

ТРАНСПОРТ

УДК 656.13.05

А. Н. Дудников, канд. техн. наук, Н. Н. Дудникова, канд. техн. наук,
Д. А. Подопрigора

Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ПЕРЕГОНАХ ГОРОДСКИХ УЛИЦ, ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ТЕХНИЧЕСКУЮ СКОРОСТЬ АВТОБУСОВ

Сформулированы подходы к расчету плотности транспортного потока на перегонах городских улиц, ограничивающей техническую скорость автобусов на маршрутах. Предложено взять за основу модель «плотность – скорость» транспортного потока Гриншилдса-Гринберга с условием, что плотность транспортного потока, где формируются заторы, составляет более 0,5 от максимального ее значения. Указанная модель усовершенствована использованием значения скорости транспортного потока, которую было предложено рассчитывать по методике применения коэффициентов снижения значения скорости, за счет наличия определенных условий движения, где был введен дополнительный коэффициент для перегонов городской улицы. Полученные результаты позволяют правильно моделировать возможный максимум технической скорости автобусов на городских маршрутах.

***Ключевые слова:** транспортный поток, плотность транспортного потока, перегон улицы городской, скорость техническая, автомобильный затор, модель «плотность – скорость»*

Постановка проблемы

Пассажирские перевозки всегда имели важное значение для жизнедеятельности как отдельного населенного пункта, так и для всей страны в целом. Наиболее распространенным видом пассажирского транспорта являются автобусы с различными параметрами и техническими характеристиками. Важность пассажирских автобусных перевозок нельзя недооценивать ни с точки зрения удовлетворения потребностей людей, ни с точки зрения обеспечения безопасности дорожного движения. В рамках автобусного маршрута большой интерес вызывают изменения характеристик транспортного потока на перегонах городских улиц.

Выполненный анализ существующих исследований в области учета влияния характеристик транспортного потока на организацию городских пассажирских автобусных перевозок показал, что существующие методики расчета плотности транспортного потока не учитывают особенности ее формирования на перегонах городских улиц в определенных условиях. Указанное говорит о том, что это является актуальной проблемой. Таким образом формирование подходов к расчету плотности транспортного потока на перегонах городских улиц, ограничивающей техническую скорость автобусов на маршрутах является целью данной работы.

Анализ последних исследований и публикаций

Ряд ученых занимались исследованиями изменения характеристик транспортного потока на городских дорогах. На данный момент определено, что плотность транспортного потока представляет собой среднее значение количества автомобилей, которые движутся на участке дороги определенной длины [1–7]. Так же установлено, что плотность является пространственной характеристикой, определяющей степень загрузки полосы дороги. Измеряют ее количеством транспортных средств, проходящих на 1 км протяженности полосы дороги.

Установлено, что максимальная плотность транспортного потока формируется при

неподвижном состоянии очереди транспортных средств, которые расположены на полосе дороги максимально близко к друг другу [4, 6]. С учетом габаритных длин легковых автомобилей, в современных условиях максимальная плотность транспортного потока на полосе может составлять около 200 авт/км [6, 7]. При такой плотности движение невозможно даже при автоматическом управлении транспортными средствами, поскольку практически отсутствует дистанция безопасности.

Исследования, проведенные в [6, 7] показывают, что для легковых транспортных средств при колонном движении с минимальной скоростью плотность потока может достигать 100 авт/км, что обычно принимают как максимальную плотность транспортного потока на полосе движения. В свою очередь для колонного движения автобусов по полосе городской улицы [6] известно, что максимальная плотность может составлять 33 авт/км. Важно подчеркнуть, что чем меньше плотность потока на полосе городской улицы, тем свободнее себя чувствуют водители и тем выше скорость, которую они развивают. И наоборот, чем выше плотность транспортного потока на полосе движения, тем больше от водителей требуется повышения внимательности, точности действий, и, следовательно, повышения психологического напряжения. Одновременно с этим, в случае ошибки допущенной одним из водителей или возникших проблем в узлах и агрегатах транспортного средства, увеличивается вероятность дорожно-транспортного происшествия.

Целью исследования является формулирование подходов к расчету плотности транспортного потока на перегонах городских улиц, ограничивающей техническую скорость автобусов на маршрутах.

Изложение основного материала исследования

Как показал анализ ранее осуществленных исследований, в зависимости от плотности потока принято делить условия движения в зависимости от степени стесненности на следующие условия [7]: свободное движение; частично связанное движение; насыщенное движение; колонное движение; перенасыщенное движение.

В теории транспортных потоков [7] принято связывать плотность транспортного потока со второй основной характеристикой потока – интенсивностью движения. Зависимость «интенсивность – плотность» транспортного потока называют основной диаграммой транспортного потока [6, 7]. Уменьшение интенсивности движения транспортного потока при плотностях 60...110 авт/км можно объяснить тем, что в этом случае на интенсивность потока существенно влияют перестроения транспортных средств между соседними полосами. Зависимость «скорость – плотность» формализована в виде моделей Гриншилдса, Гринберга и Гриншилдса-Гринберга [6, 7]:

– модель формирования плотности Гриншилдса [6, 7]:

$$q = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right) + c, \quad (1)$$

где q_{max} – максимальная плотность транспортного потока, авт/км;

V_{max} – максимальная скорость движения по перегону (в свободных условиях), км/ч;

c – константа с единицами измерения плотности транспортного потока, авт/км.

– модель формирования плотности Гринберга [6, 7]:

$$q = q_{max} \cdot e^{-\frac{V}{c}}, \quad (2)$$

где V – скорость движения по перегону в составе транспортного потока, км/ч;

c – неотрицательная константа с единицами измерения скорости движения, км/ч.

– модель формирования плотности Гриншилдса-Гринберга [6, 7]:

$$q = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{max}}\right)^{\frac{2}{n+1}}, \quad n \leq 0, \quad (3)$$

$$q = q_{max} \cdot \left(1 - (n+1) \cdot \frac{V}{c} \cdot V_{max}^{\left(\frac{n+1}{2}\right)}\right)^{\frac{2}{n+1}}, \quad n \neq -1, \quad n \neq 1. \quad (4)$$

Все приведенные модели имеют свои особенности. Согласно основному уравнению транспортного потока [8], его плотность может быть определена как отношение интенсивности транспортного потока к скорости его движения:

$$q = \frac{N}{V}. \quad (5)$$

В формуле (5) известна интенсивность движения, поскольку она элементарно устанавливается натурными измерениями или задается. Более сложной величиной является скорость транспортного потока, которую необходимо рассчитать.

Для определения средней скорости движения потока транспортных средств применяем метод коэффициентов, который учитывает снижение скорости движения потока в зависимости от элементов плана, продольного и поперечного профилей, состава потока и интенсивности движения. Указанный метод усовершенствуем. Значение средней скорости движения автомобилей в транспортном потоке определяем по формуле [9]:

$$V = V_{св} \cdot K, \quad (6)$$

где V – средняя скорость движения транспортных средств в потоке на перегоне городской улицы, км/ч;

$V_{св}$ – скорость движения одиночного транспортного средства по перегону городской улицы в свободных условиях, км/ч;

K – коэффициент снижения скорости движения автомобилей в потоке на перегоне городской улицы за счет ряда его индивидуальных особенностей.

Совокупность индивидуальных особенностей, которые влияют на скорость движения автомобилей в потоке на перегоне городской улицы, оцениваем коэффициентом снижения скорости движения транспортных средств [9]:

$$K = c_{min} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} \cdot k_n \cdot \theta \cdot k_p, \quad (7)$$

где c_{min} – наименьшее из значений коэффициентов c_i , учитывающих изменение скорости движения в результате воздействия какого-то одного из элементов условий перегона городской улицы. Из нескольких минимальных значений c_i выбирается одно, а влияние других элементов учитывается коэффициентами k_i , ед.;

k_i – коэффициент, учитывающий изменение скорости движения в результате воздействия нескольких элементов условий городской улицы без учета элемента, оказывающего наибольшее влияние на снижение скорости движения, ед.;

k_n – коэффициент, учитывающий влияние продольных уклонов перегона городской улицы, ед.;

θ – коэффициент, учитывающий влияние интенсивности движения и состава транспортного потока, ед.

k_p – коэффициент, учитывающий наличие перекрестков в одном уровне, ед.

Таким образом, в предложенной усовершенствованной формуле (7) можно принимать значения коэффициентов по рекомендациям [9], а дополнительно введенный коэффициент k_p необходимо далее формализовать.

Тенденциозность значений предложенного коэффициента k_p предполагает, что при отсутствии перекрестков улиц в одном уровне на исследуемом перегоне значение коэффициента будет равно 1,00, а при увеличении количества перекрестков в одном уровне коэффициент становится меньше единицы.

Таким образом, учитывая приведенное выше, максимальную скорость транспортного потока на перегонах городских улиц предлагается рассчитывать по формуле:

$$V_{max} = V_{cs} \cdot \left[c_{min} \cdot \theta \cdot k_n \cdot k_p \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \right]. \quad (8)$$

Тогда указанная выше модель Гриншилдса (1) по формированию плотности транспортного потока [7], с учетом полученной формулы для скорости транспортного потока (8), для перегона городской улицы получит вид:

$$\begin{cases} q = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right) + c, \\ V_{max} = V_{cs} \cdot \left[c_{min} \cdot \theta \cdot k_n \cdot k_p \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Вместе с тем, модель Гринберга (2) по формированию плотности транспортного потока [6], указанная выше, с учетом полученной формулы для скорости транспортного потока (8), для перегона городской улицы получит вид:

$$\begin{cases} q = q_{max} \cdot e^{-\frac{V}{c}}, \\ V_{max} = V_{cs} \cdot \left[c_{min} \cdot \theta \cdot k_n \cdot k_p \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \right]. \end{cases} \quad (10)$$

В свою очередь модель Гриншилдса-Гринберга (3), указанная выше, по формированию плотности транспортного потока [7], с учетом полученной формулы для скорости транспортного потока (8), для перегона городской улицы получит вид:

$$\begin{cases} q = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right)^{\frac{2}{n+1}}, & n \leq 0, \\ V_{max} = V_{cs} \cdot \left[c_{min} \cdot \theta \cdot k_n \cdot k_p \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \right]. \end{cases} \quad (11)$$

Сформулированные выше модели формирования плотности транспортного потока для перегона городской улицы (9), (10) и (11) необходимо принять за основу для проведения дальнейших исследований в области нормирования технической скорости автобусов на городских маршрутах.

Упомянутые выше связи «плотность – скорость» отражают общие тенденции изменения плотности транспортного потока [6, 7, 8]. Однако образование заторов в потоке предполагает появление плотного транспортного потока при многорядном движении на перегонах города. Борис Кернер [10] предложил следующую классификацию фаз движения транспортного потока, рис. 1, 2.

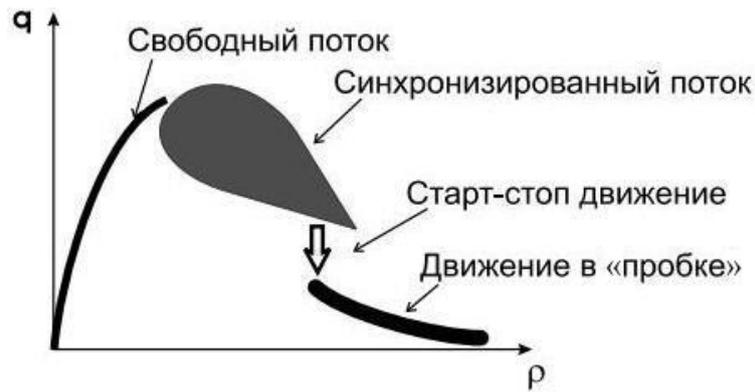


Рисунок 1 – Фазовые состояния потока на многорядных магистралях [10]

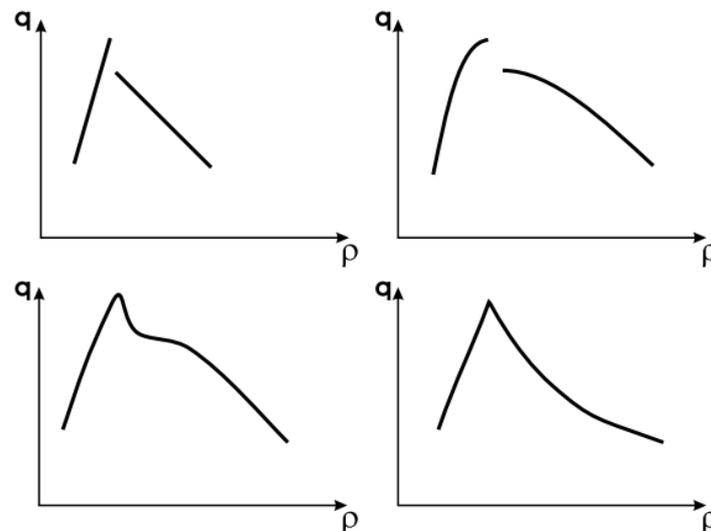


Рисунок 2 – Теоретические аппроксимации эмпирической фундаментальной диаграммы [10]

С учетом показанных графических моделей и изложенного выше, предлагается с математической точки зрения принять за основу модель Гриншилдса-Гринберга, с условием, что плотность транспортного потока, где формируются заторы, составляет более 0,5 от максимального значения. Получим условие возможного образования заторов в транспортном потоке на перегонах городских улиц:

$$0,5 \cdot q_{max} = q_{max} \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{max}}\right)^{\frac{2}{n+1}}, \quad 0,5 = \left(1 - \frac{V}{V_{max}}\right)^{\frac{2}{n+1}}, \quad V = \left(1 - 0,5^{\frac{n+1}{2}}\right) \cdot V_{max}. \quad (12)$$

Условие ограничения технической скорости автобусов на перегонах городских маршрутов (техническая скорость автобусов не может превышать скорость транспортного потока) с учетом (3), (8) и (12) запишем для плотного транспортного потока следующим образом:

$$\begin{cases} q \geq 0,5 \cdot q_{max}, \\ V_{max} = V_{св} \cdot \left[c_{min} \cdot \theta \cdot k_n \cdot k_p \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \right], \\ V_m \leq V = \left(1 - 0,5^{\frac{n+1}{2}}\right) \cdot V_{max}. \end{cases} \quad (13)$$

Выводы

В работе сформулированы подходы к расчету плотности транспортного потока на перегонах городских улиц, которая ограничивает техническую скорость автобусов на маршрутах. Предложено взять за основу модель «плотность – скорость» транспортного потока Гриншилдса-Гринберга с условием, что плотность транспортного потока, где формируются заторы, составляет более 0,5 от максимального ее значения. Указанная модель усовершенствована использованием значения скорости транспортного потока, которую было предложено рассчитывать по методике применения коэффициентов снижения значения скорости, за счет наличия определенных условий движения, где был введен дополнительный коэффициент для перегонов городской улицы.

В дальнейших исследованиях необходимо провести уточнение методики нормирования технической скорости автобусов на городских маршрутах с учетом полученного условия ограничения технической скорости автобусов по скорости транспортного потока.

Список литературы

1. Gentile, G. Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems / G. Gentile, K. Nökel. – Springer, 2016. – 641 p.
2. Vilakazi, A. Service Quality Management in Passenger Transportation / A. Vilakazi. – Scholars' Press, 2018. – 296 p.
3. Дудников, А. Н. Усовершенствование организации городских пассажирских автобусных перевозок с учетом образования заторов на перегонах улиц / А. Н. Дудников, Н. Н. Дудникова, Д. А. Подопригора // Научно-технические аспекты инновационного развития транспортного комплекса : сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции, 26 мая 2021 года. – Донецк: ДАТ, 2021. – С. 12–15.
4. Авен, О. И. Оптимизация транспортных потоков / О. И. Авен, С. Е. Ловецкий, Г. Е. Моисеенко. – Москва : Наука, 1985. – 165 с.
5. Долбня, Н. В. Оптимизация характеристик транспортного потока и параметров дорог / Н. В. Долбня, Н. Н. Никитенко. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2002. – 202 с. – ISBN 5-85534-602-1.
6. Справочник по безопасности дорожного движения : обзор мероприятий по безопасности дорожного движения / Р. Эльвик, А. Б. Мюсен, В. Трулс ; под ред. В. В. Сильянова. – ОСЛО-МОСКВА-ХЕЛЬСИНКИ, 2001. – 576 с.
7. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю ; пер. с англ. Е. Г. Коваленко и Г. Д. Шермана. – Москва : Транспорт, 1972. – 424 с.
8. Сильянов, В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц / В. В. Сильянов, Э. Р. Домке. – 2-е изд. – Москва : Академия, 2008. – 352 с. – ISBN 978-5-7695-4864-2.
9. Методические рекомендации по оценке проектных решений автомобильных дорог по скорости движения. – Текст : электронный // Министерство транспортного строительства Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт СОЮЗДОРНИИ. – URL: <http://www.gosthelp.ru/text/metodicheskierekomendacii163.html>.
10. Кленов, С. Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке – новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий / С. Л. Кленов // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 4(8). – С. 75–89.

А. Н. Дудников, Н. Н. Дудникова, Д. А. Подопригора
Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

**Формулирование подходов к расчету плотности транспортного потока
 на перегонах городских улиц, ограничивающей техническую скорость автобусов**

Проведенный анализ существующих исследований в области учета влияния характеристик транспортного потока на организацию городских пассажирских автобусных перевозок показал, что существующие методики расчета плотности транспортного потока не учитывают особенности ее формирования на перегонах городских улиц в определенных условиях, что является актуальной проблемой.

Таким образом формирование подходов к расчету плотности транспортного потока на перегонах городских улиц, ограничивающей техническую скорость автобусов на маршрутах является целью данной работы.

В работе сформулированы подходы к расчету плотности транспортного потока на перегонах городских улиц, ограничивающей техническую скорость автобусов на маршрутах.

Предложено взять за основу модель «плотность – скорость» транспортного потока Гриншилдса-Гринберга с условием, что плотность транспортного потока, где формируются заторы, составляет более 0,5 от

максимального ее значения. Указанная модель усовершенствована использованием значения скорости транспортного потока, которую было предложено рассчитывать по методике применения коэффициентов снижения значения скорости, за счет наличия определенных условий движения, где был введен дополнительный коэффициент для перегонов городской улицы.

В дальнейших исследованиях необходимо провести уточнение методики нормирования технической скорости автобусов на городских маршрутах с учетом полученного условия ограничения технической скорости автобусов по скорости транспортного потока.

ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК, ПЛОТНОСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА, ПЕРЕГОН УЛИЦЫ ГОРОДСКОЙ, СКОРОСТЬ ТЕХНИЧЕСКАЯ, АВТОМОБИЛЬНЫЙ ЗАТОР, МОДЕЛЬ «ПЛОТНОСТЬ – СКОРОСТЬ»

A. N. Dudnikov, N. N. Dudnikova, D. F. Podoprigora

**Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
Formulation of Approaches to the Calculation of the Traffic Flow Density on the Spans of
Urban Streets, Limiting the Buses Road Speed**

The conducted analysis of existing studies in the field of accounting the traffic flow characteristics impact on the organization of the urban passenger bus transportation has shown that the existing methods for calculating the traffic flow density do not take into account the peculiarities of its formation on the spans of urban streets under certain conditions, which is an urgent problem.

Thus, the goal of this work is the formation of approaches to the calculation of the traffic flow density on the spans of urban streets, which limits the road speed of buses on the routes.

The work formulates approaches to the calculation of the traffic flow density on the spans of urban streets, which limits the road speed of buses on the routes.

It is proposed to take as a basis the «density – speed» model of the Greenshields-Greenberg traffic flow, with the condition that the density of the traffic flow, where congestion is formed, is more than 0,5 of its maximum value. This model is improved by using the value of the traffic flow speed, which was proposed to be calculated by the method of applying the coefficients for reducing the value of the speed, due to the presence of certain traffic conditions, where an additional coefficient was introduced for the spans of urban street.

In further studies, it is necessary to accurate the technique to normalize the road speed of buses on urban routes, taking into account the obtained condition for limiting the road speed of buses according to the speed of the traffic flow.

TRAFFIC FLOW, TRAFFIC FLOW DENSITY, URBAN STREET SPAN, ROAD SPEED, TRAFFIC CONGESTION, «DENSITY – SPEED» MODEL

Сведения об авторах:

A. N. Dudnikov

SPIN-код РИНЦ: 8393-4943
Телефон: +7 (949) 301-98-50
Эл. почта: ANdudnikov@rambler.ru

D. A. Подопригора

Эл. почта: DudnikovaNN@rambler.ru

N. N. Дудникова

SPIN-код РИНЦ: 1424-1363
Телефон: +7 (949) 412-79-04
Эл. почта: DudnikovaNN@rambler.ru

Статья поступила 12.09.2022

© **A. N. Dudnikov, N. N. Дудникова, D. A. Подопригора, 2022**

Рецензент: Т. А. Самисько, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»