Научная статья
УДК 656.13
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617
EDN: SSWLJU

Check for updates

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОПОЛОСНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ С ПРИОРИТЕТОМ ДВИЖЕНИЯ НА КОЛЬЦЕ

Н. М. Каримов, А. Ю. Михайлов*

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
newday-87@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-9607-4201,
89148701840@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-1946-0659
**ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. *В последние годы в Российской Федерации для кольцевых пересечений дорог общего пользования разработан целый ряд методических и нормативных документов. В частности, предложно оценивать качество организации дорожного движения на кольцевых пересечениях показателем «уровень обслуживания», измеряемым величиной средней задержки на входах на кольцевые пересечения. Распространение критерия «средняя задержка» на проектирование кольцевых пересечений требует разработки методики оценки пропускной способности полос движения на входах на многополосные кольца.*
Цель исследования. *Разработка метода оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений.*
Объект исследования. *Процесс функционирования многополосных кольцевых пересечений.*
Предмет исследования. *Значения параметров, характеризующих взаимодействие транспортных потоков в конфликтных точках многополосных кольцевых пересечений.*
Теоретические основы исследования. *Научно обоснованная адаптация модели оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений, основанная на использовании конфликтных точек и функции принятия интервалов к условиям дорожного движения в городах Российской Федерации.*
Методика исследования. *Обрабатывалась видеосъемка многополосных кольцевых пересечений в городах Братск, Владивосток, Иркутск, Липецк, Находка, Оренбург, Петрозаводск, Псков. На каждой полосе кольцевой проезжей части фиксировались интервалы в потоке, измеряемые между передними бамперами транспортных средств. Отмечались принятые и отвергнутые интервалы, а также количество транспортных средств, использовавших принятые интервалы. Определение значений критических интервалов и интервалов следования из очереди выполнено с использованием метода Сиглоха, основанного на линейной регрессии.*
Результаты. *Обоснована модель оценки пропускной способности на входе на многополосное кольцевое пересечение. Установлены значения критических интервалов, интервалов следования из очереди каждой из полос входа на 2- и 3-полосные кольцевые пересечения. Определены значения минимальных интервалов в потоках, движущихся на кольцевой проезжей части, также установлены зависимости влияния интенсивности движения на свободную долю транспортного потока.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *многополосные кольцевые пересечения, пропускная способность, конфликтные точки, функция принятия интервалов, критические интервалы, интервалы следования из очереди*

Статья поступила в редакцию 07.08.2023; одобрена после рецензирования 06.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Каримов Н. М., Михайлов А. Ю. Разработка метода оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений с приоритетом движения на кольце // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 600-617. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617

© Каримов Н. М., Михайлов А. Ю., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617
EDN: SSWLJU

DEVELOPING A METHOD OF MULTI-LANE ROUNDABOUTS CAPACITY

Navruz M. Karimov, Aleksandr Yu. Mikhailov*
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia
newday-87@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-9607-4201,
89148701840@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-1946-0659
**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. *In recent years a number of methodological and regulatory documents have been developed for public road roundabouts in the Russian Federation. In particular it was proposed to evaluate the quality of traffic management at roundabouts by the level of service measured by the average delay at roundabout entrances. The extension of the average delay criterion to the design of roundabouts requires the development of a methodology for estimating the capacity of traffic lanes at multi-lane roundabout entrances.*
The aim of the study. *Is to develop a methodology for estimating the capacity of multi-lane roundabouts.*
The object of the study. *Is the functioning of multilane roundabouts.*
Subject of the research. *Are the regularities of influence of traffic volume on the values of characteristics of transport streams interaction in the conflict points of multilane roundabouts.*
Theoretical foundations of the research. *The model for estimation of carrying capacity of multilane roundabouts based on the use of conflict points and function of acceptance of intervals is offered.*
Research Methodology. *The video footage of multi-lane roundabouts in the cities of Bratsk, Vladivostok, Irkutsk, Lipetsk, Nakhodka, Orenburg, Petrozavodsk and Pskov was processed. On each lane of the circular carriageway, intervals in the flow, measured between the front bumpers of vehicles, were recorded. The accepted and rejected headways were registered, as well as the number of vehicles using accepted intervals. The determination of the values of critical headways and follow-up time was performed using the Siegloch's method based on linear regression.*
Results. *A model for estimating capacity at the entrance to a multi-lane roundabout was validated. The values of critical intervals, queuing intervals of each of the entrance lanes to 2-lane and 3-lane roundabouts were determined. The values of the minimum headways in the flows moving on the circular carriageway are determined, also the dependences of the influence of traffic intensity on the free share of the traffic flow are established.*

KEYWORDS: *multi-lane roundabouts, capacity, conflict points, gap acceptance function, critical headway, follow up time*

The article was submitted 07.08.2023; approved after reviewing 06.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Karimov N. M., Mikhailov A. Yu. Developing a method of multi-lane roundabouts capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 600-617. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617

© Karimov N. M., Mikhailov A. Yu., 2023

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Российской Федерации совершенствуется методическое обеспечение проектирования транспортной инфраструктуры и оценки качества организации дорожного движения (ОДД). Вместе с тем необходимо дальнейшее развитие методов расчетов пропускной способности, задержек и длин очередей транспортных средств. Исследование по разработке метода расчета многополосных кольцевых пересечений с приоритетным движение на кольце вызвано целым рядом причин.

Последние три десятилетия мировая проектная практика (страны Европы, США, Канада, Австралия, Япония) сосредоточена на исключительном применении кольцевых пересечений, обозначаемых термином roundabout. Основными особенностями пресечений типа roundabout указываются[1,2]:

- приоритет движения на кольцевой проезжей части;
- компактность – внешний диаметр кольцевой проезжей части не более 70 м;
- скорость движения на кольцевой проезжей части не более 50 км/ч;
- в силу компактности на кольцевой проезжей части отсутствуют зоны переплетения потоков.

Введенный недавно ГОСТ Р 70555–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения кольцевые. Правила проектирования»[3] учел многие особенности проектирования современных кольцевых пересечений и рекомендует:

- максимальный внешний радиус кольцевой проезжей части – 70 м;
- максимальное количество полос на кольцевой проезжей части – 2;
- 3-полосные кольцевые проезжие части применять в случаях устройства спиралевидной разметки или светофорного регулирования.

Разработанный несколько ранее для городских улично-дорожных сетей документ СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования»[4] также предлагает ограничение количества полос на кольцевых пересечениях:

- количество полос движения кольцевой проезжей части следует назначать в зависимости от интенсивности движения;
- при числе полос движения на кольцевом пересечении более двух следует провести оценку необходимости организации светофорного регулирования на кольцевом пересечении.

СП 396.1325800.2018 не формулирует процедуру оценки необходимости организации светофорного регулирования, но очевидно, что сравнение нерегулируемого и регулируемого кольца должно основываться на использовании критериев: пропускная способность, средние и суммарные задержки транспортных средств, длины очередей. При этом сами методы расчета этих критериев для нерегулируемых и регулируемых кольцевых пересечений имеют существенные различия [1].

В рассматриваемом контексте принципиально важно, что распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения»[5] критерием оценки уровня обслуживания транспортных потоков на кольцевых пересечениях утверждена средняя задержка транспортных средств (таблица 1).

Очевидно, что критерий «средняя задержка транспортных средств» должен быть распространен на случай проектирования кольцевых пересечений или выполнения проектов ОДД, включающих в своем составе кольцевые пересечения. Для этого можно применять формулу расчета средней (с) руководства HCM 2000, которую предлагает использовать действующий ГОСТ «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания.

---

[1] Режим доступа: https://www.roundaboutresources.org/roundabout-vs.-traffic-circle.html (дата обращения: 04.09.2023).

[2] Режим доступа: https://www.co.washington.mn.us/DocumentCenter/View/2296/Traffic-Circles-vs-Roundabouts (дата обращения: 05.02.2022).

[3] ГОСТ Р 70555–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения кольцевые. Правила проектирования». URL: https://gostassistent.ru/doc/7c6c4759-d414-424d-824f-5485fd86c554 (дата обращения: 28.03.2023).

[4] СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования». URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293732/4293732357.pdf (дата обращения: 08.02.2023).

[5] «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения» утверждены распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р. URL: https://mintrans.gov.ru/file/489281 (дата обращения: 28.03.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Технические требования» (приложение В)[6]

Таблица 1
Шкала уровней обслуживания для кольцевых пересечений
Источник: методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения.

Table 1
Service level scale for roundabouts
Source: Methodological Recommendations on Traffic Monitoring.

Уровень обслуживания	Средняя задержка, с/прив.ед.
A	0–10
B	10–15
C	15–25
D	25–35
E	35–50
F	> 50

$$d = \frac{3600}{c_i} + \text{(1)}$$

$$+ 900T\left[\frac{q_i}{c_i} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_i} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_i}\right)\left(\frac{q_i}{c_i}\right)}{450T}}\right] + 5,$$

где c_i – пропускная способность рассматриваемого второстепенного направления движения, авт/ч; T – продолжительность анализа (например, продолжительность анализа 15 мин, T = 0,25 ч), ч; q_i – интенсивность движения рассматриваемого второстепенного направления движения, авт/ч.

