

Н. Н. Дудникова, канд. техн. наук, А. Р. Лебеденко

Автомобильно-дорожный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
в г. Горловка

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛОС ПЕРЕГОНОВ ГОРОДСКИХ УЛИЦ

Приведены экспериментальные исследования и расчеты значений пропускных способностей десяти перегонів четырехполосных улиц на улично-дорожной сети города Донецка.

Построены диаграммы значений пропускных способностей первой и второй полос движения на перегонів городских улиц, а также значений пропускных способностей перегонів в целом. Значения расчетных пропускных способностей сравнены со значениями максимальных суммарных интенсивностей на перегонів, замеры которых проводились в одно и то же время в течение суток для каждого перегонів.

Проверка разработанных расчетных формул пропускной способности перегонів с двухполосным движением в одном направлении осуществлена с применением линейного корреляционного анализа, их адекватность теоретически доказана.

Сформулирована методика расчета пропускной способности первой и второй полос движения, а также перегонів двухполосной улицы в одном направлении.

Ключевые слова: пропускная способность дороги, полоса движения дороги, перегон дороги, методика расчета, эксперимент

Постановка проблемы

В предыдущих работах авторов [1, 2] было выяснено, что интенсивное маневрирование транспортных средств при выполнении поворотов направо, налево, остановки у края проезжей части, приводят к созданию индивидуальных условий движения по первой и второй полосам перегонів улицы. Очереди транспортных средств, как подвижные, так и неподвижные, приводят к снижению пропускной способности полос и улицы, к формированию ударных волн в транспортном потоке и образованию заторов.

Указанное раскрывает актуальность и необходимость совершенствования существующей методики [3–7] назначения пропускной способности полос движения городских улиц, до уровня расчетной методики, учитывающей индивидуальные особенности маневрирования транспортных средств в пределах конкретного перегонів улицы. Поэтому усовершенствование данной методики было выполнено в [1, 2], что в свою очередь требует проведения экспериментальных исследований значений пропускной способности полос перегонів городских улиц.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ исследований [1–5] показал, что эффективность улично-дорожной сети города при пропуске транспортных средств определяется двумя основными факторами: пропускной способностью перегонів и перекрестков улиц. Пропускная способность перегонів городских улиц является основой в построении улично-дорожной сети города.

Пропускная способность многополосного движения на городских улицах формируется неравномерно. Уменьшение пропускной способности каждой последующей полосы осуществляется от крайней правой. Основным фактором снижения пропускной способности указанных полос являются маневры транспортных средств по смене полосы движения.

Целью исследования является проведение экспериментальных исследований значений пропускной способности полос перегонів городских улиц.

Изложение основного материала исследования

В соответствии с выполненными исследованиями [1, 2], объектом экспериментального исследования были выбраны перегоны четырехполосных городских улиц в одном уровне на улично-дорожной сети города Донецка.

С учетом рекомендаций теории планирования эксперимента [3], а также с учетом того, что собираемые данные колеблются относительно среднего значения по нормальному закону распределения, необходимо обеспечить не менее десяти пар данных о значениях пропускной способности перегонов четырехполосной улицы в одном направлении, которые в дальнейшем будут сравниваться с экспериментальными значениями интенсивности движения по указанным перегонам с целью подтверждения теоретических данных экспериментальными.

Предлагается в качестве объекта экспериментальных исследований принять улицу Артема в рамках Ворошиловского района города Донецка, где осуществляется двустороннее движение по двум полосам в одном направлении.

Соответственно была сформирована таблица с перечнем перегонов улицы Артема, которые подлежали экспериментальному исследованию.

Таблица – Перечень перегонов четырехполосной улицы Артема на улично-дорожной сети города Донецка, которые выбраны в качестве объекта экспериментальных исследований

№ п/п	Название перегона улиц	Характеристика геометрии перегона улицы		
		Число полос движения в одном направлении	Ширина первой полосы движения В1, м	Ширина второй полосы движения В2, м
1	Перегон по улице Артема «проспект Таманский – проспект Панфилова» (2 пешеходных перехода)	2	3,75	3,75
2	Перегон по улице Артема «проспект Освобождения Донбасса – проспект Титова»	2	3,75	3,75
3	Перегон по улице Артема «проспект Титова – проспект Мира»	2	3,75	3,75
4	Перегон по улице Артема «проспект Мира – проспект Ватутина»	2	3,75	3,75
5	Перегон по улице Артема «проспект Ватутина – проспект Богдана Хмельницкого»	2	3,75	3,75
6	Перегон по улице Артема «проспект Богдана Хмельницкого – бульвар Шевченко»	2	3,75	3,75
7	Перегон по улице Артема «бульвар Шевченко – проспект Театральный»	2	3,75	3,75
8	Перегон по улице Артема «проспект Театральный – проспект Гурова»	2	3,75	3,5
9	Перегон по улице Артема «проспект Гурова – проспект Гринкевича»	2	3,75	3,5
10	Перегон по улице Артема «проспект Гринкевича – проспект Комсомольский»	2	3,75	3,75

