

На правах рукописи



Боярский Сергей Николаевич

Повышение эффективности функционирования
пересечений автомобильных дорог с высоким значением коэффициента
загрузки движением

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны,
ее регионов и городов, организация производства на транспорте

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВПО УГЛТУ)

Научный руководитель: Ковалев Рудольф Николаевич,
заведующий кафедрой экономики транспорта и логистики ФГБОУ ВПО УГЛТУ, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Михайлов Александр Юрьевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет», профессор кафедры менеджмента и логистики на транспорте

Пыталева Ольга Анатольевна,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент кафедры промышленного транспорта

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тихоокеанский государственный университет»

Защита состоится «26» мая 2015 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.02 на базе ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, д.66, зал диссертационного совета, ауд. Б2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО УрГУПС по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66 и на сайте: www.usurt.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Сирина Н.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Для России характерны высокие темпы автомобилизации населения, наращивающие уровень загрузки как улично-дорожной сети городов (УДС), так сетей дорог общего пользования. В крупных городах исчерпывается пропускная способность самой УДС и ее узлов, представленных различными видами пересечений и развязок. Существующая методическая и нормативная база страны, регулирующая методы и способы повышения эффективности организации дорожного движения на пересечениях УДС, разрабатывалась для условий, не предусматривающих высокие значения коэффициента загрузки движением.

Анализ методической и нормативной литературы показывает, что действующие нормативы допускают неоднозначность в назначении типа пересечения и определения областей их эффективного применения. Это затрудняет решение проблемы повышения эффективности организации движения и при высокой загрузке транспортными потоками, и в условиях фактического исчерпания пропускной способности узлов УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования. Кроме того, изменение динамических характеристик подвижного состава автомобильного транспорта изменило целый ряд параметров транспортных потоков, нуждающихся в уточнении.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью поиска методов повышения эффективности движения транспортных потоков при высоком значении коэффициента загрузки движением транспортной сети крупных городов страны. Настоящая работа направлена на повышение эффективности организации движения на основных типах пересечений УДС путем уточнения областей их эффективного применения.

Степень разработанности темы исследования. В России проблемой повышения эффективности функционирования транспортных потоков на пересечениях автомобильных дорог занимались такие ведущие ученые, как В.А. Гохман, Е.М. Лобанов, А.Ю. Михайлов, В.В. Столяров и др. В качестве основного критерия эффективности ими принят критерий минимума приведенных затрат, который основывается на задержке транспорта на пересечении. Но методы определения задержки транспорта, рекомендуемые действующей нормативной литературой, не учитывают ситуации, когда значение коэффициента загрузки движением для данного пересечения больше единицы.

Зарубежные руководства по оценке пропускной способности рассматривают такие ситуации, но постоянно совершенствуются, кроме того, их применимость для отечественных условий при высоких значениях коэффициента загрузки движением не определялась.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в

условиях высокого значения коэффициента загрузки движением на основе критерия минимума задержки транспорта.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Научно обосновать критерий оценки эффективности функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокой загрузки.

2. Обосновать стохастическую дискретно-событийную модель, позволяющую оценивать задержки транспорта и длину очереди на основных типах пересечений и уточнить значения параметров, входящих в эти модели.

3. Определить рациональные области применения основных типов пересечений.

4. Предложить рекомендации по совершенствованию процесса организации движения на основе уточнения выбора типа пересечения.

Объектом исследования является процесс функционирования пересечений УДС города и сети автомобильных дорог общего пользования.

Предметом исследования являются условия эффективного функционирования основных видов пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования.

В качестве **методологии и методов исследования** в диссертационной работе используются: натурные наблюдения состояния транспортных потоков, имитационное моделирование, статистический анализ и экспериментальные исследования транспортных потоков.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Научно обоснованы критерии оценки эффективности функционирования пересечений УДС в условиях высокого коэффициента загрузки движением.