Формула (1) содержит всего лишь один предварительно рассчитываемый параметр – пропускную способность полосы движения второстепенного направления движения. Следует отметить, что сложилась практика рассмотрения каждой полосы движения (показатели: пропускная способность, средняя задержка, длина очереди) при детальном анализе всех видов пересечений [1]. Этим объясняется необходимость разработки методики расчета пропускной способности, рассматривающей в отдельности каждую полосу входа на кольцевое пересечение.

Действующий в настоящее время документ ОДМ 218.2.020–2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог»[7] содержит расчет пропускной способности, изложенный ранее в документе «Методические указания по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог», утвержденном в 1980 г. Последний документ основан на характеристиках транспортных потоков, установленных исследованиями кольцевых пересечений на автомобильных дорогах общего пользования, выполненными в 70-е годы. В целом оценка пропускной способности многополосных кольцевых пересечений рассматривалась лишь в нескольких российских публикациях [2, 3].

В этой связи становится актуальной задачей развитие методов расчета пропускной способности всех видов городских кольцевых пересечений (однополосных, многополосных, включая случаи со спиралевидной разметкой, турбоколец). Актуальность этого исследования можно подтвердить примером структуры методики оценки показателей качества функционирования кольцевого пересечения руководства Highway Capacity Manual 2010[8]. Шаг 5 (рисунок 1) – расчет пропускной способности предваряет расчет значений средней задержки и длины очереди транспортных средств 95% обеспеченности.

Цель выполняемого исследования – разработка метода оценки пропускной способности входов на 2- и 3-полосные кольцевые пересечения с приоритетом движения на кольце [4, 5]. Изучение трехполосных колец вызвано тем, что они эксплуатируются во многих городах Российской Федерации и продолжают вводиться в эксплуатацию (например, в составе развязки КАД г. Санкт-Петербург). На данном этапе не рассматривалось влияние пешеходного движения на пропускную способность, что должно быть объектом отдельного специального исследования.

[6] ГОСТ Р 58653–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания. Технические требования. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200169423 (дата обращения: 28.03.2023).

[7] ОДМ 218.2.020–2012 Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог // РОСАВТОДОР. URL: https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/22-odm-2182020-2012.pdf (дата обращения: 28.02.2023).

[8] Highway Capacity Manual 2010. URL: https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf (дата обращения: 23.03.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

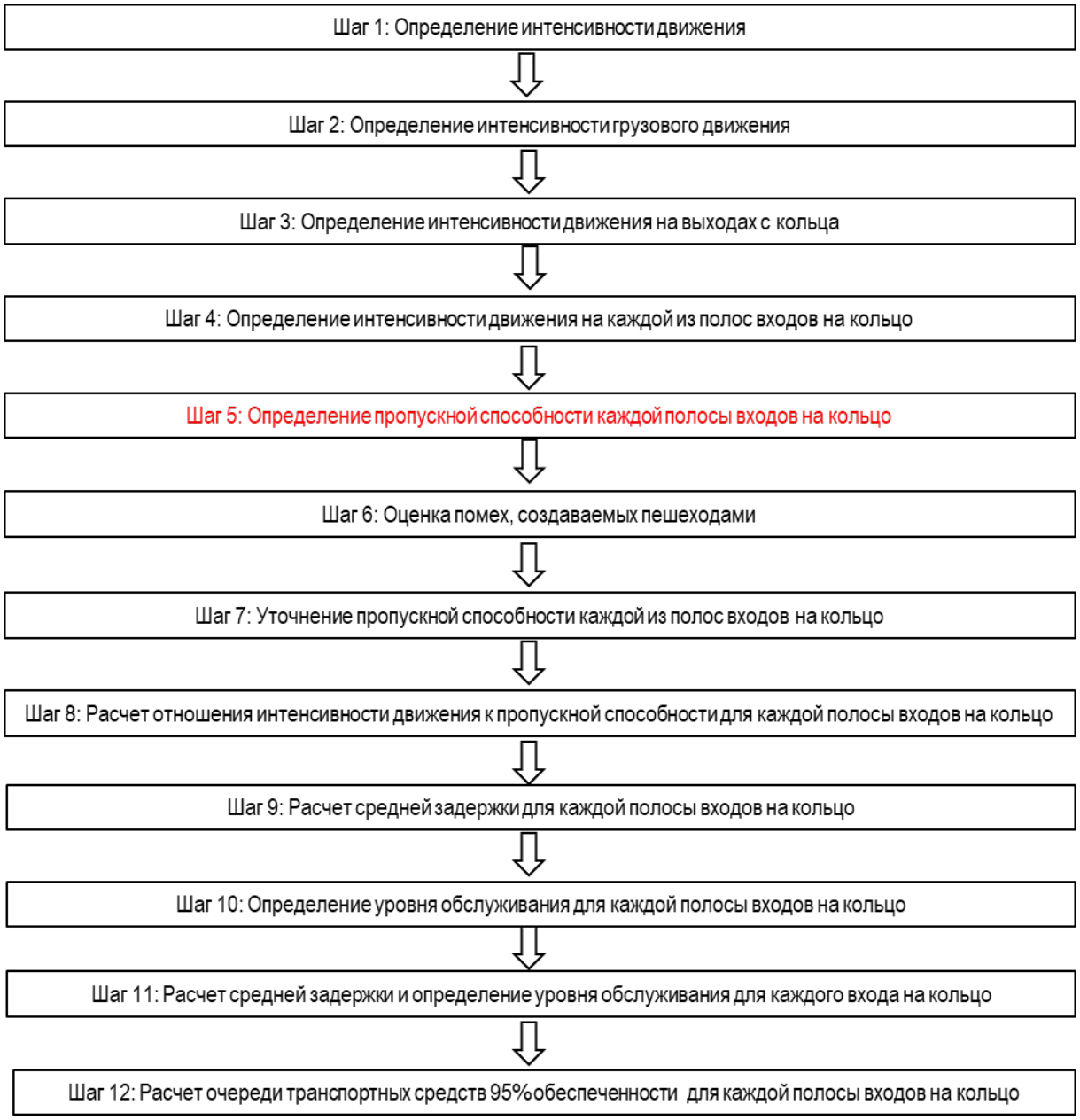


Рисунок 1 – Методика оценки показателей качества функционирования кольцевого пересечения руководства Highway Capacity Manual
Источник: Highway Capacity Manual 2010[9].

Figure 1 – Methodology for assessing Highway Capacity Manual roundabout performance indicators
Source: Highway Capacity Manual 2010[9].

[9] Highway Capacity Manual 2010. URL: https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf (дата обращения: 23.03.2023)

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛОСЫ НА ВХОДЕ НА МНОГОПОЛОСНОЕ КОЛЬЦЕВОЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЕ

За последние два десятилетия оценка пропускной способности входов на кольцевые пересечения рассмотрена во многих публикациях [6, 7, 8, 9]. При этом в основном исследовались 2-полосные кольцевые пересечения, 3-полосные кольца представлены лишь в нескольких работах [10,11].

В целом модели оценки пропускной способности полосы движения на входе кольцевое пересечение разделяют на две принципиально разные группы [3]:

- статистические модели, основанные на уравнениях регрессии;
- модели, основанные на использовании функции принятия интервалов (gap acceptance function) [12,13,14,15].

Наиболее гибким инструментом формализованного представления кольцевых пересечений всех типов (1-, 2- и 3-полосных, со спиралевидной разметкой, турбоколец) являются модели, основанные на конфликтных точках [16, 17, 18]. Теорию конфликтов (conflict technique) для оценки взаимодействия транспортных потоков на нерегулируемых и кольцевых пересечениях предложили N.Wu и W.Brilon [16, 17]. Важно подчеркнуть, что при изучении одно- и двухполосных кольцевых пересечений эти авторы установили, что при суммарной интенсивности движения более 1600 авт./ч на 2-полосном кольце транспортные средства, совершающие левый поворот, используют для входа на кольцо только левую полосу. Модель, предложенная немецкими авторами, была использована в описании входов на 2- и 3-полосные кольца (рисунок 2).

