

УДК: 625.71

DOI: 10.52409/20731523_2023_4_318

EDN: MPJTQR



Влияние положения пешеходного перехода на главной дороге на пропускную способность нерегулируемого примыкания

Т.К. Комарова¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Российская федерация

Аннотация: Целью настоящего исследования является определение пропускной способности полос движения на нерегулируемом примыкании в одном уровне с пешеходным движением при различных положениях пешеходного перехода на главной дороге. Задачами исследования являются применение разработанной математической модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне в соответствии с предложенной иерархией; разработка расчетных схем движения автомобилей и пешеходов; определение пропускной способности полос движения второстепенной дороги. В статье приведены результаты исследования влияния положения пешеходного перехода на главной дороге на пропускную способность правоповоротного направления второстепенной дороги. Исследование выполнено методом математического моделирования движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемом примыкании согласно разработанным схемам. Математическая модель учитывает приоритет движения на нерегулируемом примыкании и представляет собой комплексную систему стохастически-детерминированных уравнений. Предложенная модель и результаты исследования могут быть использованы для определения пропускной способности при проектировании, реконструкции и капитальном ремонте нерегулируемых примыканий в одном уровне с пешеходным движением, а также при выборе местоположения пешеходного перехода на главной дороге.

Ключевые слова: нерегулируемое примыкание, нерегулируемый пешеходный переход, пропускная способность, интенсивность движения, интенсивность пешеходов, математическое моделирование

Для цитирования: Комарова Т.К. Влияние положения пешеходного перехода на главной дороге на пропускную способность нерегулируемого примыкания // Известия КГАСУ, 2023, № 4 (66), с. 318-327, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_318, EDN: MPJTQR

The influence of the position of a pedestrian crossing on the main road on the capacity of an unsignalized junction

T.K. Komarova¹

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation

Abstract: The purpose of this study is to determine the capacity of traffic lanes at an unsignalized junction at the same level with pedestrian traffic at different positions of the pedestrian crossing on the main road. The objectives of the study are the application of the developed mathematical model of traffic and pedestrian flows at an unsignalized junction at the same level in accordance with the proposed hierarchy; the development of computational schemes for the movement of cars and pedestrians; the determination of the capacity of the lanes of the secondary road. The article presents the results of the study of the influence of the

pedestrian crossing position on the main road on the capacity of the right-turning direction of a secondary road. The study was carried out by the method of mathematical modeling of the movement of cars and pedestrians at an unsignalized junction according to the developed schemes. The mathematical model takes into account the priority of movement at an unsignalized junction and it is a complex system of stochastic-deterministic equations. The proposed model and the results of the study can be used to determine the capacity during the design, reconstruction and overhaul of unsignalized junctions at the same level with pedestrian traffic, as well as when choosing the location of a pedestrian crossing on the main road.

Keywords: capacity, unsignalized junction, unsignalized pedestrian crossing, capacity, traffic intensity, pedestrian intensity, mathematical model

For citation: Komarova T.K. The influence of the position of a pedestrian crossing on the main road on the capacity of an unsignalized junction// News KSUAE, 2023, № 4 (66), p. 318-327, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_318, EDN: MPJTQR

1. Введение

Нерегулируемые примыкания являются одним из часто устраиваемых планировочных элементов улично-дорожной сети [1, 2]. В городских условиях нерегулируемые примыкания должны быть оборудованы пешеходными переходами для пропуска пешеходов через проезжую часть и обеспечения связанности транспортных и пешеходных маршрутов населения города [3, 4].

При проектировании элементов улично-дорожной сети необходимо знать и обосновано определять их пропускную способность. Существующие отечественные и зарубежные методики определяют пропускную способность нерегулируемых примыканий, как максимальное количество автомобилей второстепенной дороги, которые могут влиться в транспортный поток главной дороги, по которой автомобили движутся с заданными интервалами [5, 6, 7]. При этом среди интервалов между транспортными средствами двигающимися по главной дороге существует граничный интервал, который водители, двигающиеся по второстепенной дороге, могут принять для выполнения маневра [8, 9, 10].

