда интервал между автомобилями больше минимального интервала пешеходов ( $t_v > \delta$ ). Задержка автомобиля “2” происходит, когда пешеход “А” достиг границу улицы и временной интервал между пешеходным переходом и автомобилем “2” меньше минимального интервала. В данном случае автомобиль “2” должен остановиться перед пешеходным переходом;

- второй случай (рис. 3б) – когда интервал между автомобилями меньше минимального интервала между пешеходами ( $t_v < \delta$ ). В этом случае могут быть пешеходы, ожидающие перед переходом. Этим пешеходам нельзя пересекать проезжую часть, так как временной интервал между пешеходом и автомобилем “1” меньше минимального интервала  $\delta$ . В этом случае водитель автомобиля “1” не может предоставить приоритет пешеходам. Поэтому только следующий автомобиль “2” должен предоставить этот приоритет;

- третий случай (рис. 3в) – когда интервал между автомобилями меньше минимального интервала пешеходов ( $t_v < \delta$ ). Это дополнительный случай второго случая, когда нет пешеходов, ожидающих перехода. Задержка автомобиля “2” происходит только когда пешеходы подходят к пешеходному переходу в пределах интервала между транспортными средствами  $t_v$ .

Для каждого из рассмотренных случаев определяем вероятности появления события. Вероятность появления первого случая является совместной вероятностью двух событий: событие 1 – интервал между транспортными средствами больше, чем минимальный интервал пешеходов ( $t_v > \delta$ ); событие 2 – пешеходы появились у перехода за время  $t_p$ ,  $0 < t_p < \delta$ . Вероятность можно вычислить по формуле (11):

$$P_1 = M \int_{\delta}^{+\infty} f(t_v) dt_v \int_0^{\delta} f(t_p) dt_p \quad (11)$$

где,  $M$  – доля водителей, уступающих дорогу пешеходам (англ. *the yielding rate*). Это значение определено, как отношение количества автомобилей, которые остановились, чтобы уступить дорогу пешеходам, к общему количеству автомобилей, которые должны остановиться в соответствии с ПДД. Чем больше это значение, тем строже водитель соблюдает ПДД. Предыдущие исследования показали, что среднее значение  $M$  изменяется в пределах 0,2-0,8 [6].

Вероятность появления второго случая считается условной вероятностью. Это вероятность того, что автомобиль “2” подъедет к пересечению за время от  $t_m$  до  $\delta$ . Это событие происходит в присутствии пешеходов, ожидающих перехода (13):

$$P_2 = M \cdot L \int_{t_m}^{\delta} f(t_v) dt_v \quad (12)$$

где  $L$  – вероятность присутствия пешехода перед переходом в момент до прибытия автомобиля “2”. Dali Wei и др. [6] предложили формулу для вычисления значения  $L$ . Эта величина представляет собой вероятность того, что пешеходы появляются на переходе в процессе рассасывания очереди  $t_{qd}$ :

$$L = 1 - e^{-\lambda_p t_{qd}}$$

где  $t_{qd}$  – время рассасывания очереди автомобилей, которое определяется по формуле (13, 14), аналогичной формуле Мауне [7], для задержки пешехода перед переходом в предположении, что транспортные средства имеют абсолютный приоритет:

$$t_{qd} = \frac{N_v t_m}{1 - N_v t_m} t_{qf} \quad (13)$$

$$t_{qf} = \rho + \delta + \frac{1}{\lambda_p} \left[ e^{\lambda_p \delta} - (1 + \lambda_p \delta) \right] \quad (14)$$

где  $t_{qf}$  – время образования очереди автомобилей;  $\rho$  – время, потерянное из-за необходимости ускорения после остановки транспортного средства.