В последние три десятилетия для описания распределения интервалов в потоках главных направлений движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях широко используется дихотомическое распределение интервалов (часто обозначаемое как 3M Cowan's Distibution) [19, 20, 21, 22, 23, 24]. Рассматриваемая функция распределения $F(h)$ и ее плотность $f(h)$ имеют вид

$$F(h) = \begin{cases} 0 & \text{если } h < \Delta \\ 1 - \varphi e^{-\lambda(h-\Delta)} & \text{если } h \geq \Delta \end{cases}. \qquad (2)$$

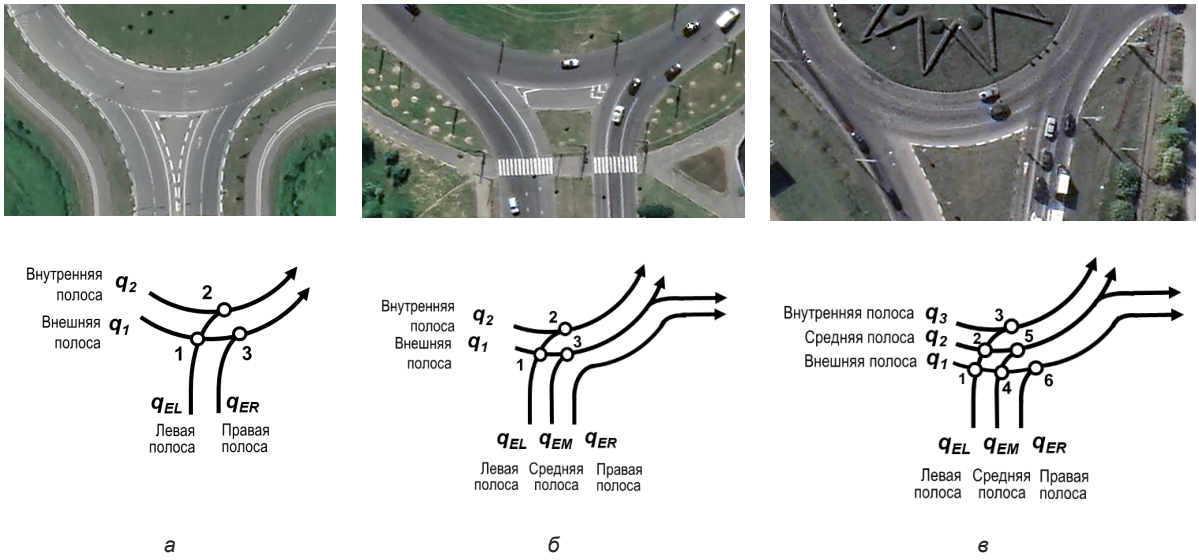


Рисунок 2 – Конфликтные точки на входах на многополосные кольцевые пересечения: а – вход на двухполосное кольцо; б – вход на кольцо с дополнительной полосой для правых поворотов (Древлянское кольцо г. Петразаводск); в – вход на трехполосное кольцо
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Conflict points at multi-lane roundabout entrances, a – entrance to a two-lane roundabout; b – entrance to a two-lane roundabout with an additional right-turn lane; c – entrance to a three-lane roundabout
Source: compiled by the authors.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

$$f(h) = \begin{cases} 0 & \text{если } h < \Delta \\ \varphi\, \lambda \exp[-\lambda(h-\Delta)] & \text{если } h \geq \Delta \end{cases}, \quad (3)$$

где h – интервал в потоке (headway), измеряемый (в зависимости от задачи исследования) между передними или задними бамперами автомобилей, с; φ – свободная доля транспортного потока, $0<\varphi\leq 1$; λ – параметр распределения интервалов главного потока в конфликтной точке, $\lambda=\varphi q/(1-\Delta q)$; Δ – минимальный интервал в потоке, с.

По выводам, приводимым Е. Macioszek [9], при интенсивности больше 100 авт./ч на полосу кольцевой проезжей части следует применять дихотомическое распределение, поэтому оно рассматривалось в данной работе.

Теоретическая модель взаимодействия второстепенного потока с главным потоком, движущимся по нескольким полосам и описываемым дихотомическим распределением, представлена в работе O.Hagring [25]. Теория включает в рассмотрение случай, когда часть водителей снижает скорость движения под воздействием второстепенного потока (limited priority) [26,27]. В рамках теории limited priority пропускную способность полосы на входе на многополосное кольцевое пересечение c предлагается оценивать с использованием уравнения [15]

$$c = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \prod_{i=1}^{i=n} \left(\frac{C_i \varphi_i q_i}{\lambda_i}\right) * \frac{e^{-\left(\sum_{i=1}^{i=n}\lambda_i\right)(t_c-\Delta)}}{1-e^{-\left(\sum_{i=1}^{i=n}\lambda_i\right)t_f}}, \quad (4)$$

где λ_i – параметр распределения интервалов на полосе i; C_i – параметр, учитывающий, что часть водителей главного потока снижает скорость движения под воздействием второстепенного потока и являющийся функцией λ_i, $0\leq C_i\leq 1$; φ_i – свободная доля потока на полосе i; q_i – интенсивность движения на полосе i, авт/с; n – количество полос движения главного направления; t_c – критический интервал, с; t_f – интервал следования из очереди, с; Δ – минимальный интервал в потоке, с.

В формуле (4) интервалы t_c, t_f и Δ приняты одинаковыми для всех конфликтных точек второстепенного потока, поступающего с рассматриваемой полосы входа на кольцо. При этом для каждой полосы i кольцевой проезжей части рассматриваются ее интенсивность движения q_i, значение параметра λ_i и доля свободной части транспортного потока φ_i.

При условии, что не нарушается движение на кольцевой проезжей части, т.е. все водители главного направления используют свой приоритет (C_i =1), уравнение (4) получает следующий вид

$$c = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \prod_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\varphi_i q_i}{\lambda_i}\right) * \frac{e^{-\left(\sum_{i=1}^{i=n}\lambda_i\right)(t_c-\Delta)}}{1-e^{-\left(\sum_{i=1}^{i=n}\lambda_i\right)t_f}}, \quad (5)$$

Частные формы уравнения оценки пропускной способности (5) для правых, средних и левых полос входа на многополосное кольцо представлены ниже:

правая полоса входа на 2-х и 3-х полосное кольцо

$$C_{ER} = q_c \frac{\varphi e^{-\lambda(t_c-\Delta)}}{1-e^{-\lambda t_f}}. \quad (6)$$

правая полоса входа на 2-х полосное кольцо и средняя полоса входа на 3-х полосное кольцо

$$C_{EL} \text{или } C_{EM} = (\lambda_1+\lambda_2)\frac{\varphi_1\varphi_2 q_1 q_2}{\lambda_1\lambda_2} * * \frac{e^{-(\lambda_1+\lambda_2)(t_c-\Delta)}}{1-e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t_f}}. \quad (7)$$

левая полоса входа на 3-х полосное кольцо

$$C_{EL} = (\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)\frac{\varphi_1\varphi_2\varphi_3 q_1 q_2 q_3}{\lambda_1\lambda_2\lambda_3} * * \frac{e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)(t_c-\Delta)}}{1-e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)t_f}}. \quad (8)$$

Локализация моделей оценки пропускной способности (6), (7), (8) к условиям дорожного движения городов Российской Федерации требовала установления значений следующих параметров и зависимостей для 2- и 3-полосных кольцевых пересечений:

- критического интервала (critical headway)[10] – минимального интервала времени в транспортном потоке главного направления, который позволяет въехать на перекресток одному автомобилю с второстепенного направления;
- интервала следования из очереди (follow-up time)[11] – времени между выездом одного транспортного средства с второсте-

[10] Highway Capacity Manual 2010. Режим доступа: URL: https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf (дата обращения: 23.03.2023).

[11] Highway Capacity Manual 2010. Режим доступа: URL: https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf (дата обращения: 23.03.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

пенного направления и выездом следующего транспортного средства, использующего тот же самый интервал в потоке главного направления;

- минимального интервала в потоке, движущемся на кольцевой проезжей части;
- зависимостей, характеризующих влияние интенсивности движения на свободную долю транспортного потока, движущегося на многополосной кольцевой проезжей части.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку в функции принятия интервалов (gap acceptance function) рассматривается интервал в главном потоке, измеряемый между передними бамперами автомобилей, интервалы рассчитывалась как разница между фиксируемыми моментами пересечения створа передними бамперами (рисунок 3). На внешней полосе кольцевой проезжей части отмечались принятые и отвергнутые интервалы, а также количество транспортных средств второстепенного потока, использовавших принятые интервалы.

Для оценки значений критических интервалов применяются методы, основанные на принципиально разных математических моделях [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. В данной работе применен метод Сиглоха (Siegloch's method) [36], позволяющий одновременно оценить критический интервал и интервал следования из очереди. Метод использует регрессионную зависимость между продолжительностью принятого интервала и количеством транспортных средств, принявших его

$$\hat{h}(n) = t_0 + nt_f, \quad (9)$$

где $\hat{h}(n)$ – длительность интервала h, который приняло n транспортных средств, с; t_0 – длительность минимального принятого интервала, с; t_f – интервал следования из очереди, с.