В зарубежной практике особое внимание уделено обеспечению комфорта, безопасности всех участников дорожного движения, в том числе пешеходов и велосипедистов [11, 12, 13]. Совокупный учет всех пользователей улично-дорожной сети отвечает современному принципу мультимодальной оценки качества движения [14, 15, 16].

Автором проведены натурные и математические исследования пропускной способности нерегулируемых примыканий, оборудованных пешеходным переходом. В том числе проведено сравнение результатов исследования пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги при $N_{\text{пеш}} = 0$ чел./час с данными отечественных и зарубежных авторов и сравнение результатов математического моделирования и натурных наблюдений на городском нерегулируемом примыкании [17], оборудованном пешеходным переходом, что доказало достоверность предложенной математической модели при уровне надежности 95%.

Результаты математического моделирования расчетной схемы при отсутствии пешеходного перехода на главной дороге показали снижение пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги в два раза при интенсивности пешеходного движения 400 чел./час¹.

Выбор положения пешеходного перехода на главной дороге при проектировании, реконструкции и капитальном ремонте нерегулируемых примыканий является актуальной проблемой и должен быть исследован.

¹ 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.

Целью настоящего исследования является определение пропускной способности полос движения на нерегулируемом примыкании в одном уровне с пешеходным движением при различных положениях пешеходного перехода на главной дороге.

Задачами исследования являются применение разработанной математической модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне в соответствии с предложенной иерархией; разработка расчетных схем движения автомобилей и пешеходов; определение пропускной способности полос движения второстепенной дороги в зависимости от положения пешеходного перехода.

2. Материалы и методы

В качестве математической модели выбрана комплексная дискретная система стохастическо-детерминированных уравнений, которые следует комбинировать и последовательно применять в зависимости от исходных данных и планировочных условий согласно приоритету проезда примыкания.

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» [18].

Пропускную способность полосы движения, оборудованную пешеходным переходом $P_{ПП}$, определим по формуле:

$$P_{ПП} = \frac{3600}{\delta t_{mn}} e^{-\frac{N_{пеш} t_{пеш.треб.}}{3600}}, \quad (1)$$

где δt_{mn} – интервал между передними бамперами автомобилей при разъезде из очереди при пересечении пешеходного перехода, сек.;

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

$N_{пеш}$ – интенсивность пешеходов или количество случаев перехода проезжей части группой пешеходов, чел./час.

В случае распределения интервалов следования между автомобилями в транспортном потоке согласно распределению Пуассона и применению стохастической модели движения транспортных потоков общее выражение для определения пропускной способности имеет вид:

$$P = M \frac{e^{-\frac{M}{3600} \delta t_{cp}}}{1 - e^{-\frac{M}{3600} \delta t}}, \quad (2)$$

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

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

δt_{cp} – граничный интервал, принимаемый водителями второстепенного направления, сек.;

δt – интервал между передними бамперами автомобилей при разъезде из очереди второстепенного направления, сек.

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

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 ($i = 1 \dots 4$) с порядковыми номерами

транспортных потоков $j(j = T1...T6)$ и порядковыми номерами пешеходных потоков $k(k = П1...П3)$:

- Класс 1. Водители обладают преимуществом проезда примыкания и могут беспрепятственно осуществлять движение в случае отсутствия пешеходных переходов. К ним относят главные направления движения прямо $T1, T4$ и направо $T2$. При наличии пешеходных переходов водители уступают пешеходным потокам $П1-П3$.

- Класс 2. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают направлениям движения $T1$ и $T2$. К ним относят главные левоворотные направления движения $T3$ и второстепенные правоворотные направления движения $T6$. При наличии пешеходных переходов водители уступают также пешеходным потокам $П1-П3$.

- Класс 3. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают направлениям движения $T1, T3, T4$. К нему относят второстепенные левоворотные направления движения $T5$. При наличии пешеходных переходов водители также уступают пешеходным потокам $П1-П3$.

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

Общая схема нерегулируемого примыкания представлена на рис. 1.

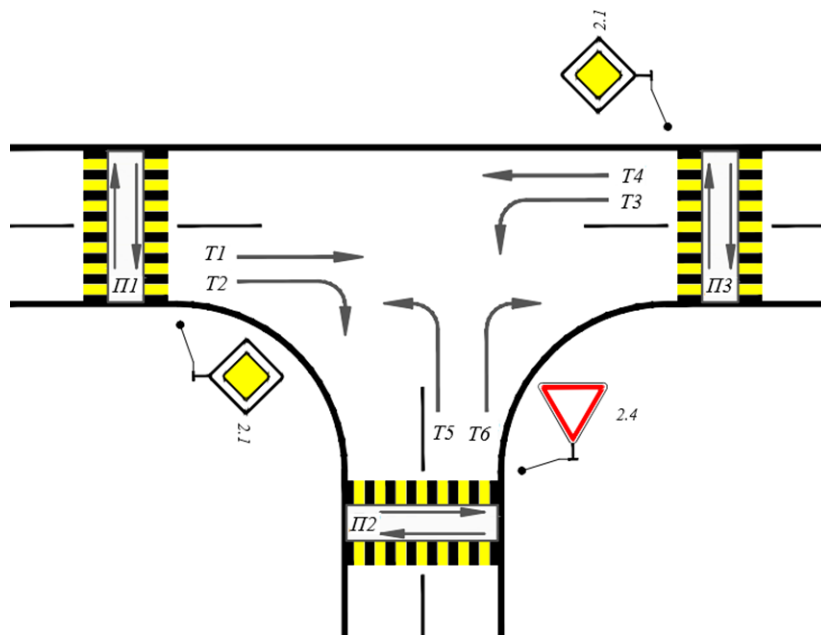


Рис. 1. Схема нерегулируемого примыкания с указанием направлений движения (иллюстрация автора)

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

Математическая модель определения пропускной способности нерегулируемого примыкания с учетом иерархии типов транспортных потоков соответствует условиям беспрепятственного проезда примыкания автомобилями и беспрепятственного движения пешеходов.

Пропускную способность примыкания определим по формуле:

$$P = p_i P_i = \prod_1^{j,k} p_j p_{j,k} \sum_1^{j,k} P_{j,k} \tag{3}$$

где $i(i = 1...4)$ - порядковый номер класса;

$j(j = T1...T6)$ - порядковый номер направления движения транспортных потоков;

k ($k = П1...П3$) - порядковый номер сечения, в котором движется пешеходный поток;

p_i - вероятность беспрепятственного движения потока i -ого класса;

P_i - пропускная способность потока i -ого класса;

p_j - вероятность беспрепятственного движения j -ого направления движения транспортного потока, при отсутствии пешеходного движения;

$p_{j,k}$ - вероятность беспрепятственного движения j -ого направления движения транспортного потока, при наличии пешеходного движения в сечении k ;

$P_{j,k}$ - пропускная способность полосы движения j -ого направления с учетом пешеходного движения в сечении k .

3. Результаты и обсуждение

Математическое моделирование совместного движения автомобилей и пешеходов проведено для разработанных расчетных схем однополосного нерегулируемого примыкания в одном уровне с различными вариантами положения пешеходных переходов.

В статье рассмотрены различные варианты расположения пешеходного перехода на главной дороге:

- Вариант 1. Пешеходный переход на главной дороге расположен перед примыканием второстепенной дороги ближе к сечению 1-1.

- Вариант 2. Пешеходный переход на главной дороге расположен после примыкания второстепенной дороги ближе к сечению 3-3.

Расчетные схемы приведены на рис. 2 и 3.

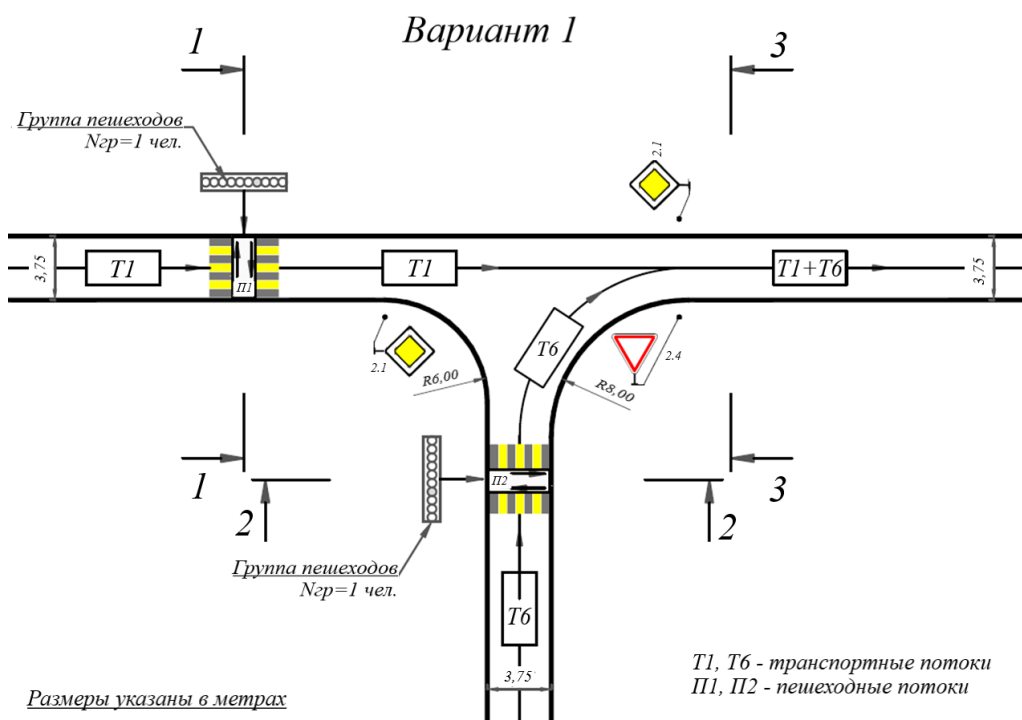


Рис. 2. Расчетная схема варианта 1 математической модели (иллюстрация автора)
Fig. 2. Design scheme of the option 1 of mathematical model (illustration by the author)

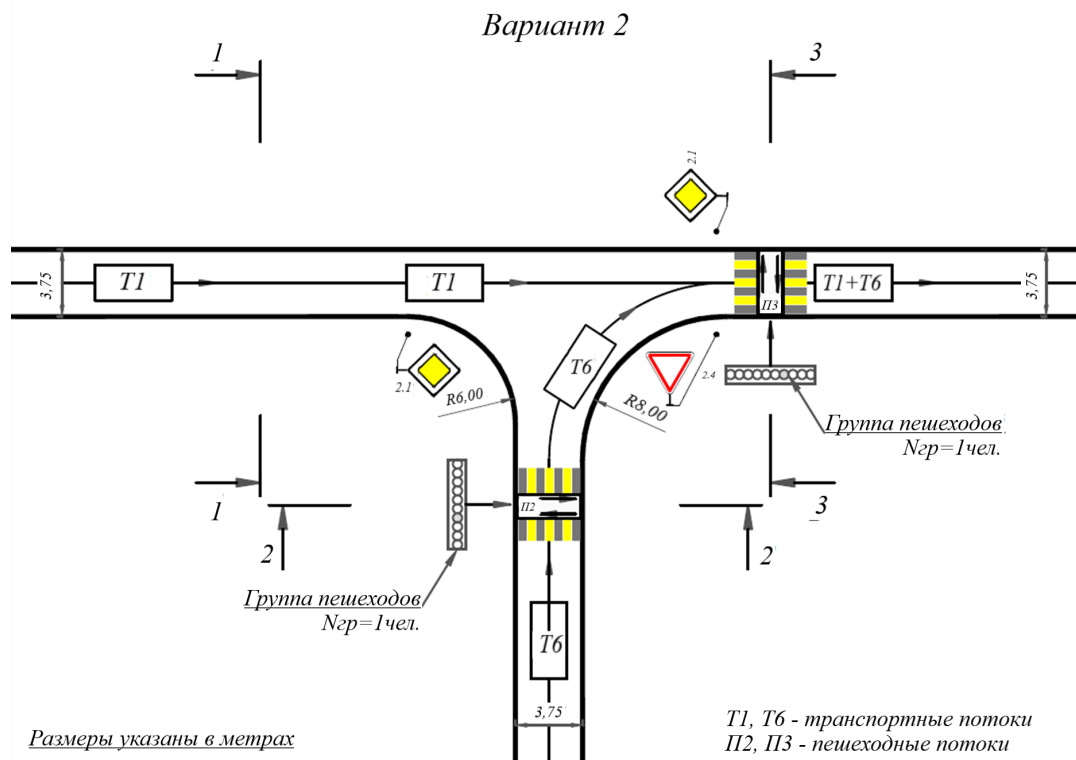


Рис. 3. Расчетная схема варианта 2 математической модели (иллюстрация автора)
Fig. 3. Design scheme of the option 2 of mathematical model (illustration by the author)

Второстепенное направление движения во всех рассмотренных случаях оборудовано нерегулируемым пешеходным переходом шириной 5,0 м. Длина пешеходного перехода принята в зависимости от ширины проезжей части.

Ширина полосы движения главного и второстепенного направлений принята 3,75 м. Радиус примыкания принят 8,0 м. Граничный интервал, необходимый для поворота направо второстепенного направления принят $\delta t_{21}^{наво} = 6,4$ сек. Интервал следования второстепенного направления при разъезде из очереди при повороте направо принят $\delta t_{вт}^{наво} = 3,5$ сек.

Транспортный поток Т1 поступает из сечения 1-1 в сечение 3-3 с переменной интенсивностью N_1 от 0 до 2000 авт./час.

При отсутствии пешеходных переходов в сечениях 1-1 и 3-3 на главной дороге пропускная способность полосы движения транспортного потока Т1 определена как максимальная заданная интенсивность движения N_1 .

При наличии пешеходных переходов в сечениях 1-1 и/или 3-3 на главной дороге для остальных схем пропускная способность полосы движения транспортного потока Т1 определена при интенсивности пешеходного потока П1 для варианта 1 или П3 для варианта 2 от 1 до 1500 чел./час в соответствии с вышеуказанной методикой.

Транспортный поток Т6 поступает из сечения 2-2 в сечение 3-3 с переменной интенсивностью N_6 от 0 до максимальной [авт./час] в зависимости от интенсивности N_1 транспортного потока Т1 и интенсивности пешеходных потоков П2 для обоих вариантов и пешеходного потока П3 для варианта 2 в сечениях 2-2 и 3-3.

Если принять, что интенсивность пешеходного движения в сечениях 2-2 и 3-3 равна 0 чел./час, то интенсивность движения N_6 транспортного потока Т6 имеет максимально возможное значение в зависимости от интенсивности $N_1 = 0-2000$ авт./час транспортного потока Т1 согласно расчету по предложенной модели.

Максимально возможная интенсивность движения транспортного потока Т6 будет равна его пропускной способности P_6 и равняется пропускной способности примыкания

P в зависимости от интенсивности движения главного направления и интенсивности пешеходов.

Результаты математического моделирования пропускной способности полосы движения транспортного потока Т1 приведены на рис. 4.

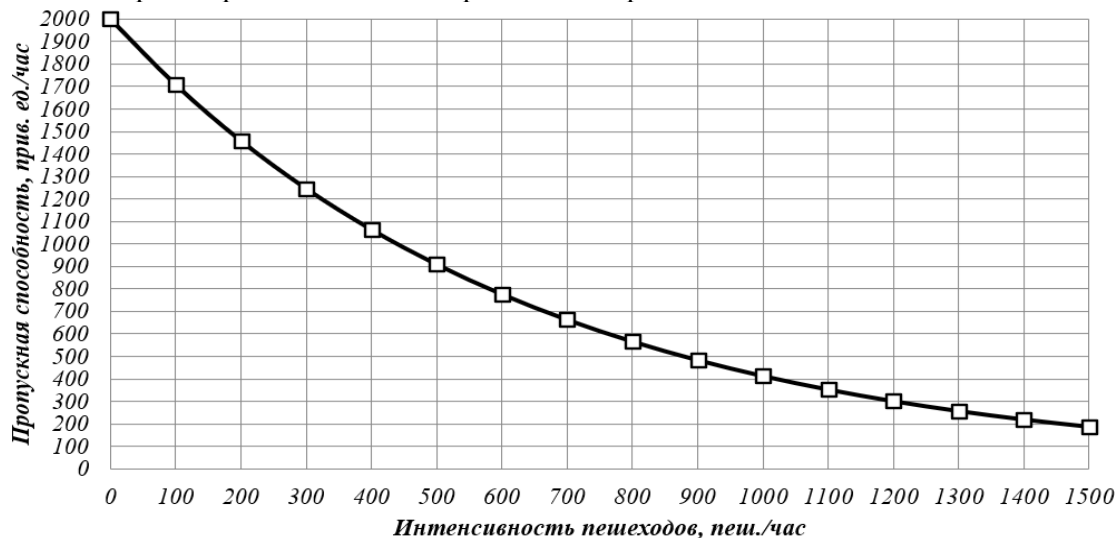


Рис. 4. Зависимость пропускной способности главной дороги от интенсивности пешеходного потока в створе 1-1 (иллюстрация автора)
 Fig. 4. Dependence of the capacity of the main road on the intensity of pedestrian traffic in the alignment 1-1 (illustration by the author)

Результаты математического моделирования пропускной способности полосы движения второстепенной дороги (транспортный поток Т6) приведены на рис. 5 и 6. Характерные группы изолиний графиков представлены в диапазонах интенсивности транспортного потока Т1, движущегося по главной дороге $N_1 = 400 - 900$ авт./час.

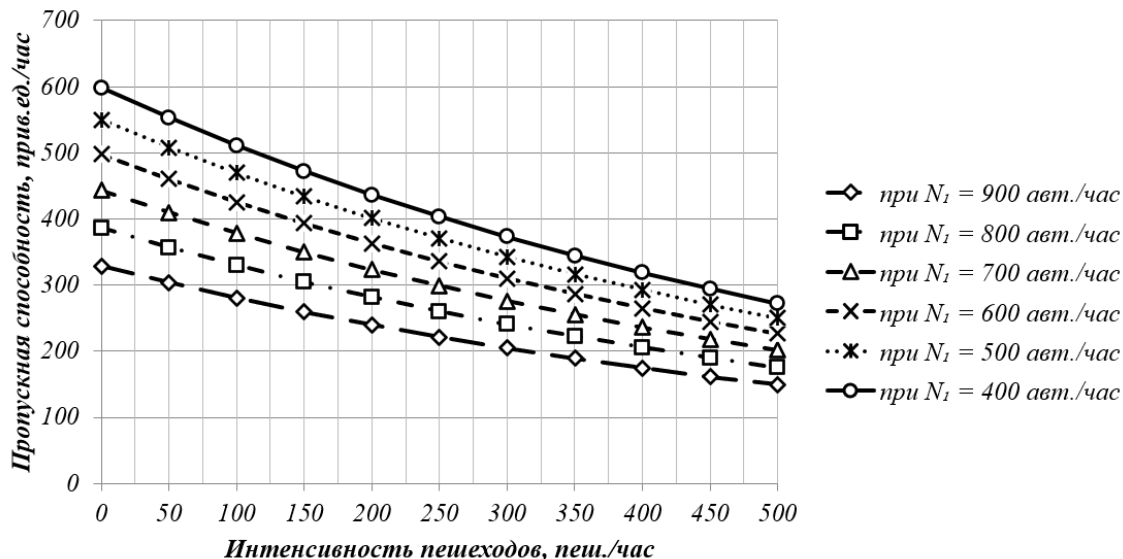


Рис. 5. Вариант 1. Зависимость пропускной способности второстепенной дороги (транспортный поток Т6) от интенсивности пешеходного потока в створе 1-1 и 2-2 (иллюстрация автора)
 Fig. 5. Option 1. Dependence of the capacity of a secondary road (traffic flow Т6) on the intensity of pedestrian traffic in the alignment 1-1 and 2-2 (illustration by the author)

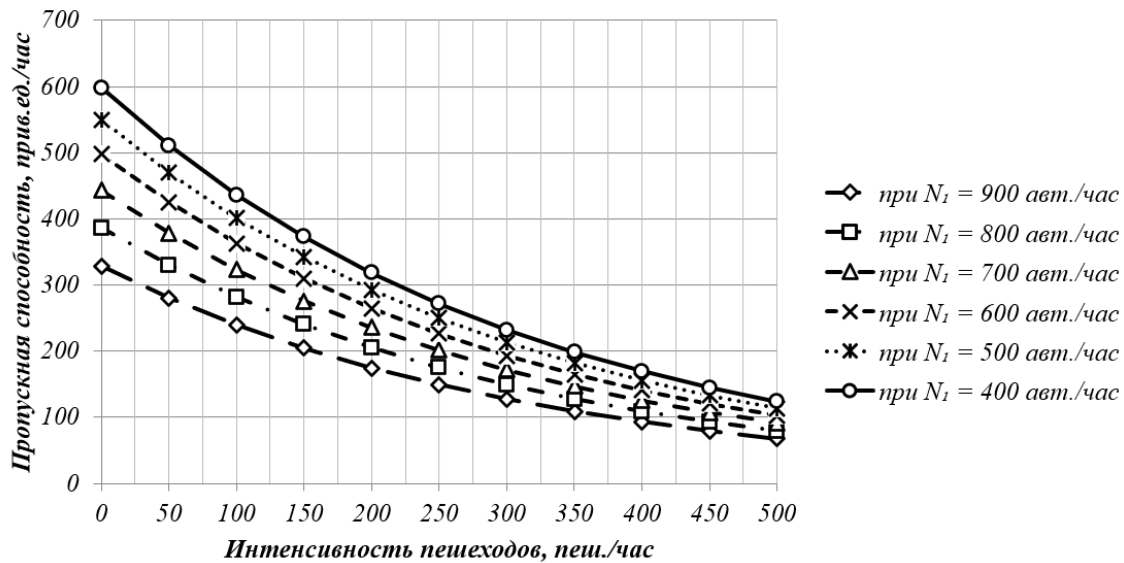


Рис. 6. Вариант 2. Зависимость пропускной способности второстепенной дороги (транспортный поток Т6) от интенсивности пешеходного потока в створе 2-2 и 3-3 (иллюстрация автора).
 Fig. 6. Option 2. Dependence of the capacity of a secondary road (traffic flow T6) on the intensity of pedestrian traffic in the alignment 2-2 and 3-3 (illustration by the author).

Сравнительный анализ результатов математического моделирования пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги в зависимости от положения пешеходного перехода на главной дороге и интенсивности пешеходного движения приведен в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов математического моделирования

Интенсивность пешеходов Nпеш, чел./час	Интенсивность транспортного потока T1 (N1), авт./час						Снижение пропускной способности полосы движения второстепенной дороги (транспортный поток T6), %
	Вариант 1			Вариант 2			
	400	600	800	400	600	800	
	Пропускная способность полосы движения второстепенной дороги (транспортного потока T6) прив.ед./час						
0	505	443	328	550	443	328	0,0
100	470	379	281	401	323	240	14,6
200	401	323	240	293	236	175	27,1
400	293	236	175	156	125	93	46,8

Результаты исследования показали, что пропускная способность правоповоротной полосы движения второстепенной дороги зависит от положения пешеходного перехода на главной дороге и интенсивности пешеходного движения.

Расположение пешеходного перехода на однополосных примыканиях непосредственно перед примыканием при отсутствии поворота направо с главной дороги повышает пропускную способность примыкания.

4. Заключение

В результате проведенного исследования сформулированы следующие выводы:

1. Предложена математическая модель определения пропускной способности нерегулируемых примыканий с учетом приоритета совместного движения транспортных и пешеходных потоков.
2. Разработаны расчетные схемы нерегулируемого примыкания с различным положением пешеходного перехода на главной дороге.
3. Пропускная способность полосы движения главной дороги (при отсутствии смешанных полос движения) снижается при увеличении интенсивности пешеходного движения и не зависит от положения пешеходного перехода на главной дороге.
4. Пропускная способность полосы движения правоповоротного направления второстепенной дороги зависит от положения пешеходного перехода на главной дороге и может быть увеличена при расположении пешеходного перехода перед примыканием: на 14% при интенсивности пешеходного движения до 100 чел./час; на 27% при интенсивности пешеходного движения до 200 чел./час; на 46% при интенсивности пешеходного движения до 400 чел./час.
5. Предложенная модель и результаты исследования могут быть использованы для определения пропускной способности при проектировании, реконструкции и капитальном ремонте нерегулируемых примыканий.

Список литературы/References

1. Alkhatib, A.A.A. Novel system for road traffic optimisation in large cities / A.A.A. Alkhatib, K.A. Maria, S. Alzu'bi, E.A. Maria // IET Smart Cities. - 4(2). - 2022. - P. 143–155.- doi:10.1049/smc2.12032.
2. Xing, R. A Regional Road Network Capacity Estimation Model for Mountainous Cities Based on Auxiliary Map / R. Xing, W. Fei, C. Xiaoyu, C. Ning, Y. Tao, P. Bo // Sustainability. - 2023. - 15, 11439. - P. 1-27. - doi:10.3390/su151411439.
3. 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. Investigation of pedestrian collisions on the Kazan street and road network / R.V. Nikolaeva, I.I. Popova // Transport engineering and technology. - 2022. - № 1 (24). - P. 10. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N2410BDD122.pdf>.]
4. Николаева, Р.В. Оценка поведения пешеходов / Р.В. Николаева, П.Л. Щур // Вестник НЦБЖД. - 2023. - № 2 (56). - С. 119–127. [Nikolaeva, R.V. Assessment of pedestrian behaviour / R.V. Nikolaeva, P.L. Shchur // Vestnik NCBŽD. - 2023. - № 2 (56). - P. 119–127.]
5. Akçelik, R. Searching for a Gap Acceptance Theory Basis for Linear Capacity Models / R. Akçelik // Technical Note. - Akcelik & Associates Pty Ltd. - Melbourne, Australia. - May, 2022.
6. 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.
7. Goyani, J. Crossing conflict models for urban un-signalized T-intersections in India / G. Jaydip, G. Ninad, A. Shriniwas // Transportation letters. The International Journal of Transportation Research. - August, 2023. - P. 1-9. - doi:10.1080/19427867.2023.2250161.
8. Gracanin, D. Simulation modelling of pedestrians influence on the roundabout capacity / D. Gracanin, N. Ruskic, T. Pavlica, M. Maric, L.D.Ciric // International Journal of Simulation Modelling. - 2023. - 22, 3. - P. 474-484. - doi: 10.2507/IJSIMM22-3-656.
9. Luther, P.J. The unsignaled intersection performance analysis of Arterial access road at Karawang barat 1 toll gate, West Java / P.J. Luther, I.R. Andri, T. Mohamad // Indonesian Journal of Multidisciplinary Science. - 2023. - 1(1). - P. 451-459. - doi:10.55324/ijoms.v1i1.402.

10. 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.
11. Lopes, A.S. Mobility as a service and socio-territorial inequalities: A systematic literature review / A.S. Lopes, M. Orozco-Fontalvo, F. Moura, D. Vale // Journal of Transport and Land Use. – 2023. – Vol. 16. - N. 1. – P. 215-240. – doi:10.5198/jtlu.2023.2273.
12. Hensher, D.A. Mobility as a service and private car use: Evidence from the Sydney MaaS trial / D.A.Hensher, C.Q. Ho, D.J. Reck // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2020/ - Vol. 145. – P. 17-33. – doi:10.1016/j.tra.2020.12.015.
13. 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.
14. Msaas, B. Literature Review of Mobility as a Service. Sustainability / B.Msaas // MDPI. - July, 2022. - 14, 8962.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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 probabilistic 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.]

Информация об авторах

Комарова Татьяна Константиновна – аспирант, ассистент кафедры «Изыскания и проектирование дорог», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация
E-mail: tatianakkom@gmail.com

Information about the authors

Tatiana K. Komarova – post-graduate student, assistant of the Department of Research and Design of Roads, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation
E-mail: tatianakkom@gmail.com