

Математическое моделирование движения автотранспорта и пешеходов на нерегулируемых перекрестках

А.Г. Баламирзоев¹, А.З. Салахов², Д.Н. Селимханов³

¹Дагестанский государственный педагогический университет им.Р.Гамзатова,

¹367000, г.Махачкала, ул. М. Ярагского, 57, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

³Махачкалинский филиал МАДИ,

³367008, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 1, Россия

Резюме. Цель. Разработка математической модели совместного движения транспортных и пешеходных потоков на городских нерегулируемых примыканиях в одном уровне и рекомендаций по определению их пропускной способности. **Метод.** Исследование основано на применении технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. В качестве модели системы взаимодействия транспортных и пешеходных потоков выбрана вероятностная Пуассоновская модель. **Результат.** Разработаны расчетные схемы для математического моделирования в зависимости от числа полос движения и местоположения пешеходного перехода. Разработан метод определения пропускной способности нерегулируемых примыканий в одном уровне с пешеходным движением. **Вывод.** Пропускная способность нерегулируемого примыкания определена как сумма пропускных способностей полос движения второстепенной дороги с учетом приоритета пешеходных потоков и транспортных потоков главного направления в зависимости от различных переменных (интенсивностей движения автомобилей главного направления, доли поворачивающих автомобилей, интервалов прибытия групп пешеходов, интенсивности пешеходного движения).

Ключевые слова: математическое моделирование, пропускная способность, транспортный поток, интенсивность движения

Для цитирования: А.Г. Баламирзоев, А.З. Салахов, Д.Н. Селимханов. Математическое моделирование движения автотранспорта и пешеходов на нерегулируемых перекрестках. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(2):44-52. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-44-52.

Mathematical modeling of the movement of vehicles and pedestrians at unregulated intersections

A.G. Balamirzoev¹, A.Z. Salakhov², D.N. Selimkhanov³

¹ R.Gamzatov Daghestan State Pedagogical University,

¹ 57 M. Yaragsky St., Makhachkala 367000, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

³Mahachkala branch of MADI,

³1 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367008, Russia

Abstract. Objective. Development of a mathematical model of the joint movement of traffic and pedestrian flows at urban unregulated junctions at the same level in order to develop recommendations for determining their capacity. **Method.** The research is based on the use of modern technology of mathematical modeling and computational experiment. A probabilistic Poisson mathematical model was chosen as a model of a complex system of interaction between

transport and pedestrian flows. **Result.** Calculation schemes have been developed for mathematical modeling depending on the number of traffic lanes and the location of the pedestrian crossing. A method has been developed to determine the capacity of unregulated junctions at the same level as pedestrian traffic. **Conclusion.** The capacity of an unregulated junction is defined as the sum of the capacity of the lanes of a secondary road, taking into account the priority of pedestrian flows and traffic flows of the main direction, depending on various variables (the intensity of traffic of cars in the main direction, the proportion of turning cars, the intervals of arrival of groups of pedestrians, the intensity of pedestrian traffic).

Keywords: mathematical modeling, throughput, traffic flow, traffic intensity

For citation: A.G. Balamirzoev, A.Z. Salakhov, D.N. Selimkhanov. Mathematical modeling of the movement of vehicles and pedestrians at unregulated intersections. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(2):44-52 DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-44-52

Введение. Проектирование элементов улично-дорожной сети требует разработки планировочных решений для обеспечения безопасности и отсутствия задержек пешеходного движения. Нерегулируемые примыкания – часто используемые элементы улично-дорожной сети. Движение пешеходов низкой и средней интенсивности через проезжую часть обеспечивают в большинстве случаев путем устройства нерегулируемых пешеходных переходов, что в значительной мере снижает пропускную способность полос для движения транспорта и всего примыкания.

Постановка задачи. Пусть $\{U_1, U_2, \dots\}$ – последовательность независимых и рномерно распределенных на отрезке $[0,1]$ случайных величин и ξ равна по формуле (1) [4].

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

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

Таким образом, выборку $X = (X_1, \dots, X_n)$ из распределения $\Pi(\lambda)$ можно смоделировать по формуле (2) [4]:

$$X_j = \max\left\{k: \prod_{i=1}^k U_{X_{j-1}+i} \geq e^{-\lambda}\right\}, j = \overline{1, n}, \quad X_0 = 0. \quad (2)$$

Методы исследования. По планировочному решению примыкания в одном уровне разделяют на простые и канализированные. Простые примыкания не имеют направляющих элементов, канализированные – оборудованы специальными островками, выделяющими полосы движения на проезжей части для организации поворачивающего движения [1,2,5-12]. 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. Результаты натурных наблюдений подтверждают, что при высокой интенсивности пешеходных потоков движение происходит группами от 5 до 14 чел. Авторами принято, что случай перехода проезжей части осуществляет группа пешеходов $n_{гр}$ эквивалентная одному свободно движущемуся пешеходу. Группа пешеходов занимает всю ширину пешеходного перехода, что эквивалентно движению пешеходов в двух направлениях (рис. 1).

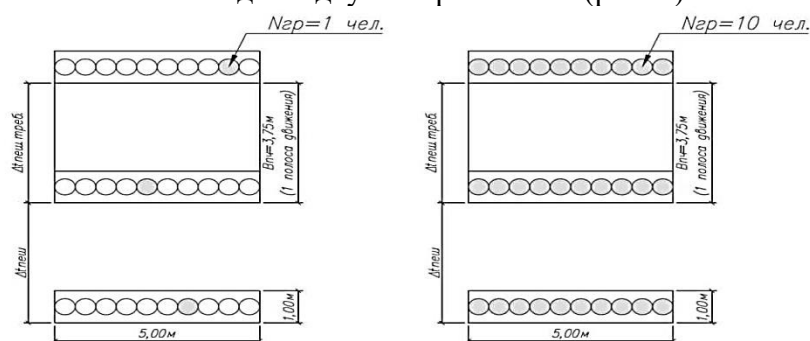


Рис. 1. Расчетная схема движения пешеходов по нерегулируемому пешеходному переходу
Fig. 1. Calculated diagram of pedestrian movement along an unregulated pedestrian crossing

Плотность пешеходного движения D , может быть выражена площадью пешеходного пути (тротуара или пешеходного перехода), приходящегося на одного человека ($\text{м}^2/\text{чел}$) [3] по формуле (3):

$$D = \frac{F}{N}, \quad (3)$$

где F - площадь, занимаемая пешеходным потоком, м^2 ;
 N — количество человек, чел.

Следовательно, количество человек, осуществляющих переход проезжей части группой эквивалентной одному пешеходу $N_{гр}$ может быть выражено следующей формулой (4):

$$N_{гр} = \frac{F}{D} = \frac{B_{пеш} L_{пеш}}{D} \quad (4)$$

где $B_{пеш}$ - ширина пешеходного перехода, м;
 $L_{пеш}$ - длина пешеходного пути, $L_{пеш} = 1,0$ м.

Согласно исследованиям П.Г. Буга [3] при плотности $D=0,5 \text{ м}^2/\text{чел}$. начинает сказываться влияние плотности потока на скорость движения пешеходов. Скорость потока пешеходов довольно быстро снижается, и соответственно уменьшается интенсивность движения. Следовательно, в математической модели автором может быть принято ограничение о плотности движения пешеходов и количестве человек, входящих в состав группы. Например, при ширине пешеходного перехода $B_{пеш} = 5,0$ м за один случай перехода проезжей части n следует считать группу пешеходов $N_{гр} = 10$ чел.

Тогда пропускную способность пешеходного перехода можно определить как количество случаев пересечения проезжей части эквивалентными группами пешеходов при минимальном интервале следования между группами пешеходов по формуле (5):

$$P_{пеш} = N_{гр} \cdot \frac{3600}{\delta t_{пеш}}, \quad (5)$$

где $P_{пеш}$ - пропускная способность пешеходного перехода, чел/час;
 $\delta t_{пеш}$ - интервал следования, между группами пешеходов, сек.

При $\delta t_{пеш} \rightarrow 0$, то есть непрерывном движении групп пешеходов возможно

получить значение интенсивности движения пешеходов, эквивалентное пропускной способности пешеходного перехода $P_{\text{пеш}}$. Но при этом условии движение транспорта становится невозможным, так как пешеходный поток является приоритетным.

Таким образом, вероятность обеспечения пропускной способности пешеходного перехода будет определена как вероятность возникновения интервалов следования между группами пешеходов по формуле (6):

$$P_{\text{пеш}} = 1 - \frac{N_{\text{пеш}}}{P_{\text{пеш}}} = 1 - \frac{N_{\text{пеш}}}{N_{\text{гр}} \frac{3600}{\delta t_{\text{пеш}}}}, \quad (6)$$

Минимальное время, которое необходимо группе пешеходов для пересечения проезжей части определим по формуле (7):

$$t_{\text{пеш.треб}} = \frac{B_{\text{ПЧ}}}{V_{\text{пеш}}} + C, \quad (7)$$

где $t_{\text{пеш.треб}}$ - минимальное время, которое требуется группе пешеходов для пересечения проезжей части, сек; $V_{\text{пеш}}$ - скорость движения пешеходов, м/с;

C - запас времени, необходимый пешеходам для безопасного завершения перехода.

Тогда пропускную способность полосы движения, оборудованную пешеходным переходом $P_{\text{пп}}$, определим по формуле (8):

$$P_{\text{пп}} = \frac{3600}{\delta t_{\text{пп}}} e^{\frac{N_{\text{пеш}} t_{\text{пеш.треб.}}}{3600}} \quad (8)$$

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

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

вид по формуле (9):

$$P = M \frac{e^{-\frac{M}{3600} \Delta t_{\text{гр}}}}{1 - e^{-\frac{M}{3600} \delta t}}, \quad (9)$$

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

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

$\Delta t_{\text{гр}}$ - граничный интервал, принимаемый водителями второстепенного направления, сек;

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

Пропускная способность одной полосы движения второстепенной дороги при отсутствии пешеходного движения может быть определена по формуле (10).

$$P = N_{\text{ГЛ}} \left(A \frac{e^{-\beta_1 \lambda \Delta t_{\text{гр}}}}{1 - e^{-\beta_1 \lambda \delta t}} + B \frac{e^{-\beta_2 \lambda \Delta t_{\text{гр}}}}{1 - e^{-\beta_2 \lambda \delta t}} + C \frac{e^{-\beta_3 \lambda \Delta t_{\text{гр}}}}{1 - e^{-\beta_3 \lambda \delta t}} \right), \quad (10)$$

при $A + B + C = 1$ и $\lambda = \frac{N_{\text{ГЛ}}}{3600}$

где $N_{\text{ГЛ}}$ - интенсивность движения на главной дороге, авт./час; A - эмпирический коэффициент, характеризующий свободно движущиеся автомобили; B - эмпирический коэффициент, характеризующий частично связанную часть потока; C - эмпирический коэффициент, характеризующий связанную часть потока; $\Delta t_{\text{гр}}$ - граничный интервал между автомобилями основного потока; δt - интервал следования автомобилей из очереди второстепенного направления, сек; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ - коэффициенты характеризующие плотность потока автомобилей.

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.

Авторами предложена иерархия транспортных и пешеходных потоков различных направлений, выраженная следующими классами i ($i = 1 \dots 5$) с порядковыми номерами j ($j = T1 \dots T12$) для направлений движения транспортных потоков и k ($k = П1 \dots П4$) для сечений, в которых расположены пешеходные переходы. Расчетная схема нерегули-

руемого примыкания в одном уровне с пешеходным движением представлена на рис. 2.

Класс 1. Водители обладают преимуществом проезда примыкания и могут беспрепятственно осуществлять движение в случае отсутствия пешеходных переходов. К ним относят главные направления движения прямо Т2, Т5 и направо Т3, Т6. При наличии пешеходных переходов водители уступают пешеходным потокам П1-П4.

Класс 2. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают только одному направлению движения класса 1. К ним относят главные левопоротные направления движения Т1, Т4 и второстепенные правоповоротные направления движения Т9, Т12. При наличии пешеходных переходов водители уступают также пешеходным потокам П1-П4.

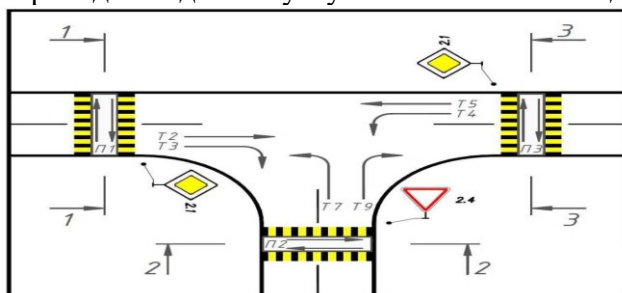


Рис. 2. Схема нерегулируемого примыкания с указанием направлений движения

Fig. 2. Scheme of unregulated junction indicating directions of movement

Класс 3. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают двум классам направления движения 1 и 2 главной дороги. К ним относят второстепенные направления движения прямо Т8, Т11. В случае нерегулируемого примыкания класс 3 отсутствует. При наличии пешеходных переходов водители также уступают пешеходным потокам П1-П4.

Класс 4. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают классам движения 1-3. К ним относят второстепенные левоповоротные направления движения Т7, Т10. При наличии пешеходных переходов водители также уступают пешеходным потокам П1-П4.

Класс 5. Пешеходы беспрепятственно движутся по нерегулируемому переходу принятыми группами.

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

В транспортном потоке класса 1 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков класса 2;

В транспортных потоках класса 1 и класса 2 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков класса 3;

В транспортном потоке класса 2 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в транспортном потоке класса 1;

В транспортных потоках классов 1 - 3 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков класса 4;

В транспортных потоках классов 2 и 3 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в транспортных потоках классов 1 и 2.

В пешеходных потоках класса 5 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков классов 1 - 4.

В транспортных потоках класса 1 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в пешеходном потоке класса 5.

Для каждого пешеходного потока направлений П1-П4 необходимо определить его пропускную способность $P_{пеш}^k$ и вероятность возникновения интервала между группами пешеходов $p_{пеш}^k$ формуле (6). Для каждого транспортного потока направлений Т1-Т12 необходимо определить пропускную способность P_{jk} и вероятность их беспрепятственного движения p_{jk} . Пропускную способность главных направлений движения $P_{j,k}^1$ (при $i=1$) определим по формуле (8). Пропускную способность второстепенных направлений $P_{j,k}^{2,3,4}$

(при $i = 2,3,4$) определим по формулам (8) и (10). Пропускную способность полос смешанного движения $P_{смеш}$ получим как соотношение интенсивностей N_{jk} и пропускных способностей полос движения P_{jk} различных направлений и приведем к единой $P_{смеш}$ по формуле (11):

$$P_{смеш} = \frac{\sum N_j}{\frac{N_j}{P_{j,k}}}, \quad (11)$$

Вероятность беспрепятственного движения транспортных потоков p_{jk} определим по формуле (12):

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

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

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

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

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

Также необходимо определить вероятность беспрепятственного проезда всех потоков j -ого направления движения i -ого типа p_i по формуле (14):

$$p_i = \prod_{j,k} p_i p_{j,k}, \quad (14)$$

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

$$P = p_i P_i = \prod_{j,k} p_i p_{j,k} \sum_{j,k} P_{j,k}. \quad (15)$$

Рассмотрим схему движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании, оборудованном двумя пешеходными переходами (рис. 3).

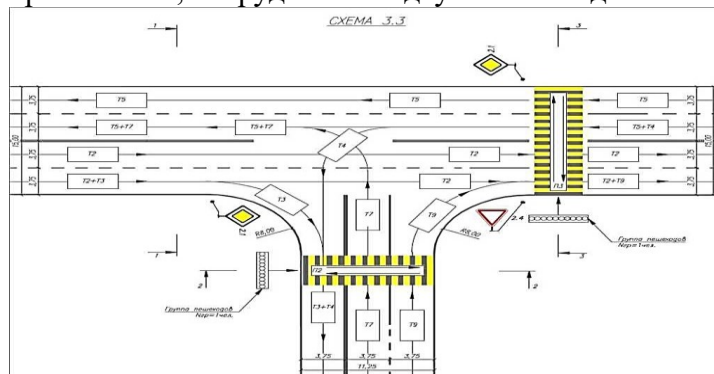


Рис. 3. Схема движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании, оборудованном пешеходными переходами

Fig. 3. Scheme of traffic and pedestrian flows at an unregulated junction equipped with pedestrian crossings

Рассмотрим несколько случаев движения транспортных и пешеходных потоков при различных условиях. Предположим, что ширина пешеходного перехода в сечении 2 (пешеходный поток П2, $k=2$) $B_{пеш} = 5,0$ м, плотность $D=0,5$ м²/чел., тогда $N_{тр} = 10$ чел.

Минимальное время, которое требуется группе пешеходов для примыкания проезжей части при $B_{пч} = 11,25$ м, $V_{пеш} = 1,4$ м/сек, $C = 3,0$ сек.

$$t_{пеш.треб.}^2 = \frac{B_{пч}}{V_{пеш}} + C = 12 \text{ сек.}$$

Предположим, что ширина пешеходного перехода в сечении 3 (пешеходный поток

ПЗ, $k=3$) $B_{\text{пеш}} = 5,0$ м, плотность $D=0,5$ м²/чел., тогда $N_{\text{гр}} = 10$ чел.

Тогда максимальное количество случаев перехода проезжей части группой пешеходов за один час составит: $N = \frac{3600}{12} = 300$ шт.

Получим пропускную способность пешеходного перехода:

$$P_{\text{пеш}}^2 = 300 \cdot 10 = 3000 \text{ чел/час.}$$

Минимальное время, которое требуется группе пешеходов для пересечения проезжей части при $B_{\text{пч}} = 15,00$ м, $V_{\text{пеш}} = 1,4$ м/сек, $C = 3,0$ сек.

$$t_{\text{пеш.треб.}}^3 = \frac{B_{\text{пч}}}{V_{\text{пеш}}} + C = 15 \text{ сек.}$$

Тогда максимальное количество случаев перехода проезжей части группой пешеходов за один час составит: $N = \frac{3600}{15} = 240$ шт.

Получим пропускную способность пешеходного перехода:

$$P_{\text{пеш}}^3 = 240 \cdot 10 = 2400 \text{ чел/час.}$$

Обсуждение результатов. Пропускная способность пешеходного перехода остается фиксированной величиной. Вероятность ее обеспечения или вероятность возникновения интервала между группами пешеходов $p_{\text{пеш}}^k$ зависит от интенсивности движения пешеходов $N_{\text{пеш}}^k$ (или количества прибывающих групп пешеходов).

Случай 1. Допустим, что интервал прибытия групп пешеходов очень велик, следовательно, $\delta t_{\text{пеш}}^2 = \infty$ и $\delta t_{\text{пеш}}^3 = \infty$. При этом $N_{\text{пеш}}^2 = 0$ чел/час, $N_{\text{пеш}}^3 = 0$ чел/час

Вероятность появления группы пешеходов на проезжей части в сечениях 2 и 3 $p_{\text{пеш}}'^2 = 0$ и $p_{\text{пеш}}'^3 = 0$ соответственно. Если пешеходные потоки не влияют на транспортные потоки, то движение автомобилей на пересечении возможно при $\Delta t_{\text{гл}} \geq \Delta t_{\text{гр}}$ и $\delta t \leq \Delta t_{\text{гр}}$. Тогда можно утверждать, что если пешеходное движение в сечениях 2 и 3 отсутствует, либо транспортные потоки не пересекают пешеходные, всегда существуют интервалы, достаточные для проезда автомобиля, тогда $p_{\text{пеш}}^2 = 1$ и $p_{\text{пеш}}^3 = 1$. В этом случае пропускную способность примыкания определим по формулам (10, 11, 12, 13).

Случай 2. Допустим, что интервал прибытия групп пешеходов в сечении 2 очень велик, а в сечении 3 очень мал, следовательно, $\delta t_{\text{пеш}}^2 = \infty$ и $\delta t_{\text{пеш}}^3 = 0$.

При этом $N_{\text{пеш}}^2 = 0$ чел/час, $N_{\text{пеш}}^3 = P_{\text{пеш}}^3 = 2400$ чел/час

Вероятность появления группы пешеходов на проезжей части в сечениях 2 и 3 $p_{\text{пеш}}'^2 = 0$ и $p_{\text{пеш}}'^3 = 1$ соответственно. Тогда движение автомобилей на пересечении невозможно при $\Delta t_{\text{гл}} = \infty$, $\Delta t_{\text{гр}} = 0$ и $\delta t = \infty$. Следовательно, можно утверждать, что если пешеходное движение в сечении 2 отсутствует, а в сечении 3 группы пешеходов прибывают непрерывно, либо транспортные потоки не пересекают пешеходные, в пешеходном потоке отсутствуют интервалы, достаточные для проезда автомобиля, то $p_{\text{пеш}}^2 = 1$ а $p_{\text{пеш}}^3 = 0$. В этом случае пропускная способность примыкания равна нулю.

Случай 3. Допустим, что интервал прибытия групп пешеходов в сечении 2 очень мал, а в сечении 3 очень велик, следовательно, $\delta t_{\text{пеш}}^2 = 0$ и $\delta t_{\text{пеш}}^3 = \infty$. При этом $N_{\text{пеш}}^2 = P_{\text{пеш}}^2 = 3000$ чел/час, $N_{\text{пеш}}^3 = 0$ чел/час. Вероятность появления группы пешеходов на проезжей части в сечениях 2 и 3 $p_{\text{пеш}}'^2 = 1$ и $p_{\text{пеш}}'^3 = 0$ соответственно. Тогда движение автомобилей на пересечении невозможно при $\Delta t_{\text{гл}} = \infty$, $\Delta t_{\text{гр}} = 0$ и $\delta t = \infty$. Следовательно, можно утверждать, что если пешеходное движение в сечении 2 группы пешеходов прибывают непрерывно, либо транспортные потоки не пересекают пешеходные, в пешеходном потоке отсутствуют интервалы, достаточные для проезда автомобиля, а в сечении 3 пешеходное движение отсутствует, то $p_{\text{пеш}}^2 = 0$, а $p_{\text{пеш}}^3 = 1$. В этом случае пропускная способность примыкания равна нулю.

Случай 4. Допустим, что интервал прибытия групп пешеходов в сечениях 2 и 3 очень мал, следовательно, $\delta t_{\text{пеш}}^2 = 0$ и $\delta t_{\text{пеш}}^3 = \infty$.

При этом $N_{\text{пеш}}^2 = P_{\text{пеш}}^2 = 3000$ чел/час, $N_{\text{пеш}}^3 = P_{\text{пеш}}^3 = 2400$ чел/час.

Вероятность появления группы пешеходов на проезжей части в сечениях 2 и 3 $p_{\text{пеш}}'^2 = 1$ и $p_{\text{пеш}}'^3 = 1$ соответственно. Тогда движение автомобилей на пересечении невозможно при $\Delta t_{\text{гл}} = \infty$, $\Delta t_{\text{гр}} = 0$ и $\delta t = \infty$. Следовательно, можно утверждать, что если пешеходное движение в сечениях 2 и 3 группы пешеходов прибывают непрерывно, либо транспортные потоки не пересекают пешеходные, в пешеходном потоке отсутствуют интервалы, достаточные для проезда автомобиля, то $p_{\text{пеш}}^2 = 0$ и $p_{\text{пеш}}^3 = 0$. В этом случае пропускная способность примыкания равна нулю.

Случай 5. Допустим, что интервал прибытия групп пешеходов в сечениях 2 и 3 существует, следовательно, $\delta t_{\text{пеш}}^2 = (0, \infty)$ и $\delta t_{\text{пеш}}^3 = (0, \infty)$. При этом $N_{\text{пеш}}^2 = (0, P_{\text{пеш}}^2) = (0, 3000)$ чел/час, $N_{\text{пеш}}^3 = (0, P_{\text{пеш}}^3) = (0, 2400)$ чел/час. Вероятность появления группы пешеходов на проезжей части в сечениях 2 и 3 $p_{\text{пеш}}'^2 = (0, 1)$ и $p_{\text{пеш}}'^3 = (0, 1)$ соответственно. Тогда движение автомобилей на пересечении возможно при $\Delta t_{\text{гл}} \geq \Delta t_{\text{гр}}$ и $\delta t \leq \Delta t_{\text{гр}}$. Следовательно, можно утверждать, что если пешеходное движение в сечениях 2 и 3 группы пешеходов прибывают с определенными интервалами, либо транспортные потоки не пересекают пешеходные, в пешеходном потоке отсутствуют интервалы, достаточные для проезда автомобиля, то $p_{\text{пеш}}^2 = (0, 1)$ и $p_{\text{пеш}}^3 = (0, 1)$. В этом случае пропускную способность примыкания определим по формулам (8 - 15). Получим, что движение транспортных и пешеходных потоков на пересечении может одновременно существовать только в случае 5.

Вывод. В качестве модели сложной системы взаимодействия транспортных и пешеходных потоков выбрана вероятностная Пуассоновская математическая модель. Назначены параметры и законы распределения случайных величин математической модели, определены границы применения математической модели. Разработаны расчетные схемы для математического моделирования в зависимости от числа полос движения и местоположения пешеходного перехода.

Для повышения пропускной способности примыкания целесообразно устройство пешеходных переходов перед примыканием, так как пропускная способность правой полосы движения главной дороги (при движении прямо или смешанном правоповоротном движении) будет снижена до 400-600 авт./час. При этом интенсивность движения главного направления будет оптимальна для устройства нерегулируемых примыканий.

Пропускная способность примыкания может быть увеличена при удалении пешеходных переходов от оси примыкания на расстояние достаточное для размещения очереди автомобилей, ожидающих интервала в пешеходном потоке.

Пропускная способность нерегулируемого примыкания может быть увеличена при устройстве дополнительных поворотных полос движения, оптимальном выборе положения пешеходного перехода относительно оси примыкания и расстояния от оси примыкания до пешеходного перехода.

Библиографический список:

1. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и организация движения / В.Ф. Бабков, О.А. Дивочкин, В.П. Залуга. - М.: Транспорт, 1974. - 240 с.
2. Бабков, В.Ф. Дорожные условия и режимы движения автомобилей / В.Ф. Бабков, М.Б. Афанасьев, А.П. Васильев. - М.: Транспорт, 1967. - 227 с.
3. Буга, П.Г. Пешеходное движение в городах / П.Г. Буга. - М.: Стройиздат, 1979. - 126 с.
4. 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.
5. Лобанов, Е.М. Исследование пропускной способности нерегулируемых узлов автомобильных дорог в одном уровне: дис. . канд. техн. наук: 05.00.00/Лобанов Евгений Михайлович. М., 1965. 270 с.
6. Лобанов, Е.М. Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов. - М.: Транспорт, 1990. - 239 с.
7. ОДМ 218.2.020-2012. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. - М.: Росавтодор, 2012. - 148 с.
8. Сильянов, В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов. - М.: Транспорт, 1977. - 303 с.

9. Aakre, E. Modeling cooperation in unsignalized intersections / E. Aakre, A. Arvid // *Procedia Computer Science* – 2017. – P.877-879.
10. Abhigna, D. Multi Vehicle-Type Right Turning Gap-Acceptance and Capacity Analysis at Uncontrolled Urban Intersections. D. Abhigna, D. Brahmankar, K.V.R. Ravi Shankar. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. January, 2018; 48(2):.99-108.
11. Cordes J., A. Schadschneider, A. Tordeux. The Trouble with 2nd Order Models or How to Generate Stop-and-Go Traffic in a 1st Order Model. *Traffic and Granular Flow 2019. Springer Proceedings in Physics*. 2020; 252.
12. Kapacitet och framkomlighetseffekter (Capacity and Level of Service). – Borlänge: Swedish Transport Administration, 2013.

References:

1. Babkov V.F., O.A. Divochkin, V.P. Zaluga. Road conditions and traffic organization. *M.: Transport*, 1974; 240 (In Russ)
2. Babkov, V.F. Road conditions and vehicle traffic modes / V.F.Babkov, M.B.Afanasyev, A.P.Vasiliev. *M.: Transport*, 1967; 227 (In Russ)
3. Buga, P.G. Pedestrian traffic in cities P.G. Buga. *M.: Stroyizdat*, 1979. -126 p. (In Russ)
4. 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. *M.: LENAND*, 2021; 620 . (In Russ)
5. Lobanov E. M. Study of the capacity of unregulated highway junctions at one level: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.00.00. M., 1965; 270. (In Russ)
6. Lobanov, E.M. Transport planning of cities / E.M. Lobanov. *M.: Transport*, 1990; 239 (In Russ)
7. ODM 218.2.020-2012. Industry road methodological document. Methodological recommendations for assessing the capacity of highways. *M.: Rosavtodor*, 2012; 148 (In Russ)
8. Silyanov, V.V. Theory of transport flows in road design and traffic management. *M.: Transport*, 1977; 303. (In Russ)
9. Aakre E., Arvid A. Modeling cooperation in unsignalized intersections. *Procedia Computer Science* 2017; 877-879.
10. Abhigna, D. Multi Vehicle-Type Right Turning Gap-Acceptance and Capacity Analysis at Uncontrolled Urban Intersections. D. Abhigna, D. Brahmankar, K.V.R. Ravi Shankar. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. January, 2018; 48(2):99-108.
11. Cordes J., A. Schadschneider, A. Tordeux. The Trouble with 2nd Order Models or How to Generate Stop- and-Go Traffic in a 1st Order Model. *Traffic and Granular Flow 2019. Springer Proceedings in Physics*. 2020; 252.
12. Kapacitet och framkomlighetseffekter (Capacity and Level of Service). Borlänge: Swedish Transport Administration, 2013.

Сведения об авторах:

Баламирзоев Абдул Гаджибалаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Информатика и информационно-коммуникационные технологии», abdul2000@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-6850-4841;

Салахов Агамет Заргарович, старший преподаватель, кафедра «Высшая математика», agamet-s@yandex.ru;

Селимханов Даниял Нажиудинович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автомобильный транспорт и автомобильные дороги», danyal860@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7187-5635

Information about authors:

Abdul G. Balamirzoev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Computer Science and Information and Communication Technologies, abdul2000@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-6850-4841;

Agamet Z. Salakhov, Senior Lecturer, department of “Higher Mathematics”, agamet-s@yandex.ru;

Daniyal N. Selimkhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automobile Transport and Highways, danyal860@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7187-5635

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 07.02.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 02.03.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 02.03.2024.