Свободный член регрессионного уравнения (9) является длительностью минимального принятого интервала t_0, а интервал следования из очереди t_f – угловым коэффициентом линейного уравнения регрессии. Соответственно критический интервал t_c определяется как

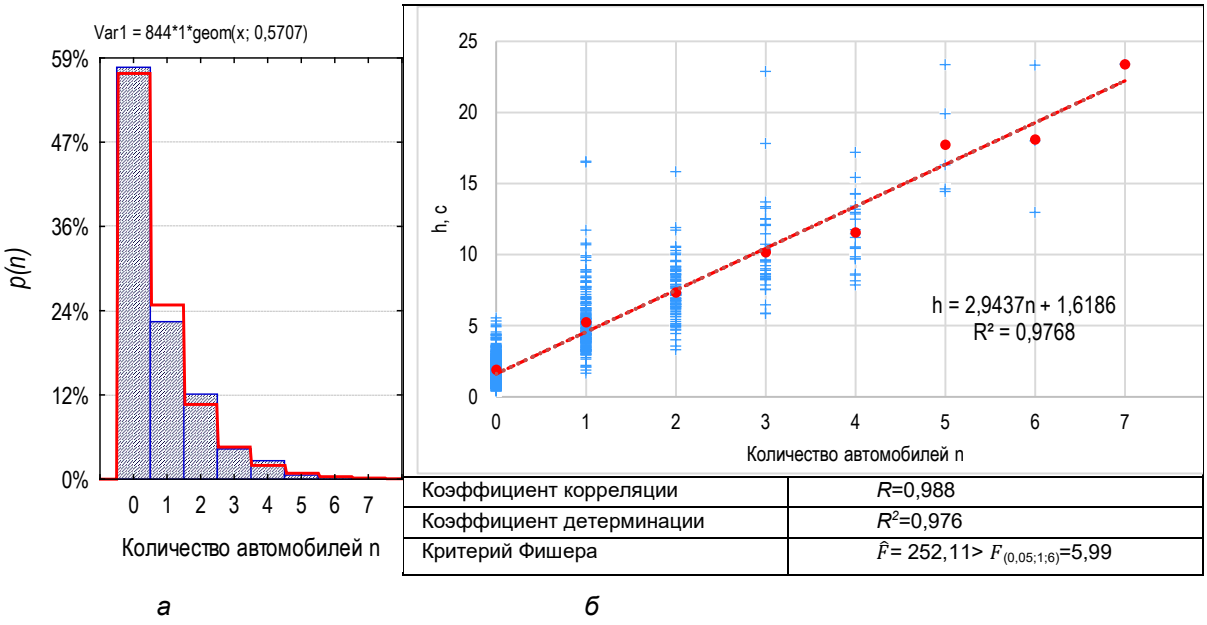
$$t_c = t_0 + t_f/2\ . \quad (10)$$

Метода Сиглоха является специфическим случаем регрессионного анализа, поскольку независимая переменная n имеет целочисленные значения, соответственно распределения ее значений описываются геометрическим распределением (рис. 4а). Поэтому регрессионный анализ выполнялся с использованием средних значений интервалов h, рассчитанных для каждого значения независимой переменной n (рис.4б), а также с включением в рассмотрение среднего значения отклоненных интервалов (n = 0). Во всех изучаемых случаях при применении регрессии средних отмечались высокие значения коэффициентов детерминации и критерия Фишера.

Рисунок 3 – Определение интервалов в потоке на кольцевой проезжей части
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Headways determining in the traffic flow on a circular carriageway
Source: compiled by the authors.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal



Коэффициент корреляции	R=0,988
Коэффициент детерминации	R^2=0,976
Критерий Фишера	$\hat{F}$= 252,11> $F_{(0,05;1;6)}$=5,99

а *б*

Рисунок 4 – Оценка критических интервалов и интервалов следования из очереди методом Сиглоха: средняя полоса на 3-х полосном входе на Древлянское кольцо (г Петрозаводск)
а – распределение значений количества автомобилей, использовавших интервал;
б – диаграмма рассеяния и регрессия с использованием средних значений интервалов
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Estimation of critical intervals and queuing intervals using the Sigloch's method: middle lane at the 3-lane entrance to the Drevlyanskoye Ring (Petrozavodsk)
a – distribution of the number of vehicles that used the headway;
b – scatter diagram and regression of averages
Source: compiled by the authors.

Следует подчеркнуть, что метод Сиглоха уже применялся в исследованиях, выполняемых в ИРНИТУ [12] для оценки критических интервалов на мини и компактных кольцевых пересечениях.

Кроме оценки значений критических интервалов и интервалов следования, из очереди было важным установить зависимости влияния интенсивности движения на величину минимального интервала Δ в потоке и свободную долю потока φ.

Минимальный интервал Δ определялся экспериментально при каждой обработке данных для каждой из полос кольцевой проезжей части 2- и 3-кольцевых пересечений. При этом минимальный интервал Δ оценивался как порядковая статистика – минимальное значение в рассматриваемой выборке. В этой связи было важным обеспечить максимально возможное количество выборок, поэтому обрабатывались данные видеосъёмки длительностью 5–10 мин на кольцевых пересечениях:

- 2-полосных (Братск, Владивосток, Душанбе, Липецк, Находка, Оренбург, Петрозаводск, Псков);
- 3-полосных (Владивосток, Иркутск, Липецк, Нижневартовск, Новокузнецк).

При обследованиях городских УДС получаемые выборки значений интенсивности, имеют, как правило, распределения с положительной асимметрией. Выполнение обследований кольцевых пересечений в разные часы суток позволило получить приблизительно нормальные выборки значений интенсивностей движения, поскольку модули коэффициентов асимметрии имеют значения близкие к 0 (таблица 2). Полученные выборки значений минимальных интервалов Δ имеют выраженную положительную асимметрию, что подтверждается значением коэффициентов асимметрии (см. таблицу 2).

[12] Липницкий А. С. Повышение эффективности организации дорожного движения на основе применения компактных кольцевых пересечений: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. Иркутск, 2010. 20 с. URL: http://www.transport.istu.edu/downloads/auto_lipnickiy.pdf (дата обращения: 03.03.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 2
Характеристики выборок интенсивности движения и минимальных интервалов Δ
Источник: составлено авторами.

Table 2
Characteristics of traffic volumes and minimum interval samples
Source: compiled by the authors

Статистки выборки	Интенсивность движения		Минимальный интервал	
	2-полосные кольца	3-полосные кольца	2-полосные кольца	3-полосные кольца
Среднее	560	501	1,18	1,09
Медиана	574	532	1,15	1,01
Мода	578	Несколько случаев	Несколько случаев	1,00
Минимум	171	93	0,56	0,50
Максимум	1034	1302	3,56	3,58
Стандартное отклонение	199	232	0,43	0,42
Коэффициент асимметрии	-0,03	0,48	2,16	3,83

Определение доли свободной части потока φ выполняется с применением разных линейных и нелинейных функций [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Из всего их многообразия были выбраны две функции, в которых без включения дополнительных коэффициентов используются значения интенсивности движения и минимального интервала:
модель, предложенная R. Luttinen [20]

$$\varphi = \frac{2}{1+s^2\left(\frac{q}{1-\Delta q}\right)^2}, \quad (10)$$

часто применяемая в практике линейная зависимость [21,38]

$$\varphi = 1 - \frac{\Delta q}{3600}, \quad (11)$$

где s^2 – дисперсия интервалов в потоке; q – интенсивность движения на рассматриваемой полосе кольцевой проезжей части, авт/ч; Δ – минимальный интервал в потоке, с.

При установлении регрессионных зависимостей влияния интенсивности движения на минимальный интервал Δ и свободную долю потока φ не применялась многошаговая регрессия с отсевом выбросов на основе анализа остатков. На распределение интервалов в потоке, движущемся по кольцевой проезжей части, также влияют близко расположенные светофорные объекты (регулируемые перекрестки и переходы). Поэтому выбросы будут в дальнейшем анализироваться как результат влияния особенностей участков УДС, прилегающих к обследованным кольцевым пересечениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения критических интервалов и интервалов следования очереди 2-полосных колец (таблица 3) были установлены исследованием кольцевых пересечений в городах Братск, Псков, Петрозаводск.

Таблица 3
Значения критических интервалов и интервалов следования из очереди на 2-полосных кольцах
Источник: составлено авторами.

Table 3
Values of critical headway and follow-up time on 2-lane roundabouts
Source: compiled by the authors.

Вход на кольцевое пересечение	Полоса на входе	Диапазон значений			Средние значения, с	
		t_c	t_f	t_f/t_c	t_c	t_f
2-х полосный на 2 -х полосное	левая	3,34 – 4,50	2,52 – 3,08	0,73	3,72	2,72
	правая	3,26 – 3,79	2,24 – 3,18	0,79	3,44	2,73
3-х полосный на 2 -х полосное с дополнительной правой полосой (рис. 2б)	левая	3,52 – 3,96	2,54 – 3,17	0,75	3,75	2,80
	средняя	3,25 – 3,62	2,53 – 2,96	0,83	3,33	2,77
	правая	3,13 – 3,71	3,02 – 2,63	0,82	3,46	2,84

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

Таблица 4

Значения критических интервалов и интервалов следования из очереди на 3-полосных кольцах

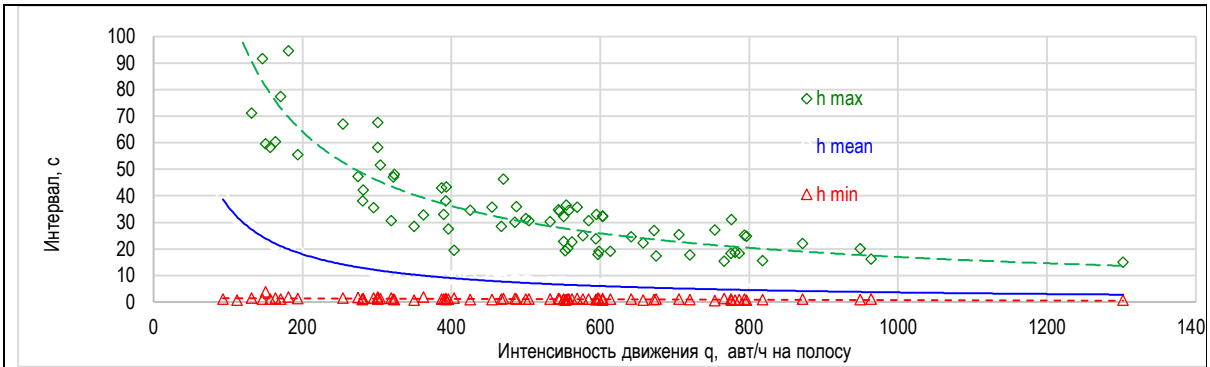
Источник: составлено авторами.

Table 4

Values of critical headway and follow-up time on 3-lane roundabouts

Source: compiled by the authors.

Вход на 3 -х полосное кольцевое пересечение	Полоса на входе	Диапазон значений			Средние значения, с	
		t_c	t_f	t_f/t_c	t_c	t_f
2-х полосный	левая	2,32 – 2,43	1,92 – 1,78	0,78	2,38	1,86
	правая	2,15 – 1,83	1,94 – 2,41	1,09	1,99	2,18
3-х полосный	левая	3,68 – 6,50	2,82 – 3,27	0,63	5,01	3,17
	средняя	3,45 – 5,92	2,89 – 3,56	0,70	4,68	3,27
	правая	3,05 – 4,98	2,8 – 4,1	0,89	3,94	3,52
4-х полосный (рис. 2в)	левая	3,70 – 3,00	2,87 – 3,36	0,87	3,39	3,01
	левая средняя	3,03 – 3,44	2,68 – 3,6	0,88	3,31	2,92
	правая средняя	2,91 – 3,46	2,4 – 2,68	0,77	3,18	2,46
	правая	2,79 – 3,32	2,19 – 2,66	0,79	3,03	2,4



Интервал	Уравнение регрессии или функция	Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Критерий Фишера
Максимальный h_{max}	$h_{max} = 5121{,}4q^{-0{,}827}$	$R = 0{,}88$	$R^2 = 0{,}78$	$\hat{F}$=267,82 > $F_{(0{,}05;1;75)}$=3,97
Средний h_{mean}	$h_{mean} = 3600q^{-1}$	$R = 1$	$R^2 = 1$	-
Минимальный h_{mean}	$h_{mean} = 1{,}4865 - 0{,}0008q$	$R = 0{,}44$	$R^2 = 0{,}19$	$\hat{F}$=17,86 > $F_{(0{,}05;1;75)}$=3,97

Рисунок 5 – Графики зависимости влияния интенсивности движения на максимальный h_{max}, средний h_{mean} и минимальный Δ интервалы (3-полосные кольца)

Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Plots of traffic volume influence on the maximum h_{max}, average h_{mean} and minimum Δ headways (3-lane roundabouts)

Source: compiled by the authors.

Критические интервалы и интервалы следования из очереди 3-полосных колец (таблица 4) были установлены исследованием кольцевых пересечений в городах Иркутск и Липецк. В случае трехполосных колец были рассмотрены входы на кольцевую проезжую часть:

2 полосы на входе (ул. Ширямова, кольцо Плотина ГЭС, г. Иркутск)

4 полосы на входе (ул. Байкальская, кольцо Плотина ГЭС, г. Иркутск)

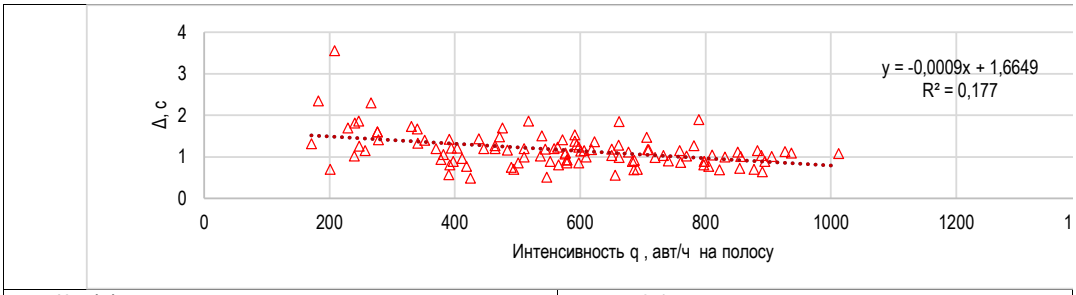
3 полосы на входе (2 кольцевых пересечения, г. Липецк)

Влияние интенсивности движения на величины максимального h_{max} и среднего h_{mean} интервалов в потоке отображает степенная функция (рисунок 5). В отличие от h_{max} и h_{mean} величина минимального интервала Δ испыты-

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

вает слабое влияние интенсивности движения (рисунки 5, 6). Такой вывод делается на основании полученных значений коэффициентов корреляции (рисунок 6, *а, б*), попадающих в разряд значений *R* = 0,4-0,5 шкалы Чеддока[13].

В этой связи значения минимальных интервалов для практического использования оценены как средние выборочные (таблица 5). Учитывая, что расчеты пропускной способности предполагают рассмотрение случаев высокой интенсивности движения на кольцевой проезжей части, были также оценены значения минимальных интервалов при интенсивности более 500 авт./ч на полосу.



Коэффициент корреляции	R=0,45
Коэффициент детерминации	R^2=0,21
Критерий Фишера	$\hat{F}$=24,87 > $F_{(0,05;1;96)}$=3,95

а

Коэффициент корреляции	R=0,44
Коэффициент детерминации	R^2=0,19
Критерий Фишера	$\hat{F}$=17,86 > $F_{(0,05;1;75)}$=3,97

б

Рисунок 6 – Зависимость «интенсивность на полосе движения q – минимальный интервал Δ»: а – двухполосные кольца; б – трехполосные кольца
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Traffic volume q – minimum headway Δ dependence: a – two-lane roundabouts; b – three-lane roundabouts
Source: compiled by the authors.

Таблица 5
Значения минимальных интервалов в потоке
Источник: составлено авторами.

Table 5
Values of minimum headways
Source: compiled by the authors.

Кольцо	Интенсивность на полосе авт/ч	Количество случаев	Доверительный интервал, с		Средне значение Δ, с	Ошибка оценки среднего, с
			- 95%	+ 95%		
2-х полосное	200 – 1030	96	1,09	1,27	1,18	0,04
	500 – 1030	62	0,99	1,14	1,07	0,04
3-х полосное	90 – 1300	75	1,00	1,19	1,09	0,05
	500 – 1300	41	0,88	1,00	0,94	0,03

[13] Режим доступа: https://statpsy.ru/correlation/velicina (дата обращения: 03.09.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

В соответствии с полученными данными (табл. 4) для практического применения рекомендуются значения минимального интервала (смещения экспоненциального распределения):

- 2-х полосные кольца Δ = 1,07 с;
- 3-х полосные кольца Δ = 0,94 с.

Тестирование формул (10,11) характеризующих влияния интенсивности движения на долю свободного потока φ с использованием наблюдаемых значений q и Δ, дало следующие результаты:

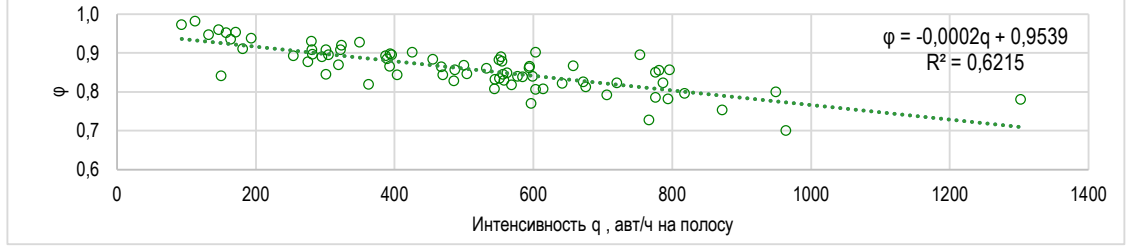
- рассчитанные по формуле (10) отдельные значения φ превышают 1, также отсутствует статистически значимая корреляция между q и φ;
- рассчитанные по формуле (11) значения φ имеют более высокую корреляцию с интенсивностью движения (рис. 6).

Для практического применения представляется удобным использовать функцию $\varphi = f(q)$. Полученные уравнения регрессии для 2-х полосных (рис. 7а) и 3-х полосных кольцевых пересечений (рис. 7б) имеют близкие значения сводных членов и угловых коэффициентов. Поэтому были совместно обработаны данных обеих выборок 2-х и 3-х полосных колец (рис. 7в).

а

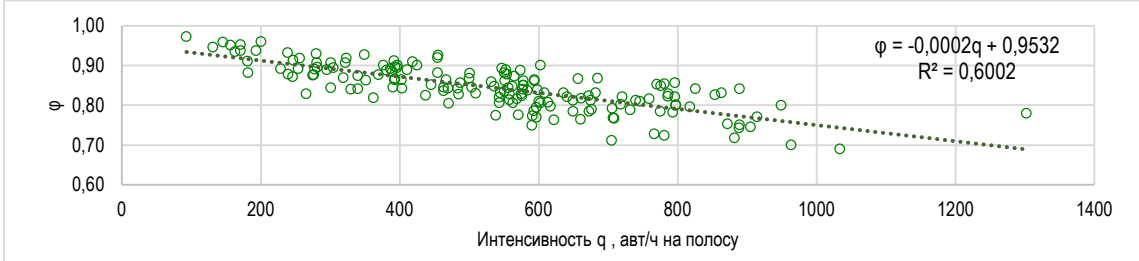
Коэффициент корреляции	R=0,64
Коэффициент детерминации	R^2=0,41
Критерий Фишера	$\hat{F}$=67,58 > $F_{(0,05;1;96)}$=3,95

б



Коэффициент корреляции	R=0,79
Коэффициент детерминации	R^2=0,62
Критерий Фишера	$\hat{F}$=123,17 > $F_{(0,05;1;75)}$=3,97

в



Коэффициент корреляции	R=0,77
Коэффициент детерминации	R^2=0,60
Критерий Фишера	$\hat{F}$=246,21 > $F_{(0,05;1;171)}$=3,90

Рисунок 7 – Влияние интенсивности движения на свободную долю транспортного потока φ: а – двухполосные кольца; б – трехполосные кольца; в – двух- и трехполосные кольца совместно
Источник: составлено авторами.

Figure 7 - Influence of traffic intensity on the free share of φ traffic flow: а – two-lane rings; б – three-lane rings; в – two and three-lane rings together
Source: compiled by the authors.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

С учетом преобразования уравнения регрессии, полученного при обработке совместных данных 2- и 3-полосных колец (см. рисунок 7, в), свободную долю потока можно также определять, используя упрощенную зависимость

$$\varphi = 0{,}96 - 0{,}77\,(q/3600), \qquad (11)$$

где q – интенсивность движения, авт/ч на полосу.

ОБСУЖДЕНИЕ

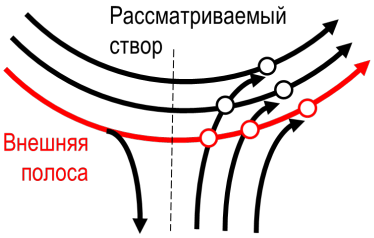
Важнейший результат исследования – установлено, что полосы входа на многополосное кольцо имеют разные значения критических интервалов и интервалов следования из очереди. Это доказывает, что расчет пропускной должен выполняться в отдельности для каждой полосы на входе с учетом всех конфликтных точек, в которых поступающий на кольцо второстепенный поток взаимодействует с потоком, движущимся на многополосной кольцевой проезжей части. Полученные данные не противоречат результатам других исследований многополосных кольцевых пересечений [14].

Следует также указать на выявленную особенность функционирования 3-полосных кольцевых пересечений. По результатам обследований внешняя (правая полоса) кольцевой проезжей между выходом с кольца и входом на него (рисунок 8) начинает активно использоваться при интенсивности движения на кольцевой проезжей части более 1500 авт./ч.

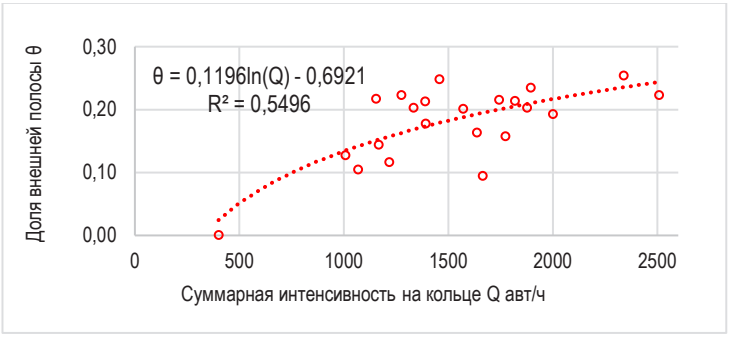
Рост доли потока, использующего правую полосу 3-полосного кольца (рисунок 8, б), при суммарной интенсивности движения более 1400–1500 авт./ч объясняется, в том числе возрастающим использованием этой полосы для сквозного движения. Это приводит к увеличению интенсивности движения сразу во всех трех первых конфликтных точках, через которые поступает по левой, средней и правой полосе поток второстепенного направления (рисунок 8, а).

Критическим элементом многополосных кольцевых пересечений являются левые полосы входов на кольцевую проезжую часть. Поток, поступающий с левых полос и совершающий левый поворот, проходит максимальное количество конфликтных точек (соответственно, 2 на 2-полосных кольцах и 3 на 3-полосных).

Интенсивность движения на кольцевой проезжей части не оказывает статистически значимого влияния на величину минимального интервала. Поэтому величину минимального интервала можно интерпретировать как характеристику водителей с наиболее агрессивной манерой вождения.



а



Коэффициент корреляции	R=0,74
Коэффициент детерминации	R^2=0,55
Критерий Фишера	$\hat{F}$=24,40 > $F_{(0,05;1;20)}$=4,35

б

Рисунок 8 – Влияние интенсивности движения на использование внешней полосы: а – рассматриваемый участок 3-полосного кольца; б – зависимость «интенсивность – доля внешней полосы»
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Influence of traffic volume on the external lane use a – considered section of a 3-lane ring; б – traffic volume – share of external lane dependence
Source: compiled by the authors.

[14] Alcelik R. A comparative analysis of exponential and liner roundabout capacity models using HCM research data.URL: https://www.sidrasolutions.com/media/523/download (дата обращения: 03.03.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования установлены значения характеристик, необходимых для выполнения расчетов пропускной способности входов на многополосные кольцевые пересечения при отсутствии помех пешеходов.

Для расчетов рекомендуется использовать следующие значения критических интервалов t_c и интервалов следования из очереди t_f:
2-х полосные кольца:

- левая полоса t_c= 3,72, t_f= 2,72;
- правая полоса t_c= 3,44, t_f= 2,73.

3-х полосные кольца:

- левая полоса t_c=5,01, t_f=3,17;
- средняя полоса t_c=4,68, t_f= 3,27;
- правая полоса t_c= 3,94, t_f= 3,52.

Рекомендуемые для использования значения минимального интервала в потоке на кольцевой проезжей части: 2-х полосные кольцах Δ = 1,07 с; 3-х полосные кольцах Δ = 0,94 с.

Для определения доли свободной части транспортного потока предлагается использовать зависимость φ=1−Δq/3600, где Δ – минимальный интервал в потоке на рассматриваемой полосе кольцевой проезжей части, с; q – интенсивность движения на рассматриваемой полосе кольцевой проезжей части, авт/ч.

Для дальнейшего развития методического обеспечения оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений, задержек и очередей транспортных средств на них необходимо:

установить закономерности влияния пешеходных потоков на пропускную способность входов на кольцевые пересечения и выходов с них;

установить сочетания значений интенсивностей движения на многополосных кольцевых пересечениях, при которых наблюдается ограниченный приоритет (т.е. когда часть водителей приоритетного потока уступает второстепенному потоку), что нужно рассматривать как признак исчерпания пропускной способности входа на кольцо;

на основе оценки соотношений интервалов следования очереди основных типов транспортных средств [37] определить для кольцевых пересечений коэффициенты приведения к легковому автомобилю;

изучить особенности функционирования кольцевых пересечений в условиях влияния близко расположенных светофорных объектов, а также возможность применения в расчетах аналогии с регулируемыми пересечениями, рассмотренной в работах R. Akçelik [38].

Дальнейшее накопление данных о функционировании кольцевых пересечений и их систематизация позволят сформировать базу справочных данных, на основе которых можно развивать методическое обеспечение оценки пропускной способности, а также разрабатывать программное обеспечение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Akçelik R. Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: the SIDRA solution // Traffic Engineering and Control. 1997. Vol. 38 (7/8). P. 388–399.
2. Косцов А. В. Современные кольцевые пересечения: зарубежный опыт / А. В. Косцов, А. Ю. Михайлов // монография. М.: А-проджект, 2018. 106 с.
3. Рассоха В. И. Обзор методов оценки пропускной способности кольцевых пересечений / В. И. Рассоха, Н. А. Никитин // Технико-технологические проблемы сервиса. 2020. № 3 (53). С. 31–37. EDN: OUSSHJ.
4. Каримов Н.М. Обоснование модели оценки пропускной способности городских трехполосных кольцевых пересечений / Н.М. Каримов, А.Ю. Михайлов // Мир транспорта и технологических машин 2022 4-2 (79). С. 68-74. EDN: ZDTPYY
5. Каримов Н. М. Критические интервалы и интервалы следования из очереди на двухполосных кольцевых пересечениях / Н.М. Каримов, А.Ю. Михайлов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С.44–57. https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-44.
6. Ahmad A., Regression model for entry capacity of a roundabout under mixed traffic condition-an Indian case study. / A. Ahmad, R. Rastogi // The International Journal of Transportation Research. 2017. Volume 9, Issue 5. P. 243-257. URL: DOI: 10.1080/19427867.2016.1203603.
7. Patnaik A. K., Krishna Y., Rao et al S. Development of Roundabout Entry Capacity Model Using INAGA Method for Heterogeneous Traffic Flow Conditions // Arab J Sci Eng. 2017. 42, P. 4181 – 4199. https://doi.org/10.1007/s13369-017-2677-x.
8. Ahmad A., Rastogi R. Calibrating HCM model for roundabout entry capacity under heterogeneous traffic // Mod. Transport. 2019. 27. P. 293–305. https://doi.org/10.1007/s40534-019-00194-7
9. Macioszek E. Roundabout Entry Capacity Calculation–A Case Study Based on Roundabouts in Tokyo, Japan, and Tokyo Surroundings // Sustainability. 2020. Vol. 12. Is. 4, 1533, https://doi.org/10.3390/su12041533
10. Al-Madani M. N. Capacity of large dual and triple lanes roundabouts during heavy demand conditions // Arabian Journal for Science and Engineering. vol. 38, no. 3. pp. 491–505, 2013.
11. Shaaban K., Hamad H. Critical Gap Comparison between One-, Two-, and Three-Lane Roundabouts in Qatar // Sustainability. 2020. 12(10). 4232. 14 p. DOI:10.3390/su12104232

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

12. Giuffrè O., Granà A., Tumminello M. Gap-accepteance parameters for roundabouts: a systematic review // European Transport Research Review. 2016. Vol. 8, 2. https://doi.org/10.1007/s12544-015-0190-4

13. Guo R., Liu L., Wang W. Review of Roundabout Capacity Based on Gap Acceptance // Journal of Advanced Transportation. Vol. 2019, Article ID 4971479, https://doi.org/10.1155/2019/4971479.

14. Kusuma A., Koutsopoulos H. N. Critical Gap Analysis of Dual Lane Roundabouts // Procedia Social and Behavioral Sciences. Vol. (2011) 16. pp. 709 – 717, https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.490.

15. Qu Z., Duan Y., Song X., Hu H., Liu H., Guan K. Capacity Prediction Model Based on Limited Priority Gap-Acceptance Theory at Multilane Roundabouts // Mathematical Problems in Engineering. Volume 2014, Article ID 490280 |, 11 pages https://doi.org/10.1155/2014/490280

16. Wu N., Brilon W. Total capacity of roundabouts analyzed by a conflict technique // Transportation Research Record. 2018. 2672 (15): 9-22. doi: 10.1177/0361198118788171.

17. Wu N., Brilon W. Roundabout Capacity Based on conflict Technique // Paper presented at the 5th International Roundabout Conference Green Bay, TRB Committee on Roundabouts (ANB75), Wisconsin, May 8–10, 2017. 25 p. URL: http://teachamerica.com/RAB17/RAB17papers/RAB175C_BrilonPaper.pd (accessed: 17.01.2023).

18. Qu Z., Duan Y., Hu H., Song X. Capacity and delay estimation for roundabouts using conflict theory // The Scientific World Journal, vol.2014, ArticleID7 10938,12pages,2014. https://doi.org/10.1155/2014/710938

19. Cowan R. J. Useful headway models / R. J. Cowan // Transportation Research Volume 9, Issue 6, December 1975, Pages 371-375 https://doi.org/10.1016/0041-1647(75)90008-8

20. Luttinen R. T. Properties of Cowan's M3 headway distribution // Transportation Research Record. vol. 1678. no. 1. pp. 189–196, 1999. https://doi.org/10.3141/1678

21. Akçelik R., Chung E. Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways // Road and Transport Research. (1994) 3 (1). pp. 42–59.

22. Tanyel S., Yayla N. A discussion on the parameters of Cowan M3 distribution for Turkey // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2003. vol. 37, issue 2: 129-143 https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00009-5

23. Luis V., Ana B.S., Alvaro S., Joao S. Estimating The Parameters Of Cowan's M3 Headway distribution For Roundabout Capacity Analyses // The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering. 2012; 7(4): 261–268.

24. Giuffrè O., Granà A., Marino S. Turbo-roundabouts vs Roundabouts Performance Level // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2014; 53: 590 – 600 https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.909

25. Hagring O. A further generalization of Tanner's formula // Transportation Research B: Methodological. 1998; vol. 32, no. 6: 423–429, 1998. https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00010-1

26. Troutbeck R. Capacity of limited-priority merge // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 1999; vol. 1678, pp. 269–276. https://doi.org/10.3141/1678-32

27. Troutbeck R., Kako S. Limited priority merge at unsignalized intersections // Transportation Research A: Policy and Practice. 1999; vol. 33, no. 3-4: 291–304. DOI:10.1016/S0965-8564(98)00046-9

28. Vasconcelos L. P., Seco, Silva C. B. Comparison of Procedures to Estimate Critical Headways at Roundabouts // Promet – Traffic & Transportation. 2013; Vol. 25, No. 1: 43-53 https://doi.org/10.7307/ptt.v25i1.1246

29. Brilon W., Koenig R., Troutbeck R. Useful estimation procedures for critical gap // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 1999. 33 (3–4): 161-186. doi: 10.1016/s0965-8564(98)00048-2.

30. Kang N., Nakamura H., Asano M. An empirical analysis on critical gap and follow-up time at roundabout considering geometry effect // Proc., 46th Infrastructure Planning Conference (2012). URL: http://library.jsce.or.jp/ jsce/open/00039/201211_no46/pdf/129.pdf. (Accessed: 03.02.2023).

31. Maslać D., Cvitanić D., Lovrić I. Estimation of Critical Headway at Small Urban Roundabout // Promet – Traffic & Transportation. 2020; Vol. 32. Is. 1: 103–117, https://doi.org/10.7307/ptt.v32i1.3155.

32. Vikram D., Agarwal S. Methodology to Estimate Parameters of Critical Gap Distribution // Transportation Science. Research Procedia. 2020; Vol. 48: 665–672, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.067.

33. Barchański A., Żochowska R. Estimation of critical gaps and follow-up times at median uncontrolled t-intersection // Archives of Transport. 2021; Vol. 60, (2021) Is. 4:105–123, https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6030

34. Faye F. R. Estimation of Critical Gap Using Maximum Likelihood Method at Unsignalized Intersection: A Case Study in Adama City, Ethiopia // International Journal of Transportation Engineering and Technology. 2021; Vol. 7. Is. 2: 48–59, https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20210702.12.

35. Radović D. Critical headway at unsignalized intersections - literature review / D. Radović, V. Bogdanović, B. Marić // International Journal for Traffic and Transport Engineering. 2022; Vol. 12(1): 61–77, https://dx.doi.org/10.7708/ ijtte2022.12(1).05.

36. Siegloch W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung; Bundesminister für Verkehr: Strassenbau, Germany, 1973; pp. 1–173.

37. Al-Kaisy A., Hall F. L., Reisman E. S. Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow // Transport. Res. Part A 36. 2002: 725–742. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00032-5

38. Akçelik R. Gap acceptance modelling by traffic signal analogy // Traffic Engineering and Control. 1994; 35 (9): 498-506.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

REFERENCES

1. Akçelik R. Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: the SIDRA solution. *Traffic Engineering and Control*. 1997; Vol. 38 (7/8): 388–399
2. Koscov A. V., Mihajlov A. Ju. Sovremennye kol'cevye peresechenija: zarubezhnyj opyt [Modern roundabouts: foreign experience]. Moscow, A-prodzhekt, 2018. 106 p. (in Russ.)
3. Rassoha V. I., Nikitin N. A. Obzor metodov ocenki propusknoj sposobnosti kol'cevyh peresechenij [Review of the methods for assessing the capacity of roundabouts]. *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa.* 2020; 3 (53): 31–37. EDN: OUSSHJ. (in Russ.)
4. Karimov N.M., Mihajlov A.Ju. Obosnovanie modeli ocenki propusknoj sposobnosti gorodskih trehpolosnyh kol'cevyh peresechenij [Justification of the model for estimating the capacity of urban three-lane roundabouts]. *Mir transporta i tehnologicheskih mashin.* 2022; 4-2 (79): 68-74. EDN: ZDTPYY (in Russ.)
5. Karimov N. M., Mihajlov A. Ju. Kriticheskie intervaly i intervaly sledovanija iz ocheredi na dvuhpolosnyh kol'cevyh peresechenijah [Critical headways and follow up time on two-lane roundabouts]. *Intellekt. Innovacii. Investicii.* 2023; 4: 44–57. https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-44. (in Russ.)
6. Ahmad A., Rastogi R. Regression model for entry capacity of a roundabout under mixed traffic condition–an Indian case study. *The International Journal of Transportation Research*.2017; Volume 9, Issue 5: 243-257. URL: DOI: 10.1080/19427867.2016.1203603.
7. Patnaik, A.K., Krishna, Y., Rao S. Development of Roundabout Entry Capacity Model Using INAGA Method for Heterogeneous Traffic Flow Conditions. *Arab J Sci Eng*. 2017; 42: 4181–4199. https://doi.org/10.1007/s13369-017-2677-x.
8. Ahmad A., Rastogi R., Calibrating HCM model for roundabout entry capacity under heterogeneous traffic. *Mod. Transport*. 2019; 27: 293–305. https://doi.org/10.1007/s40534-019-00194-7
9. Macioszek E. Roundabout Entry Capacity Calculation–A Case Study Based on Roundabouts in Tokyo, Japan, and Tokyo Surroundings. *Sustainability*. 2020; Vol. 12. Is. 4, 1533, https://doi.org/10.3390/su12041533
10. Al-Madani M. N. Capacity of large dual and triple lanes roundabouts during heavy demand conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering.*2013; vol. 38, no. 3: 491–505, 2013.
11. Shaaban K., Hamad H. Critical Gap Comparison between One-, Two-, and Three-Lane Roundabouts in Qatar. *Sustainability*. 2020; 12(10). 4232: 14. DOI:10.3390/su12104232
12. Giuffrè O., Granà A., Tumminello M. Gap-accepteance parameters for roundabouts: a systematic review. *European Transport Research Review*. 2016; Vol. 8, 2. https://doi.org/10.1007/s12544-015-0190-4
13. Guo R., Liu L., Wang W. Review of Roundabout Capacity Based on Gap Acceptance. *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 2019. Article ID 4971479, https://doi.org/10.1155/2019/4971479.
14. Kusuma A., Koutsopoulos H. N. Critical Gap Analysis of Dual Lane Roundabouts. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Vol. (2011) 16: 709–717, https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.490.
15. Qu Z. Z. Qu, Y. Duan, X. Song, H. Hu, H. Liu, K. Guan Capacity Prediction Model Based on Limited Priority Gap-Acceptance Theory at Multilane Roundabouts. *Mathematical Problems in Engineering* Volume. 2014., Article ID 490280. 11 p. URL: https://doi.org/10.1155/2014/490280
16. Wu N., Brilon W. Roundabout Capacity Based on conflict Technique. *Paper presented at the 5th International Roundabout Conference Green Bay* URL http://teachamerica.com/RAB17/RAB17papers/RAB175C_BrilonPaper.pdf (accessed: 13.05.2023).
17. Wu N, Brilon W. Total capacity of roundabouts analyzed by a conflict technique ю/ *Transportation Research Record*. Transportation Research Record, Vol 2672 (Preprint No. 18-00849), Issue 15, 2018. pp. 9–22. https://doi.org/10.1177/0361198118788171
18. Qu Z., Duan Y., Hu H., Song X. Capacity and delay estimation for roundabouts using conflict theory/ *The Scientific World Journal,* 2014. vol.2014, ArticleID7 10938/ 12 pages. https://doi.org/10.1155/2014/710938
19. Cowan R. J. Useful headway models. *Transportation Research Volume 9*, Issue 6, December 1975, Pages 371-375 https://doi.org/10.1016/0041-1647(75)90008-8
20. Luttinen R. T. Properties of Cowan's M3 headway distribution. *Transportation Research Record*. 1999; vol. 1678, no. 1: 189–196, 1999. https://doi.org/10.3141/1678
21. Akçelik R., Chung E. Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways. *Road and Transport Research*. 1994; 3 (1): 42–59.
22. Tanyel S., Yayla N. A discussion on the parameters of Cowan M3 distribution for Turkey. *Transportation Research Part A*: *Policy and Practice*. 2003; vol. 37, issue 2: 129-143. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00009-5
23. Luis V., Ana B.S., Alvaro S. Joao S. Estimating The Parameters Of Cowan's M3 Headway distribution For Roundabout Capacity Analyses. *The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering.* 2012; 7(4): 261–268.
24. Giuffrè O., Granà A., Marino S. Turbo-roundabouts vs Roundabouts Performance Level. *Procedia - Social and Behavioral Sciences.* 53 (2012) 590 – 600. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.909
25. Hagring O. A further generalization of Tanner's formula. T*ransportation Research B: Methodological*. 1998; vol. 32, no. 6: 423–429, 1998. https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00010-1.
26. Troutbeck R. Capacity of limited-priority merge. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board,* vol. 1678: 269–276, 1999. https://doi.org/10.3141/1678-32.
27. Troutbeck R., Kako S. Limited priority merge at unsignalized intersection. Transportation Research A: *Policy and Practice*; vol. 33, no. 3-4: 291–304, 1999. DOI:10.1016/S0965-8564(98)00046-9.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

28. Vasconcelos L. P., Seco Á. J., Silva C. B. Comparison of Procedures to Estimate Critical Headways at Roundabouts. *Promet – Traffic & Transportation*. 2013; Vol. 25, No. 1: 43-53 https://doi.org/10.7307/ptt.v25i1.1246

29. Brilon W, Koenig R, Troutbeck RJ. Useful estimation procedures for critical gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 1999;33(3–4): 161-186. doi: 10.1016/s0965-8564(98)00048-2.

30. Kang N., Nakamura H., Asano M. An empirical analysis on critical gap and follow-up time at roundabout considering geometry effect. *Proc., 46th Infrastructure Planning Conference*. (2012) URL: http://library.jsce.or.jp/ jsce/open/00039/201211_no46/pdf/129.pdf. (accessed: 03.02.2023).

31. Maslać D., Cvitanić D., Lovrić I. Estimation of Critical Headway at Small Urban Roundabout. *Promet – Traffic & Transportation*. 2020; Vol. 32. Is. 1: 103–117, https://doi.org/10.7307/ptt.v32i1.3155.

32. Vikram D., Agarwal S. Methodology to Estimate Parameters of Critical Gap Distribution. *Transportation Science. Research Procedia*. 2020; Vol. 48: 665–672, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.067.

33. Barchański A., Żochowska R. Estimation of critical gaps and follow-up times at median uncontrolled t-intersection. *Archives of Transport*. 2021; Vol. 60, Is. 4: 105–123, https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6030

34. Faye F. R. Estimation of Critical Gap Using Maximum Likelihood Method at Unsignalized Intersection: A Case Study in Adama City, Ethiopia. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. 2021; Vol. 7. Is. 2: 48–59/ https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20210702.12.

35. Radović D., Bogdanović V., Marić B. Critical headway at unsignalized intersections - literature review. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2022; Vol. 12(1), (2022): 61–77, https://dx.doi.org/10.7708/ ijtte2022.12(1).05.

36. Siegloch, W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung; Bundesminister für Verkehr. Strassenbau, Germany. 1973: 1–173

37. Al-Kaisy, A., Hall, F. L., and Reisman, E. S. Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. *Transport. Res. Part A 36.* 2002: 725–742. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00032-5

38. AKÇELIK, R. Gap acceptance modelling by traffic signal analogy. *Traffic Engineering and Control*. 1994; 35 (9), (1994): 498-506.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каримов Н. М. Выполнение экспериментальных исследований. Математическая обработка данных.

Михайлов А. Ю. Формулирование цели и задач исследования. Научное руководство исследованием.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Navruz M. Karimov. Experimental studies fulfillment. Mathematical data processing.

Aleksandr Yu. Mikhailov. Aim and objectives of the research statement. Scientific research management.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каримов Навруз Мирозорахимович – аспирант, научная специальность 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта», SPIN-код: 3369-1225.

Михайлов Александр Юрьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автомобильного транспорта, SPIN-код: 2498-7773.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Navruz M. Karimov – Postgraduate student, 2.9.5 Operation of road transport scientific major, SPIN-код: 3369-1225.

Alexander Yu. Mikhailov – Dr. of Sci., Professor, Professor of Automobile Transport Department, SPIN-код: 2498-7773.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal