УДК 656.11

© А. Ю. Михайлов, д-р техн. наук, профессор
(Московский государственный архитектурно-
строительный университет, Москва, Россия)

E-mail: mikhaylov_ay@mail.ru

© Е. А. Шестеров, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: eashest@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-4-134-142

© A. Yu. Mikhailov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Moscow State University of Architecture
and Civil Engineering, Moscow, Russia)

E-mail: mikhaylov_ay@mail.ru

© E. A. Shesterov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: eashest@rambler.ru

УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВЫДЕЛЕННЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ФАЗ

EFFECTIVE APPLICATION CONDITION OF EXCLUSIVE PEDESTRIAN PHASES

Выполнен анализ исследований эффективности применения выделенных пешеходных фаз и диагональных пешеходных переходов. Условия эффективного применения выделенных пешеходных фаз и устройства диагональных пешеходных переходов, а также допускаемые значения интенсивности конфликтного движения транспортных и пешеходных потоков требуют уточнений, основанных на данных специальных исследований, актуальность которых очевидна.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, выделенная пешеходная фаза, условия применения диагональных пешеходных переходов.

This article analyses researches of the effectiveness of exclusive pedestrian phases and diagonal pedestrian crossings. The conditions for effective use of exclusive pedestrian phases and diagonal pedestrian crossings, as well as the traffic and pedestrians' conflicting volumes require clarification based on special research data, the relevance of which is obvious.

Keywords: signalized intersection, exclusive pedestrian phase, conditions for the use of diagonal pedestrian crossings..

В последние годы в Российской Федерации проделана большая работа по совершенствованию нормативных и методических документов в области организации дорожного движения. С 1 апреля 2020 года действует ГОСТ Р 52289–2019 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств». Применительно к организации дорожного движения на регулируемых перекрестках этот документ содержит важное изменение.

В соответствии с п. 7.2.6 ГОСТ Р 52289–2019 на регулируемых перекрестках допускается конфликтное движение транспортных и пешеходных потоков, при условии что суммарная интенсивность транспортных средств, поворачивающих в одно направление, не более 120 ед./ч,

а интенсивность движения пешеходов не более 600 пеш./ч. Хотя допускаемые значения интенсивности движения пешеходов и транспорта в дальнейшем могут быть уточнены, признана целесообразность применения конфликтного движения при определенных условиях.

Вместе с тем п. 7.2.6 ГОСТ Р 52289–2019, как и предыдущие версии документа, не рассматривает условия введения специальных пешеходных фаз в составе цикла регулирования. Кроме того, постановлением Правительства в Российской Федерации с 15 апреля 2015 года введено применение диагональных пешеходных переходов, но новый ГОСТ Р 52289–2019 не содержит прямых указаний о целесообразности их устройства.

Растущие требования к повышению безопасности и комфортности движения пешеходов неизбежно потребуют разработки детальных реко-

мендаций по применению выделенных пешеходных фаз и устройству диагональных переходов. Очевидно, что при разработке таких рекомендаций придется решать задачу нахождения баланса между требованиями обеспечения безопасности и комфорта движения пешеходов и вступающими в конфликт с ними требованиями снижения задержек транспортных средств и длины их очередей, а также расхода топлива¹ [1, 4, 13, 18, 22, 23]. Возможность устройства выделенных пешеходных фаз также может ограничиваться в случаях координированного регулирования [2].

Важнейшим ограничением применения выделенных пешеходных фаз является ограничение длительности цикла регулирования² [13, 14, 18]. В настоящее время рекомендуемый диапазон значений длительности цикла составляет 40–120 с.

Оптимальная по критерию величина средней задержки продолжительность цикла C_{opt} определяется как³

$$C_{opt} = \frac{1,5L + 5}{1 - Y}, \quad (1)$$

где L — потерянное в цикле время, с; $Y = \sum_{i=1}^{i=n} y_i$ — сумма фазовых коэффициентов; n — количество фаз в цикле, в которых осуществляется движение транспорта.

¹ Calculation of Traffic Signal Timings-Webster's Method Note13. <https://ru.scribd.com/document/426459256/Calculation-of-Traffic-Signal-Timings-Webster-s-Method-Note13>.

² Ibid.

³ Ibid.

В случае введения специальной пешеходной фазы ее продолжительность включают в потерянное в цикле время L . Происходящие при этом изменения длительности цикла можно продемонстрировать на простом примере:

- исходный режим регулирования: двухфазный цикл с длительностью потерянного времени 8 с (два переходных интервала по 4 с в конце каждой фазы);
- новый режим — добавляется пешеходная фаза длительностью 20 с.

В соответствии с формулой (1) оптимальная продолжительность цикла будет изменяться с ростом суммы фазовых коэффициентов (рис. 1).

Представленный простой пример эффекта, вызываемого введением пешеходной фазы, показывает, что уже при сумме фазовых коэффициентов более 0,65 оптимальная длительность трехфазного цикла начинает превышать 120 с. В случае четырехфазного режима регулирования с выделенной пешеходной фазой значения оптимальной длительности цикла регулирования еще более высоки. При таких режимах резко возрастает длина очередей транспортных средств и сама длительность ожидания разрешающего сигнала пешеходами.

Оценка изменений задержек транспорта и пешеходов при введении пешеходной фазы и устройстве диагональных переходов уже вы-

Рис. 1. Изменение оптимальной длительности цикла регулирования при введении пешеходной фазы

полнялась на примере простейшего перекрестка с двухфазным режимом (рис. 2 и табл. 1) югославскими специалистами [18]. Рассматривалось одинаковое распределение трафика при всех подходах к перекрестку: 50 % транспортных средств движутся прямо, 25 % поворачивают налево и 25 % — направо. Также предполагалась одинаковая интенсивность движения пешеходов на всех переходах перекрестка.

Согласно результатам, представленным в табл. 1, введение выделенной пешеходной фазы в условиях низкой интенсивности движения транспорта приводит к снижению средней задержки пешеходов более чем на 50 %. С ростом интенсивности движения транспорта (соответственно и суммы фазовых коэффициентов) увеличивается оптимальная длительность цикла, и, как следствие, средняя задержка пешеходов возрастает на 50 %. При этом величина средней задержки транспортных средств во всем рассмотренном диапазоне значений интенсивности движения транспорта возрастает на 30–50 %.

Таким образом, преимуществами, получаемыми при введении пешеходной фазы, а также устройстве диагональных переходов, являются повышение безопасности движения и сокращение задержек пешеходов. Последнее будет достигаться только при определенных распределениях пешеходных потоков на переходах перекрестков (т. е. при определенных матрицах корреспонденций пешеходного движения на перекрестках — преобладании спроса на движение по диагонали).

Поскольку в настоящее время в нашей стране не проводились исследования влияния устрой-

ства выделенной пешеходной фазы и диагональных пешеходных переходов на безопасность и комфортность движения пешеходов, представляется целесообразным выполнить анализ зарубежной специальной литературы и периодики^{4,5} [3, 7–10, 13, 16, 17, 19, 21], а также нормативных документов и методических руководств^{6,7,8}.

В США, кроме документов и руководств, разрабатываемых на федеральном уровне, ряд технических условий и норм организации дорожного движения разрабатывается департаментами транспорта штатов и муниципалитетов крупных городов⁹ [8, 9]. Так, в техническом меморандуме Бостона от 4 июня 2015 г. [9] указаны следующие условия применения специальных пешеходных фаз (табл. 2).

По результатам анализа 86 перекрестков с выделенными пешеходными фазами, выполненного в Нью-Йорке в 2015 г., департамент транспорта города сделал следующие выводы [9]:

- сокращаются затраты времени пешеходов на движение через перекресток;

⁴ Walk this way. Exclusive Pedestrian Signal Phase Treatments Study. October 2017, URL: <https://www1.nyc.gov/html/dot/downloads/pdf/barnes-dance-study-sept2017.pdf>

⁵ URL: <https://www.boston.gov/sites/default/files/file/2020/09/04%20CHAPTER%204%20-%20INTERSECTIONS.pdf>

⁶ Calculation of Traffic Signal Timings-Webster's Method Note13. <https://ru.scribd.com/document/426459256/Calculation-of-Traffic-Signal-Timings-Webster-s-Method-Note13>.

⁷ Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV. 2015. 93 s.

⁸ Traffic Engineering Manual. Vol. 3 — Guidance on Treating Pedestrian and Turning Vehicle Conflicts at Signalized Intersections. Victoria State Averment, 2016. 38 p.

⁹ Walk this way. Exclusive Pedestrian Signal Phase Treatments Study. October 2017, URL: <https://www1.nyc.gov/html/dot/downloads/pdf/barnes-dance-study-sept2017.pdf>

Рис. 2. Перекресток: а — с двухфазным режимом; б — с введением пешеходной фазы и устройством диагональных переходов [18]

Таблица 1

Результаты оценки изменений задержек транспортных средств и пешеходов в результате введения пешеходной фазы и диагональных переходов [18]

Суммарная интенсивность движения транспорта, авт./ч	Суммарная интенсивность движения пешеходов, пеш./ч		Двухфазный цикл без выделенной пешеходной фазы		Трехфазный цикл с выделенной пешеходной фазой	
			Средняя задержка транспортных средств, с	Средняя задержка пешеходов, с	Средняя задержка транспортных средств, с	Средняя задержка пешеходов, с
350	A	2000	21	61	33	29
	B	760–1880	10–20	28–58	20–32	27–29
500	A	1720	20	49	33	33
	B	680–1680	10–20	24–49	21–32	30–33
800	A	1120	20	24	31	41
	B	480–1040	10–19	17–23	25–30	39–41
1000	A	800	23	22	32	49
	B	200–760	11–20	16–20	29–31	48–49

Примечание. A — максимальный суммарный объем пешеходного движения, для которого целесообразно использование выделенной пешеходной фазы, пеш./ч (цикл ≤ 120 с); B — общий диапазон значений суммарного объема пешеходного движения, при котором уровень обслуживания транспортных средств при двухфазном цикле на один уровень выше, чем при цикле с выделенной фазой.

- увеличиваются задержки пешеходов и транспорта;

- увеличивается загруженность тротуаров (из-за увеличения продолжительности ожидания разрешающего сигнала).

Как и технический меморандум Бостона [9], руководство австралийского штата Виктория¹⁰ также рекомендует применять пешеходные фазы в случаях высокой интенсивности движения пешеходов. При этом указывается, что введение пешеходной фазы может вызвать дополнительные задержки для трамваев, автобусов и других участников дорожного движения. В некоторых случаях более высокий приоритет может быть отдан общественному транспорту, что делает нежелательным устройство специальной пешеходной фазы.

В рамках анализа эффективности применения специальных пешеходных фаз существует отдельный специальный вопрос — целесообразность устройства диагональных пешеходных переходов. В целом в специальной литературе и публикациях указываются несколько отличающиеся критерии целесообразности устройства

диагональных переходов¹¹ [2–4, 7], отличаются и результаты внедрения диагональных переходов.

Следует отметить очень широкое применение диагональных переходов на перекрестках в Японии (более 300 перекрестков), в том числе перекресток около станции Сибуя в Токио, на котором по некоторым оценкам суммарная интенсивность движения достигает 250 000 пешеходов в день.

В Северной Америке диагональные переходы для пешеходов (scramble crossings) стали применять уже в 1940-х годах, включая Лос-Анджелес, который к началу 1950-х годов имел 25 перекрестков с такими переходами [8]. В Нью-Йорке благодаря транспортному инженеру Генри Барнсу перекрестки с диагональными переходами, известные как Barnes Dance, получили распространение начиная с 1962 г.¹²

В связи с образующимися большими очередями транспортных средств в Лос-Анджелесе на некоторый период отказались от диагональных переходов [8]. Возвращение к использованию диагональных переходов объясняется тем, что они:

¹¹ Calculation of Traffic Signal Timings-Webster's Method Note13. <https://ru.scribd.com/document/426459256/Calculation-of-Traffic-Signal-Timings-Webster-s-Method-Note13>

¹² Walk this way. Exclusive Pedestrian Signal Phase Treatments Study. October 2017, URL: <https://www1.nyc.gov/html/dot/downloads/pdf/barnes-dance-study-sept2017.pdf>

¹⁰ Traffic Engineering Manual. Vol. 3 — Guidance on Treating Pedestrian and Turning Vehicle Conflicts at Signalized Intersections. Victoria State Averment, 2016. 38 p.

Таблица 2

Условия применения выделенных пешеходных фаз и последовательных фаз, разрешающих движения пешеходов на отдельных направлениях [9]

Выделенные пешеходные фазы	Последовательные фазы
<ul style="list-style-type: none"> • Интенсивность движения пешеходов более 1200 чел./сут • Поворачивающие на перекрестке потоки с интенсивностью более 250 авт./ч • В составе пешеходных потоков значительная доля пожилых людей, детей и инвалидов • Сложные пересечения с плохими условиями видимости • Протяженные пешеходные переходы > 55 фт (16,5 м) • Геометрические факторы не обеспечивают благоприятных условий поворотного движения транспортных средств 	<ul style="list-style-type: none"> • Незначительная интенсивность движения пешеходов — менее 1200 чел./сут • Поворачивающие на перекрестке потоки с интенсивностью менее 250 авт./ч • В пешеходных потоках незначительная доля пожилых людей и детей • Короткие пешеходные переходы < 55 фт (16,5 м)

- позволяют пешеходам пересекать все направления одновременно;

- уменьшают конфликты между транспортными средствами и пешеходами;

- сокращают затраты времени пешеходами на движение по перекрестку.

В 1987 г. в деловой части района Беверли-Хиллз (Лос-Анджелес) на восьми перекрестках были введены эксклюзивные пешеходные фазы, при этом пешеходам было разрешено переходить перекрестки по диагонали. Диагональное движение пешеходов потребовало увеличения длительности пешеходных фаз до 20–22 с и, соответственно, увеличения длительности циклов регулирования. Только на двух из этих перекрестков отмечалось существенное ухудшение условий движения транспорта (т. е. значения средней задержки в пиковые часы соответствовали уровням обслуживания D и E).

На основе полученного в Беверли-Хиллз опыта сформулированы следующие рекомендации для введения диагональных перекрестков и пешеходной фазы [8]:

- Не менее четырех часов в день общая суммарная интенсивность движения пешеходов должна быть высокой (желательно более 1000 пешеходов в час). Устройство выделенной фазы неэффективно, если значительная интенсивность движения пешеходов отмечается лишь в течение одного часа пикового периода.

- Объем движения транспортных средств должен быть умеренным и постоянным в течение дневного периода в сочетании с высокими долями поворотов налево или направо. Важно, чтобы пиковые периоды движения транспор-

та совпадали с пиковыми периодами движения пешеходов. Рекомендуемый общий объем движения на подходах к перекрестку должен составлять менее 2000 авт./ч.

- Рекомендуется, чтобы существующий уровень транспортных потоков на выбранных перекрестках был не ниже уровня «С».

- Длинные диагональные переходы требуют продолжительного мигающего сигнала для освобождения пешеходами перекрестка. Меньшие по размерам перекрестки не требуют значительной длительности пешеходной фазы, увеличивающей задержки транспорта. Рекомендуемые размеры перекрестка: на второстепенных улицах ширина проезжей части не превышает 40 фт (12 м) и на главных улицах — 40–60 фт (12–18 м).

- Рекомендуется соблюдать осторожность при устройстве эксклюзивной пешеходной фазы, когда обе улицы являются двухсторонними.

- Уровень аварийности — количество ДТП с участием пешеходов и поворачивающих транспортных средств превышает среднегородские показатели.

В целом отмечается [8], что пешеходные фазы — недорогое мероприятие, позволяющее снизить количество конфликтов между транспортными и пешеходными потоками, и что в США при этом отсутствуют рекомендации по их применению, принятые на федеральном уровне или уровне отдельного штата.

В свою очередь департамент транспорта Нью-Йорка считает, что, кроме случаев выделенной пешеходной фазы, целесообразно применять диагональные переходы на перекрестках, где

улицы пересекаются под острым углом¹³. В такой ситуации диагональные переходы позволяют значительно сократить затраты времени пешеходов на движение по перекрестку (рис. 3).

В английской публикации [7], посвященной применению диагональных переходов, рассмотрен один из самых известных в мире перекрестков с диагональными переходами Oxford Circus (Лондон). Суммарная интенсивность движения пешеходов на этом перекрестке в пиковые периоды достигает 40 000 пеш./ч. Сочетание большого количества пешеходов (по 5500–10 000 на каждом из переходов перекрестка) вместе с ограниченностью пространства для их движения послужили главной причиной создания диагональных переходов и сохранения на Оксфорд Стрит движения только автобусов (24 маршрута) и такси.

Вместе с тем в практике применения диагональных переходов отмечают и отрицательные результаты. По данным канадских специалистов [19] устройство диагональных переходов в 2014 г. на трех перекрестках в Торонто привело к следующим результатам (табл. 3).

По результатам введения в Торонто диагональных переходов количество ДТП с участием пешеходов осталось неизменным, но возрос уровень аварийности с участием только транспортных средств [10, 19].

¹³ Walk this way. Exclusive Pedestrian Signal Phase Treatments Study. October 2017, URL: <https://www1.nyc.gov/html/dot/downloads/pdf/barnes-dance-study-sept2017.pdf>

Кроме того, отмечается, что большие объемы пешеходного движения в сочетании с применением специальных пешеходных фаз требуют пространства для накапливающихся пешеходов на углах перекрестков. Это актуально и для Санкт-Петербурга, где на перекрестках Невского пр. и Садовой ул. существует дефицит пространства для пешеходов.

Таким образом, опыт применения диагональных переходов неоднозначен, и для разработки методических рекомендаций по их применению необходимы исследования, охватывающие широкий диапазон значений интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков. Выполненный сопоставительный анализ специальной литературы и периодики^{14,15} [2, 5–8, 10–17, 19, 20], а также нормативных документов и методических руководств^{16,17} [4] позволяет сделать следующие предварительные выводы:

- в случаях плотной улично-дорожной сети с небольшими расстояниями между перекрестками в сочетании с незначительными поворотными потоками целесообразно применять фазы

¹⁴ Walk this way. Exclusive Pedestrian Signal Phase Treatments Study. October 2017, URL: <https://www1.nyc.gov/html/dot/downloads/pdf/barnes-dance-study-sept2017.pdf>

¹⁵ URL: <https://www.boston.gov/sites/default/files/file/2020/09/04%20CHAPTER%204%20-%20INTERSECTIONS.pdf>

¹⁶ Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV. 2015. 93 s.

¹⁷ Traffic Engineering Manual. Vol. 3 — Guidance on Treating Pedestrian and Turning Vehicle Conflicts at Signalized Intersections. Victoria State Averment, 2016. 38 p.

Рис. 3. Диагональный переход на косом пересечении улиц 1569 Flatbush Ave — 2151 Nostrand Ave (Нью-Йорк)

Таблица 3

Изменение характеристик функционирования перекрестков после устройства пешеходной фазы и диагональных переходов [19]

Характеристики функционирования перекрестка	Перекресток улиц		
	Yonge и Dundas	Yonge и Bloor	Bay и Bloor
Сокращение затрат времени пешеходом, с	7	8	8
Рост средней задержки автомобилей, с	47	33	59
Рост средней задержки подвижного состава общественного пассажирского транспорта, с	70	–	–
Сокращение суммарной задержки пешеходов, чел.-ч / ч	26	26	18
Рост суммарной задержки пользователей автомобильного транспорта, чел.-ч / ч	23	33	60
Рост суммарной задержки пользователей общественного пассажирского транспорта, чел.-ч / ч	21	–	–
Суммарный рост затрат времени в расчете на одного человека, чел.-ч / ч	18	7	43
Увеличение выбросов CO ₂ в час пик	78 %	41 %	97 %

с конфликтным движением транспортных и пешеходных потоков;

- применение выделенных пешеходных фаз эффективно при сочетании высоких интенсивностей движения пешеходных потоков и отсутствия требований по ограничению длины очередей на подходах к перекрестку;

- условия эффективного применения выделенных пешеходных фаз и устройства диагональных пешеходных переходов, а также допускаемые значения интенсивности конфликтного движения транспортных и пешеходных потоков требуют уточнений, основанных на данных специальных исследований, актуальность которых очевидна.

По мнению авторов, изучение области эффективного применения выделенных пешеходных фаз и диагональных переходов может рассматриваться как оптимизационная задача, в которой минимизируется целевая функция — суммарный ущерб от задержек всех участников движения на перекрестке. Эффективным методом решения рассматриваемой задачи представляется использование микромоделирования транспортных и пешеходных потоков, позволяющее рассмотреть широкий спектр сочетаний значений интенсивностей движения транспорта и пешеходов, а также их распределений по направлениям движения на перекрестках.

Библиографический список

1. Akçelik R. Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis. Australian Road Research Board, Research Report ARR No 123 (7th reprint), 1998. 120 p.
2. Adacher L. A global optimization approach to solve the traffic signal synchronization problem // Procedia — Social and Behavioral Sciences. 2012. Vol. 54. Pp. 1270–1277.
3. Bechtel A. K., MacLeod K. E., Ragland D. R. Pedestrian scramble signal in Chinatown neighborhood of Oakland, California: an evaluation // Transportation Research Record. 2004. Vol. 1878. Issue 1. Pp. 19–26.
4. Tepley S., Allingham D. I., Richardson D. B., Stephenson B. W. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. 3rd Ed. Institute of Transportation Engineers, 2008. 232 p.
5. Chen K., Yu L. Microscopic traffic-emission simulation and case study for evaluation of traffic control strategies // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2007. Vol. 7. Issue 1. Pp. 93–99.
6. Gallivan S., Heydecker B. Optimizing the control performance of traffic signals at a single junction // Transportation Research Part B: Methodological. 1988. Vol. 22 (5). Pp. 357–370.
7. Greenwood C. 'Scramble' crossings: a case study of the Oxford Circus scheme // Traffic Engineering & Control. 2010. Vol. 51. Issue 6. Pp. 223–230.
8. Vaziri B. Exclusive Pedestrian Phase for the Business District Signals in Beverly Hills, 10 Years Later: City of Beverly Hills, California, 1996. URL: http://pedbikesafe.org/PEDSAFE/casestudies_detail.cfm?CM_NUM=47&CS_NUM=23.

9. Asante S., Nagle A. Technical Memorandum. June 4, 2015. Pedestrian Signal Phasing Study. URL: https://www.ctps.org/data/html/studies/bikeped/ped_signal_phase/Literature_Pedestrian_Signal.html.
10. Zvaniga B. Results from the Pedestrian Priority Phase Project at Yonge/Dundas. Toronto Pedestrian Committee, Nov 24 2009. URL: https://www.toronto.ca/wp-content/uploads/2017/11/974e-pedestrian_priority_phase_project.pdf.
11. Hewage K. N., Ruwanpura J. Y. Optimization of Traffic Signal Light Timing Using Simulation // Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Ingalls R. G., Rossetti M. D., Smith J. S., Peters B. A. (eds.). Vol. 2. Pp. 1428–1433.
12. Ivan J. N., McKernan K., Zhang Y., Ravishanker N., Mamun S. A. A study of pedestrian compliance with traffic signals for exclusive and concurrent phasing // Accident Analysis & Prevention. 2017. Vol. 98. Pp. 157–166.
13. Kattan L., Acharjee S., Tay R. Pedestrian scramble operations // Transportation Research Record. 2009. Vol. 2140. No. 1. Pp. 79–84.
14. Ma W., Lin Y., Yang X. Design method of pedestrian phases at multi-phase signal intersection // Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004. Vol. 4 (2). Pp. 103–106.
15. Ma W., Han B., An K., Zhang N. Investigating the applicability of exclusive pedestrian phase at two-phase actuated controlled intersections // Journal of Advanced Transportation. 2015. Vol. 49 (6). Pp. 752–767.
16. Mark R. V. Scramble and Crosswalk Signal Timing, Transportation Research Record 1636. Accessed on Mar. 18th 2013, available at <http://www.enhancements.org/download/trb/1636-013.PDF>.
17. Pitaksringkarn J. P. Implementation of the first pedestrian scramble in downtown San Diego // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, California. 2005. Vol. 5. Pp. 2504–2515.
18. Plazinić B. R., Pantić M. Exclusive pedestrian phases as a measure to improve pedestrian safety on signalized intersections // 7th International Conference «Towards a Humane City» Environmentally Friendly Mobility. Novi Sad, 6th and 7th December, 2019. Pp. 355–362.
19. Rajnath B., Craig T. Pedestrian Scramble Crossings — A Tale of Two Cities. Accessed on Mar. 18th 2013, available at http://www.toronto.ca/transportation/walking/pdf/pedestrian_scramble_crossings.pdf.
20. Saneinejad S. Evaluation of Pedestrian Priority Phases (Scramble Crossings) in Toronto. URL: http://www.tcat.ca/wp-content/uploads/2015/10/Saneinejad_Sheyda-Evaluation-of-Pedestrian-Priority-Phases-in-Toronto-CSF.pdf.
21. Tu T.V., Sano K. Simulation Based Analysis of Scramble Crossings at Signalized Intersections // International Journal of Transportation. 2014. Vol. 2. No. 2. Pp. 1–14.
22. Wolput B., Christofa E., Tampère C. M. J. Optimal Cycle Length Formulas for Intersections With or Without Transit Signal Priority // Transportation Research Record. 2016. Vol. 2558. Issue 1. Pp. 78–91.
23. Wu Y., Lu J., Chen H., Yang H. Development of an Optimization Traffic Signal Cycle Length Model for Signalized Intersections in China // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 6. Pp. 1–9.

References

1. Akçelik R. *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis*. Australian Road Research Board, Research Report ARR No 123 (7-th reprint), 1998, 120 p.
2. Adacher L. A global optimization approach to solve the traffic signal synchronization problem. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2012, vol. 54, pp. 1270–1277.
3. Bechtel A. K., MacLeod K. E., Ragland D. R. Pedestrian scramble signal in Chinatown neighborhood of Oakland, California: an evaluation. *Transportation Research Record*, 2004, vol. 1878, issue 1, pp. 19–26.
4. Teply S., Allingham D. I., Richardson D. B., Stephenson B. W. *Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections*, 3-rd ed. Institute of Transportation Engineers, 2008, 232 p.
5. Chen K., Yu L. Microscopic traffic-emission simulation and case study for evaluation of traffic control strategies. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2007, vol. 7, issue 1, pp. 93–99.
6. Gallivan S., Heydecker B. Optimizing the control performance of traffic signals at a single junction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1988, vol. 22 (5), pp. 357–370.
7. Greenwood C. 'Scramble' crossings: a case study of the Oxford Circus scheme. *Traffic Engineering & Control*, 2010, vol. 51, issue 6, pp. 223–230.
8. Vaziri B. *Exclusive Pedestrian Phase for the Business District Signals in Beverly Hills*. 10 Years Later: City of Beverly Hills, California, 1996. Available at: http://pedbikesafe.org/PEDSAFE/casestudies_detail.cfm?CM_NUM=47&CS_NUM=23
9. Asante S., Nagle A. Technical Memorandum. June 4, 2015. Pedestrian Signal Phasing Study. Available at: https://www.ctps.org/data/html/studies/bikeped/ped_signal_phase/Literature_Pedestrian_Signal.html
10. Zvaniga B. Results from the Pedestrian Priority Phase Project at Yonge/Dundas. Toronto Pedestrian Committee, Nov 24 2009. Available at: https://www.toronto.ca/wp-content/uploads/2017/11/974e-pedestrian_priority_phase_project.pdf
11. Hewage K. N., Ruwanpura J. Y. *Optimization of Traffic Signal Light Timing Using Simulation*. Proceedings

of the 2004 Winter Simulation Conference. Ingalls R. G., Rossetti M. D., Smith J. S., Peters B. A. (eds.). Vol. 2, pp. 1428–1433.

12. Ivan J. N., McKernan K., Zhang Y., Ravishanker N., Mamun S. A. A study of pedestrian compliance with traffic signals for exclusive and concurrent phasing. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, vol. 98, pp. 157–166.

13. Kattan L., Acharjee S., Tay R. Pedestrian scramble operations. *Transportation Research Record*, 2009, vol. 2140, no. 1, pp. 79–84.

14. Ma W., Lin Y., Yang X. Design method of pedestrian phases at multi-phase signal intersection. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2004, vol. 4 (2), pp. 103–106.

15. Ma W., Han B., An K., Zhang N. Investigating the applicability of exclusive pedestrian phase at two-phase actuated controlled intersections. *Journal of Advanced Transportation*, 2015, vol. 49 (6), pp. 752–767.

16. Mark R. V. *Scramble and Crosswalk Signal Timing*. *Transportation Research*. Record 1636. Available at: <http://www.enhancements.org/download/trb/1636-013.PDF>. (Accessed on Mar. 18-th 2013).

17. Pitaksringkarn J. P. *Implementation of the first pedestrian scramble in downtown San Diego*. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, California, 2005, vol. 5, pp. 2504–2515.

18. Plazinić B. R., Pantić M. *Exclusive pedestrian phases as a measure to improve pedestrian safety on*

signalized intersections. Proc. of the 7-th International Conference “Towards a Humane City” Environmentally Friendly Mobility. Novi Sad, 6-th and 7-th December, 2019, pp. 355–362.

19. Rajnath B., Craig T. *Pedestrian Scramble Crossings — A Tale of Two Cities*. Available at: http://www.toronto.ca/transportation/walking/pdf/pedestrian_scramble_crossings.pdf. (Accessed: March 18, 2013).

20. Saneinejad S. *Evaluation of Pedestrian Priority Phases (Scramble Crossings) in Toronto*. Available at: http://www.tcat.ca/wp-content/uploads/2015/10/Saneinejad_Sheyda-Evaluation-of-Pedestrian-Priority-Phases-in-Toronto-CSF.pdf

21. Tu T.V., Sano K. Simulation Based Analysis of Scramble Crossings at Signalized Intersections. *International Journal of Transportation*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 1–14.

22. Wolput B., Christofa E., Tampère C. M. J. Optimal Cycle Length Formulas for Intersections With or Without Transit Signal Priority. *Transportation Research Record*, 2016, vol. 2558, issue 1, pp. 78–91.

23. Wu Y., Lu J., Chen H., Yang H. Development of an Optimization Traffic Signal Cycle Length Model for Signalized Intersections in China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 6, pp. 1–9.