

На правах рукописи



Сильченков Дмитрий Дмитриевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО
ДВИЖЕНИЯ НА КОЛЬЦЕВОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ
СО СВЕТОФОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ
И ПРОРЕЗАННЫМ ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОСТРОВКОМ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Комаров Юрий Яковлевич.

Официальные оппоненты: **Новиков Иван Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В. Г. Шухова»,
кафедра «Эксплуатация и организация движения
автотранспорта», директор
Транспортно-технологического института;

Сидоров Борис Андреевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет», г. Екатеринбург,
кафедра «Автомобильного транспорта
и транспортной инфраструктуры», заведующий.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», г. Ростов-на-Дону.**

Защита состоится «26» сентября 2023 г., в 12:00 часов, на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул. д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220). Тел/факс: (812) 316-58-73, E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/silchenkov-dmitriy-dmitrievich>

Автореферат разослан «11» мая 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е. В. Куракина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При сохраняющихся высоких темпах автомобилизации в Российской Федерации транспортная инфраструктура городов развивается более инертно, что приводит к росту транспортных заторов, к потерям в дорожном движении (ДД), эмоционально – психологическому напряжению водителей и пассажиров, находящихся в транспортном заторе, что, зачастую, побуждает их к нарушениям правил дорожного движения (ПДД), влечет за собой рост аварийности. Повышение безопасности дорожного движения (БДД) и разработка новых технологий в организации дорожного движения (ОДД) являются приоритетными направлениями государственной политики и важными факторами обеспечения устойчивого социально-экономического и демографического развития страны, что закреплено в Указе Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», Стратегии безопасности дорожного движения на 2018–2024 года и в других правовых актах. Применение «каноничных» методов и технологий по ОДД зачастую не дает значительных результатов по повышению БДД, уменьшению транспортных заторов, снижению транспортных задержек ввиду описанных выше условий. Применение круговых развязок позволяет обеспечить безопасные и удобные условия движения на пересечении улиц и дорог. Ввиду роста автомобилизации, мобильности населения в современных условиях общепринятые круговые пересечения зачастую не способны обеспечить необходимый уровень безопасности и обслуживания движения. Таким образом, исследования, направленные на решение транспортных проблем, в частности на снижение потерь времени участниками ДД, путем развития технологии организации круговых пересечений с разработкой алгоритмов обоснования оптимальных решений, являются актуальными.

Степень разработанности темы. Работы в области исследований круговых пересечений ведутся в научных и высших образовательных учреждениях, таких как: ОАО *Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта* (НииАТ), ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ), ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ) и др. Весомый вклад в исследование круговых пересечений внесли следующие отечественные и зарубежные ученые: Витоллин С. В., Жанказиев С. В., Зедгенизов А. В., Зырянов В. В., Лагерев Р. Ю., Левашев А. Г., Липницкий А. С., Литвинов А. В., Михайлов А. Ю., Новиков И. А., Поздняков М. Н., Поспелов П. И., Сидоров Б. А., Сильянов В. В.,

Солодкий А. И., Чичин С. В., Чумаков Д. Ю., Шаром М. И., Щит Б. А., Tolla-
zzi T., Mauro R., Branco F., Bulla L. A., Castro W., Brilon W., Mauro R., и др.

Анализ нормативно-технической литературы, а также научных работ в области применения круговых пересечений показывает, что исследования по определению оптимальных параметров круговых пересечений со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком (КПСРПЦО) в зависимости от характеристик движения не получили должного развития. КПСРПЦО нашли ограниченное применение на улично-дорожной сети (УДС) городов: Минска, Самары, Фэрфакса и др.

Цель и задачи исследования:

Цель исследования – повышение эффективности использования кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком.

Задачи исследования:

1. Анализ применения и существующих технологий ОДД на круговых пересечениях.

2. Разработка имитационной модели дорожного движения на участке УДС крупного города, проверка ее валидатности.

3. Обоснование области применения КПСРПЦО, как технологии ОДД, на одноуровневых пересечениях.

4. Исследование закономерностей транспортных задержек от организационно – планировочных факторов КПСРПЦО и характеристик дорожного движения.

5. Разработка математических зависимостей, позволяющих определить оптимальные параметры КПСРПЦО.

6. Разработка методики и рекомендаций по применению КПСРПЦО на УДС.

Объектом исследования является дорожное движение на кольцевом пересечении со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком.

Предметом исследования является эффективность организации дорожного движения на кольцевом пересечении со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком.

Рабочая гипотеза. Малое количество КПСРПЦО на УДС городов обусловлено отсутствием системной информации о возможности применения, методик расчета параметров, транспортных задержках и т.д., может быть повышено за счет создания методики обоснования параметров и рекомендаций по применению данной технологии ОДД.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования являются научные работы и нормативно-методические документы отечественных и зарубежных авторов в области круговых и регулируемых пересечений. При решении поставленных задач использовались методы анализа,

натурного обследования транспортных потоков, компьютерного моделирования (микромодели ДД), метод планирования эксперимента и равномерного поиска, методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается:

