УДК 656.11

© Р. В. Андронов, канд. техн. наук, доцент

© Е. Э. Леверенц, аспирант

© Д. А. Гензе, канд. техн. наук, доцент

© Е. Н. Легостаева, ассистент

(Тюменский индустриальный
университет, г. Тюмень, Россия)

E-mail: aroma77777@mail.ru, eduardlevereniz@gmail.ru,
genzada@tyuiu.ru, legostajevaen@tyuiu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-179-185

© R. V. Andronov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© E. E. Leverents, post-graduate student

© D. A. Genze, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© E. N. Legostaeva, assistant lecturer

(Tyumen industrial university,
Tyumen, Russia)

E-mail: aroma77777@mail.ru, eduardlevereniz@gmail.ru,
genzada@tyuiu.ru, legostajevaen@tyuiu.ru

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

THE INFLUENCE OF TRAFFIC MANAGEMENT AT A REGULATED INTERSECTION ON THE UNIFORMITY OF TRAFFIC CAPACITY

Рассматриваются вопросы равномерности показателя пропускной способности регулируемых пересечений с позиций особенностей организации дорожного движения, для оптимизации которого, кроме величины пропускной способности, необходимо знать ее равномерность (однородность). Приводятся схемы организации движения, в которых помехи из-за поворачивающих транспортных средств и движения пешеходов в одной фазе снижают равномерность пропускной способности, из-за чего снижается эффективность работы светофорного регулирования и увеличиваются длина очереди и общие задержки транспортных средств. Выводы статьи подтверждаются проведением многофакторного эксперимента с нахождением статистически значимых коэффициентов.

Ключевые слова: регулируемые пересечения, задержки транспортных средств, поток насыщения, пропускная способность.

The paper deals with the issue of uniformity indicator of the traffic capacity at the regulated intersections from the standpoint of the traffic management, emphasizing the importance of accounting the value of uniformity, in addition to the value on the traffic performance. The schemes of traffic management are provided, where the interferences, due to turning vehicles and the movement of pedestrians in one phase, reduce the uniformity of the traffic capacity. This reduces the efficiency of traffic light regulation and increases the queue length and overall vehicle delays. The conclusions of the study are confirmed by carrying out a multiple-factor testing with the search for statistically significant coefficients.

Keywords: regulated intersections, vehicle delays, saturation flow, traffic capacity.

В каждом государстве или группе государств (например, ЕС) существуют свои методики определения пропускной способности автомобильных улиц и дорог и пересечений на них, как регулируемых, так и нерегулируемых. Эти методики закреплены в соответствующих нормативных документах^{1,2,3,4}. Особенность применения

этих методик — в своем большинстве детерминированный подход к определению пропускной способности как к условно постоянному показателю. При общем расчете учитываются продолжительность разрешающей фазы и цикла светофора, число полос движения, наличие пешеходов, лево- и правоповоротное движение, состав потока, уклон проезжей части и др. Все вышеперечисленные факторы учитываются как поправочные коэффициенты к так называемой эталонной пропускной способности (поток насыщения). В нормах² также учитывается длина очереди, которая может скопиться перед пересечением.

¹ Справочник по определению размеров систем дорожного движения (HBS 2001). Кельн: FGSV, 2015. 299 с.

² Руководство по пропускной способности автомагистралей (HCM 2000). Вашингтон: Совет по транспортным исследованиям, 2011. 30 с.

³ Руководство по пропускной способности для сигнальных перекрестков. Ванкувер: Канадский институт инженеров транспорта, 2008. 232 с.

⁴ ОДМ. 218.2.020–2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог.

чением. Не учитываются или слабо учтены показатели неоднородности (неравномерности) пропускной способности. В справочнике¹ по определению размеров систем дорожного движения даются рекомендации по общему повышению пропускной способности, косвенно реализованные через повышение ее равномерности — такие как запрет поворотов налево и увеличение общей продолжительности цикла с уменьшением доли промежуточных тактов.

Согласно предварительным наблюдениям, неравномерность пропускной способности пересечения приводит не только к общему снижению пропускной способности, но и повышению неопределенности дорожного движения, ведущая к увеличению количества маневров в транспортном потоке, снижению безопасности движения, увеличению задержек и повышению транспортных потерь [1–3, 6–10]. Данную нестабильность транспортного потока сложно рассчитать детерминированными методиками. Для этого лучше всего подходят программные комплексы транспортного моделирования, такие как VISSIM [5, 10].

Для организации дорожного движения и ее оптимизации необходимо знать неравномерность пропускной способности регулируемых пересечений при различной схеме организации дорожного движения и в сочетании с другими факторами, такими как число полос движения и параметрами светофорного регулирования. В дальнейшем эти данные будут использоваться в работе регулируемого пересечения с адаптивным управлением [1, 12].

Предлагается пропускную способность пересечений представить в виде случайной величины с математическим ожиданием и ее стандартным отклонением. Другой показатель будет оценивать неравномерность (неоднородность) пропускной способности [2].

Для оценки равномерности (однородности) пропускной способности по стандартному отклонению или по коэффициенту вариации предложена достаточно простая линейная модель зависимости

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n, \quad (1)$$

где a_n — определяемые в исследовании коэффициенты; x_n — набор факторов, влияющих на по-

казатели равномерности (среднеквадратичного отклонения).

Выбор линейной функции взят из-за ее относительной простоты. Также функции линейного вида используются в различных методиках нахождения пропускной способности на основе потока насыщения [6].

В работе была отобрана выборка из 15 регулируемых пересечений в г. Тюмени с различными параметрами времени цикла, времени горения разрешающего сигнала, числа полос движения перед стоп-линией и разными схемами организации движения на узле. Фактическая пропускная способность определялась как количество автомобилей, проехавших за время разрешающей фазы светофора при условии существования автомобилей, не проехавших пересечение [4].

Пересечения по схеме организации дорожного движения были разбиты на следующие группы:

1) пересечения, у которых поворачивающие направления и движение пешеходов запрещены или выделены в отдельные фазы;

2) пересечения, у которых только поворачивающие налево направления выделены в отдельные фазы или запрещены;

3) пересечения, у которых поворачивающие направления и движение пешеходов осуществляются в общем потоке без запрещения левого поворота.

Деление по этим группам основывалось на объективных факторах, т. е. при отсутствии значительных помех равномерность пропускной способности будет наибольшей (коэффициент вариации — минимальный). При движении пешеходов в одной фазе возникнут помехи для правоповорачивающих направлений, снижающие показатели равномерности, а для 3-й группы помехи от конфликтного поворота налево транспортных средств в основной фазе создадут наибольшие неопределенности параметра пропускной способности и ее равномерности. Несмотря на то что на равномерность пропускной способности априорно влияют состав транспортного потока и количество (процентное соотношение) поворачивающих на пересечении автомобилей, в исследовании сделано некоторое упрощение. Оно заключается в том, что согласно фундаментальной теореме об устойчивости в смысле Ляпунова при накоплении большо-

го количества статистики без разделения ее по множеству влияющих факторов в результате получается нормальное распределение случайной величины [12]. Это сделано в целях последующей обработки результатов эксперимента, так как большинство таких методик обработки результатов основываются на нормальном (по кривой Гаусса) характере отклонений экспериментальных значений от среднего.

При проведении исследования полученные данные проверялись на аномальность. Это было вызвано тем, что на пересечении при проезде могла возникнуть нестандартная ситуация (внезапные остановки, проезды транспортных средств с включенным синим проблесковым маячком, движение тихоходной коммунальной техники и др.), а также погрешность измерения интенсивности движения (табл. 1).

При дальнейшей оценке репрезентативности выборки выяснилось, что для надежности 90 % определения среднеквадратичного отклонения результатов (в рамках допустимой ошибки 10 %) необходимо провести от 20 до 66 замеров на каждом узле.

Далее по полученным в результате эксперимента данным была составлена матрица эксперимента с оценкой влияния каждого фактора на итоговое значение с оценкой достоверности каждого коэффициента и отбрасыванием статистически незначимых величин.

При составлении матрицы итогов эксперимента и оценки влияния каждого фактора было выбрано четыре фактора, могущих оказать влияние на равномерность пропускной способности. Этими факторами предложено считать:

a_0 — постоянная константа линейной функции;
 a_1 — число полос движения;
 a_2 — группа пересечения;
 a_3 — фактическая пропускная способность, авт./фаза.

В модели было предложено не учитывать продолжительности цикла и разрешающей фазы светофора, так как при обработке модели удобнее работать с показателями пропускной способности без привязки ко времени (авт./фаза) [1, 2, 12]. Это обусловлено тем, что за время разрешающей фазы формируется стабильный непрерывный поток автомобилей, и неравно-

мерность пропускной способности проявляется именно в разном фактическом количестве автомобилей, сумевших проехать через пересечение за разрешающий сигнал.

Для дальнейшей обработки результатов эксперимента и нахождения коэффициентов модели по методу наименьших квадратов каждый параметр проверялся на статистическую значимость по критерию Стьюдента (табл. 2–5). В качестве достоверительной вероятности была взята вероятность 95 %.

Анализ данных табл. 2 показывает, что коэффициенты a_0 и a_1 статистически незначимы.

Это предварительно говорит о том, что константой линейной функции и числом полос движения в модели можно пренебречь. Статистическая незначительность коэффициента, описывающего полосность улицы, вызвана тем, что число полос движения косвенно заложено в коэффициенте a_3 .

В процессе дальнейшего анализа было принято решение оставить два коэффициента (a_2 и a_3). Полученные результаты показали хорошую статистическую значимость (табл. 3).

Полученные значения коэффициентов показали достаточно хорошую достоверность.

В дальнейшем формулу (1) было предложено преобразовать:

$$y = a_2 \ln(x_1) + a_3 x_2. \quad (2)$$

Ввод логарифма обусловлен тем, что при наиболее благоприятных условиях проезда автомобилей через пересечение, среднеквадратичное отклонение пропускной способности будет наименьшим и значение логарифма от единицы будет равно нулю.

Наилучшее качество модели представлено в табл. 4. Итоговая функция зависимости среднеквадратичного отклонения y будет выглядеть следующим образом:

$$y = 1,76 \ln(x_1) + 0,099 x_2, \quad (3)$$

где x_1 — группа пересечения по способу организации дорожного движения;

x_2 — значение фактической пропускной способности (авт./фаза).

На основании анализа полученных данных можно сделать предварительные выводы.

1. Получена линейная математическая модель, описывающая неравномерность (неоднородность) фактической пропускной способно-

Таблица 1

Параметры работы рассматриваемой выборки пересечений

Наименование пересечения	Наблюдаемое сечение стоп-линии	Кол-во полос движения	Продолжительность цикла, с	Время разрешающей фазы, с	Средняя пропускная способность, авт./фаза	Группа пересечения	Средне-квадратичное отклонение
Ул. Мельникайте – ул. Республики	Ул. Республики	2	90	40	21,8	3	5,23
Ул. Герцена – ул. Первомайская	Ул. Герцена	2	71	30	17,6	3	3,87
Ул. 50 лет Октября – ул. М. Горького	Ул. 50 лет Октября (1-е напр.)	4	88	40	45,9	2	6,89
	Ул. 50 лет Октября (2-е напр.)	4	88	40	36,5	2	5,11
Ул. 50 лет Октября – ул. Профсоюзная	Ул. 50 лет Октября	4	90	31	50,2	1	4,52
	Ул. Осипенко	4	90	17	31,1	1	3,73
	Ул. Профсоюзная	4	90	13	25,3	1	3,29
Ул. Республики – ул. Челюскинцев	Ул. Челюскинцев (1-е напр.)	2	68	34	21,7	2	3,04
	Ул. Челюскинцев (2-е напр.)	2	68	34	15,2	3	3,04
	Ул. Республики	2	102	51	22,0	2	4,84
Ул. Республики – ул. М.Тореза	Ул. Республики	2	95	35	29	1	2,32
Ул. Республики – ул. М. Горького	Ул. М. Горького	2	45	16	15,7	1	1,41
Ул. 50 лет Октября – ул. Одесская	Ул. 50 лет Октября	4	90	34	51,1	1	6,13
	Ул. Одесская	2	90	15	13,9	2	1,53
Ул. Аккумуляторная – ул. Ямская	Ул. Аккумуляторная	2	75	28	10,9	3	2,51
Ул. Ленина – ул. Первомайская	Ул. Ленина (от ТЦ «Корона»)	3	118	46	32,4	1	3,56
Ул. Герцена – ул. Первомайская	Ул. Герцена (от ул. Камышинской)	2	120	25	17,7	3	3,0
Ул. 50 лет Октября – ул. Профсоюзная	Ул. Осипенко	4	128	23	33,1	1	2,64
Ул. 50 лет Октября – ул. Профсоюзная	Ул. Профсоюзная (от р. Туры)	5	128	24	46,7	1	4,2
Ул. Чекистов – ул. Республики	Ул. Республики (из центра города)	2	136	63	27,1	3	4,06
Ул. Новаторов – ул. Республики	ул. Республики (из центра города)	3	124	77	51,8	1	3,6

сти регулируемого пересечения от схемы организации и условий дорожного движения.

2. В параметрах модели значимыми параметрами, влияющими на неравномерность, являются: группа пересечения по способу организации движения и фактическая пропускная спо-

собность за время цикла/фазы светофорного регулирования.

3. Данная модель может быть использована при оптимизации организации дорожного движения на улично-дорожной сети в целях дальнейшего снижения нестабильности потока, приводящей к увеличению длины автомобильных

Таблица 2

**Проверка статистической значимости
коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3**

Коэф- фициент модели	Значение коэффи- циента	Довери- тельный интервал	Относительное значение доверительного интервала
a_0	-2,279271	$\pm 2,500355$	-110 %
a_1	0,2511102	$\pm 0,822893$	328 %
a_2	1,2288108	$\pm 0,680347$	55 %
a_3	0,114471	$\pm 0,062684$	55 %

Таблица 3

**Проверка статистической значимости
коэффициентов a_2, a_3**

Коэф- фициент модели	Значение коэффи- циента	Довери- тельный интервал	Относительное значение доверительного интервала
a_2	0,726188	$\pm 0,295074$	41 %
a_3	0,084321	$\pm 0,018403$	22 %

Таблица 4

**Проверка статистической значимости
коэффициентов a_2, a_3**

Коэф- фициент модели	Значение коэффи- циента	Доверитель- ный интер- вал	Относительное значенис доверительного интервала
a_2	1,764473	$\pm 0,631099$	36 %
a_3	0,099352	$\pm 0,013336$	13 %

очереди, увеличению задержек и снижению безопасности дорожного движения.

4. Модель может использоваться в имитационных моделях работы регулируемого пересечения, работающих по методу Монте-Карло для адаптации эталонной модели работы пересечения к реальным условиям движения [1, 12].

Библиографический список

1. Андронов Р. В., Леверенц Е. Э. Расчет задержек транспортных средств на транспортных пересечениях с адаптивным алгоритмом управления движени-

ем // Материалы IV Международной конференции молодых исследователей «Молодежь, наука, решения: идеи и перспективы». 2017. № 143. С. 1–6.

2. Андронов Р. В., Леверенц Е. Э. Расчет методом Монте-Карло задержек транспортных средств на изолированном регулируемом пересечении при его работе на высоких уровнях загрузки // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (2). С. 221–226.

3. Андронов Р. В. Расчет экономических потерь пользователей улично-дорожной сети на регулируемых пересечениях для обоснования мероприятий по реконструкции и улучшению организации движения // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 4. С. 38–40.

4. Андронов Р. В., Елькин Б. П., Гензе Д. А. Понятие затора и формирование очередей на регулируемом пересечении в условиях плотного транспортного потока // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 1. С. 39–41.

5. Бекмагамбетов М. М., Кочетков А. В. Анализ современных программных средств транспортного моделирования // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 6. С. 25–34.

6. Булавина Л. В. Расчет пропускной способности магистралей и узлов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 44 с.

7. Дрогалева Е. В., Сухина Л. А., Хайрулина Р. Ф., Яшина Е. Ю. Выбор объекта локального исследования в целях повышения эффективности организации дорожного движения в центре крупного города: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Новые технологии — нефтегазовому региону». Тюмень: ТИУ, 2016. С. 172–175.

8. Ковалев Р. Н., Боярский С. Н. Теоретическое обоснование общей модели определения задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог // Транспорт Урала. 2012. № 2. С. 64–69.

9. Тестешев А. М., Тестешев А. А., Лощинина И. Е. Дистанционный мониторинг транспортных потоков г. Тюмени при различных состояниях дорожного покрытия на основе спутникового наблюдения // Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии – 2016: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. Тюменский индустриальный университет, 2016. С. 167–173.

10. Эртман С. А., Фадюшин А. А., Карманов Д. С., Эртман Ю. А. Оценка эффективности оптимизации организации дорожного движения на пересечении улиц с интенсивным движением // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 219–222.

11. Якимов М. Р., Арепьева А. А. Транспортное планирование: Особенности моделирования транспортных потоков в крупных российских городах. М.: Логос, 2016. 280 с.

12. Astarita V., Giofré V. P., Vitale A. A. Cooperative Intelligent Transportation System for Traffic Light Regulation Based on Mobile Devices as Floating Car Data (FCD) // American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS). 2016. T. 19, № 1. Pp. 166–177.

13. Andronov R., Leverents E., Anufrieva T. MATEC Web of Conferences, 2018. Simulation of queue length and vehicle delays on signal-controlled intersection // matic-conferences.org.

14. Lavrenz S. M. et al. Characterizing signalized intersection performance using maximum vehicle delay. Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications. Paper 17. 2015. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/civeng/17/>

15. Fu H. и др. Empirical analysis of large-scale multimodal traffic with multi-sensor data // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2020. (118).

16. Lei C., Jiang Z., Ouyang Y. Path-based dynamic pricing for vehicle allocation in ridesharing systems with fully compliant drivers // Transportation Research Part B: Methodological. 2020. (132). Pp. 60–75.

References

1. Andronov R. V., Leverents E. E. *Raschet zaderzhek transportnykh sredstv na transportnykh peresecheniyakh s adaptivnym algoritmom upravleniya dvizheniem* [Calculation of vehicle delays at transport intersections with an adaptive traffic control algorithm]. *Trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh issledovateley «Molodezh', nauka, resheniya: idei i perspektivy»* [Proceedings of the IV International conference of young researchers "Youth, science, solutions: ideas and prospects"]. 2017, no. 143, pp. 1–6.

2. Andronov R. V., Leverents E. E. *Raschet metodom Monte-Karlo zaderzhek transportnykh sredstv na izolirovannom reguliruemom peresechenii pri ego rabote na vysokikh urovnyakh zagruzki* [Calculation of vehicles' delays at an isolated controlled intersection characterized with a high value of traffic load coefficient using the Monte Carlo technique]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1, pp. 221–226.

3. Andronov R. V. *Raschet ekonomicheskikh poter' pol'zovateley ulichno-dorozhnoy seti na reguliruemyykh peresecheniyakh dlya obosnovaniya meropriyatiy po rekonstruktsii i uluchsheniyu organizatsii dvizheniya* [Calculation of economic losses of the street and road network users at regulated intersections to justify measures for reconstruction and improvement of traffic management]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya – Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2014, no. 4, pp. 38–40.

4. Andronov R. V., El'kin B. P., Genze D. A. *Ponyatie zatora i formirovanie ocheredey na reguliruemom peresechenii v usloviyakh plotnogo transportnogo potoka* [The concept of congestion and the formation of queues at a regulated intersection in conditions of dense traffic flow]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya – Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2015, no. 1, pp. 39–41.

5. Bekmagambetov M. M., Kochetkov A. V. *Analiz sovremennykh programmnykh sredstv transportnogo modelirovaniya* [Analysis of modern software tools for transport modeling]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov – Journal of Automotive Engineers*, 2012, no. 6, pp. 25–34.

6. Bulavina L. V. *Raschet propusknoy sposobnosti magistraly i uzlov* [Calculation of the traffic capacity of highways and intersections]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 2009, 44 p.

7. Drogaleva E. V., Sukhina L. A., Khayrulina R. F., Yashina E. Yu. *Vybor ob'ekta lokal'nogo issledovaniya v tselyakh povysheniya effektivnosti organizatsii dorozhnogo dvizheniya v tsentre krupnogo goroda* [Selecting the local research object in order to improve the efficiency of traffic organization in the city]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Novye tekhnologii — neftegazovomu regionu»* [Proceedings of the Intern. scientific - practical conf. "New technologies for the oil and gas region"]. Tyumen', TIU Publ., 2016, pp. 172–175.

8. Kovalev R. N., Boyarskiy S. N. *Teoreticheskoe obosnovanie obshchey modeli opredeleniya zaderzhki transporta na peresecheniyakh avtomobil'nykh dorog* [Theoretical substantiation of the general model for determining the transport delay at intersections of highways]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2012, no. 2, pp. 64–69.

9. Testeshev A. M., Testeshev A. A., Loshchinina I. E. *Distantsonniy monitoring transportnykh potokov g. Tyumeni pri razlichnykh sostoyaniyakh dorozhnogo pokrytiya na osnove sputnikovogo nablyudeniya* [Remote monitoring of traffic flows in the city of Tyumen in various conditions of the road surface on the basis of satellite observations]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Aktual'nye problemy arkhitektury, stroitel'stva, energoeffektivnosti i ekologii»* [Proceedings of the International scientific and practical conference "Actual problems of architecture, construction, energy efficiency and ecology"]. In 3 vols. Tyumen, Tyumenskiy industrial'nyi universitet Publ., 2016, pp. 167–173.

10. Ertman S. A., Fadyushin A. A., Karmanov D. S., Ertman Yu. A. *Otsenka effektivnosti optimizatsii organizatsii dorozhnogo dvizheniya na peresechenii ulits s intensivnym dvizheniem* [Evaluation of the efficiency of optimization of traffic organization at the intersection of streets with heavy traffic]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik*

Povolzh'ya – Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region, 2015, no. 6, pp. 219–222.

11. Yakimov M. R., Arepëva A. A. *Transportnoe planirovanie: Osobennosti modelirovaniya transportnykh potokov v krupnykh rossiyskikh gorodakh* [Transport planning: Features of transport flow modeling in large Russian cities]. Moscow, Logos Publ., 2016, 280 p.

12. Astarita V., Giofrè V. P., Vitale A. A. Cooperative intelligent transportation system for traffic light regulation based on mobile devices as floating car data (FCD). *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 166–177.

13. Andronov R., Leverents E., Anufrieva T. *MATEC Web of Conferences*, 2018. Simulation of queue length and

vehicle delays on signal-controlled intersection. Available at: matec-conferences.org.

14. Lavrenz S. M. et al. Characterizing signalized intersection performance using maximum vehicle delay. *Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications*. Paper 17, 2015. Available at: <http://docs.lib.purdue.edu/civeng/17/>

15. Fu H. et al. Empirical analysis of large-scale multimodal traffic with multi-sensor data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, no. 118.

16. Lei C., Jiang Z., Ouyang Y. Path-based dynamic pricing for vehicle allocation in ridesharing systems with fully compliant drivers. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020, no. 132, pp. 60–75.