Третий случай возникает, когда интервал между автомобилями меньше, чем минимальный интервал между пешеходами ( $t_v < \delta$ ) и отсутствии пешеходов, ожидающих перехода. Тогда водители будут уступать дорогу только тем пешеходам, которые достигают перехода в промежутке интервала между автомобилями  $t_v$ . Эта совместная вероятность двух событий: событие 1 – интервал между автомобилями меньше, чем минимальный интервал между пешеходами ( $t_v < \delta$ ); событие 2 – прибытие пешехода происходит за время  $t_v$ . Вероятность этого события определяется по формуле (15):

$$P_3 = M \cdot (1 - L) \int_{t_m}^{\delta} f(t_v) dt_v \int_0^{t_v} f(t_p) dt_p \quad (15)$$

После вычисления значений вероятности с соответствующими функциями плотности, получаем результат (17):

$$\begin{aligned} P_1 &= M \cdot e^{-\lambda_v(\delta-t_m)} \left( 1 - e^{-\lambda_p \delta} \right) \\ P_2 &= M \cdot L \cdot \left[ 1 - e^{-\lambda_v(\delta-t_m)} \right] \\ P_3 &= M \cdot (1 - L) \left[ 1 - e^{-\lambda_v(\delta-t_m)} + \frac{\lambda_v \cdot e^{\lambda_v t_m}}{\lambda_v + \lambda_p} \left\{ e^{-(\lambda_v + \lambda_p) \delta} - e^{-(\lambda_v + \lambda_p) t_m} \right\} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Далее оценим ожидаемое значение количества автомобилей, прибывающих в процессе образования и рассасывания очереди во время свободного движения:

$$E(Q) = N_v (t_{qd} + t_{qf}) + \frac{1}{P}$$

где  $1/P$  – ожидаемое количество автомобилей в состоянии свободного потока при возникновении задержки:  $P = P_1 + P_2 + P_3$ .

Общая задержка транспортных средств в процессе образования и рассасывания очереди включает две составляющие: первая – время образования очереди автомобилей  $t_{qf}$ ; вторая – общая задержка транспортных средств, прибывающих в процессе образования и её рассасывания  $d_q$ :

$$d = t_{qf} + d_q$$

где  $d_q$  – общая задержка транспортных средств, прибывающих в процессе образования и рассасывания очереди. Ожидаемое значение  $E(d_q)$  определяет формула McNeil [8]:

$$E(d_q) = \frac{N_v t_{qf}}{2(1 - t_m N_v)} [t_{qf} + t_m (2 - t_m N_v)]$$

тогда

$$E(d) = t_{qf} + \frac{N_v t_{qf}}{2(1 - t_m N_v)} [t_{qf} + t_m (2 - t_m N_v)] \quad (17)$$

Таким образом, можно определить среднее время задержки на один автомобиль (18):

$$\bar{d} = \frac{E(d)}{E(Q)} \quad (18)$$

#### 4. Численные примеры

Расчеты выполнены в двух случаях с разной долей уступки дороги водителем  $M = 0.3$  и  $M = 0.6$ . Значения входных параметров следующие:  $t_m = 1,5$  с;  $\rho = 2$  с;  $b = 7$  м;  $V_p = 1,4$  м/с;  $t_d = 2$  с.

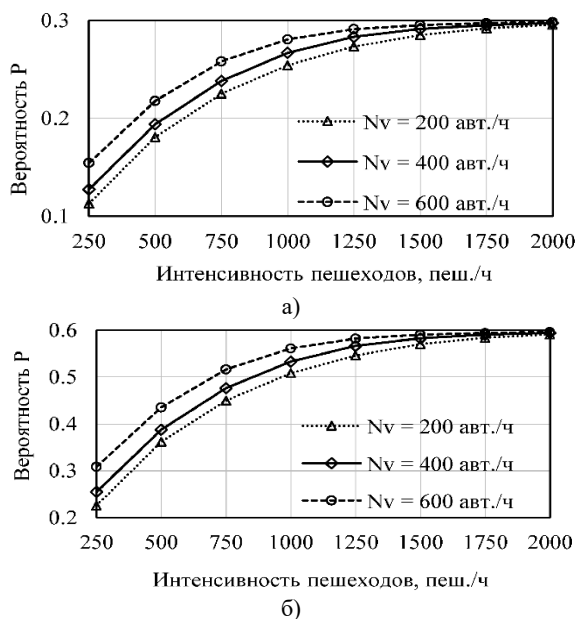


Рис. 4. Средняя задержка транспортных средств ( $\bar{d}$ ): а) –  $M = 0,3$ ; б) –  $M = 0,6$

Полученные результаты на рисунках 4 и 5 показали следующее:

– вероятность задержки транспортных средств почти прямо пропорциональна интенсивности транспортного и

пешеходного потоков и имеет тенденцию увеличения к максимальному значению  $M$ . Аналогичные результаты получены для оценки задержки транспортных средств;

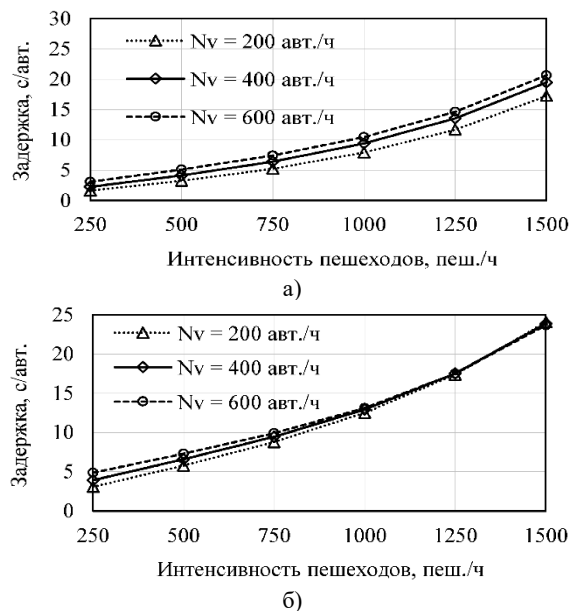


Рис. 5. Средняя задержка транспортных средств ( $\bar{d}$ ): а) –  $M = 0,3$ ; б) –  $M = 0,6$

– из графика на рисунке 6 следует, что расхождения между значениями по модели и наблюдаемых задержек не превышают 22% при интенсивности пешеходного движения менее 1500 пеш./ч, модель лучше подходит к описанию невысокой интенсивности пешеходного потока. Это можно объяснить тем, что задержка в значительной степени зависит от поведения водителей и пешеходов. Кроме того, по мере увеличения интенсивности транспортного и пешеходного потоков может происходить изменение вида распределения интервалов, которое не может быть включено в модель. Однако анализ подтверждает пригодность, положительные стороны и перспективу дальнейшего развития модели.

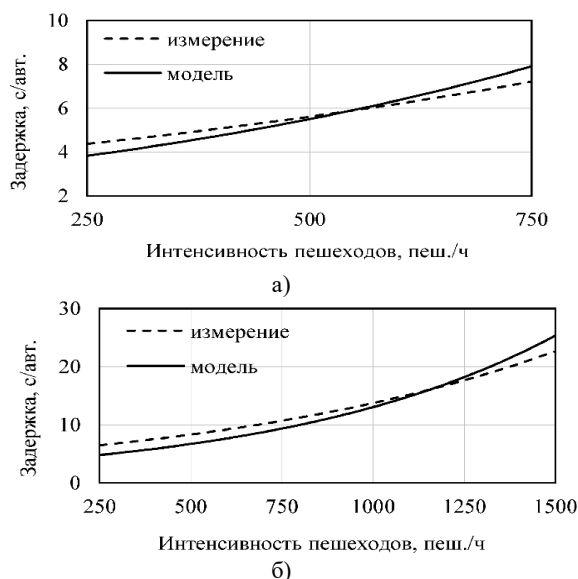


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования и измерений при интенсивности автомобилей ( $M=0.6$ ): а) – менее 400 авт./ч; б) – более 400 авт./ч

### Заключение

На основе теории вероятностей была построена модель оценки влияния транспортного и пешеходного потоков и доля уступки дороги водителем на задержку транспортных средств на нерегулируемом пересечении. Результаты моделирования показали, что модель с высокой точностью соответствует движению с невысокой интенсивностью пешеходного потока.

Разработанная методика и использование математической модели могут быть использованы для оценки уровня обслуживания пересечении (англ. *Level of service – LOS*). Оттуда в качестве основы для предоставления решений по минимизации задержки транспортных средств на перекрестках, таких как управление пешеходным переходом (светофор) или проектирование дополнительной полосы для выполнения поворота и т.д.

Анализ модели показывает возможность её применения, положительные стороны и перспективу дальнейшего развития. В будущем модель, которая применяется для оценки задержки транспортных средств в условиях высокой интенсивности движения пешеходов будет развиваться.

### Литература

1. Буга П.Г., Шелков Ю.Д. Организация пешеходного движения в городах. М.: Высш. школа, 1980. 232 с.
2. Поспелов П.И., Ле Дык Лонг. Работа регулируемого пересечения с выделенной полосой // Наука и техника в дорожной отрасли (МАДИ). 2020. № 4. С. 30–33.
3. Поспелов П.И., Ле Дык Лонг. Организация движения на нерегулируемом пересечении с выделенной полосой для наземного общественного транспорта // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2021. № 2 (65). С. 22–25.
4. Клейнрок Л., Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
5. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. Пер. с англ. М.: Наука, 1975. 360 с.
6. Wei D., Liu H., Tian Z. Vehicle Delay Estimation at Unsignalised Pedestrian Crosswalks with Probabilistic Yielding Behaviour. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2015. Vol. 11(2). Pp. 103–118.
7. Mayne A. J. Some Further Results in the Theory of Pedestrian and Road Traffic // *Biometrika*. 1955. Vol. 41. No. 3/4. Pp. 375–380.
8. McNeil D. R. A Solution to the fixed-cycle traffic light problem for compound poisson arrivals // *Journal of Applied Probability*. 1968. Vol. 5(3). Pp. 624–635.
9. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Le Duc Long, Susoev N.P. Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before crossroad // International scientific conference “2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications” (Moscow, 16–18 March 2021). Moscow, 2021. doi:10.1109/IEEECONF51389.2021.9416102.
10. Pospelov P.I., Kostsov A.V., Tatashev A.G., Yashina M.V. A mathematical model of traffic segregation on multilane highway // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 442–446. doi:10.21533/pen.v7i1.384.g287.
11. Yashina M. V., Vinogradov A. A. On traffic control means recognition in intelligent monitoring and traffic safety // In *Traffic and Granular Flow '11*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Pp. 439–452.
12. Lukanin V. N., Buslaev A. P., Novikov A. V., Yashina M.V. Traffic flows modelling and the evaluation of energy-ecological parameters // Part I. *International journal of Vehicle Design*. 2003. Vol. 33. No. 4. Pp. 381–399. doi:10.1504/ijvd.2003.003578.
13. Lukanin V. N., Buslaev A. P., Novikov A. V., Yashina M.V. Traffic flows modelling and the evaluation of energy-ecological parameters // Part II. *International Journal of Vehicle Design*. 2003. Vol. 33. No. 4. Pp. 400–421. doi:10.1504/ijvd.2003.003577.
14. Yang Z., Zhang Y., Zhu R. Impacts of Pedestrians on Capacity and Delay of Major Street Through Traffic at Two-Way Stop-Controlled Intersections // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. 11 p.

## DELAYS OF TRAFFIC MANAGEMENT AT AN UNREGULATED PEDESTRIAN INTERSECTION WITH A DEDICATED LANE

**Pavel I. Pospelov**, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, [pospelov@madi.ru](mailto:pospelov@madi.ru)  
**Marina V. Yashina**, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, [yash-marina@yandex.ru](mailto:yash-marina@yandex.ru)  
**Aleksandr G. Tatashev**, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, [a-tatashev@yandex.ru](mailto:a-tatashev@yandex.ru)  
**Le Duc Long**, Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam, [longld@lqdtu.edu.vn](mailto:longld@lqdtu.edu.vn)