1. Классифицированы рекомендации по организации движения пешеходов на кольцевых пересечениях.
2. Впервые обоснована область эффективного применения КПСРПЦО в зависимости от средних интенсивностей дорожного движения на пересекающихся улицах (дорогах) с учетом доли левоповоротного движения по основному направлению.
3. Определены зависимости времени задержки от организационно – планировочных факторов и характеристик дорожного движения на КПСРПЦО.
4. Впервые предложено рассматривать кольцевую часть КПСРПЦО как совокупность полуколец. Предложен параметр «пропускная способность полосы движения полукольца (ПСПК)». Установлена зависимость «ПСПК» от организационно – планировочных факторов на КПСРПЦО.
5. Определены зависимости числа полос движения и режима работы светофорной сигнализации на КПСРПЦО от характеристик дорожного движения.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Разработана методика определения основных геометрических параметров кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком (диаметр центрального островка, количество полос на кольцевой части транспортной развязки) и параметров светофорной сигнализации (длительность светофорного цикла и фаз регулирования). Применение адаптированной методики расчета параметров светофорной сигнализации позволяет уменьшить среднюю транспортную задержку на транспортной развязке в среднем на 28 %, а в наиболее вероятном режиме работы, когда сумма фазовых коэффициентов по главной и второстепенной дороге находится в границах 0,5..0,7, – 40 %.
2. Разработана номограмма выбора планировочного решения перекрестка, отличающаяся от существующих тем, что определена область эффективного применения кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком, с учетом доли левоповоротного движения по основному направлению.
3. Разработанная математическая модель дорожного движения на улично-дорожной сети крупного города в программном комплексе Aimsun позволяет оценить применение кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком, как высокоэффективное средство в борьбе с транспортными заторами.

Область исследования диссертационной работы соответствует паспорту специальности ВАК 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

по пунктам 8 – «Исследования в области технологий организации дорожного движения, развития технических средств организации дорожного движения», 9 – «Исследования в области безопасности движения с учетом технического состояния автомобиля, дорожной сети, организации движения автомобилей, качеств водителей; проведение дорожно-транспортной экспертизы, разработка мероприятий по снижению аварийности».

Положения, выносимые на защиту:

1. Область эффективного применения КПСРПЦО в зависимости от характеристик транспортных потоков на участке УДС.

2. Установленные закономерности транспортных задержек от транспортных и организационно-планировочных факторов на КПСРПЦО.

3. Область применения методики Ф. Вебстера по расчету транспортной задержки на КПСРПЦО.

4. Разработанная методика обоснования параметров и рекомендации по применению КПСРПЦО.

Степень достоверности научных положения и результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, подтверждается хорошим согласованием результатов с современными результатами практических работ и экспериментальных исследований в области круговых и регулируемых пересечений.

Апробации работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на внутривузовских научно-практических конференциях ВолгГТУ (Волгоград, 2016–2021), XXII Региональная конференция молодых учёных Волгоградской области (Волгоград, 2017), международной научно-практической конференции «Развитие науки в современном мире» (Душанбе, 2017), международной научно-практической конференции «Инновационные процессы в научной среде» (Прага, 2017), международной научно-практической конференции «Результаты современных научных исследований и разработок» (Минск, 2017); VII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орел, 2021), XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России» (Волгоград, 2021), научных семинарах кафедры «Автомобильный транспорт» ВолгГТУ в 2016–2021 годах, в статьях, определенных в перечне ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ в том числе: 3 печатные работы опубликованы в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 работа в издании, включенном в международную базу научного цитирования Scopus.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе при обучении бакалавров по направлению 23.03.01 «Технология транспортных процессов» по дисциплине «Моделирование дорожного движения» и магистров по направлению 23.04.01 «Технология транспортных процессов» по дисциплине «Автоматизированные системы управления дорожным движением» на факультете автомобильного транспорта Волгоградского государственного технического университета, при выборе параметров кольцевых пересечений в ООО «Иноватор-строитель».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 108 наименований. Текст диссертации изложен на 187 страницах, включает 29 таблиц, 59 иллюстраций, 4 приложения.

Основное содержание работы:

Во введении обоснована актуальность проблемы, определены цели и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая ценность, изложены положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе проведен анализ применения и существующих технологий ОДД на круговых пересечениях. Выявлены основные преимущества и недостатки круговых пересечений. Установлено, что КПСРПЦО нашли ограниченное применение на УДС городов ввиду отсутствия научно-методической основы их применения. Определены основные идеи КПСРПЦО: предоставление преимущества движения главному направлению, заключающегося в организации сквозного проезда через центральный островок, и снижение вероятности блокировки транспортного узла левоповоротными потоками. На основе анализа научно-методической литературы установлены принципы ОДД на КПСРПЦО. Классифицированы существующие отечественные и зарубежные рекомендации по организации движения пешеходов вблизи кольцевых пересечений.

Во второй главе анализируется ДД на реальном пересечении пр. им. В. И. Ленина и ул. 7-ой Гвардейской Бригады в г. Волгограде. Описывается создание модели ДД в программном комплексе Aimsun, проводится проверка ее валидности. На откалиброванной модели перекрестка строится модель КПСРПЦО с диаметром 40 м. В результате чего достигается снижение средней транспортной задержки на пересечении в 8,7 раз. Расчетными методами показано, что КПСРПЦО безопаснее перекрестка с двумя фазами регулирования и кольцевого пересечения, так как совмещает в себе элементы кольцевого пересечения и принцип разделения транспортных потоков во времени. На основе моделирования ДД в программном комплексе Aimsun разработана номограмма выбора планировочного решения перекрестка, оценивающая область эффективного применения КПСРПЦО.

В третьей главе приведены результаты исследований закономерностей транспортных задержек от организационно-планировочных факторов КПСРПЦО и характеристик дорожного движения.

В четвертой главе на основе анализа экспериментальных и расчетных данных получены зависимости для определения числа полос на КПСРПЦО. Впервые было предложено рассматривать круговую часть КПСРПЦО как совокупность полуколец, так как в зависимости от транспортных потоков по главному и второстепенному направлению дорожно-транспортные ситуации (ДТС) на полукольцах могут отличаться друг от друга. Адаптирована методика расчета светофорной сигнализации Ф. Вебстера для условий КПСРПЦО, определена ее эффективность, систематизированы рекомендации по применению КПСРПЦО, как технологии ОДД на одноуровневых пересечениях. Приведена методика обоснования параметров КПСРПЦО. Проведена апробация предлагаемой методики для пересечения пр. им. В. И. Ленина и ул. 7-й Гвардейской Бригады.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Область эффективного применения КПСРПЦО в зависимости от характеристик транспортных потоков на участке УДС

Для определения области эффективного применения КПСРПЦО было проведено исследование методом равномерного поиска, моделированием ДД в программном комплексе Aimsun трех технологий ОДД: перекресток со светофорным регулированием (см. рис. 1, а), перекресток с выделенными полосами для транспортных средств, ожидающих поворот налево, (см. рис. 1, б), КПСРПЦО с диаметром 40 м (см. рис. 1, в), которые сравнивались по величине средней задержки на пересечении.

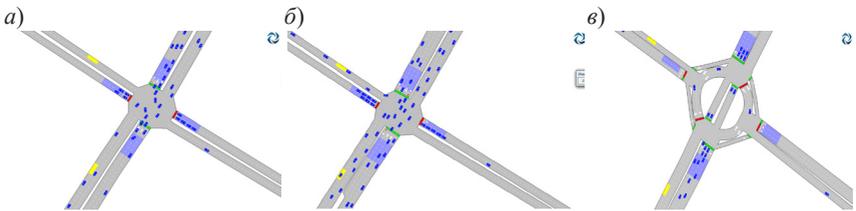


Рисунок 1 – Модели сравниваемых схем ДД: а) перекресток со светофорным регулированием, режим светофорной сигнализации – 2 фазы;
 б) перекресток с выделенными полосами для транспортных средств, ожидающих поворот налево, режим светофорной сигнализации – 3 фазы;
 в) КПСРПЦО с диаметром 40 м, режим светофорной сигнализации – 2 фазы

Исходя из геометрических размеров, для подходов к перекресткам определены потоки насыщения по главной и второстепенной дороге. Далее определены интенсивности по главной и второстепенной дороге, которые составили: 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,45 от потока насыщения. Затем определены интенсивности прямо,

лево – и правоповоротных потоков. Далее были рассчитаны структуры светофорных циклов. Для КПСРПЦО был выбран двухфазный светофорный цикл.

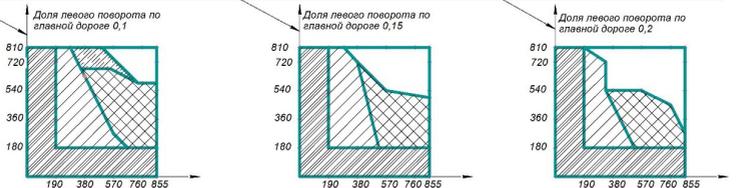
Интенсивности, структура светофорного цикла задавалась в моделях ДД.

Так как методика расчета светофорного цикла для КПСРПЦО не представлена в научно – технической литературе (приведена рекомендация по применению методики Ф. Вебстера), то для каждой пары интенсивностей (главная и второстепенная дорога) выполнено моделирование при различных структурах светофорного цикла $\frac{30}{96}$, $\frac{40}{96}$, $\frac{50}{96}$ или $\frac{60}{96}$ где числитель дроби – время (с) горения зеленого сигнала светофора по главной дороге, знаменатель – длительность (с) цикла регулирования, сумма переходных сигналов светофора составляла 6 с.

По окончании моделирования выбраны значения транспортных задержек по каждому подходу. Рассчитана средняя задержка для каждой схемы ОДД.

После выполнения всех сценариев и дополнительных сценариев моделирования была разработана номограмма выбора планировочного решения перекрестка, показанная на рисунке 2.

Интенсивность дорожного движения по второстепенной дороге, приходящаяся на одну полосу пр. авт./час.



Интенсивность дорожного движения по главной дороге, приходящаяся на одну полосу, пр. авт./час.

-  - моделирование не проводилось, так как длительность рассчитанных сигналов светофора была меньше 5 с.
-  - эффективна технология с двух фазным светофорным регулированием.
-  - эффективна технология КПСРПЦО.
-  - эффективна технология с выделенными полосами для левого поворота.
-  - задержки более 300с, или в модели движение ТС не возможно, или длительность цикла регулирования больше 120с.

Рисунок 2 – Разработанная номограмма выбора планировочного решения перекрестка

2. Установленные закономерности транспортных задержек от транспортных и организационно – планировочных факторов на КПСРПЦО

Для исследования закономерностей транспортных задержек от организационно-планировочных факторов КПСРПЦО и характеристик ДД на КПСРПЦО был применен метод планирования эксперимента (см. табл. 1 и рис. 3). Вариирование факторов приведено в таблице 2.

Таблица 1 – Исследуемые факторы и функции на КПСРПЦО

Обозначение	Наименование фактора/функции
X_1	интенсивность дорожного движения по основному направлению прямо, проходящая на одну полосу, (пр. ед. / час)
X_2	интенсивность дорожного движения по основному направлению налево, (пр. ед. / час)
X_3	интенсивность дорожного движения по кольцу, проходящая на одну полосу, (пр. ед. / час)
X_4	диаметр островка, (м)
X_5	эффективная длительность цикла регулирования по основному направлению, $\left(\frac{t_{\text{зел}}}{T_{\text{цикла}}}\right)$
X_6	интенсивность дорожного движения по второстепенному направлению, проходящая на одну полосу, (пр. ед. / час)
Y_1	транспортная задержка на одно ТС, движущееся по основному направлению, (с)
Y_2	транспортная задержка на одно ТС, движущееся по второстепенному направлению, (с)

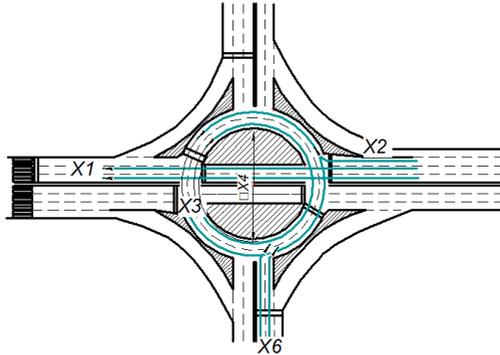


Рисунок 3 – Исследуемые факторы

Таблица 2 – Варьирование факторов

Фактор	$-\alpha (-2)$	-1	0	$+1$	$+\alpha (+2)$	Δ
X_1	50	425	800	1175	1550	375
X_2	25	75	125	175	225	50
X_3	75	150	225	300	375	75
X_4	40	50	60	70	80	10
X_5	$\frac{15}{96}$	$\frac{30}{96}$	$\frac{45}{96}$	$\frac{60}{96}$	$\frac{75}{96}$	$\frac{15}{96}$

Окончание табл. 2

Фактор	$-\alpha (-2)$	-1	0	$+1$	$+\alpha (+2)$	Δ
X_6	50	200	350	500	650	150

При значениях исследуемых факторов ($X_1 - X_6$) коэффициент загрузки подхода по основному направлению будет варьироваться от 0,05 до 2; для второстепенного направления от 0,05 до 1,2. Данное варьирование исследуемых факторов позволяет учесть все множество ДТС: от свободного движения до транспортного затора.

Полученная матрица планирования эксперимента обработана в программном комплексе Statistica. В результате статистической обработки данных получены уравнения множественной регрессии транспортной задержки для основного (1) и второстепенного (2) направления:

$$Y_1 = 0,83 \times X_1 - 2416,49 \times X_5 + 3495,99 \times X_5^2 - 2,34 \times X_1 \times X_5. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации полученного уравнения составил $R^2 = 0,997$.

$$Y_2 = 5215,88 \times X_5 + 4110,98 \times X_5^2 - 2,58 \times X_6 + \\ + 2,53 \times X_3 \times X_5 + 4,15 \times X_5 \times X_6. \quad (2)$$

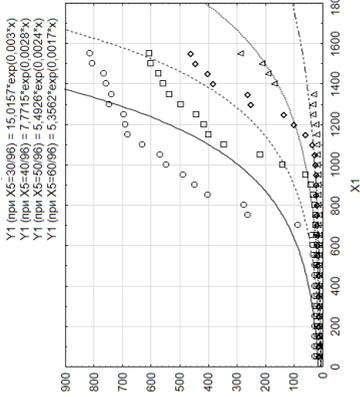
Коэффициент детерминации полученного уравнения составил $R^2 = 0,888$.

Далее проведено исследование функции Y_1 методом равномерного поиска с шагом $\Delta X_1 = 50$, $\Delta X_5 = 10/96$, $\Delta X_4 = 10$ границах $50 \leq X_1 \leq 1550$, $30/96 \leq X_5 \leq 60/96$, $40 \leq X_4 \leq 70$, и Y_2 с шагом $\Delta X_3 = 25$, $\Delta X_5 = 10/96$, $\Delta X_4 = 10$, $\Delta X_6 = 50$ границах $75 \leq X_3 \leq 225$, $30/96 \leq X_5 \leq 60/96$, $40 \leq X_4 \leq 70$, $50 \leq X_6 \leq 450$, так как X_1 , X_3 , X_5 , X_6 – значимые переменные, а X_4 – определяет геометрические размеры пересечения. Полученные экспериментальные данные обработаны в программном комплексе Statistica для определения степени влияния исследуемых факторов на функции. Установлено, что X_1 и X_5 оказывают влияние на Y_1 и X_3 , X_5 и X_6 на Y_2 по экспоненциальной зависимости. Влияние X_4 на Y_1 и Y_2 незначительно (не более 10 %).

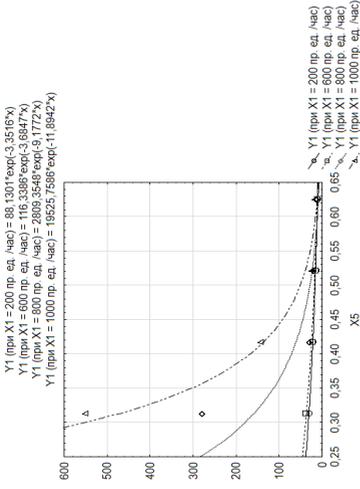
Полученные закономерности хорошо коррелируются с зависимостями транспортной задержки от вида маневра, диаметра островка, интенсивности движения на полосу, представленные в «Методических рекомендациях по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Повышение эффективности использования кольцевых развязок», одобренные Научно-техническим советом ОАО НииАТ и секцией «Государственная политика в области автомобильного городского пассажирского транспорта» научно-технического совета Министерством транспорта Российской Федерации.

На рисунках 4 и 5 приведены примеры полученных закономерности.

а) влияние X_1



б) влияние X_5



в) влияние X_4

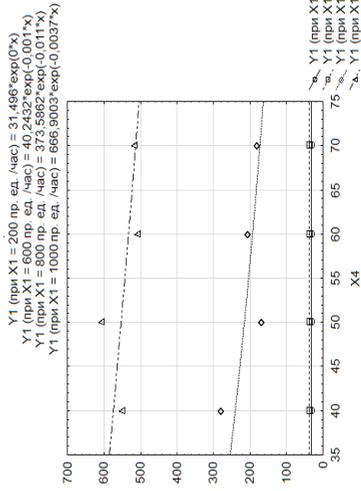
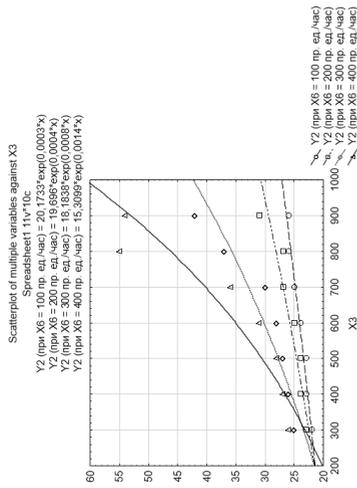
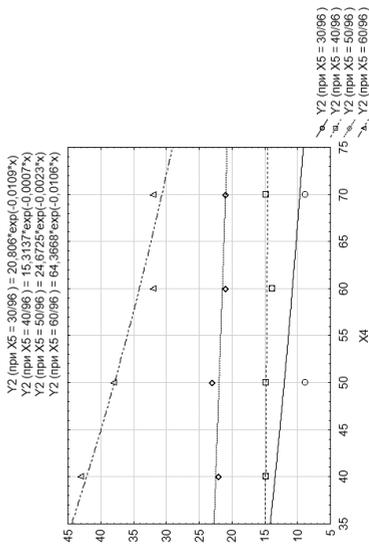


Рисунок 4 — Влияние факторов на Y_1

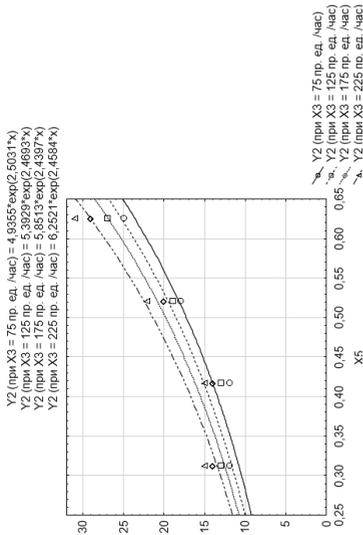
а) Влияние X_3



б) Влияние X_4



б) Влияние X_5



в) Влияние X_6

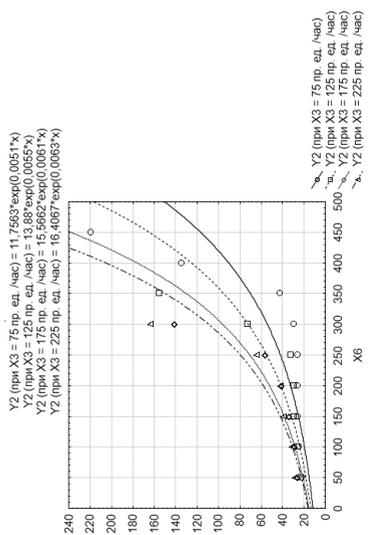


Рисунок 5 – Влияние факторов на Y_2

3. Область применения методики Ф. Вебстера по расчету транспортной задержки на КПСРПЦО

В зависимости от интенсивностей транспортных потоков по главным и второстепенным направлениям ДТС на полукольцах КПСРПЦО различается.

Было проведено исследование по определению пропускной способности полосы движения полукольца (ПСПК) КПСРПЦО в зависимости от двух факторов: X_4 – диаметра островка, X_5 – эффективной длительности цикла регулирования по основному направлению.

Для этого в моделях КПСРПЦО (с диаметрами центрального островка 40, 50, 60 и 70 м) задавалась избыточная интенсивность транспортного потока (1500 пр. единиц/час на одну полосу движения), движущегося по 3/4 части кольца КПСРПЦО. Определено количество транспортных средств (ТС), прошедших через транспортную развязку за 1 час моделирования, которое принималось равным пропускной способности полосы движения полукольца КПСРПЦО.

В результате была получена следующая зависимость 3:

$$\text{ПСПК} = 1286,55 - 1243,2 \times X_5. \quad (3)$$

Для каждой экспериментальной задержки по главному направлению была рассчитана задержка по формуле Ф. Вебстера и степень насыщенности направления (χ), для второстепенного направления – задержка, степень насыщенности направления, нагрузка полукольца КПСРПЦО, которая оценивалась выражением $\frac{X_3 + X_6}{\text{ПСПК}}$.

Установлено, что для главного направления экспериментальные и расчетные данные, выполненные по методике Ф. Вебстера, сходятся при степени насыщенности направления $\chi \leq 1$; для второстепенного направления – при одновременном выполнении условий: $\chi \leq 0,72$ и $\frac{X_3 + X_6}{\text{ПСПК}} \leq 0,88$.

4. Описание разработанной методики обоснования оптимальных параметров и рекомендаций по применению КПСРПЦО

Полученное неравенство $\frac{X_3 + X_6}{\text{ПСПК}} \leq 0,88$ было модернизировано в формулу по определению достаточного количества полос (n) на кольцевой части КПСРПЦО. Для этого значение $\frac{X_3 + X_6}{\text{ПСПК}}$ не должно превышать 0,7, чтобы в конце моделирования на второстепенном направлении не образовывались значительные очереди ТС (более 10 ТС):

$$n \geq \frac{N_{\text{втор}} + N_{\text{кольцо}}}{0,7 \times \text{ПСПК}}, \quad (4)$$

Решением системы неравенств 5 была адаптирована существующая методика Ф. Вебстера по расчету светофорного цикла для условий движения на КПСРПЦО:

$$\begin{cases} \chi_{\text{глав}} \leq 1; \\ \chi_{\text{втор}} \leq 0,72. \end{cases} \quad (5)$$

Степень насыщенности направления χ определяется в соответствии с выражением 6.

$$\chi = \frac{N_i * T_{\text{цикла}}}{M_i * t_{\text{зел}}}, \quad (6)$$

где N_i – приведенная интенсивность дорожного движения (пр. ед./час); M_i – поток насыщения (пр. ед./час); $T_{\text{цикла}}$ – длительность цикла регулирования, с; $t_{\text{зел}}$ – длительность разрешающего сигнала по данному направлению, с.

Выражаем $\chi_{\text{глав}}$ и $\chi_{\text{втор}}$ по формуле 6, получено:

$$\begin{cases} \frac{N_{\text{глав}} \times T_{\text{цикла}}}{M_{\text{глав}} \times t_{\text{глав}}} \leq 1; \\ \frac{N_{\text{втор}} \times T_{\text{цикла}}}{M_{\text{втор}} \times t_{\text{втор}}} \leq 0,72; \end{cases} \quad (7)$$

Так как на развязке осуществляется двухфазное светофорное регулирование, то

$$T_{\text{цикла}} = t_{\text{глав}} + t_{\text{втор}} + t_{\text{перех}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{глав}}$ – время горения зеленого сигнала светофора для главного направления, с; $t_{\text{втор}}$ – время горения зеленого сигнала светофора для второстепенного направления и кольцевой части, с; $t_{\text{перех}}$ – время переходных сигналов, с.

$$\begin{cases} N_{\text{глав}} \times T_{\text{цикла}} \leq M_{\text{глав}} \times t_{\text{глав}}; \\ N_{\text{втор}} \times T_{\text{цикла}} \leq 0,72 \times M_{\text{втор}} \times (T_{\text{цикла}} - t_{\text{перех}} - t_{\text{глав}}). \end{cases} \quad (9)$$

Решив данную систему неравенств, получено:

$$\begin{cases} t_{\text{глав}} \geq \frac{0,72 \times t_{\text{перех}} \times M_{\text{втор}} \times N_{\text{глав}}}{0,72 \times M_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}} - M_{\text{глав}} \times N_{\text{втор}} - 0,72 \times N_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}}}; \\ t_{\text{втор}} \geq \frac{t_{\text{перех}} \times M_{\text{глав}} \times N_{\text{втор}}}{0,72 \times M_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}} - M_{\text{глав}} \times N_{\text{втор}} - 0,72 \times N_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}}}; \\ T_{\text{цикла}} \geq \frac{0,72 \times t_{\text{перех}} \times M_{\text{втор}} \times M_{\text{глав}}}{0,72 \times M_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}} - M_{\text{глав}} \times N_{\text{втор}} - 0,72 \times N_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}}}. \end{cases} \quad (10)$$

После перехода к фазовым коэффициентам (деля числитель и знаменатель дробей формулы 10 на $M_{\text{глав}} \times M_{\text{втор}}$), получена измененная система неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{зглав}} \geq \frac{0,72 \times t_{\text{перех}} \times y_{\text{глав}}}{0,72 - y_{\text{втор}} - 0,72 \times y_{\text{глав}}}; \\ t_{\text{звтор}} \geq \frac{t_{\text{перех}} \times y_{\text{втор}}}{0,72 - y_{\text{втор}} - 0,72 \times y_{\text{глав}}}; \\ T_{\text{цикла}} \geq \frac{0,72 \times t_{\text{перех}}}{0,72 - y_{\text{втор}} - 0,72 \times y_{\text{глав}}}; \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{зглав}} \geq T_{\text{цикла}} \times y_{\text{глав}}; \\ t_{\text{звтор}} \geq \frac{T_{\text{цикла}} \times y_{\text{втор}}}{0,72}; \\ T_{\text{цикла}} \geq \frac{0,72 \times t_{\text{перех}}}{0,72 - y_{\text{втор}} - 0,72 \times y_{\text{глав}}}; \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{зглав}} \geq T_{\text{цикла}} \times y_{\text{глав}}; \\ t_{\text{звтор}} \geq 1,39 \times T_{\text{цикла}} \times y_{\text{втор}} \\ T_{\text{цикла}} \geq \frac{t_{\text{перех}}}{1 - (1,39 \times y_{\text{втор}} + y_{\text{глав}})}; \end{array} \right. \quad (13)$$

Для одновременного выполнения всех неравенства в формуле 13 знаки неравенств заменены на знаки равно.

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{\text{зглав}} = T_{\text{цикла}} \times y_{\text{глав}}; \\ t_{\text{звтор}} = 1,39 \times T_{\text{цикла}} \times y_{\text{втор}}; \\ T_{\text{цикла}} = \frac{t_{\text{перех}}}{1 - (1,39 \times y_{\text{втор}} + y_{\text{глав}})}; \end{array} \right. \quad (14)$$

При расчете по формуле 14 длительность цикла, время горения сигналов светофора получаются по величине малыми. Для устранения данного недостатка адаптируем методику Ф. Вебстера по расчету светофорного цикла получившимся коэффициентом «1,39» для второстепенной дороги. Получим следующие формулы для светофорного цикла:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{цикла}} = \frac{1,5 \times t_{\text{перех}} + 5}{1 - (1,39 \times y_{\text{втор}} + y_{\text{глав}})}; \\ t_{\text{зглав}} = \frac{(T_{\text{цикла}} - t_{\text{перех}}) \times y_{\text{глав}}}{1,39 \times y_{\text{втор}} + y_{\text{глав}}}; \\ t_{\text{звтор}} = \frac{1,39 \times (T_{\text{цикла}} - t_{\text{перех}}) \times y_{\text{втор}}}{1,39 \times y_{\text{втор}} + y_{\text{глав}}}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Для проверки эффективности адаптированной методики в сравнении со стандартной было проведено моделирование ДД на КПСРПЦО в программном комплексе Aimsun.

В результате установлено, что применение адаптированной методики расчета параметров светофорной сигнализации позволяет уменьшить среднюю транспортную задержку на транспортной развязке в среднем на 28 %, а в наиболее вероятном режиме работы, когда сумма фазовых коэффициентов по главной и второстепенной дороге находится в границах 0,5..0,7, – 40 %.

Далее показана блок-схема разработанной методики обоснования оптимальных параметров КПСРПЦО (рис. 6) и приведено ее описание.

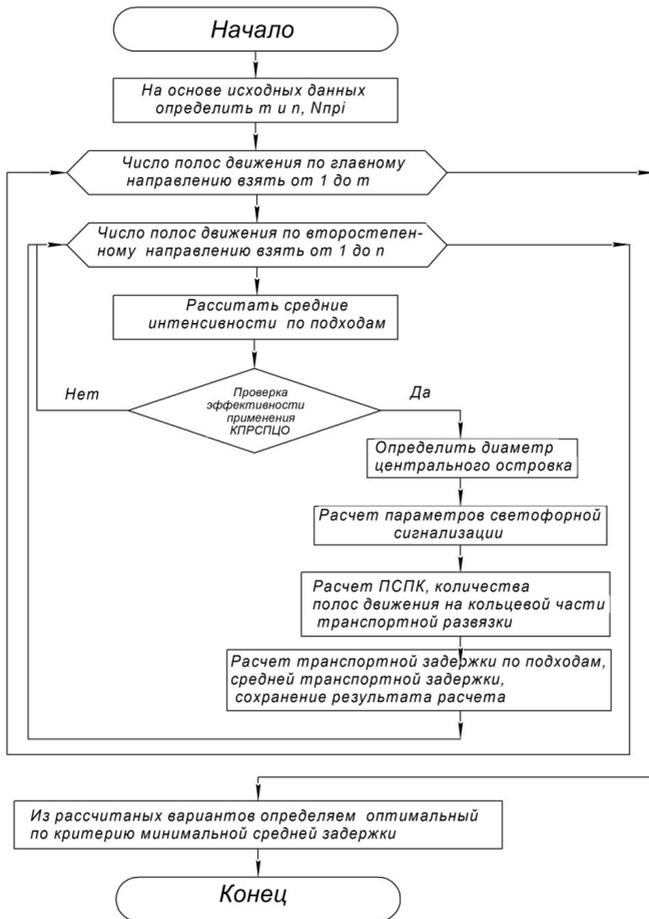


Рисунок 6 – Блок-схема методики обоснования параметров КПСРПЦО

На первом этапе происходит анализ участка УДС. Определяется возможность организации КПСРПЦО, максимальное количество полос движения по главному направлению (m) и второстепенному направлению (n) исходя из доступного пространства на участке УДС. Далее выполняется исследование характеристик дорожного движения: определяется интенсивность движения, приведенная интенсивность движения ($N_{прл}$), доля левого поворота.

На втором этапе последовательно рассчитывают параметры возможных планировочных решений КПСРПЦО. Принимают число полос движения по основному направлению $i = 1$, по второстепенному направлению $j = 1$. Рассчитывают приведенные интенсивности движения по полосам движения. Проверяют возможность применения КПСРПЦО по разработанной номограмме. При успешной проверке определяют минимальный диаметр островка (например, методом динамического габарита), рассчитывают режим работы светофорной сигнализации, ПСПК и достаточное количество полос на кольцевой части КПСРПЦО. Рассчитывают транспортные задержки по подходам, определяют среднюю транспортную задержку на пересечении. Сохраняют результаты расчета. Увеличивают число полос по второстепенному, а затем главному направлению на 1 до тех пор, пока они не станут равны n и m .

На третьем этапе последовательным сравнением всех рассчитанных вариантов определяют оптимальный вариант КПСРПЦО по критерию минимальной средней задержки на пересечении.

Сформулированы рекомендации по применению КПСРПЦО:

- КПСРПЦО рекомендуется применять на перекрестках в соответствии с номограммой выбора планировочного решения перекрестка (см. рис. 2);
- приоритет движения на КПСРПЦО предоставляется загруженному направлению, для него организуется сквозное движение через центральный островок;
 - движение пешеходов и транспорта рекомендуется выполнять в разных уровнях, при невозможности этого, необходимо относить пешеходные переходы от КПСРПЦО в соответствии с существующими рекомендациями по применению круговых пересечений;
 - на развязке организуется двухфазное светофорное регулирование. В первой фазе осуществляется движение по основному направлению, во второй – по второстепенному направлению и кольцу;
 - длительность цикла регулирования, основных фаз регулирования предлагается определять в соответствии с выражением 15;
 - диаметр центрального островка оказывает малое влияние на эффективность ОДД, минимальный диаметр можно определять различными методами, например методом динамического габарита;
 - достаточное количество полос движения по кольцу должно определяться по выражению 4;

- количество полос движения для главной дороги через островок должно быть таково, чтобы степень загрузки направления была меньше или равна 1 ($\chi \leq 1$);
- количество полос движения по второстепенной дороге должно быть таково, чтобы степень загрузки направления была меньше или равна 0,72 ($\chi \leq 0,72$);
- число полос для правоповоротных потоков должно определяться в соответствии с интенсивностью движения по данному направлению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, содержащей решение задачи, направленной на развитие технологии ОДД на круговых пересечениях, имеющим важное значение для развития государственной политики Российской Федерации в области БДД и технологии ОДД.

Основные научно-практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ применения и существующих технологий ОДД на круговых пересечениях. В результате проведенного анализа установлено: КРСРПЦО нашли ограниченное применение на УДС городов, отсутствие системной информации о возможности применения КПСРПЦО, методик расчета параметров пересечения, транспортных задержках и т.д.

2. Разработана имитационной модели дорожного движения на участке УДС крупного города, проведена ее валидатность. Проведенные исследования ДД на разработанной модели в программном комплексе Aimsun, оценивают применение КПСРПЦО, как высоко эффективное решение проблемы транспортных заторов;

3. Обоснована область применения КПСРПЦО, как технологии ОДД, на одноуровневых пересечениях. Разработана номограмма выбора планировочного решения перекрестка, определяющая область эффективного применения КПСРПЦО на УДС городов;

4. Исследованы закономерности транспортных задержек от организационно – планировочных факторов КПСРПЦО и характеристик дорожного движения. Интенсивность ДД (транспортного потока) и эффективная длительность цикла регулирования по основному направлению оказывают влияние на транспортную задержку по основному направлению по экспоненциальной зависимости. Интенсивность ДД (транспортного потока), движущегося по кольцу, эффективная длительность цикла регулирования по основному направлению и интенсивность ДД (транспортного потока), движущегося по второстепенному направлению, оказывают влияние на транспортную задержку на второстепенному направлению также по экспоненциальной зависимости.

5. Разработаны математические зависимости числа полос движения и режима работы светофорной сигнализации на КПСРПЦО от характеристик

дорожного движения. Минимальный диаметр можно определять различными методами, например методом динамического габарита, увеличение диаметра приводит к снижению транспортной задержки не более чем на 10 %.

6. Разработана методика обоснования параметров и рекомендаций по применению КПСРПЦО на УДС.

Применение разработанной методики и рекомендаций позволит повысить эффективность ОДД на кольцевых пересечениях со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. Сильченков, Д. Д. Определение условий применения формулы Ф. Вебстера по определению транспортной задержки на кольцевом пересечении со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком / Д.Д. Сильченков, Ю.Я. Комаров, С. В. Ганзин // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 1. – С. 76–86. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-1-76.

2. Сильченков, Д. Д. Определение пропускной способности полосы движения кольцевой части кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком / Д.Д. Сильченков, С.В. Ганзин, Ю.А. Сильченкова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 2. – С. 79–85. – DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-79. – URL: http://intellekt-izdanie.osu.ru/arch/2021_2_79.pdf

3. Мероприятия по организации пешеходного движения на кольцевых пересечениях / Д.Д. Сильченков, Г.С. Закожурникова, Ю.А. Сильченкова, С.С. Закожурников // Дороги и мосты. – 2021. – № 1 (45). – С. 170–178.

В изданиях, входящих в базу Scopus

4. Adaptation of the Traffic Signal Control Design Method to a Hamburger Roundabout (Адаптация методики расчета светофорного цикла для кругового пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком) / Д.Д. Сильченков, Ю.А. Сильченкова, Г.С. Закожурникова, С.С. Закожурников // Architecture and Engineering. – 2021. – Vol. 6, issue 3. – С. 70–76. – DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-3-70-76.

В других изданиях

5. Определение условий эффективного применения кольцевого пересечения со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком (КПСРПЦО) / Д.Д. Сильченков, А.В. Лемешкин, В.С. Метлев, В.В. Ульяновский // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 2. – С. 29-33.

6. Исследование транспортных задержек на кольцевом пересечении со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком / Д.Д. Сильченков, А.В. Лемешкин, Ю.Я. Комаров, В.С. Метлев // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 4. – С. 27-30.

7. Применение кольцевой развязки со светофорным регулированием и прорезанным центральным островком на улично-дорожной сети г. Волгограда / Д.Д. Сильченков, А.Д. Роговая, Ю.В. Шевченко, Д.С. Тупота // Молодой учёный. – 2020. – № 21 (311), ч. 7. – С. 533–536.

8. Сложно-кольцевые пересечения. Методика по решению проблем безопасности дорожного движения и пропускной способности на сложно-кольцевых пересечениях / Д.Д. Сильченков, Е.В. Катруш, А.А. Игнатов, Ю.М. Чижилова // Школа Науки. – 2018. – № 1 (1) Апрель. – С. 3–5.

9. Сильченков, Д.Д. Повышение безопасности дорожного движения на участке ул. Карбышева в границах ул. Молодогвардейцев и бул. Профсоюзов (г. Волжский) / Д.Д. Сильченков, Е.В. Катруш, Н.П. Агапитов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2017. – № 4 (21). – С. 30–34.

10. Сильченков, Д.Д. Полный факторный эксперимент на подходе к кольцу ВПЗ со стороны ул. Пушкина г. Волжского / Д.Д. Сильченков, Е.В. Катруш, В.Н. Росицкий // Молодой учёный. – 2017. – № 48 (182), ч. I. – С. 45–48.

11. Применение перекрёстка с двойным симметричным перестроением для совершенствования организации дорожного движения (ОДД) на участке в г. Волгограде / А.Н. Злобин, Н.В. Фурцева, Д.О. Сидоркин, Ю.Я. Комаров, Д.Д. Сильченков // Молодой учёный. – 2017. – № 13 (147), ч. I. – С. 44–46.

12. Совершенствование организации дорожного движения на пересечении проспекта Университетский и ул. Казахская участка 2-й Продольной магистрали г. Волгограда / Д.Д. Сильченков, М.А. Дементьевский, Н.П. Агапитов, Е.В. Катруш // Молодой учёный. – 2017. – № 8 (142), ч. 1. – С. 72–79.

13. Совершенствование организации дорожного движения на участке улично-дорожной сети в период дорожно-строительных работ в Волгограде / Е.А. Евдокимов, Д.В. Сенкин, А.В. Бондаренко, Д.Д. Сильченков, Хью Хау Нгуен // Молодой учёный. – 2016. – № 11, ч. 3. – С. 347–354.

14. Использование программного комплекса Aimsun с целью совершенствования организации дорожного движения на пересечении улиц Рокоссовского и Космонавтов в Волгограде / Е.А. Евдокимов, Д.В. Сенкин, А.Г. Ананьев, Д.Д. Сильченков // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – № 4 (162). – С. 75–78.

15. Сильченков, Д.Д. Совершенствование организации дорожного движения на пересечении ул. Рокоссовского и просп. им. Маршала Жукова в Волгограде с помощью пакета прикладных программ Aimsun / Е.А. Евдокимов, Д.В. Сенкин, Д.Д. Сильченков // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 12. – Волгоград, 2015. – № 6 (166). – С. 47–50.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 21.04.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 60.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.