2. Обоснована стохастическая дискретно-событийная модель позволяющая оценивать задержки транспорта и длину очереди на основных типах пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования.

3. На основе сформулированных критериев определены области применения основных типов пересечений.

Теоретическая и практическая значимость работы

В исследовании на основе разработанного метода расчета величины средней задержки транспорта при значениях коэффициента загрузки движением больше единицы определены условия эффективного применения различных типов пересечений автомобильных дорог, что при существующем уровне безопасности движения позволяет снизить задержку транспорта на пересечении.

Результаты работы используются на действующих пересечениях для определения потребности в реконструкции, определения параметров светофорного регулирования при величине загрузки движением больше единицы, при выборе проектируемого пересечения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Эффективность функционирования пересечений УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокой загрузки следует оценивать сочетанием критериев задержка и длина очереди.
2. Стохастическая дискретно-событийная модель позволяет оценивать задержки транспорта и длины очередей на основных типах пересечений.
3. Определение областей эффективного применения основных типов пересечений следует выполнять на основе критериев средней задержки и длины очереди.

Степень достоверности и апробация результатов:

Достоверность результатов исследований и выводов диссертации обусловлена достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Результаты натурных исследований обработаны апробированными на практике методами математической статистики с использованием современных компьютерных методик, анализа и оценки достоверности данных.

Основные результаты работы представлены и одобрены: на всероссийских научно-технических конференциях студентов и аспирантов Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ, 2005–2013); научно-технической конференции, посвященной 55-летию Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС, 2011); XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящённой 60-летию Пермского национально-исследовательского технического университета по актуальным прикладным и фундаментальным вопросам экологии, строительства дорог и транспортных сооружений, транспорта и смежных наук (ПНИТУ, 2013). Кроме того, результаты работы обсуждались на научно-практическом семинаре «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов», проведенном с участием администрации г. Перми и Института транспорта ПНИПУ и Центра дорожной информации (ПНИТУ, 2014).

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе рассматриваются вопросы планировочных решений на пересечениях автомобильных дорог и критерии эффективности движения транспортных потоков.

Выводы автора основываются на работах таких ведущих отечественных и зарубежных ученых, как В.А. Гохман, В.М. Визгалов, Ф. Вебстер, Е.М. Лобанов, А.Ю. Михайлов, М.П. Поляков, Р. Пухар, В.В. Столяров, А.П. Шевяков и др.

Типовые варианты планировочных решений на пересечениях автомобильных дорог, соответствующие альбому типовых проектов и требованиям нормативной литературы, составляют 80 % всех возможных пересечений. Такими пересечениями являются полностью канализированное пересечение и транспортная развязка «клеверный лист», для которых в работе производится сравнение значений критерия эффективности движения транспортных потоков. В случае же регулируемого пересечения

для сравнения выбирается наиболее распространенная двухфазная схема регулирования с левым конфликтным поворотом (рисунок 1).

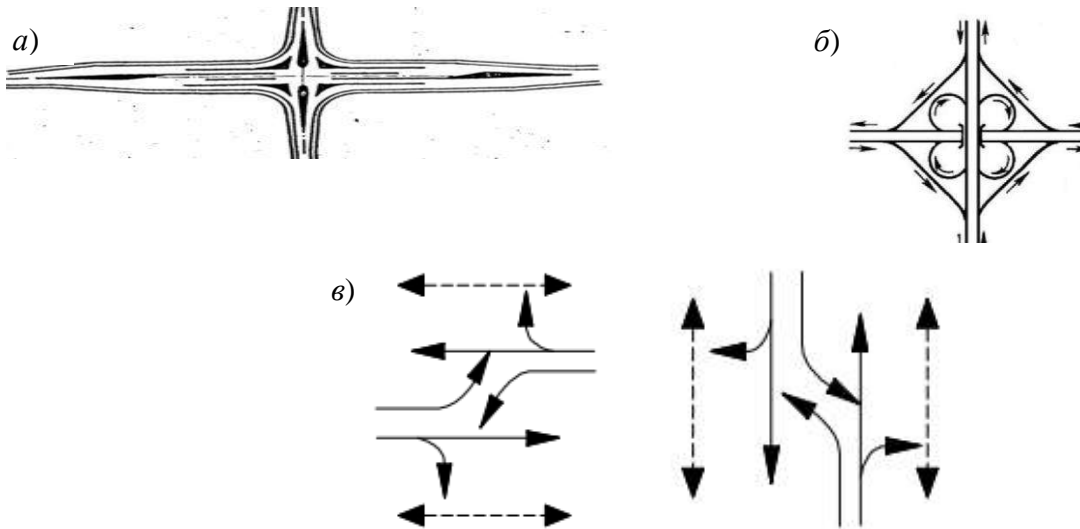


Рисунок 1 – Типовые пересечения УДС
и сети автомобильных дорог общего пользования

a – полностью канализированное пересечение в одном уровне; *б* – схема развязки в двух уровнях «клеверный лист»; *в* – двухфазная схема движения на регулируемых пересечениях

Основным критерием оценки эффективности движения транспортных потоков на пересечении автомобильных дорог в настоящее время является величина средней задержки транспорта, методы расчета которой хорошо развиты для регулируемых пересечений при малой загрузке движением. Но они не учитывают влияния существующего уровня безопасности, соблюдаемого водителями на интервалы следования из очереди. Для нерегулируемых пересечений значительную сложность представляет определение граничного интервала времени, особенно при высокой степени загрузки движением.

Как показали наши исследования, использование методов теории риска, адаптированных для теории транспортных потоков, позволяет устранить данные затруднения, а реализация стохастической имитационной модели делает возможным модернизацию метода определения средней задержки транспорта при высоких значениях коэффициента загрузки движением.

Во второй главе теоретически обоснована стохастическая дискретно-событийная имитационная модель движения транспортных потоков на пересечениях УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования, установлены зависимости для определения таких основных параметров модели, как величина граничного интервала для нерегулируемых пересечений и интервалы следования из очереди.

Для моделирования транспортных потоков используются динамические и стохастические теории. Учитывая, что транспортная задержка и длина очереди являются функ-

цией от пропускной способности дороги, для анализа данных двух показателей целесообразно воспользоваться именно стохастическими теориями транспортных потоков.

Основываясь на работах Д. Дрю, Х. Иносе, Е.М. Лобанова, В.В. Сильянова, В.В. Столярова, Т. Хамада, Ф. Хейта, в качестве основной математической базы для моделирования транспортной задержки следует принять систему массового обслуживания (СМО). Для моделирования транспортной задержки по данной схеме требуется определение следующих параметров: а) распределение входящего потока и б) распределение потока обслуженных заявок.

Для определения параметров входящего потока при высоких значениях коэффициента загрузки правильнее говорить о прибытии в очередь, т.к. в теоретической схеме «прибытие и обслуживание заявки» не рассматриваются пространственные характеристики, а во внимание принимается взаимосвязь между расстоянием от ближайшего пересечения и распределением автомобилей в пачке. Во-вторых, разные авторы используют различные распределения; на практике возможно использование эмпирических распределений, что делает неосуществимым наличие аналитического решения. Поэтому в рассматриваемом случае целесообразно использовать методы имитационного моделирования и, в частности, системы Anylogic, библиотеку Enterprise Library, которая позволяет моделировать сети СМО любой сложности.

Для более точного представления объектов Anylogic, отображающих реальную ситуацию на пересечении и особенности транспортного потока, выделим несколько зон (рисунок 2).