### Abstract

The purpose of designing dedicated lanes for ground public transport is to reduce travel time and create the most comfortable conditions for users (passengers) compared to personal cars or other modes of transport. One of the design problems is the presence of right turns and pedestrian crossings on the route, which can largely determine the speed of ground public transport vehicles that differ from the designed one. There are three typical design schemes for right turns in the presence of a dedicated lane: traffic light regulation of the organization of the right turn; uncontrolled intersection, free from possible delays; uncontrolled intersection in the organization of pedestrian traffic, which ultimately determines the time delays of the ground public transport when vehicles are located in a dedicated lane, waiting for an acceptable headway between pedestrians. Traffic rules of most countries of the world provide for the highest priority for pedestrian traffic, including on uncontrolled pedestrian crossings. This situation increases the level of safety and service for pedestrians, but at the same time reduces the level of service of road for traffic flow. The article presents a methodology for assessing the impact of pedestrians on vehicle delays at an unregulated intersection with a dedicated lane for vehicles based on a probabilistic model. The simulation results showed that the discrepancies between the values of the model and the observed delays do not exceed 22% when the pedestrian traffic intensity is less than 1500 ped/h. Based on the results obtained, recommendations are proposed to minimize the delay of vehicles at unregulated intersections, including the ground public transport vehicles on a dedicated lane.

**Keywords:** ground public transport, dedicated lane, traffic management, delay of vehicles, unregulated intersection.

### References

1. Buga P. G., Shelkov Y. D. Organization of pedestrian traffic in cities. Moscow: Vyssh. shkola, 1980. 232 p. (In Rus)
2. Pospelov P. I., Le Dyk Long. Work of adjustable crossing with the allocated lane. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli (MADI)*. 2020. No. 4, pp. 30-33. (In Rus)
3. Pospelov P. I., Le Dyk Long. Formation of queue at signalized intersection with dedicated lane for ground public transport. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (MADI)*. 2021. No. 2 (65), pp. 22-25. (In Rus)
4. Klejnrok L., Queueing systems. Moscow: Mashino stroenie, 1979. 432 p. (In Rus)
5. Konvej R.V., Maksvell V.L., Miller L.V. Theory of schedules. Moscow: Nauka, 1975. 360 p. (In Rus)
6. Wei D., Liu H., Tian Z. Vehicle Delay Estimation at Unsignalised Pedestrian Crosswalks with Probabilistic Yielding Behaviour. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2015. Vol. 11(2), pp. 103-118.
7. Mayne A.J. Some Further Results in the Theory of Pedestrian and Road Traffic. *Biometrika*. 1955. Vol. 41. No. 3/4. Pp. 375-380.
8. McNeil D.R. A Solution to the fixed-cycle traffic light problem for compound poisson arrivals. *Journal of Applied Probability*. 1968. Vol. 5(3), pp. 624-635.
9. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Le Duc Long, Susoev N.P. Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before crossroad. International scientific conference "2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications", Moscow, 16-18 March 2021. Moscow, 2021. doi:10.1109/IEEECONF51389.2021.9416102.
10. Pospelov P.I., Kostsov A.V., Tatashev A.G., Yashina M.V. A mathematical model of traffic segregation on multilane highway. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 442-446. doi:10.21533/pen.v7i1.384.g287.
11. Yashina M.V., Vinogradov A.A. On traffic control means recognition in intelligent monitoring and traffic safety. In *Traffic and Granular Flow '11*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. Pp. 439-452.
12. Lukanin V.N., Buslaev A.P., Novikov A.V., Yashina M.V. Traffic flows modelling and the evaluation of energy-ecological parameters. Part I. *International journal of Vehicle Design*. 2003. Vol. 33. No. 4. Pp. 381-399. doi:10.1504/ijvd.2003.003578.
13. Lukanin V.N., Buslaev A.P., Novikov A.V., Yashina M.V. Traffic flows modelling and the evaluation of energy-ecological parameters. Part II. *International Journal of Vehicle Design*. 2003. Vol. 33. No. 4. Pp. 400-421. doi:10.1504/ijvd.2003.003577.
14. Yang Z., Zhang Y., Zhu R. Impacts of Pedestrians on Capacity and Delay of Major Street Through Traffic at Two-Way Stop-Controlled Intersections. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. 11 p.

### Information about authors:

**Pavel I. Pospelov**, PhD, Professor, Head of department of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia  
**Marina V. Yashina**, PhD, Professor, Head of department of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia  
**Aleksandr G. Tatashev**, PhD, Professor, Lecturer of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia  
**Le Duc Long**, PhD, Lecturer of Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam