



IGOR A. BAKHIREV,  
ANTON A. CHERNYSHOV,  
SERGEY E. KANEP,  
POLINA A. SIMAKOVA

БАХИРЕВ И.А.,  
ЧЕРНЫШОВ А.А.,  
КАНЕП С.Э.,  
СИМАКОВА П.А.

## CAPACITY OF THE MAIN CITY STREETS IN THE ROAD CONDITIONS OF MOSCOW

The capacity of streets and roads is their main characteristic, which is guided by the formation of a transport and planning solution. The accuracy and closeness of the capacity to real road conditions ensures the high efficiency of the decisions made. The ongoing study is aimed at improving the accuracy of the predictive assessment of capacity in the design of the road network and improving the efficiency of spending budget funds in the design.  
**Keywords:** traffic capacity, road network, transport planning

## ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЕРЕГОНОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ УЛИЦ ОБЩЕГОРОДСКОГО ЗНАЧЕНИЯ В ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЯХ МОСКВЫ

Пропускная способность улиц и дорог представляет собой их основную характеристику, которой руководствуются при формировании транспортно-планировочного решения. Точность расчета и близость проектной пропускной способности к реальным дорожным условиям обеспечивает высокую эффективность принятых решений. Проводимое исследование направлено на повышение точности прогнозной оценки пропускной способности при планировании и проектировании улично-дорожной сети и повышение эффективности расходования бюджетных средств при строительстве.

**Ключевые слова:** пропускная способность, улично-дорожная сеть, транспортное планирование

### Введение

Анализ работы улично-дорожной сети (далее УДС) в условиях плотных транспортных потоков, связанных с высоким уровнем автомобилизации, дают основание полагать, что установленные ранее показатели пропускной способности не соответствуют реальным величинам (таб. 1). Между тем, величины пропускной способности составляют основу расчёта загрузки УДС и в значительной степени влияют на результаты транспортного моделирования. Актуальные знания о пропускной способности участка УДС будут способствовать оптимизации планируемой конфигурации плана и профиля. С целью исследования пропускной способности УДС проведена научно-исследовательская работа «Проведение измерений параметров транспортных потоков на городских улицах и дорогах Москвы» по заказу Комитета по архитектуре и градостроительству города Москвы. В работе принимали участие ГАУ «Институт Генплана Москвы», МАДИ и НИУ МГСУ. В данной статье отражены результаты НИР в части пропускной способности перегонов магистральных улиц общегородского значения.

### Постановка эксперимента

В исследовании, перегон городской улицы принял в качестве основного элемента УДС, представляющего условия движения, близкие к идеальным. Методика исследования заключается в выборочном измерении (таблица 2) параметров транспортного потока, с дифференциацией по разрешенной скорости движения. Фиксация параметров проводилась на основе видеоматериалов, получаемых в результате наблюдений с привлечением транспортной лаборатории ГАУ «Института Генплана Москвы» и беспилотных летательных аппаратов, а также с помощью камер городского видеонаблюдения. Протяженность одной записи видеосъемки составляла не менее 15 минут для одного сечения. Съемки проводились в рабочие дни недели в часы «пик» с 7.00 до 10.00 и с 17.00 до 20.00, в зависимости от местоположения выбранного места измерения в городе. Сечения для наблюдения на территории Москвы выбирались таким образом, чтобы расстояния между пересечениями было не менее 900 м. Всего было сделано более 400 измерений магистральных улиц общегородского значения непрерывного движения со скоростными режимами 60, 80 и 100 км/ч.

Источник	СП 396.1325800.2018 [1 ]	ОДМ 218.2.020-2012 [2]	HBS 2015 [3 ]
Пропускная способность, прив.ед./ч	2000	1800-2300	1700

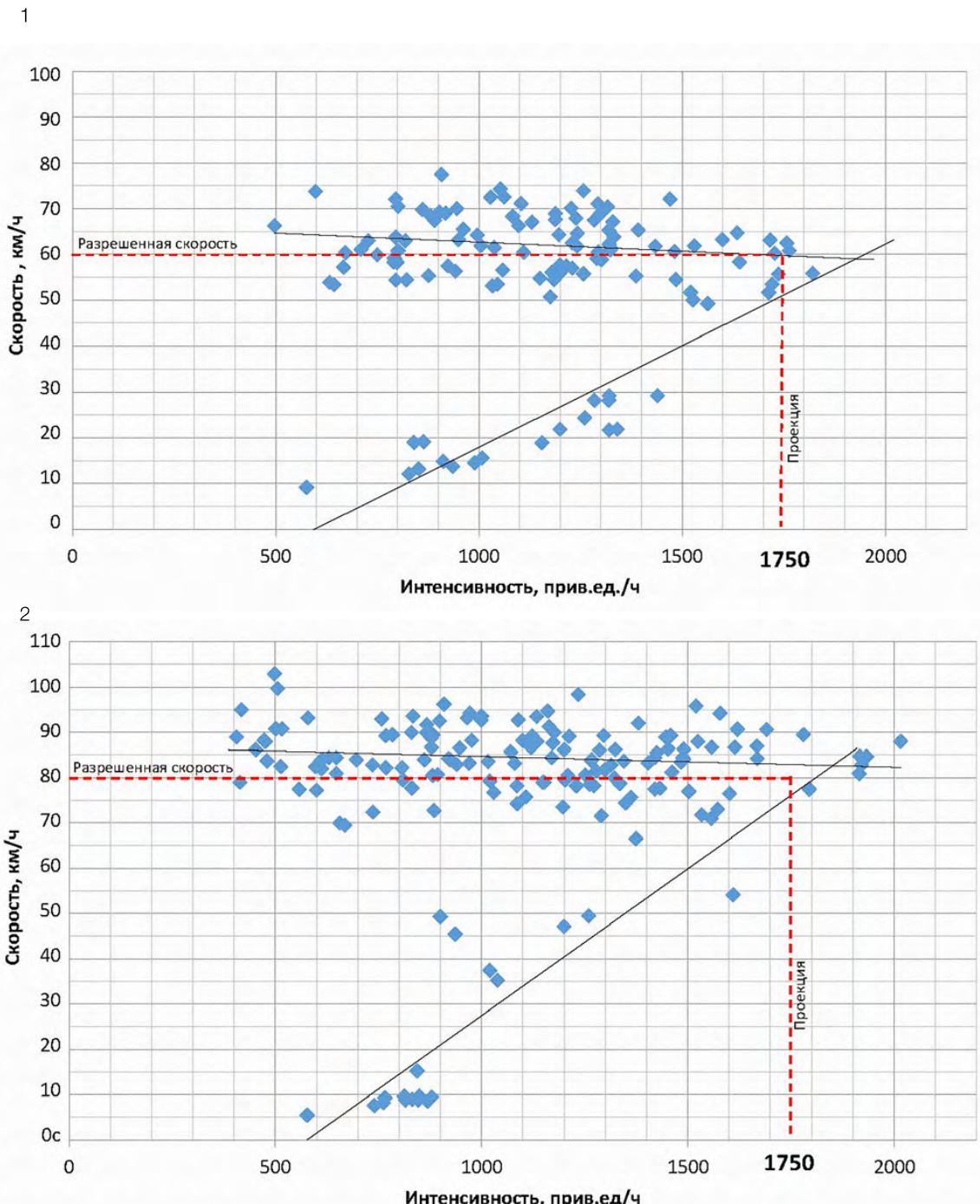
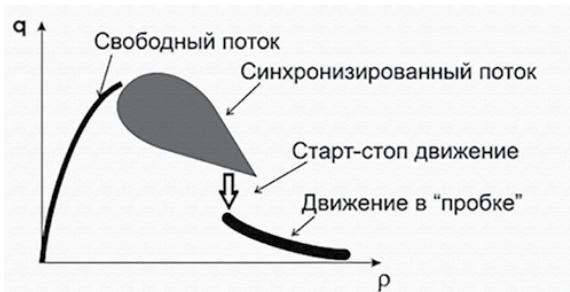


Таблица 1.  
Сравнение величин пропускной способности городских улиц

### Результаты измерений

На основании эмпирических данных транспортных потоков построены диаграммы скорости транспортного потока и его интенсивности (рисунок 1,2).

Распределение значений эмпирических данных отличается от формы распределения характеристик транспортных потоков, описанных классической теорией транспортных потоков [5,6]. Наиболее заметным различием являются



формы графиков — диаграммы, построенные на основании эмпирических данных, имеют клинообразную форму с провалом при переходе границы разрешенной скорости, то есть при переуплотнении потоков [6]. Провал в данной части графика объясняется ударной природой образования пробок — пробки образуются за очень короткий промежуток времени, что не позволяет его зафиксировать общепринятым методом натурных измерений [2].

Второе явное отличие заключается в значительном влиянии культуры вождения на распределение данных, так поток с одной и той же интенсивностью способен двигаться с различными скоростями. Скорости могут различаться на 20 км/ч в большую сторону от разрешенной скорости движения, что является следствием возможности превышения скоростного режима в соответствии с регламентом наложения административного взыскания (КОАП РФ ст. 12.9) на водителей, превышающих ограничение скоростного режима.

В 70–80 гг. в выполненных отечественными учеными Сильяновым В.В., Лобановым Е.М., Красниковым А.Н. и др. исследованиях были определены 4 состояния транспортного потока в зависимости от уровня загрузки: свободный, устойчивый, неустойчивый и насыщенный [7,8]. Однако, исследования выполнялись в основном для загородных автомобильных дорог и не могут быть в полной мере приняты для современных городских условий: высокого уровня автомобилизации, большей плотности УДС, меньшего расстояния между пересечениями и др.

Диаграммы, построенные на основании эмпирических данных, собранных в ходе настоящей работы, ближе к положениям другой теории — теории трехфазного потока Кернера [9], разработанной для транспортных потоков современных скоростных автомагистралей. Отличительной особенностью данной теории от других является объяснение эмпирического свойства перехода к плотному потоку. Три фазы транспортного потока и их мнемоника, выделенные Кернером, описаны следующим образом (рис. 3):

1. Свободный поток — фаза F (от английского «free flow»), это такое состояние потока, при котором водители могут придерживаться желаемой скорости.

2. Синхронизированный поток — фаза S (от английского «synchronized flow»), это следующее состояние потока, при котором водители вынуждены согласовывать свою скорость со скоростью потока, маневрирование затруднено.

3. Движение в «пробке» — фаза J (от английского «wide moving jam»), состояние транспортного затора.

На схеме фаз транспортного потока (рис. 3) можно выделить наиболее важное состояние транспортного потока в контексте НИР — свободный поток, как состояние, обеспечивающее максимальную скорость наибольшему числу ТС. Фаза синхронизированного потока, согласно теории Кернера, является плотным потоком с неустойчивыми характеристиками.

Малая устойчивость синхронизированного потока объясняется наличием случайных транспортных возмущений в потоке (например, переускорение или переторможение, а также перестроения), которые вынуждают сзади идущих менять скоростной режим или траекторию движения — индуцируют заторы. Соответственно, одним из важных тезисов теории Кернера является рассмотрение заторовых состояний и пропускной способности как вероятностных характеристик.

Теория Кернера, несмотря на множество отличий, определяет плотный поток так же, как и классические теории — скорость машин в плотном потоке меньше, чем минимально возможная скорость в свободном потоке. На основании данного тезиса можно заключить, что максимальная пропускная способность находится на границе разрешенной скорости, как на минимальной скорости свободного потока. На рисунке 1 значения  $V_e(80;60)$  и рисунке 2 в интервале  $V_e(100;70)$  принадлежат состоянию свободного потока, значения, лежащие ниже границы скоростного режима, принадлежат правым полосам улиц. Скорость правых полос зачастую ниже, так как крайние правые полосы осуществляют функцию обслуживания прилегающей территории. Значения в других интервалах скоростей принадлежат синхронизированному (плотному) состоянию потока, и не представляются значимым для достижения целей исследования.

Состояние свободного потока также характеризуется интенсивностью на интервале  $N \in (500;2050]$ . Числовые значения  $N$  за пределами 1750 имеют значительно более низкую плотность распределения, что демонстрируется на рисунке 1,2. Также, за пределами 1750 находится точка пересечения теоретических аппроксимаций линейных регрессий двух фаз потока, характеристики потока в данной области являются малоустойчивыми, а, следовательно, не могут быть приняты в качестве расчетной пропускной способности. Одновременно с этим, интенсивность 1750 прив.ед./ч является процентилем 95%-обеспеченности, то есть является верхним пределом распределения — пропускной способностью.

Рис.3.  
Фазовые состояния потока [9]  
[Источник:  
Boris S. Kerner,  
The Physics of Traffic. —  
Springer, Berlin,  
Heidelberg. — 2004. —  
682 c. —  
ISBN 978-3-642-05850-9.]

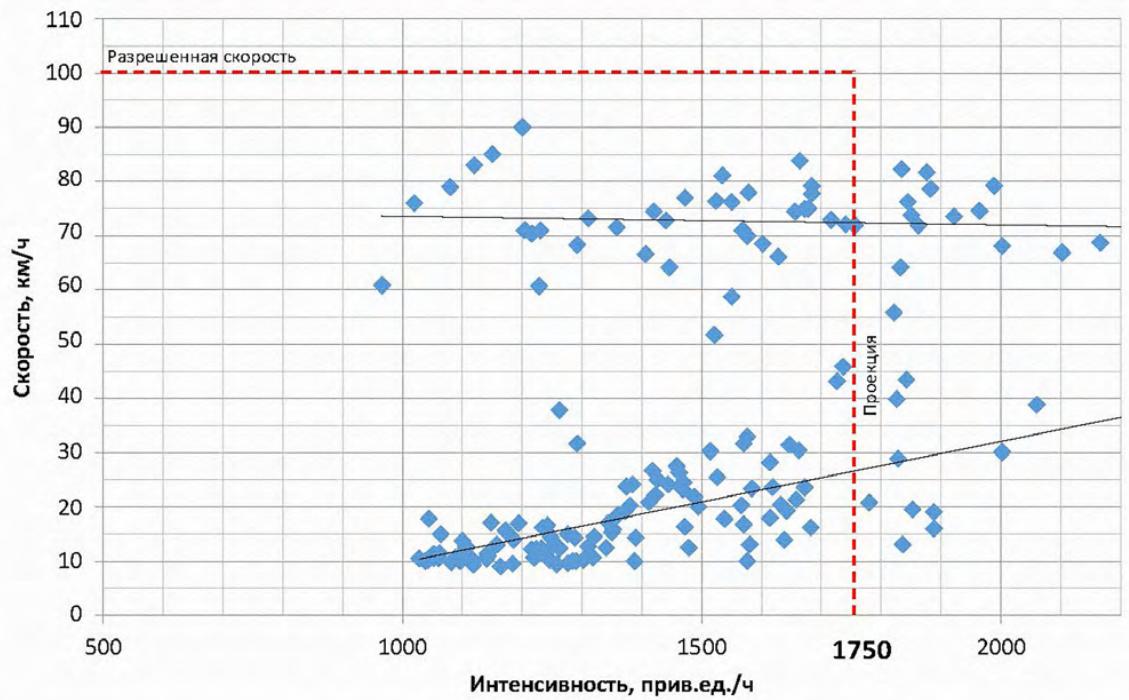


Рис.4.  
Диаграмма средней  
скорости  
и интенсивности  
при скоростном  
ограничении 100 км/ч,  
на основании  
эмпирических  
данных НИР

Результаты измерений на МКАДе со скоростным режимом 100 км/ч представлены на рисунке 4. Данные результаты не подлежат аналогичной интерпретации по двум причинам: транспортный спрос на поперечные транспортные связи чрезвычайно высок — в утренние часы «пик» МКАД в более 50% случаев пребывает в заторможенном или предзаторовом состоянии; состав потока на правых полосах движения содержит долю грузового транспорта с высокой грузоподъемностью до 70%, что, за счет использования коэффициентов приведения искажает результаты. По этой причине в исследование введено изучение интервалов следования в транспортном потоке.

#### **Сравнение интервалов в транспортном потоке**

По результатам наблюдения транспортного потока на перегонах со скоростью 100 км/ч можно заключить, что интервал следования между автомобилями составляет в среднем 2,3 секунды. Пропускная способность в таком случае составляет 1560 прив.ед./ч [10]. Однако на основе эмпирических данных НИР было установлено, что на МКАД характерно распределение интервала транспортного потока и его средней величины, аналогичное улицам с непрерывным движением при скоростном режиме 80 км/ч (рис. 5). Средняя величина интервала в таких условиях составляет 2 секунды.

В ходе исследований психофизиологии работы водителя Лобановым Е.М. [10] установлено, что интервал следования в транспортном потоке составляет минимум от 1,6 до 1,7 секунды

для 95% водителей. Однако, в таком режиме водитель способен работать от 2 до 4 минут, дальнейшая работа в таком режиме увеличивает вероятность ДТП, так как водитель находится в состоянии перегрузки — увеличивается вероятность срыва потока.

В исследовании выявлено, что при превышении величины пропускной способности 1800 прив. ед./ч интервал в транспортном потоке сокращается вплоть до 1,5 секунд, что объясняет частые предзаторовые и заторовые ситуации на МКАД (рис. 5).

Интенсивность свыше 1750 прив.ед./ч не обеспечивает средний интервал в потоке, гарантирующий безопасность движения и отсутствие заторов. Поэтому не рационально принимать пропускную способность выше 1750 прив.ед./ч.

#### **Пропускная способность многополосной проезжей части**

В ходе многочисленных натурных обследований, проведенных в рамках НИР, эмпирически установлен, в явном виде, факт — интенсивность на полосе снижается по мере приближения местоположения полосы к бортовому камню проезжей части [11]. Данный тезис подтверждает проведенные исследования в части установления пропускных способностей магистралей. Для определения коэффициента изменения интенсивности на различных полосах перегона использованы регрессионные модели, отражающие среднестатистические характеристики транспортного потока, на основании полученных данных. Для 4-й и 5-й полосы перегона сформированы теоретические аппроксимации (рис. 6).

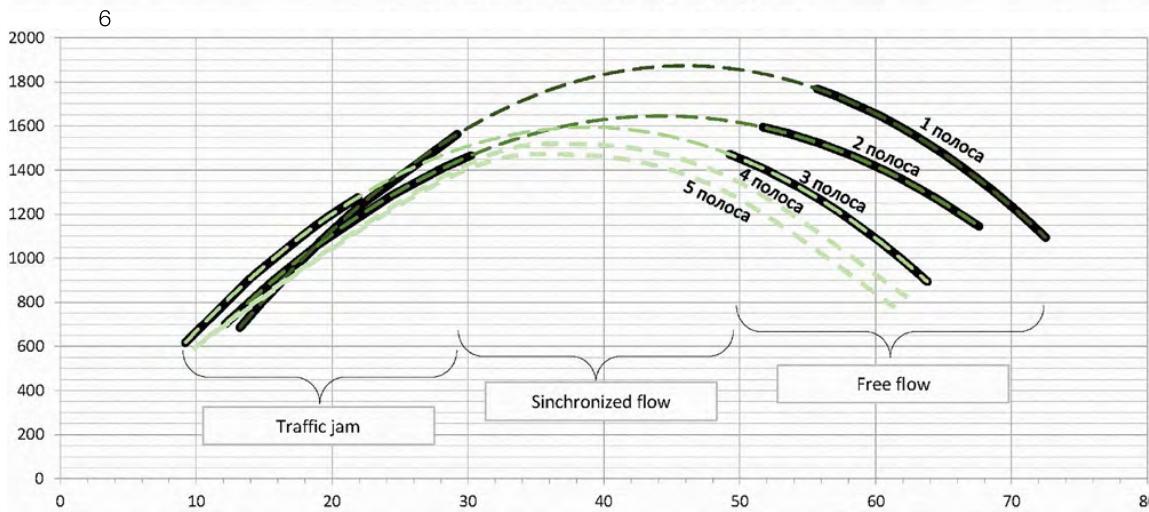
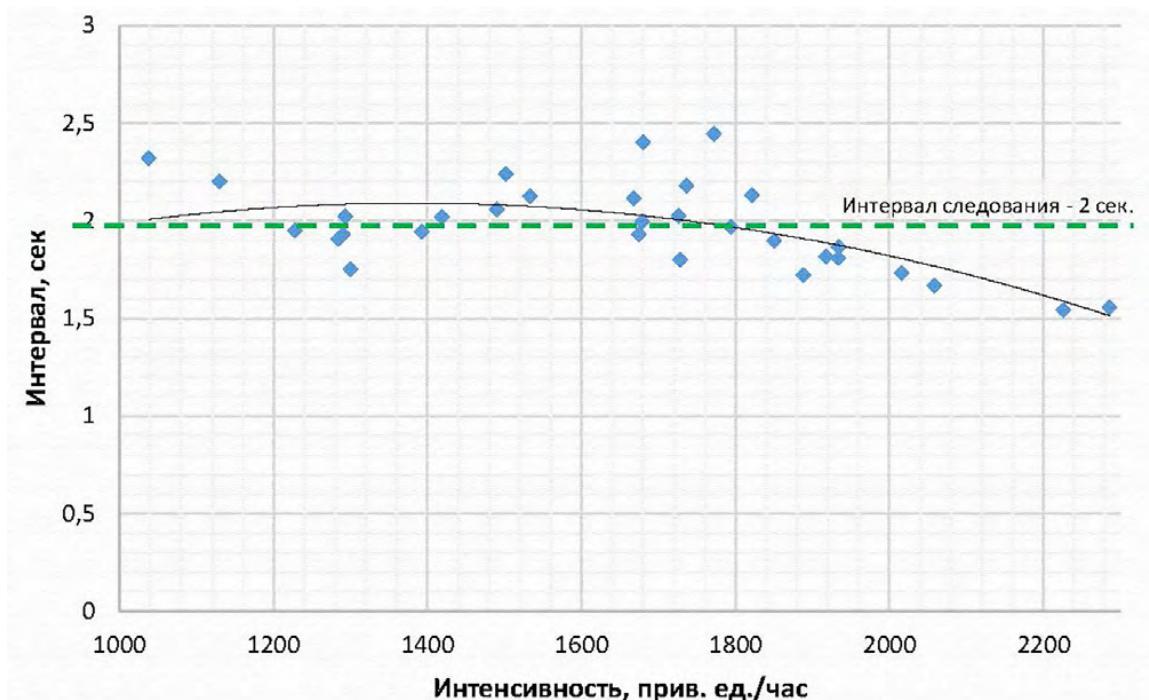


Рис.5.  
Регрессионная модель изменения интервала следования транспортного потока на МКАД

Рис.6.  
Регрессионные модели снижения интенсивности на полосе движения

Таблица 2.  
Коэффициент снижения практической пропускной способности многополосной проезжей части

Номер полосы	5 полоса	4 полоса	3 полоса	2 полоса	1 полоса
Коэффициент снижения пропускной способности	0,65	0,7	0,8	0,9	1,0

Примечание: номер полосы движения назначает справа-налево – крайняя правая полоса по ходу движения является первой.

Таким образом, строительство каждой дополнительной полосы снижает получаемый эффект относительно экономических затрат. Эффективность 4 и 5 полос движения ниже на 30–35% по сравнению с 1 полосой движения.

### Выводы

1. Пропускная способность перегона магистральной улицы непрерывного движения определяется интервалом следования в транспортном потоке, который, в свою очередь, определяется поведением водителя и влияет на его психофизическое состояние.
2. Пропускная способность полосы движения перегона магистральной улицы непрерывного

движения, обеспечивающая беспрепятственное движение транспортного потока, не допускающая падения скорости движения ниже разрешенной, составляет 1750 прив.ед./ч в городских условиях.

3. Пропускная способность многополосных частей растет непропорционально увеличению количеству полос — пропускная способность понижается по мере удаления от оси проезжей части на 10% на каждую полосу, потери достигают более 30%.

4. Коэффициенты приведения, используемые при обработке натурных обследований перегонов магистральных улиц непрерывного движения, завышают интенсивность потока на полосе движения более чем в два раза при высокой доле грузового транспорта, однако, другие характеристики транспортного потока равны или ниже, что искажает результаты исследования и свидетельствует о несовершенстве методики расчета коэффициентов приведения.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. СП 396.1325800.2018 Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. Утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 1 августа 2018 г. N 474/пр // Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/552304870> (дата обращения 24.06.2021).
2. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. — М.: Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2012. — 144 с.
3. FGSV (Ed.) (2015b). Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Edition 2015, (German Highway Capacity Manual). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Road and Transport Association), Cologne, edition 2015;
4. Бахирев И.А., Кармадонова Н.Ю., Черниченко Я.А., Танатова А.М. Определение пропускной способности улиц и дорог с применением беспилотных летательных аппаратов. Известия вузов. Инновации. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 2. С. 384–395. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-384-395.
5. Frank A. Haight Mathematical theories of traffic flow. — 1963. — 286c.
6. Власов А.А. Теория транспортных потоков: моногр. / А.А. Власов. — Пенза: ПГУАС, 2014. — 124 с. ISBN 978-5-9282-1173-8.
7. В. В. Сильянов, Е. М. Лобанов, Л. Н. Сапегин, Ю. М. Ситников. Пропускная способность автомобильных дорог. - Москва: Транспорт, 1970. - 152 с.
8. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. - М.: Транспорт, 1984. - 287 с.
9. Boris S. Kerner. The Physics of Traffic. — Springer, Berlin, Heidelberg. — 2004. — 682 с. — ISBN 978-3-642-05850-9.
10. Лобанов Е.М. Проектирование дорог и организация движения с учетом психофизиологии водителя. М.: Транспорт, 1980. — 311 с
11. Красников А.Н. Закономерности движения на многополосных автомобильных дорогах М.: Транспорт, 1988. - 111 с.

## REFERENCES

1. SP 396.1325800.2018 Ulicy i drogi naselennyx punktov. Pravila gradostroitelnogo proektirovaniya (2018) [Streets and roads of settlements. Rules of urban planning.]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/552304870> access data: 24.06.2021 [in Russian].
2. ODM 218.2.020-2012. Metodicheskiye rekommendatsii po otsenke propusknoy sposobnosti avtomobilnykh dorog (2012) [Methodical recommendations for assessing the throughput of highways]. Moscow: Rosavtodor Publ., 144 p. [in Russian].
3. FGsv (Ed.) (2015b). Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Edition 2015, (German Highway Capacity Manual). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Road and Transport Association), Cologne, edition 2015 [in German].
4. Bakhirev I.A., Karmadonova N.Yu., Chernichenko Ya.A., Tanatova A.M. (2019) Determination of the throughput capacity of streets and roads using unmanned aerial vehicles. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2019, vol. 9, no. 2, pp. 384–395. (In Russ.) DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-384-395
5. Frank A. (1963) Haight Mathematical theories of traffic flow. — 286 p. [in English]
6. Vlasov A.A. (2014) Teoriya transportnyx potokov: monogr. [Theory of traffic flows: monograph] / A.A. Vlasov. — Penza: PGUAS. — 124 p. ISBN 978-5-9282-1173-8. [in Russian].
7. V. V. Silyanov, E. M. Lobanov, L. N. Sapagin, Yu. M. Sitnikov (1970) Propusknaya sposobnost' avtomobilnykh dorog [Road capacity]. - Moskva: Transport. - 152 p. [in Russian].
8. Silyanov V. V. (1984) Transportno-ekspluatacionnye kachestva avtomobilnyx dorog [Transport and operational qualities of roads]. - M.: Transport. - 287 s. [in Russian].
9. Boris S. Kerner. (2004) The Physics of Traffic. — Springer, Berlin, Heidelberg. — 682 c. — ISBN 978-3-642-05850-9. [in English]
10. Lobanov E.M. (1980) Proektirovaniye dorog i organizaciya dvizheniya s uchetom psixofiziologii voditelya [Road design and organization of traffic, taking into account the psychophysiology of the driver]. M.: Transport. — 311 p. [in Russian].
11. Krasnikov A.N. (1988) Zakonomernosti dvizheniya na mnogopolosnyx avtomobilnyx dorogax [Traffic patterns on multi-lane highways] M.: Transport. — 111 p. [in Russian].