Ранее авторами были получены формулы [1] для расчета пропускной способности перегона городской улицы:

$$P_{1,2} = \frac{2V_{cn}}{V_{c\delta 1} + V_{c\delta 2}} \cdot \frac{(P_1 + P_2) - N_{cn}}{(P_1 + P_2)} \cdot (P_1'' + P_2''). \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2'' = 3600 \cdot (V_{c\delta 2} \cdot q_{\max 2} - \Delta P_{\delta 2} + \Delta P_{cn 2} - \Delta P_{\lambda n}), \\ \Delta P_{\delta 2} = \frac{N \cdot V_{\delta 2}}{N_{\max}} \cdot \bar{q}_2, \quad \Delta P_{cn 2} = \frac{(\omega - 1) \cdot V_{c\delta 2} \cdot q_{\max 2}}{\bar{q}_2 \cdot \left(t_{p1} \cdot V_{c\delta 1} + 2 \cdot t_{py1} \cdot V_{c\delta 1} + \frac{g \cdot \varphi_y \cdot (B)^2}{8 \cdot V_{c\delta 1}^2} + L_a + \Delta_{\delta} \right)}, \\ \Delta P_{\lambda n} = k \cdot \left(V_{c\delta 2} - \sqrt{\frac{g \cdot R_{\lambda n} \cdot (\varphi_y \mp \operatorname{tg}(\beta_{\lambda n}))}{1 \pm \varphi_y \cdot \operatorname{tg}(\beta_{\lambda n})}} \right) \cdot \bar{q}_2. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1'' = 3600 \cdot (V_{c\delta 1} \cdot q_{\max 1} - \Delta P_{\delta 1} + \Delta P_{cn 1} - \Delta P_{nn} - \Delta P_{cm}), \\ \Delta P_{\delta 1} = \frac{N \cdot V_{\delta 1}}{N_{\max}} \cdot \bar{q}_1, \quad \Delta P_{cn 1} = \frac{(\omega - 1) \cdot V_{c\delta 1} \cdot q_{\max 1}}{\bar{q}_1 \cdot \left(t_{p2} \cdot V_{c\delta 2} + 2 \cdot t_{py2} \cdot V_{c\delta 2} + \frac{g \cdot \varphi_y \cdot (B)^2}{8 \cdot V_{c\delta 2}^2} + L_a + \Delta_{\delta} \right)}, \\ \Delta P_{nn} = \left(V_{c\delta 1} - \sqrt{\frac{g \cdot R_{nn} \cdot (\varphi_y \mp \operatorname{tg}(\beta_{nn}))}{1 \pm \varphi_y \cdot \operatorname{tg}(\beta_{nn})}} \right) \cdot \bar{q}_1, \\ \Delta P_{cm} = \frac{\Delta V_{cm1} \cdot \bar{q}_1}{\bar{q}_2 \cdot \left(t_{p1} \cdot V_{c\delta 1} + 4 \cdot t_{py1} \cdot V_{c\delta 1} + 2 \cdot \frac{g \cdot \varphi_y \cdot \left(\frac{B_{a1}}{2} - \frac{B1}{2} + \Delta'_{\delta} \right)^2}{8 \cdot V_{c\delta 1}^2} + 2 \cdot L_{a1} + \Delta_{\delta} \right)}. \end{array} \right.$$

Согласно (1), проведение экспериментальных вычислений требует формирования перечня исходных данных для рассматриваемого перегона улицы:

$V_{c\delta 1}, V_{c\delta 2}$ – скорость движения одиночных транспортных средств по первой и второй полосе, м/с;

V_{cn} – средняя скорость транспортных средств при смене полосы движения, м/с;

N_{cn} – интенсивность перестроений между двумя полосами в час, авт./ч;

P_1, P_2 – нормативные значения пропускной способности первой и второй полос движения, ед./ч;

$q_{\max 1}, q_{\max 2}$ – максимальная плотность транспортного потока на первой и второй полосе, авт/м;

N – интенсивность пешеходного движения через рассматриваемый перегон улицы, чел/ч;

$N_{\max}$ – максимальная интенсивность пешеходного движения через рассматриваемый перегон улицы, чел/ч;

$\bar{q}_1, \bar{q}_2$ – средняя плотность движения на первой и второй полосе, авт/м;

ω – коэффициент, учитывающий нагрузку движением соседней полосы, ед.;

t_{p1}, t_{p2} – время реакции водителя транспортного средства первой и второй полосы, с;

t_{py1}, t_{py2} – время срабатывания рулевого управления (рулевого привода и рулевого механизма) транспортного средства первой и второй полосы, с;

ϕ_y – коэффициент бокового сцепления колес с поверхностью покрытия рассматриваемого перегона улицы, ед.;

B – усредненная ширина полос движения рассматриваемого перегона улицы, м;

$B1$ – ширина первой полосы движения рассматриваемого перегона улицы, м;

L_a – усредненная габаритная длина транспортного средства, осуществляющего перестроение, м;

L_{a1} – габаритная длина транспортного средства, которое объезжают, м;

B_{a1} – габаритная ширина транспортного средства, которое объезжают по первой полосе, м;

Δ'_o – интервал безопасности между боковыми поверхностями транспортных средств при выполнении маневра объезда стоящего транспортного средства, м;

Δ_o – интервал безопасности между транспортными средствами после выполнения маневра объезда стоящего транспортного средства или при перестроении, м;

R_{nn}, R_{ln} – радиус кривой правого и левого поворота, м;

β_{nn}, β_{ln} – угол бокового уклона поверхности покрытия правого и левого поворота, град.;

k – коэффициент учета пропуска встречного транспорта при выполнении левого поворота, ед.

В соответствии со сформулированным перечнем исходных данных были проведены натурные исследования принятых в качестве объекта экспериментальных исследований десяти перегонов улицы Артема в рамках улично-дорожной сети города Донецка.

Более 90 % транспортного потока по улице Артема составляют легковые транспортные средства, поэтому предлагается принимать характеристики транспортных потоков, как состоящих из легковых транспортных средств. Результаты исследований представлены на рисунках 1–14, на которых номер перегона соответствует таблице.

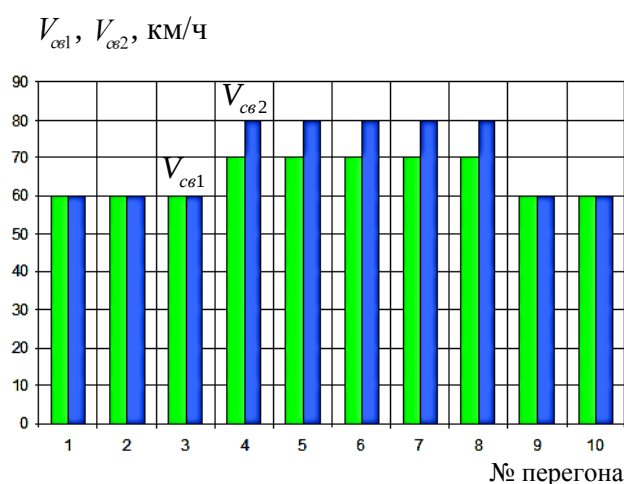


Рисунок 1 – Значения скоростей движения одиночных транспортных средств по первой и второй полосе $V_{c\delta 1}, V_{c\delta 2}$

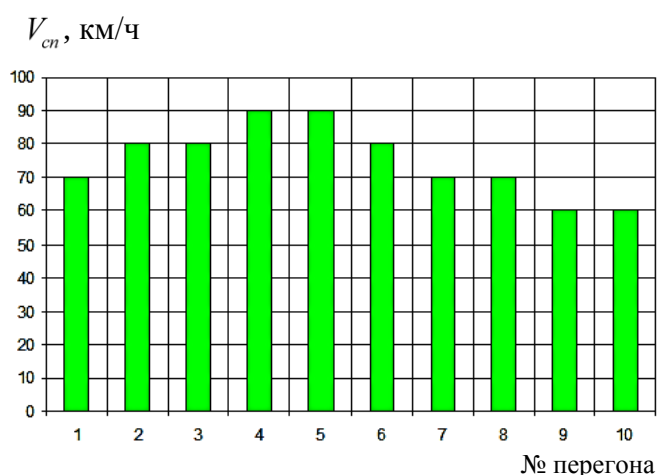


Рисунок 2 – Значения средних скоростей транспортных средств при смене полосы движения V_{cn}

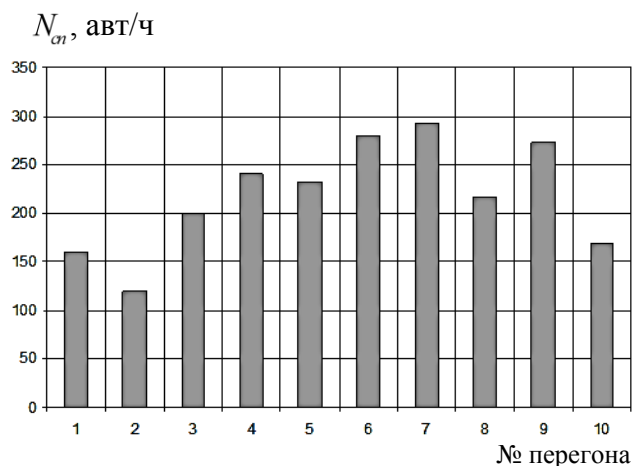


Рисунок 3 – Значения интенсивностей перестроений между двумя полосами в час $N_{п}$

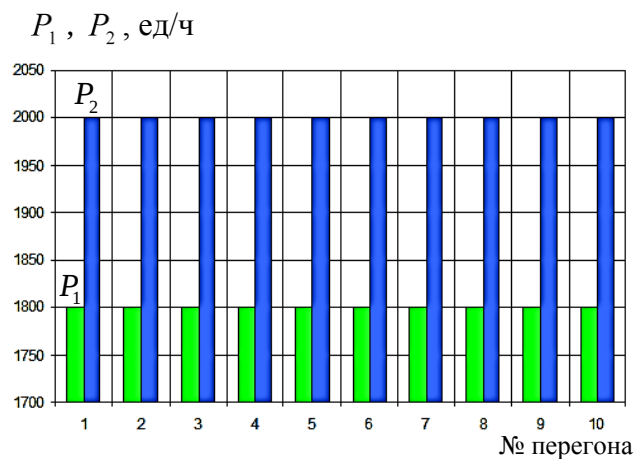


Рисунок 4 – Нормативные значения пропускной способности первой и второй полос движения P_1 , P_2

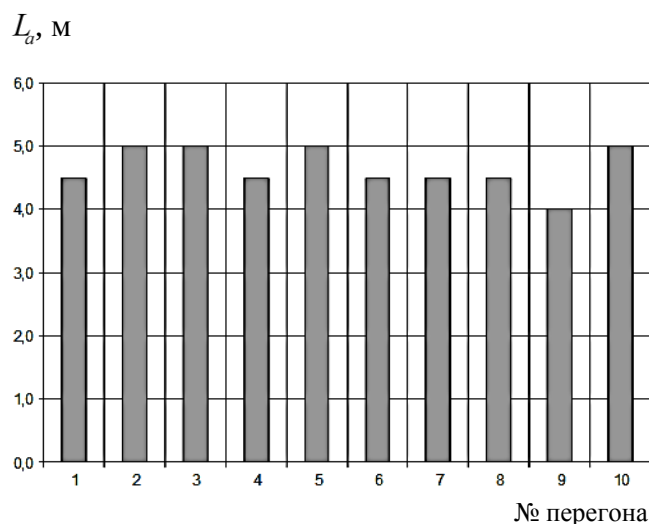


Рисунок 5 – Значения усредненной габаритной длины транспортного средства $L_{д}$, осуществляющего перестроение

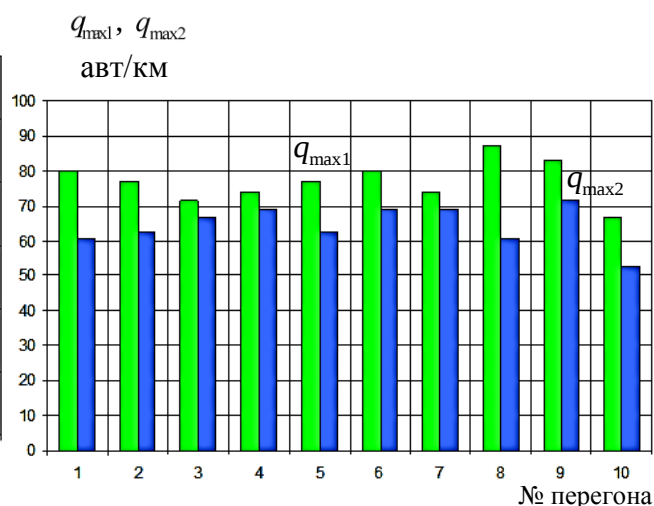


Рисунок 6 – Значения максимальной плотности транспортного потока на первой и второй полосе q_{max1} , q_{max2}

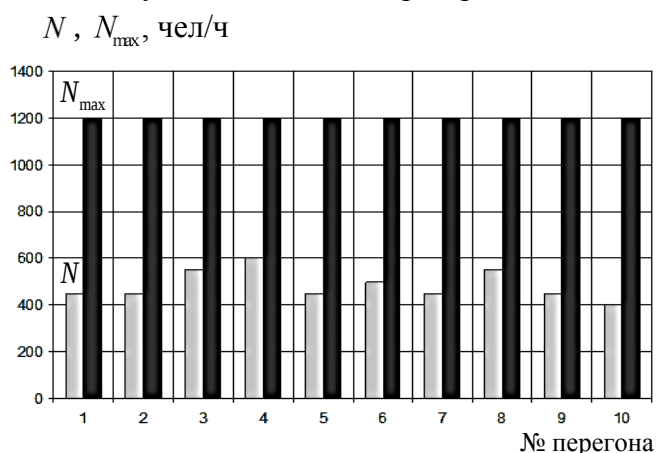


Рисунок 7 – Значения интенсивностей пешеходного движения N и максимальная интенсивность пешеходного движения N_{max} через рассматриваемый перегон

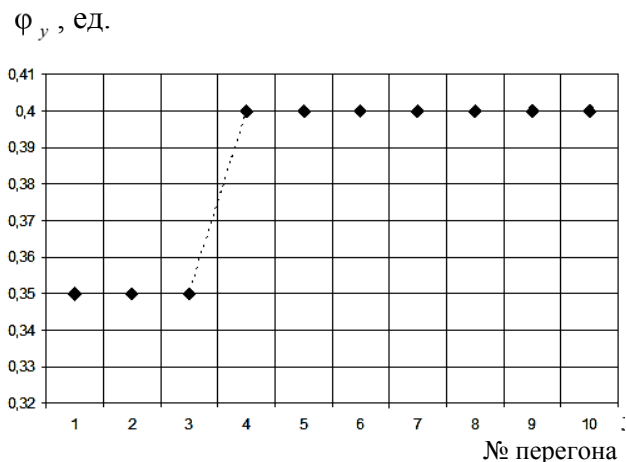


Рисунок 8 – Значения коэффициента бокового сцепления колес с поверхностью покрытия ϕ_y

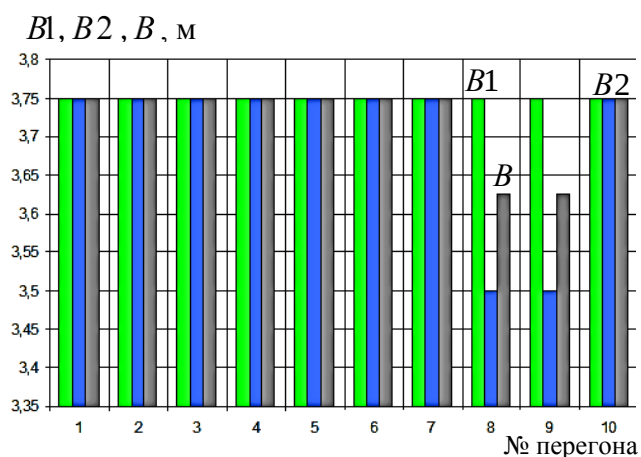


Рисунок 9 – Значения ширины полос движения, соответственно первой $B1$ и второй полос $B2$, а также усредненное значение B

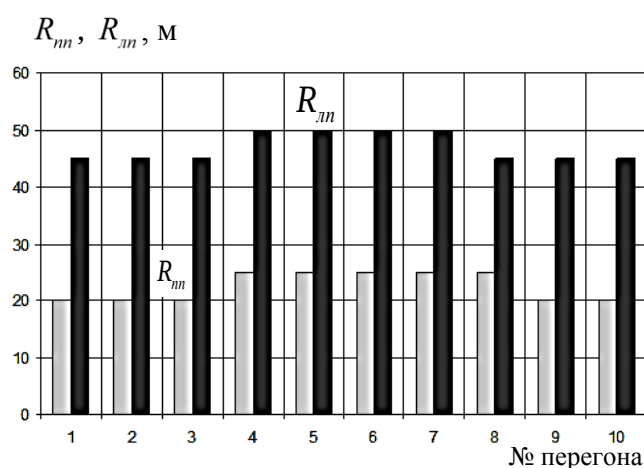


Рисунок 11 – Значения радиусов кривых правого R_{mn} и левого R_{ln} поворотов

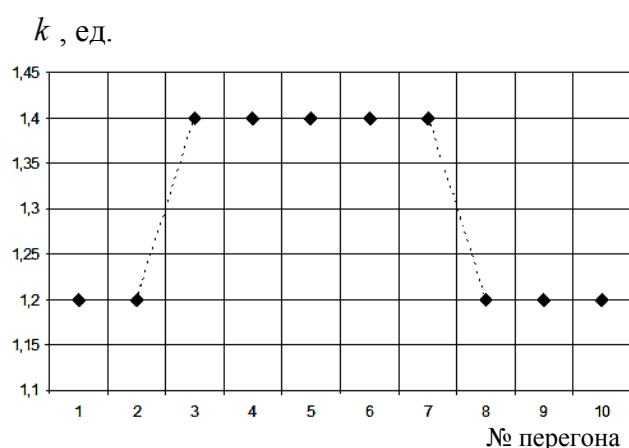


Рисунок 13 – Значения коэффициента k учета пропуска встречного транспорта при выполнении левого поворота

Далее были проведены экспериментальные расчеты (рисунки 15–19) с применением выведенных авторами формул (1).

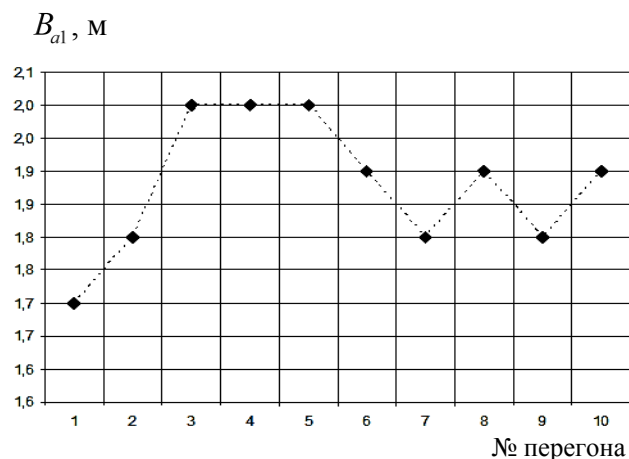


Рисунок 10 – Значения габаритной ширины транспортного средства B_{al} , которое объезжают по первой полосе



Рисунок 12 – Значения интервала безопасности Δ_δ между транспортными средствами после выполнения маневра объезда стоящего транспортного средства и интервала безопасности Δ'_δ между боковыми поверхностями

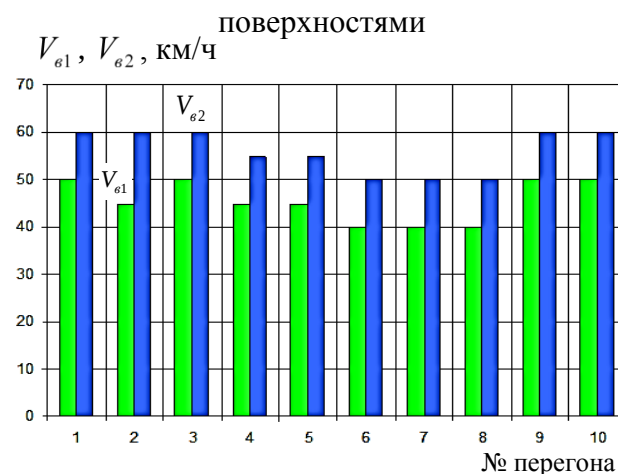


Рисунок 14 – Значения скоростей движения транспортных потоков по первой и второй полосе V_{e1} , V_{e2}

Расчеты пропускной способности полос выполнены последовательно для всех десяти перегонов по номерам таблицы и данным рисунков 1–14.

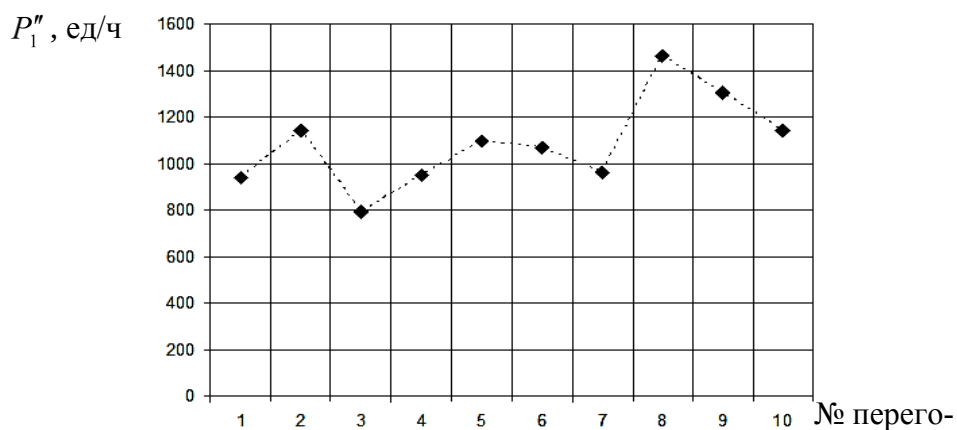


Рисунок 15 – Расчетные значения пропускной способности первой полосы P_1'' на десяти перегонах, по номерам перегонов в таблице

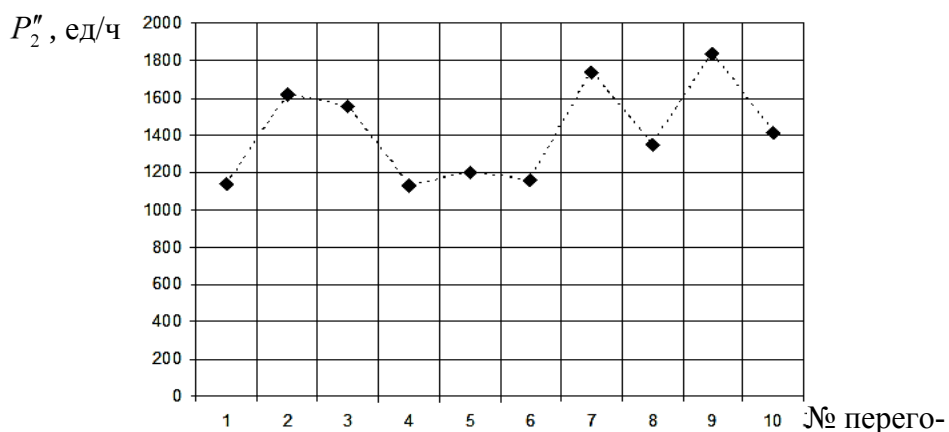


Рисунок 16 – Расчетные значения пропускной способности второй полосы P_2'' на десяти перегонах, по номерам перегонов в таблице

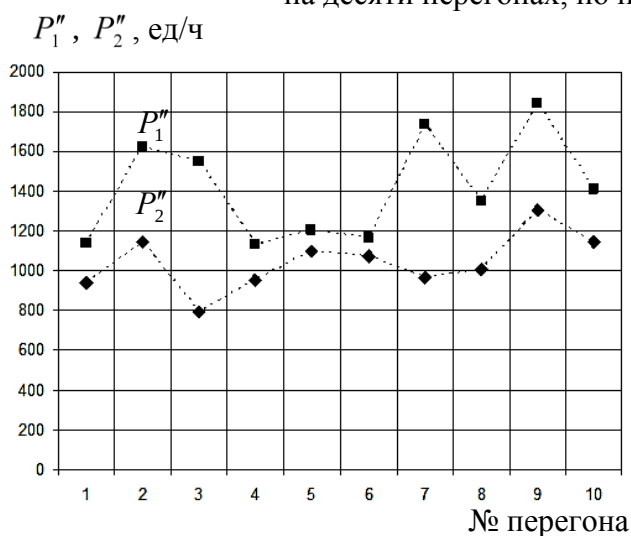


Рисунок 17 – Расчетные значения пропускной способности первой P_1'' и второй P_2'' полос на десяти перегонах, по номерам перегонов в таблице

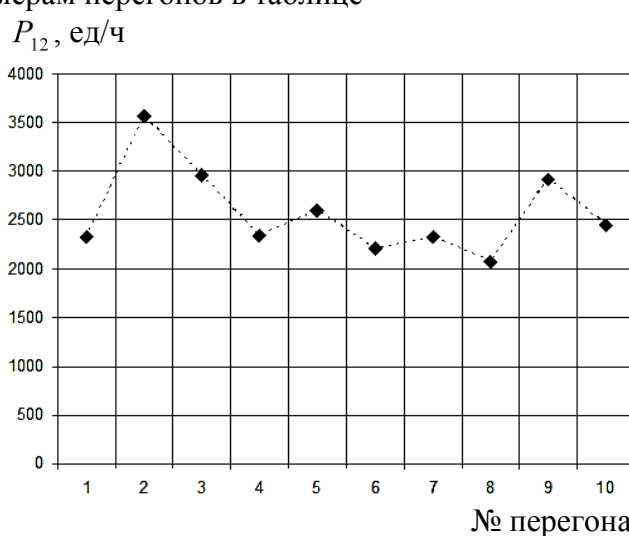


Рисунок 18 – Расчетные значения пропускной способности перегонов P_{12} улицы Артема на улично-дорожной сети города Донецка, по номерам перегонов в таблице

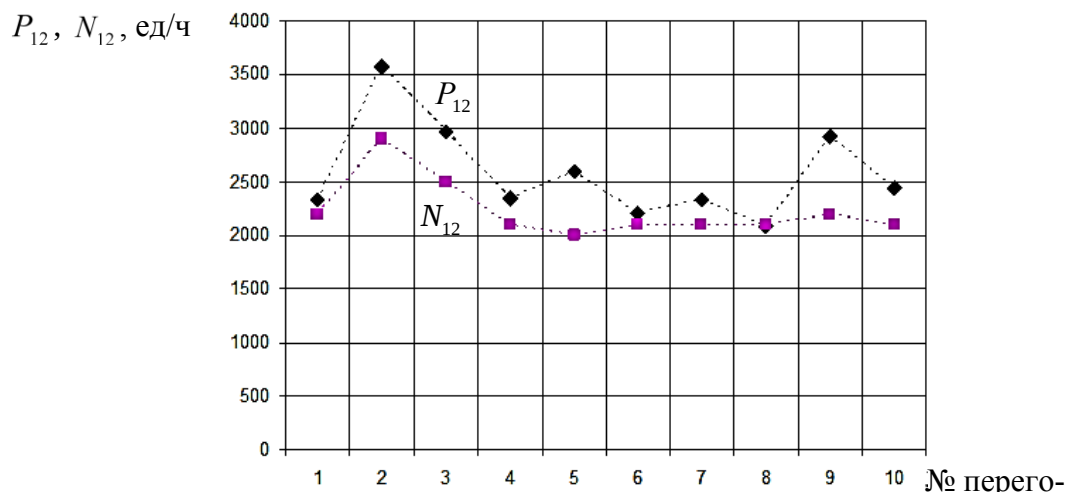


Рисунок 19 – Расчетные значения пропускной способности перегонов P_{12} и измеренная максимальная интенсивность N_{12} улицы Артема на улично-дорожной сети города Донецка, по номерам перегонов в таблице

Рассчитан коэффициент линейной корреляции между значениями P_{12} и N_{12} , который составил 0,867. При 10 парах точек и доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ нормативное значение коэффициента корреляции составляет 0,632 [8, 9]. Таким образом $0,867 > 0,632$, что указывает на адекватность расчетных данных данным, полученным по натурным наблюдениям.

Коэффициент линейной корреляции рассчитывался по формуле [8]:

$$r_{xy} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

где X – значения случайной величины в виде расчетного значения по теоретической модели;

Y – значения случайной величины в виде экспериментального значения по натурным наблюдениям.

Коэффициент корреляции изменяется в границах от минус единицы до плюс единицы. Значения, приближающиеся к единице, указывают на наличие линейной связи между данными.

Полученные результаты экспериментальных исследований, доказывают правильность разработанных формул по расчету пропускной способности перегонов четырехполосных городских улиц.

Значения (1) и проверенные экспериментом результаты расчетных формул по пропускной способности перегонов с двухполосным движением в одном направлении городских улиц позволяют сформулировать методику расчета пропускной способности, которая включает два этапа:

Этап первый. Выполнение исследования перегонов с двухполосным движением в одном направлении городских улиц проводится в соответствии с приведенным выше перечнем исходных данных.

Этап второй. С использованием полученных исходных данных проводятся расчеты пропускной способности перегона с двухполосным движением в одном направлении городских улиц по (1). Значение пропускной способности по указанным формулам формируется с единицами измерения: ед/ч.

Выводы

В статье приведены результаты экспериментальных исследований и расчеты значений пропускных способностей десяти перегонов четырехполосных улиц на улично-дорожной сети города Донецка.

Построены диаграммы значений пропускных способностей первой и второй полос движения на перегонах городских улиц, а также значений пропускных способностей перегонов в целом. Значения расчетных пропускных способностей были сравнены со значениями максимальных суммарных интенсивностей на перегонах, замеры которых проводились в одно и тоже время в течение суток для каждого перегона.

Проверка разработанных расчетных формул пропускной способности перегонов с двухполосным движением в одном направлении была осуществлена с применением линейного корреляционного анализа. Адекватность теоретических расчетов доказана.

Сформулирована методика расчета пропускной способности первой и второй полос движения, а также перегона двухполосной улицы в одном направлении.

Список литературы

1. Дудникова, Н. Н. Разработка методик расчета пропускных способностей первой и второй полос перегона городской улицы / Н. Н. Дудникова, В. И. Кондрашева // Вести Автомобильно-дорожного института = Bulletin of the Automobile and Highway Institute. – 2024. – № 1(48). – С. 48–59.
2. Дудникова, Н. Н. Расчет пропускной способности перегона в две полосы в одном направлении городских улиц / Н. Н. Дудникова, В. И. Кондрашева // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса : материалы X Международной научно-практической конференции, в рамках 10-го Международного научного форума Донецкой Народной Республики, Горловка, 31 мая 2024 г. – Горловка : АДИ ДонНТУ. – С. 315–319.
3. Лобанов, Е. М. Транспортная планировка городов / Е. М. Лобанов. – Москва : Транспорт, 1990. – 240 с. – ISBN 5-277-00375-4.
4. Бабков, В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения / В. Ф. Бабков. – Москва : Транспорт, 1993. – 271 с. – ISBN 5-277-01402-0.
5. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – Москва : Академкнига, 2005. – 279 с. – ISBN 5-94628-111-9.
6. Организация дорожного движения : учебное пособие / В. А. Гавриков, С. А. Анохин, А. А. Гуськов, Н. Ю. Залукаева. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2020. – 144 с. – ISBN 978-5-8265-2259-2.
7. Ярков, С. А. Повышение эффективности организации дорожного движения в городах : монография / С. А. Ярков, В. В. Морозов. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. – 161 с. – ISBN 978-5-9961-2291-2.
8. Факторный анализ преступности. Корреляционный и регрессионный методы : монография / С. М. Иншаков, Л. Н. Богданова, А. Д. Виноградова [и др.] ; под редакцией С. М. Иншакова. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2023. – 127 с. – ISBN 978-5-238-02282-6.
9. Кисляков, В. М. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобилей и пешеходов / В. М. Кисляков, В. В. Филиппов, И. А. Школяренко. – Москва : Транспорт, 1979. – 199 с.

Н. Н. Дудникова, А. Р. Лебеденко

Автомобильно-дорожный институт (филиал)

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка

**Экспериментальные исследования значений пропускной способности полос
перегонов городских улиц**

Интенсивное маневрирование транспортных средств при выполнении поворотов направо, налево, остановки у края проезжей части приводят к созданию индивидуальных условий движения по соответствующим первой и второй полосам перегона улицы. Очереди транспортных средств, как подвижные, так и неподвижные, приводят к снижению пропускной способности полос и улицы, к формированию ударных волн в транспортном потоке и образованию заторов.

В связи с этим необходимо совершенствовать существующую методику назначения пропускной способности полос движения городских улиц до уровня расчетной методики, учитывающей индивидуальные особенности маневрирования транспортных средств в пределах конкретного перегона улицы. Усовершенствование

данной методики было выполнено в предыдущей работе, что потребовало проведения экспериментальных исследований значений пропускной способности полос перегонов городских улиц.

Приведены результаты экспериментальных исследований и расчеты значений пропускных способностей десяти перегонов четырехполосных улиц на улично-дорожной сети города Донецка.

Построены диаграммы значений пропускных способностей первой и второй полос движения на перегонах городских улиц, а также значений пропускных способностей перегонов в целом. Значения расчетных пропускных способностей были сравнены со значениями максимальных суммарных интенсивностей на перегонах, замеры которых проводились в одно и тоже время в течение суток для каждого перегона.

Проверка разработанных расчетных формул пропускной способности перегонов с двухполосным движением в одном направлении была осуществлена с применением линейного корреляционного анализа. Адекватность теоретических расчетов доказана.

Сформулирована методика расчета пропускной способности первой и второй полос движения, а также перегона двухполосной улицы в одном направлении.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДОРОГИ, ПОЛОСА ДВИЖЕНИЯ ДОРОГИ, ПЕРЕГОН ДОРОГИ, МЕТОДИКА РАСЧЕТА, ЭКСПЕРИМЕНТ

N. N. Dudnikova, A. R. Lebedenko
Automobile and Road Institute (Branch) of the Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Donetsk National Technical University» in Gorlovka
Experimental Studies of the Capacity Values of City Street Lanes

Intensive maneuvering of vehicles when turning right, left, stopping at the edge of the roadway lead to the creation of individual traffic conditions on the corresponding first and second lanes of the street section. Queues of vehicles, both moving and stationary, lead to the decrease in the throughput of lanes and the street, to the formation of shock waves in the traffic flow and the formation of traffic jams.

The above reveals the relevance and need to improve the existing technique for assigning the throughput of the corresponding lanes of city streets, to the level of a calculation method that takes into account the individual features of maneuvering vehicles within a specific street section. The improvement of this technique was carried out in previous work, which required experimental studies of the capacity values of city street lanes.

Experimental studies and calculations of the throughput values of ten sections of four-lane streets on the street and road network of the city of Donetsk are presented.

Diagrams of the capacity values of the first and second traffic lanes on city street sections, as well as the capacity values of the sections as a whole, are constructed. The calculated capacity values were compared with the maximum total intensities on the sections, the measurements of which were carried out at the same time during the day for each section.

The adequacy of the developed calculation formulas for the throughput capacity of sections with two-lane traffic in one direction was verified using linear correlation analysis. The adequacy is theoretically proven.

The method for calculating the capacity of the first and second traffic lanes, as well as the section of a two-lane street in one direction is formulated.

ROAD CAPACITY, ROAD TRAFFIC LANE, ROAD CROSSING, CALCULATION METHOD, EXPERIMENT

Сведения об авторах:

Н. Н. Дудникова

SPIN-код РИНЦ: 1424-1363

Телефон: +7 949 412-79-04

Эл. почта: DudnikovaNN@rambler.ru

А. Р. Лебеденко

Телефон: +7 949 412-79-04

Статья поступила 16.01.2025

© Н. Н. Дудникова, А. Р. Лебеденко, 2024

Рецензент: Т. А. Самисько, канд. техн. наук, доц.,

Автомобильно-дорожный институт

(филиал) ДонНТУ в г. Горловка