

УДК: 625.71

DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_163

EDN: LSIEXN



## Математическое моделирование движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях

Т.К. Комарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
г. Москва, Российская федерация

**Аннотация:** Одним из наиболее распространенных элементов городской улично-дорожной сети является нерегулируемое примыкание в одном уровне, оборудованное пешеходным переходом. Целью исследования является определение пропускной способности полос движения на нерегулируемом примыкании в одном уровне с пешеходным движением. Задачами исследования являются разработка математической модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне, предложение иерархии и расчетной схемы движения автомобилей и пешеходов, определение пропускной способности полос движения второстепенной дороги, обоснование достоверности результатов математического моделирования. Математическая модель представляет комплексную систему уравнений, которые нужно применять в зависимости от предложенной иерархии транспортных потоков с учетом пешеходного движения. В статье приведены этапы разработки и результаты математического моделирования движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях с целью определения их пропускной способности. Проведено сравнение результатов натурных исследований и математического моделирования пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги. Предложенная модель и результаты моделирования могут быть использованы для определения пропускной способности при проектировании, реконструкции и капитальном ремонте нерегулируемых примыканий в одном уровне с пешеходным движением.

**Ключевые слова:** пропускная способность, нерегулируемое примыкание, пешеходный переход, математическая модель, интенсивность движения, интервал следования.

**Для цитирования:** Комарова Т.К. Математическое моделирование движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.163-174, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_163, EDN: LSIEXN

## Mathematical modelling of the automobiles and pedestrian moving on the unsignalized junction

T.K. Komarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract:** One of the most common elements of the urban road network is an unsignalized junction at the same level equipped with a pedestrian crossing. The purpose of the study is to determinate the capacity of traffic lanes at an unsignalized junction at the same level with pedestrian traffic. The objectives of the study are to develop a mathematical model of the movement of traffic and pedestrian flows at an unsignalized junction at the same level, to propose a hierarchy and a design scheme for the movement of cars and pedestrians, to determine the capacity of the lanes of a minor road, to substantiate the reliability of the results of mathematical modelling. The mathematical model represents a complex system of equations

that need to be applied depending on the proposed hierarchy of traffic flows, taking into account pedestrian traffic. The article presents the stages of development and the results of mathematical modelling of the movement of cars and pedestrians on unsignalized junctions in order to determine their capacity. The comparison of the results of field studies and mathematical modelling of the capacity of the right-turn lane of a minor road is carried out. The proposed model and the simulation results can be used to determine the capacity during the design, reconstruction and overhaul of unsignalized junctions at the same level with pedestrian traffic.

**Keywords:** capacity, unsignalized junction, pedestrian crossing, mathematical model, traffic, headway.

**For citation:** Komarova T.K. Mathematical modelling of the automobiles and pedestrian moving on the unsignalized junction // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.163-174, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_163, EDN: LSIEXN

## 1. Введение

Методика определения пропускной способности нерегулируемых примыканий изложена в ОДМ 218.2.020-2012 [1] и основана теории Е.М. Лобанова о принятии интервалов в главном потоке автомобилей водителями второстепенной дороги. Зарубежные исследования посвящены вопросам движения автомобилей с учетом приоритета проезда примыкания [2, 3, 4]. Согласно принципам мультимодальности [5, 6, 7] в системе необходимо дополнительно выделить пешеходов и велосипедистов, как активных участников дорожного движения и окружающей среды относительно автомобиля [8].

Поток автомобилей и комплекс условий, в которых он движется, представляет собой типичный пример сложной системы [9, 10, 11]. При разработке проблемы, связанной с движением потока автомобилей [12], может быть рассмотрена сложная система «водитель – автомобиль – дорожные условия – средства управления движением – окружающая среда». Чтобы обеспечить наиболее эффективное функционирование системы, то есть наиболее безопасные, удобные и экономичные условия движения потоков автомобилей [13, 14] и пешеходов, необходимо определить количественные связи внутри системы и установить их влияние на поведение всей системы как единого целого. Для получения количественных показателей функционирования системы большое значение имеет выбор математического аппарата. Выбор математического аппарата существенно зависит от конечной цели и решаемых задач [9].

Целью исследования является определение пропускной способности полос движения на нерегулируемом примыкании в одном уровне с пешеходным движением.

Задачами исследования являются разработка математической модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне, предложение иерархии и расчетной схемы движения автомобилей и пешеходов, определение пропускной способности полос движения второстепенной дороги, обоснование достоверности результатов математического моделирования.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Разработка общей концепции математической модели

В качестве математической модели выбрана дискретная система стохастическо-детерминированных уравнений, которые следует комбинировать и последовательно применять в зависимости от исходных данных и планировочных условий для поставленной задачи.

Для случайной величины  $X$  внутри системы уравнений принято распределение Пуассона. Функция, вероятность и плотность распределения случайных величин приняты для дискретной модели согласно распределению Пуассона. Для определения границ применения математической модели проведена рандомизация параметра  $\lambda$  случайной величины и принято усеченное распределение пуассоновских величин.

Математические основы моделирования и распределения случайных величин приняты по вероятностно-статистическому справочнику Г.И. Ивченко и Ю.И. Медведева «Дискретные вероятностные модели: Все важнейшие дискретные модели теории вероятностей, математической статистики и комбинаторного анализа и методы их применения в теории и практике» [9].

Случайная величина (с.в.)  $X$  имеет распределение Пуассона с параметром  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ), что кратко обозначается так:  $(X) = \Pi(\lambda)$ , если ее плотность имеет вид по формуле (1) [9]:

$$P\{X = r\} = \pi_r(\lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^r}{r!}, \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Если в пуассоновском распределении значение 0 запрещено, то наблюдаемая с.в.  $X$  имеет усеченное в нуле (или положительное) пуассоновское распределение по формуле (2):

$$P\{X = k\} = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{1 - e^{-\lambda}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Среднее  $EX$  и дисперсия положительного пуассоновского распределения  $DX$  определены по формулам (3) и (4) соответственно:

$$EX = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda}}, \quad (3)$$

$$DX = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda}} - \frac{\lambda^2 e^{-\lambda}}{(1 - e^{-\lambda})^2}, \quad (4)$$

при этом  $EX^{-1}$  получим по формуле (5):

$$EX^{-1} = \frac{1}{e^\lambda - 1} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\lambda^j}{j! j} \approx [(\lambda - 1)(1 - e^{-\lambda})]^{-1}, \quad (5)$$

(аппроксимация справедлива для достаточно больших значений  $\lambda$  [9]).

Сумма  $n$  независимых одинаково распределенных положительных пуассоновских величин имеет производящую функцию по формуле (6):

$$G(z) = \left( \frac{e^{\lambda z} - 1}{e^\lambda - 1} \right)^n, \quad (6)$$

а соответствующие вероятности имеют вид по формуле (7):

$$P\{Y = y\} = \frac{n! \sigma(y, n) \lambda^y}{(e^\lambda - 1)^n y!}, \quad y = n, n+1, \dots, \quad (7)$$

где  $\sigma(y, n)$  есть числа Стирлинга второго рода.

Пусть  $\{U_1, U_2, \dots\}$  - последовательность независимых и равномерно распределенных на отрезке  $[0, 1]$  случайных величин и  $\xi$  равна по формуле (8) [9]:

$$\xi = \max \left\{ k : \prod_{i=1}^k U_i \geq e^{-\lambda} \right\}. \quad (8)$$

Тогда величина  $\xi$  распределена по закону  $\Pi(\lambda)$ .

Таким образом, выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $\Pi(\lambda)$  можно смоделировать по формуле (9) [9]:

$$X_j = \max \left\{ k : \prod_{i=1}^k U_{X_{j-1}+i} \geq e^{-\lambda} \right\}, \quad j = 1, \dots, n, \quad X_0 = 0. \quad (9)$$

## 2.2. Математическое моделирование движения транспортных и пешеходных потоков

Для модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом пересечении при наличии пешеходного движения выбраны следующие характеристики:

- интервалы следования между передними бамперами автомобилей;
- граничные интервалы, принимаемые водителями второстепенных направлений движения;
- интервалы между группами пешеходов, пересекающих проезжую часть;
- требуемый интервал времени для пешеходов, необходимый для безопасного пересечения проезжей части.

Под событием принято появление одного автомобиля или случая перехода проезжей части в рассматриваемом условном сечении объекта. Сечение может быть назначено в следующих створах:

- полосы движения;
- дороги главного или второстепенного направления;
- кромки проезжей части в начале и конце зоны пешеходного перехода;
- вдоль границы пешеходного перехода.

Следует учитывать, что выбранный характер распределения случайных величин предполагает, что появление одного автомобиля не связано с моментом появления впереди идущего автомобиля, а величины соседних интервалов не имеют корреляционной связи.

Также следует учитывать, что появление одного пешехода или эквивалентной группы пешеходов не связано с моментом появления впереди идущего пешехода или группы пешеходов, а величины соседних интервалов не имеют корреляционной связи.

Количество случаев перехода проезжей части пешеходами зависит от ширины пешеходного перехода и интенсивности пешеходного движения. Автором принято, что случай перехода проезжей части осуществляет группа пешеходов  $n_{cp}$  эквивалентная одному свободно движущемуся пешеходу. Также группа пешеходов занимает всю ширину пешеходного перехода, что эквивалентно движению пешеходов в двух направлениях

Пропускную способность полосы движения [4, 15], оборудованную пешеходным переходом  $P_{III}$ , определим по формуле (10):

$$P_{III} = \frac{3600}{\delta t_{nn}} e^{-\frac{N_{neu} t_{neu.треб.}}{3600}} \quad (10)$$

где  $\delta t_{nn}$  – интервал между передними бамперами автомобилей при разъезде из очереди при пересечении пешеходного перехода, сек.

$t_{neu.треб.}$  – минимальное время, которое требуется группе пешеходов для пересечения проезжей части, сек;

$N_{neu}$  – интенсивность пешеходов, чел./час.

В случае распределения интервалов следования [15, 16] между автомобилями в транспортном потоке согласно распределению Пуассона и применению стохастической модели движения транспортных потоков общее выражение для определения пропускной способности имеет вид [17, 18] по формуле (11):

$$P = M \frac{e^{-\frac{M}{3600} \delta t_p}}{1 - e^{-\frac{M}{3600} \delta t}} \quad (11)$$

где  $P$  – пропускная способность нерегулируемого примыкания, авт./час;

$M$  – интенсивность движения главного направления, авт./час;

$\delta t_{cp}$  – граничный интервал, принимаемый водителями второстепенного направления, сек;

$\delta t$  – интервал между передними бамперами автомобилей при разъезде из очереди второстепенного направления, сек.

При пересечении транспортных потоков нескольких направлений движения, необходимо учитывать их иерархию.

В случае появления пешеходов на проезжей части, также следует учесть преимущество их движения перед автотранспортными средствами.

Автором предложена иерархия транспортных и пешеходных потоков различных направлений, выраженная следующими классами  $i$  ( $i=1...4$ ) с порядковыми номерами  $j$  ( $j=T1...T6$ ) и  $k$  ( $k=П1...П3$ ). Расчетная схема представлена на рис. 1.

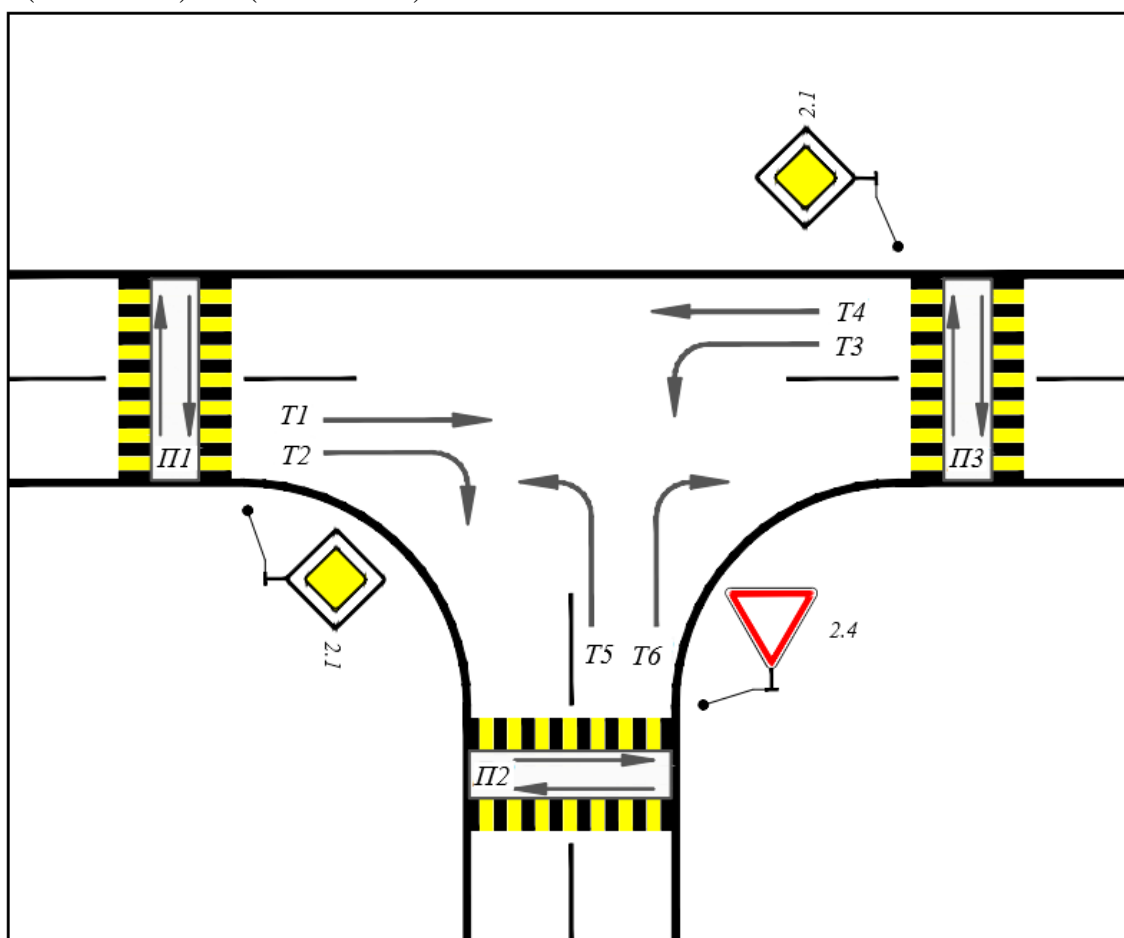


Рис. 1. Схема нерегулируемого примыкания с указанием направлений движения (иллюстрация автора).

Fig. 1. The scheme of unsignaled junction with indicating the directions of movement (illustration by the author).

Класс 1. Водители обладают преимуществом проезда примыкания и могут беспрепятственно осуществлять движение в случае отсутствия пешеходных переходов. К ним относят главные направления движения прямо Т1, Т4 и направо Т2. При наличии пешеходных переходов водители уступают пешеходным потокам П1-П3.

Класс 2. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают направлениям движения Т1 и Т2. К ним относят главные левоповоротные направления движения Т3 и второстепенные правоповоротные направления движения Т6. При наличии пешеходных переходов водители уступают также пешеходным потокам П1-П3.

Класс 3. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают направлениям движения Т1, Т3, Т4. К нему относят второстепенные левоповоротные направления

движения Т5. При наличии пешеходных переходов водители также уступают пешеходным потокам П1-П3.

Класс 4. Пешеходы беспрепятственно движутся по нерегулируемому переходу принятыми группами потоков П1-П3.

Математическая модель определения пропускной способности нерегулируемого примыкания с учетом иерархии типов транспортных потоков соответствует условиям:

– В транспортных потоках Т1, Т2 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков Т3, Т6;

– В транспортных потоках Т3, Т6 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в транспортных потоках Т1, Т2.

– В транспортных потоках Т1, Т3, Т4 существует граничный интервал, достаточный для движения потока Т5;

– В транспортных потоках Т5 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в транспортных потоках Т1, Т3, Т4;

– В пешеходных потоках П1, П2, П3 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков Т1 – Т6.

– В транспортных потоках Т1 – Т6 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в пешеходном потоке П1, П2, П3.

Для каждого транспортного потока направлений Т1-Т6 необходимо определить пропускную способность  $P_{j,k}$  и вероятность их беспрепятственного движения  $p_{j,k}$ .

Вероятность беспрепятственного движения транспортных потоков  $p_{j,k}$  определим по формуле (12):

$$p_{j,k} = \left(1 - \frac{N_j}{P_{j,k}}\right) * p_{\text{пеш}}^k \quad (12)$$

где  $N_j$  – интенсивность  $j$ -ого направления движения, авт./час.

Если транспортный поток не пересекает пешеходный, то  $p_{\text{пеш}}^k = 1$ .

Пропускную способность транспортных потоков различных направлений  $P_{j,k}$  одного типа  $i$  можно объединить в пропускную способность по формуле (13):

$$P_i = \sum_1^{j,k} P_{j,k}, \quad (13)$$

Также необходимо определить вероятность беспрепятственного проезда всех потоков  $i$  –ого типа  $p_i$  по формуле (14):

$$p_i = \prod_1^{j,k} p_j p_{j,k}, \quad (14)$$

Тогда пропускная способность примыкания может быть определена по формуле (15):

$$P = p_i P_i = \prod_1^{j,k} p_j p_{j,k} \sum_1^{j,k} P_{j,k} \quad (15)$$

### 3. Результаты и обсуждение

В качестве расчетной модели принято нерегулируемое однополосное примыкание для правого поворота (рис. 2).

Ширина полосы движения главного и второстепенного направлений принята 3,75 м. Радиус примыкания принят 8,0 м. Ширина пешеходного перехода принята 5,0 м.

Граничный интервал, необходимый для поворота направо второстепенного направления принят  $\delta t_{\text{эл}}^{\text{наво}} = 6,4$  сек. Интервал следования второстепенного направления при разъезде из очереди при повороте направо принят  $\delta t_{\text{от}}^{\text{наво}} = 3,5$  сек.

Интенсивность движения главного направления принята от 0 до 2000 авт./час. Интенсивность движения пешеходов принята от 0 до 500 чел./час. Интенсивность движения второстепенного направления определена в зависимости от условий и равна пропускной способности  $P_9$ .

Пропускная способность примыкания  $P$  будет определяться пропускной способностью правооборотной полосы движения второстепенного направления  $P_9$  в зависимости от интенсивности движения главного направления и интенсивности пешеходов.

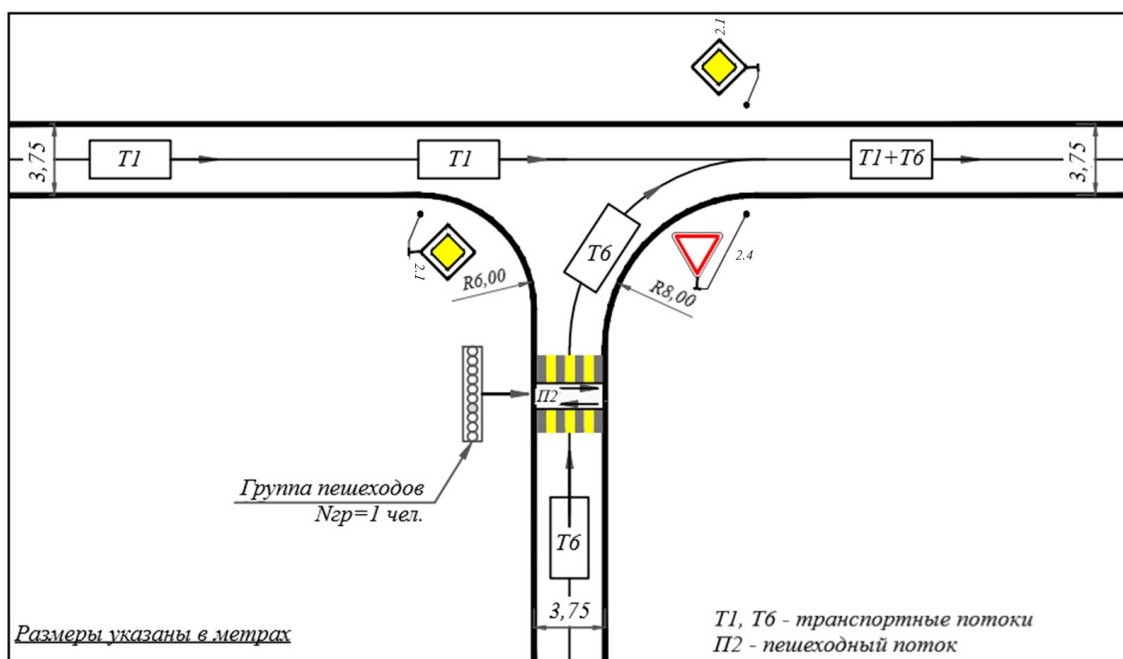


Рис. 2. Расчетная модель 1.1 (иллюстрация автора).

Fig. 2. Design model 1.1 (illustration by the author).

Результаты математического моделирования приведены на рис. 3 и 4. Характерные группы изолиний графиков представлены в диапазонах интенсивности движения главного направления  $N_1 = 600 - 1100$  авт./час и  $N_1 = 1-500$  авт./час.

При интенсивности движения главного направления  $N_1$  в диапазоне от 600 авт./час до 1100 авт./час и отсутствии пешеходного движения пропускная способность правооборотной полосы движения не превышает 450 прив. ед./час.

При интенсивности движения пешеходов 150 пеш./час, пропускная способность находится в диапазоне 170 – 350 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 400 пеш./час пропускная способность снижается на 47% до 235 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 500 чел/час пропускная способность не превышает 200 прив. ед./час.

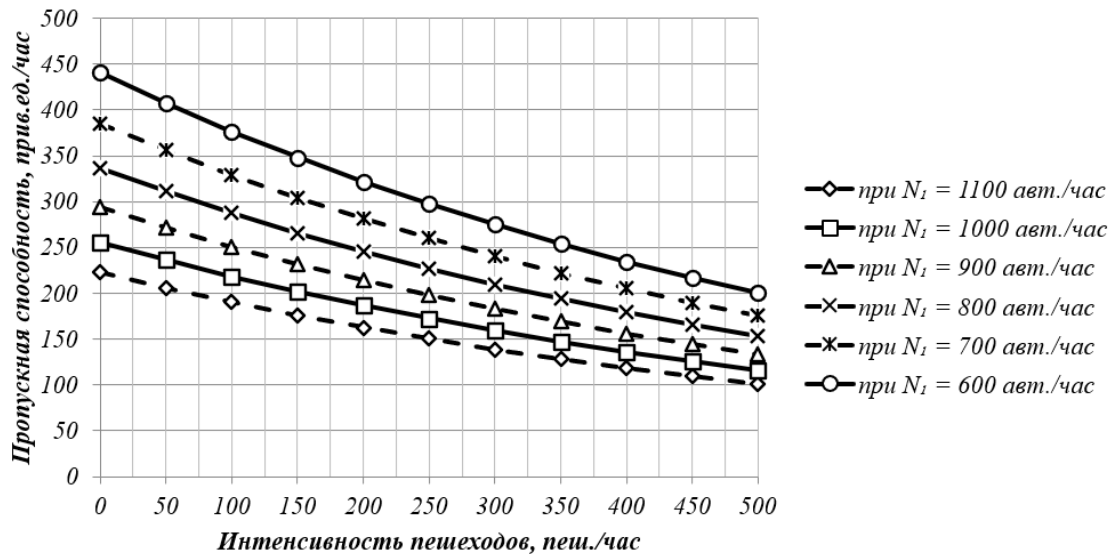


Рис. 3. Пропускная способность направления Т6 при  $N_1 = 600 - 1100$  авт./час,  $N_{пеш} = 0 - 500$  пеш./час. (иллюстрация автора).

Fig. 3. Capacity of the direction T6 at  $N_1 = 600 - 1100$  veh./hour,  $N_{пеш} = 0 - 500$  people/hour (illustration by the author).

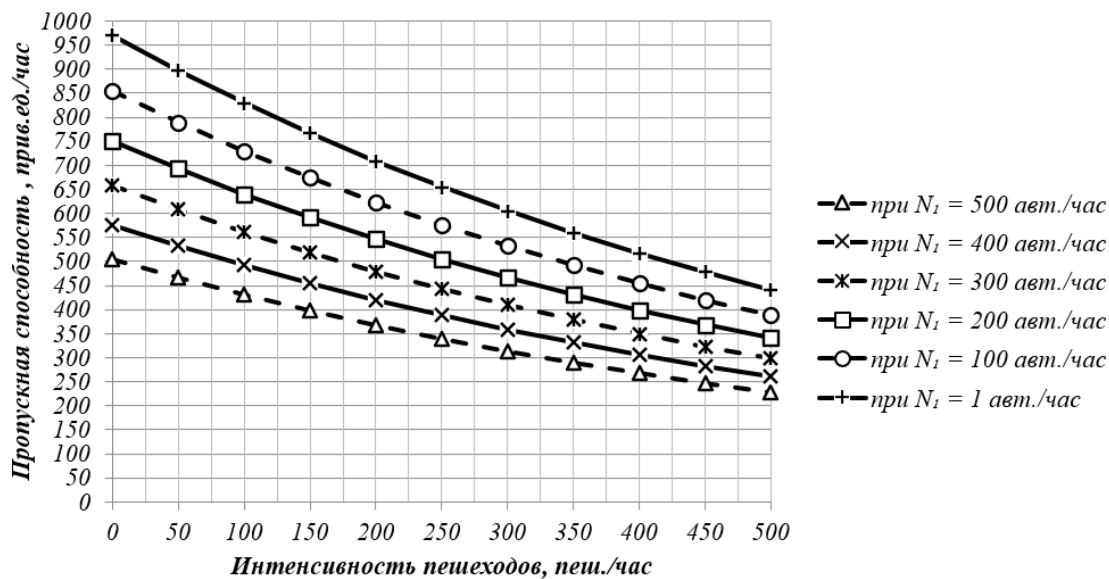


Рис. 4. Пропускная способность направления Т6 при  $N_1 = 1 - 500$  авт./час,  $N_{пеш} = 0 - 500$  пеш./час. (иллюстрация автора).

Fig. 4. Capacity of the direction T6 at  $N_1 = 1 - 500$  veh./hour,  $N_{пеш} = 0 - 500$  people/hour (illustration by the author).

При интенсивности движения главного направления  $N_1$  в диапазоне от 100 авт./час до 500 авт./час и отсутствии пешеходного движения пропускная способность правоповоротной полосы движения не превышает 850 прив. ед./час.

При интенсивности движения пешеходов 150 пеш./час, пропускная способность находится в диапазоне 400 – 750 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 400 пеш./час пропускная способность снижается на 47% до 455 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 500 чел/час пропускная способность не превышает 450 прив. ед./час.



Результаты расчета показали, что при интенсивности движения пешеходов более 400 пеш./час пропускная способность полосы движения снижается практически в два раза.

Сравнение результатов исследования пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги при  $N_{пеш} = 0$  чел./час с данными отечественных [1] и зарубежных авторов [3, 4] приведены на рис. 5.

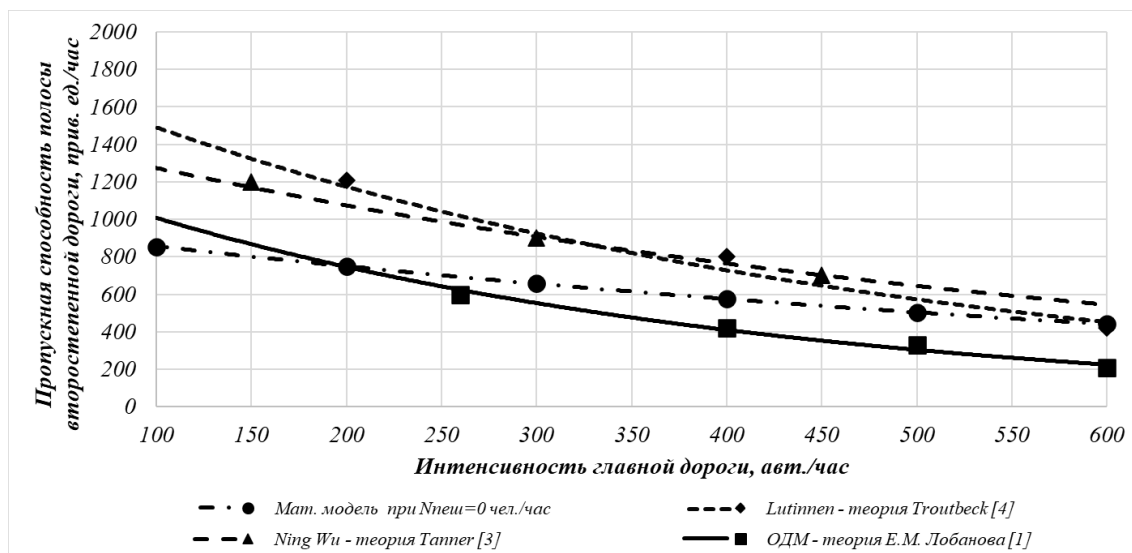


Рис. 5. Сравнение результатов математического моделирования и открытых данных. (иллюстрация автора).

Fig. 5. Comparison of the results of mathematical modeling and open data. (illustration by the author).

Проведено сравнение результатов математического моделирования и натуральных наблюдений, проведенных на городском нерегулируемом примыкании, оборудованном пешеходным переходом [19, 20].

Статистические показатели интенсивности пешеходов, зафиксированные при проведении наблюдений, как количество случаев перехода проезжей части группами по 5 человек и интенсивности движения автомобилей по правопоротной полосе второстепенной дороги, как количество автомобилей приведенное к легковому автомобилю, приведены на рисунке 6. Полученные данные находятся в диапазоне 55 – 324 чел./час. и 73 – 220 прив. ед./час соответственно.

Выборка данных математического моделирования для проведения сравнительного анализа принята в диапазоне интенсивности пешеходного движения 50 - 350 чел./час и в диапазоне пропускной способности полосы движения 50 – 300 прив. ед./час.

Для сравнения выборок по критерию Фишера для дисперсий выборок предложены две гипотезы:

$H_0$  – дисперсии генеральных совокупностей  $D(X) = D(Y)$ , различие между средними значениями статистически незначимо.

$H_1$  - генеральные средние  $D(X) > D(Y)$ , различие между средними значениями результатов статистически значимо.

Степень свободы для критерия Фишера составила 38. Допустимая ошибка  $\alpha = 0,05$ . Уровень надежности  $P = 0,95$ .

Критическое значение критерия Фишера для односторонней критической области  $F_{крит} = 0,583$ . Наблюдаемое значение критерия Фишера для независимых выборок составило  $F_{набл} = 0,286$ .

Так как  $F_{набл} < F_{крит}$ , то принята гипотеза  $H_0$ , то есть различие между средними значениями результатов статистически незначимо.

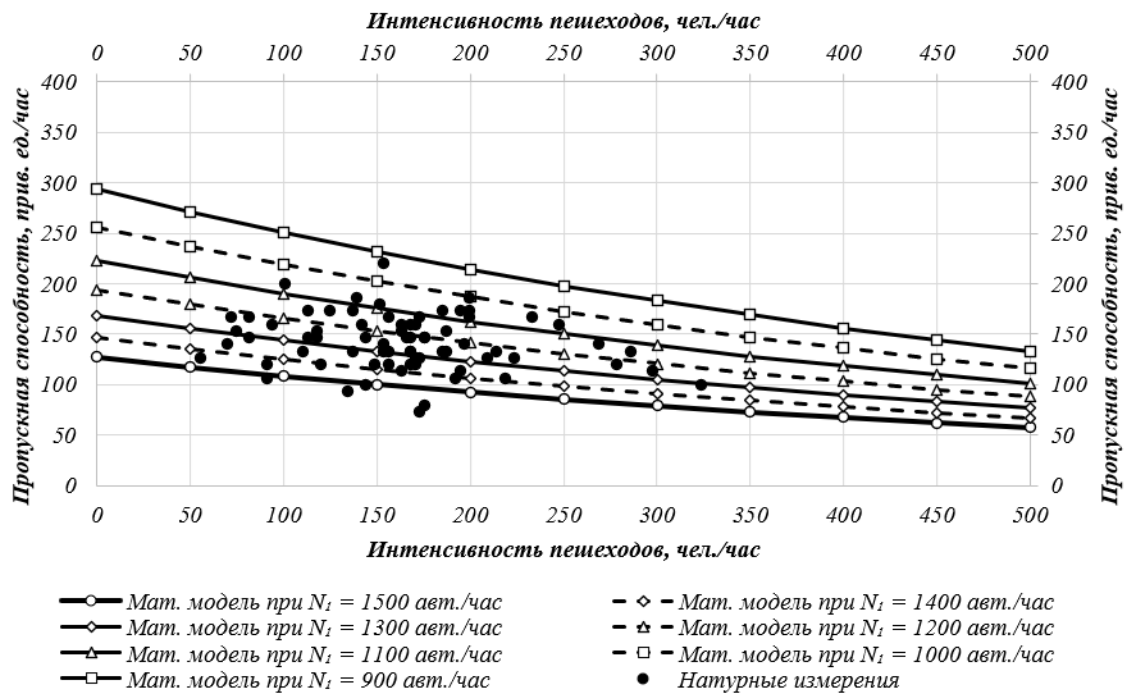


Рис. 6. Сравнение результатов математического моделирования и натуральных измерений.  
(иллюстрация автора).

Fig. 6. Comparison of the results of mathematical modeling and field measurements.  
(illustration by the author).

Следовательно, предложенная математическая модель и результаты математического моделирования пропускной способности полос движения при наличии нерегулируемых пешеходных переходов достоверны при уровне надежности 95%.

#### 4. Заключение

В результате исследования разработана математическая модель движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне, предложена иерархия и расчетная схема движения автомобилей и пешеходов, определена пропускная способность правоповоротной полосы движения второстепенной дороги, обоснована достоверность результатов математического моделирования.

Предложенная математическая модель представляет собой комплексную систему уравнений, которые можно применять в зависимости от заданных условий согласно приоритету проезда примыкания.

Математическая модель совместного движения транспортных и пешеходных потоков достоверна при уровне надежности 95% и может применяться для определения пропускной способности при проектировании, реконструкции и капитальном ремонте нерегулируемых примыканий в одном уровне с пешеходным движением.

#### Список литературы/References

1. ОДМ 218.2.020-2012. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. - М.: Росавтодор, 2012. - 148 с. [ODM 218.2.020-2012. Industry road methodological document. Methodological recommendations for assessing the capacity of highways. - M.: Rosavtdor, 2012. - 148 p.]
2. Akçelik, R. Searching for a Gap Acceptance Theory Basis for Linear Capacity Models / R. Akçelik // Technical Note. - Akçelik & Associates Pty Ltd. - Melbourne, Australia. - May, 2022.
3. Wu, N. Some New Developments in Two-Way-Stop-Controlled Intersections Procedures and Recommendations for a Future Version of the Highway Capacity Manual / N.Wu,

- W.Brilon // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. - April, 2021.
4. Luttinen, R.T. Capacity at Unsignalized Intersections / R.T. Luttinen // *TL Consulting Engineers: TL Research Report*. - Lahti, 2003. - No. 3. ISBN: 952-5415-02-3, ISSN1458-3313.
  5. Hensher, D. Mobility as a service and private car use: Evidence from the Sydney MaaS trial / D.Hensher, C.Ho, D.Reck // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. - March, 2021. - Vol. 145. - P.17-33.
  6. Msaas, B. Literature Review of Mobility as a Service. Sustainability / B.Msaas // *MDPI*. - July, 2022. - 14, 8962.
  7. Wong, Y. Emerging transport technologies and the modal efficiency framework: a case for mobility as a service (MaaS) / Y.Wong, D.A. Hensher, C.M. Mulley // *Special issue of Transportation Research Part A on MaaS and Intelligent Mobility Guest Edited by David Hensher and Corinne Mulley*. – 2020. - Vol. 131. - P. 5-19.
  8. Teodorović, D. Chapter 5 - Capacity and Level of Service / D.Teodorović, M.Janić // *Transportation Engineering, Butterworth-Heinemann*. - 2017. - P.197-292.
  9. Ивченко, Г.И. Дискретные вероятностные модели: Все важнейшие дискретные модели теории вероятностей, математической статистики и комбинаторного анализа и методы их применения в теории и практике / Г.И.Ивченко, Ю.И.Медведев. – М.: ЛЕНАНД, 2021. - 620 с. ISBN 978-5-9710-7145-7. [Ivchenko, G.I. Discrete probability models: All the most important discrete models of probability theory, mathematical statistics and combinatorial analysis and methods of their application in theory and practice / G.I.Ivchenko, Yu.I.Medvedev. – М.: LENAND, 2021. - 620 p. ISBN 978-5-9710-7145-7.]
  10. Liu, L. Modelling Pedestrian Social Group Passing Strategy with Expression-Matrix and Social Force / L.Liu, Y.Zhao, X.Zou // *Traffic and Granular Flow 2019*. – 2020. - Vol 252.
  11. Yashina, M.V. Uniform Cluster Traffic Model on Closed Two-Contours System with Two Non-symmetrical Common Nodes / M.V.Yashina, A.G.Tatashev // *Traffic and Granular Flow 2019. Springer Proceedings in Physics*. - 2020. – Vol. 252.
  12. Cordes, J. The Trouble with 2nd Order Models or How to Generate Stop-and-Go Traffic in a 1st Order Model / J.Cordes, A.Schadschneider, A.Tordeux // *Traffic and Granular Flow 2019. Springer Proceedings in Physics*. - 2020. – Vol. 252.
  13. Николаева, Р.В. Исследование наездов на пешеходов на улично-дорожной сети г. Казани / Р.В. Николаева, И.И. Попова // *Техника и технология транспорта*. - 2022. - № 1 (24). - С. 10. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N2410BDD122.pdf>. [Nikolaeva, R.V. Study of collisions with pedestrians on the road network of Kazan / R.V. Nikolaeva, I.I. Popova // *Transport engineering and technology*. - 2022. - № 1 (24). - P. 10. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N2410BDD122.pdf>.]
  14. Николаева, Р.В. Оценка поведения пешеходов / Р.В. Николаева, П.Л. Щур // *Вестник НЦБЖД*. – 2023. – № 2 (56). – С. 119–127. [Nikolaeva, R.V. Pedestrian Behavior Assessment. / R.V. Nikolaeva, P.L. Shchur // *Vestnik NCBZHD*. – 2023. – № 2 (56). – P. 119–127.]
  15. Lemke, K. The New German Highway Capacity Manual (HBS 2015) / K.Lemke // *Transportation Research Procedia*. - 2016. - Vol. 15. - P.26-35.
  16. Luttinen, R.T. Movement Capacity at Two-Way Stop-Controlled Intersections / R.T. Luttinen // *Transportation Research Record*. – 2004. vol. 1883. - P. 198-202.
  17. Wegmann, H. A General Capacity Formula for Unsignalized Intersections / H.Wegmann // *Intersections without Traffic Signals II: Proceedings of an International Workshop*. - 18–19 July, 1991. - P.177-191.
  18. Wu, N. Universal procedure for capacity determination at unsignalized (Priority-Controlled) intersections / N.Wu, W.Brilon // *Transportation Research Part B: Methodological*. - July, 2001. - vol. 35. - P. 593-623.
  19. Komarova, T.K. Improving the Digital Modeling Quality of Unsignalized Intersections Equipped with a Pedestrian Crossing / T.K. Komarova // *2022 Intelligent Technologies*

and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). - 2022. - P. 1-4. - doi: 10.1109/TIRVED56496.2022.9965532.

20. Немчинов, Д.М. «Переходный» период / Д.М. Немчинов, Д.С. Мартяхин, Т.К. Комарова, Н.В. Данилина // Автомобильные дороги. – 2022. – № 9(1090). – С. 120-121. – EDN NCJDRV. [Nemchinov D.M. "Transition" period. D.M. Nemchinov, D.S. Martuyakhin, T.K. Komarova, N.V. Danilina // Highways. – 2022. – № 9(1090). – P. 120-121. – EDN NCJDRV.]

#### **Информация об авторах**

**Комарова Татьяна Константиновна**, аспирант, ассистент кафедры «Изыскания и проектирование дорог», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация.

Email: [tatianakkom@gmail.com](mailto:tatianakkom@gmail.com)

#### **Information about the authors**

**Tatiana K. Komarova**, postgraduate student, assistant of the Department of Survey and Design of Roads, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Email: [tatianakkom@gmail.com](mailto:tatianakkom@gmail.com)