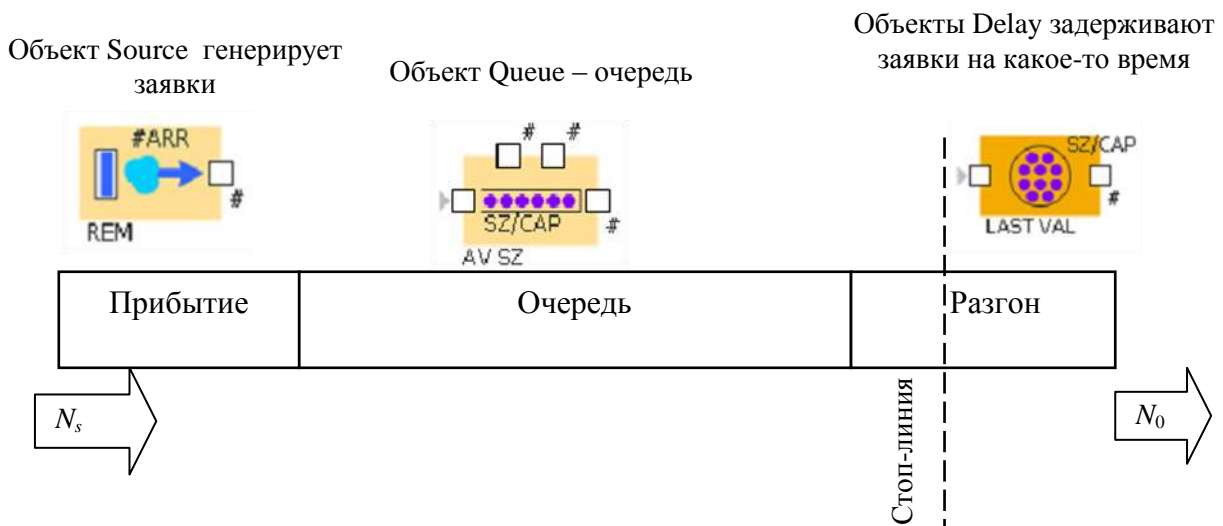


Рисунок 2 – Схема привязки объектов Anylogic к обстановке на пересечении и к состоянию транспортного потока

зона «Прибытие» – здесь определяется распределение входящего потока; «Очередь» – это либо автомобили, ожидающие проезда, либо движущиеся автомобили, имеющие между собой тесную взаимосвязь; «Разгон» – начиная от стоп-линии и далее определяется распределение исходящего потока

Дискретно-событийный подход (рисунок 2) лишь фиксирует три вида событий и время их наступления, но этого достаточно для целей определения задержки транспортных средств в очереди.

После привязки объектов Anylogic к типовому пересечению с одной полосой движения на подходе второстепенного направления, получаем общую модель движения транспортных потоков на пересечениях в целом (рисунок 3).

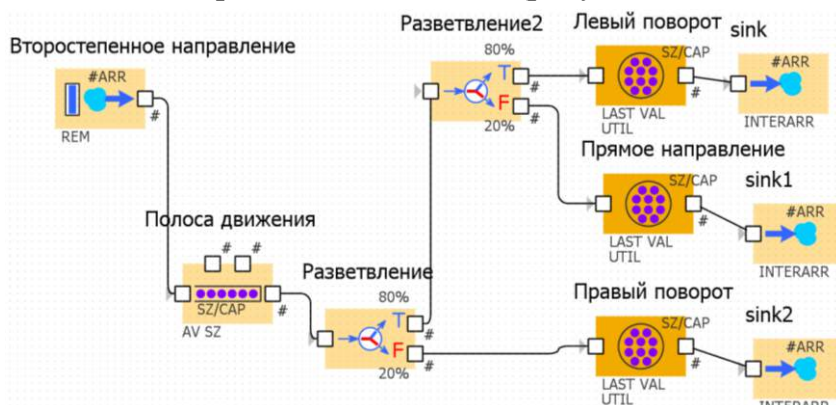


Рисунок 3 – Общая модель движения транспортных потоков на пересечениях УДС и узлах сетей автомобильных дорог общего пользования

На основании общей модели движения транспортных потоков на пересечениях УДС и узлах сетей автомобильных дорог общего пользования и модели продвижения заявки предлагается алгоритм для определения задержки транспорта и длины очереди (рисунок 4).

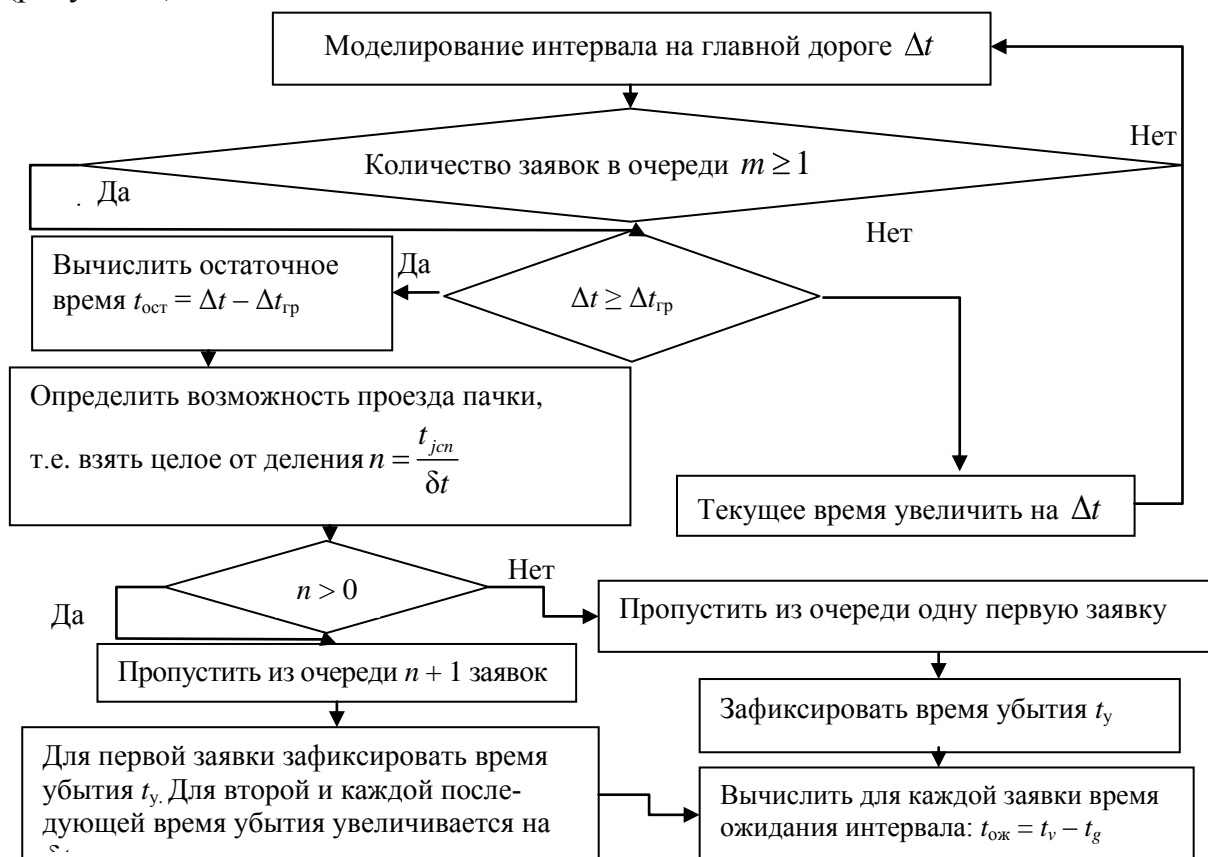


Рисунок 4 – Моделирование выбора безопасного интервала автомобилями из очереди

Выделение в модели первого автомобиля в очереди обусловлено тем, что именно он выбирает граничный интервал. Остальные автомобили следуют за ним с несколько меньшим и более постоянным интервалом (т.е. интервалом следования из очереди). Предполагается, что размер граничного интервала является интегральной оценкой безопасности движения на пересечении в одном уровне.

Учитывая, что методики определения размеров граничного интервала достаточно трудоемки, используем определение граничного интервала с учетом риска ДТП, допускаемого водителями:

$$S_{\text{гр}} = 1000 \left[\frac{v_1}{v_2 q_2} + \frac{1}{q_x} - \left(\frac{v_k - v_2}{2v_2 q_2} + \frac{1}{q_2} \right) \right] + d_2 + C, \quad (1)$$

где $S_{\text{гр}}$ – граничный интервал между автомобилями главной дороги, м; v_1 – скорость движения автомобиля на полосе главной дороги, км/ч; v_2 – начальная скорость движения автомобиля, совершающего маневр пересечения главной дороги, км/ч; q_2 – плотность движения на съезде или переходно-скоростной полосе, авт./км; q_x – допустимая мгновенная плотность движения между транзитными и вливающими автомобилями, авт./км; v_k – скорость движения того же автомобиля в конфликтной точке, км/ч; d_2 – длина автомобиля пересекающего основную дорогу, м; C – приращение граничного интервала, определяемое в зависимости от угла α между векторами скоростей движения автомобилями основного и второстепенного направлений, устанавливаются в момент прохождения конфликтной точки.

Показатели q_2 и q_x определяются на основе $q_0^{\text{зат}}$ – плотности при заторе легковых автомобилей, который определяется как

$$q_0^{\text{зат}} = \frac{1000}{a + d}; \quad a = \frac{S}{\frac{6}{u\sqrt{2}} - 1}, \quad (2; 3)$$

где S – среднее фактическое значение интервала и области допускаемого водителями риска, м; u – подынтегральная функция, которая в зависимости от величины допускаемого риска принимает определённые значения; a – интервал между ТС с учетом средних квадратических отклонений тормозных путей, м.

Поскольку значения $S_{\text{гр}}$ определялись в 1980-х гг., необходимы натурные эксперименты для их уточнения. В целом представленные корреляции позволяют определять размер граничного интервала в зависимости от допускаемого водителями риска ДТП.

Для регулируемых пересечений распределение времени обслуживания определяют параметры цикла светофора. Для моделирования распределения обслуживания правильнее использовать время эффективной фазы регулирования.

Для описания транспортной задержки на регулируемом перекрестке существует несколько различных подходов (Вебстер, Миллер, Пир, Поляков и др.), основанных на каких-либо допущениях. Наиболее точным и потому общепринятым является подход, основанный на формуле Вебстера, адекватно работающей при коэффициенте

загрузки от 0,4 до 0,8. В современных же условиях коэффициент загрузки, превышающий 0,8, и накопленная очередь являются нормой, что требует корректировки существующих зависимостей, которая проводится на основе общей модели движения транспортных потоков на пересечениях УДС и сети автомобильных дорог.

Для этого при моделировании регулируемых пересечений в Anylogic вводится следующий стейчарт, позволяющий моделировать параметры цикла светофорного регулирования (рисунок 5). Здесь при красном сигнале светофора происходит блокирование объекта delay; при первом желтом осуществляется его разблокировка и заявки из очереди могут обрабатываться.

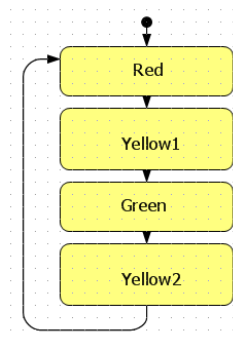


Рисунок 5 – Стейчарт моделирования параметров светофорного регулирования

Таким образом, при наличии значений параметров модели, полученных как путем экспериментального наблюдения, так и уточненных по нормативным документам, появляется возможность наблюдать и исследовать задержку транспорта в очереди с высокой точностью.

Третья глава посвящена определению ряда параметров, входящих в имитационную модель: уровень допускаемого водителями риска, характерного для Свердловской области; вероятностное распределение временных интервалов между автомобилями, прибывающими в очередь на пересечении; вероятностное распределение временного интервала между разрешающим сигналом светофора и выходом первого автомобиля из очереди; вероятностное распределение временного интервала между последующими автомобилями в очереди; вероятностное распределение временного интервала между автомобилями в устоявшейся очереди; однородность транспортного потока для выбранного типового направления при разных характеристиках движения.

В процессе натурального эксперимента все показатели снимались при загрузке движением больше 0,8. Обследование проводилось на пересечениях дорог Екатеринбург, движение ТС на пересечении снималось на видеокамеру с последующей обработкой видеофайла на компьютере. Для определения уровня допускаемого водителями риска замерялось расстояние между бамперами автомобилей, следующих друг за другом в пробке. Сам уровень допускаемого водителями риска определялся по формуле, предложенной В.В. Столяровым:

$$r = 0,5 - \Phi\left(\frac{C_i}{\sigma_c \sqrt{2}}\right), \quad (4)$$

где r – уровень допускаемого водителями риска; $\Phi(u)$ – интеграл вероятности, определяемый по значению подынтегральной функции u ; C_i – фактические интервалы при заторе между однотипными автомобилями, м; σ_c – среднее квадратическое отклонение этих интервалов, м.

Для расчетов рекомендуется выбирать 85%-ный уровень обеспеченности. По результатам исследований для условий Свердловской области риск, допускаемый водителями, составляет $r = 0,001183$ при средней величине интервала между автомобилями в заторе 2,9 м. При подборе случайных распределений временных интервалов прибывающих в очередь транспортных средств использовались критерии Пирсона (таблица 1).

Таблица 1 – Применимость экспоненциального и логнормального распределений при оценке вероятности прибытия транспортного средства в очередь*

№ серии	Экспоненциальное, полученные значения p для критерия Пирсона	Логнормальное, полученные значения p для критерия Пирсона	Выбираемое распределение
1	0,00012	0,1168	Логнормальное
2	0,02057	0,31162	Логнормальное
3	0,00945	0,00281	Не определено
4	<i>0,05592</i>	0,21177	Логнормальное
5	0,000000	0,00095	Не определено
6	0,12281	0,22110	Логнормальное
7	0,42127	0,46688	Логнормальное
8	0,03527	0,14186	Логнормальное
9	<i>0,08281</i>	0,26418	Логнормальное

*Жирным шрифтом выделены случаи неудовлетворительной сходимости, курсивом – условно удовлетворительной, т.е. при снижении уровня значимости. В случае если оба распределения подходят, выбиралось то, у которого p -значение выше.

При исследовании интервалов выходящего потока выявлено, что размер среднего интервала последовательно уменьшается от номера по порядку транспортного средства, покинувшего очередь, и после пятого транспортного средства колеблется несущественно (рисунок 6).

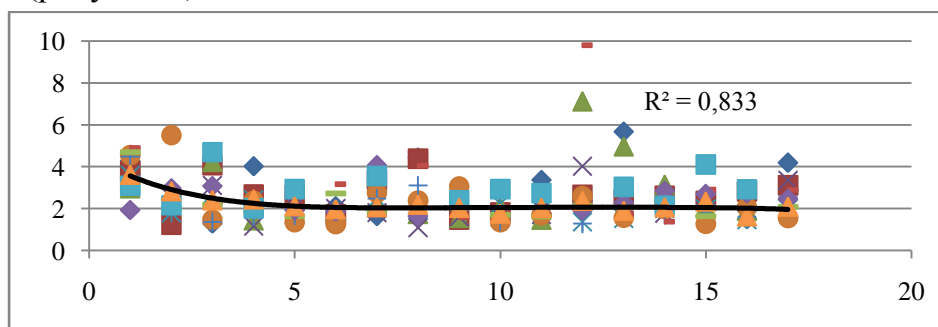


Рисунок 6 – Средний интервал между транспортными средствами

Таким образом, из результатов исследования вытекает, что целесообразно подобрать функцию распределения для интервалов с первого по пятый по отдельности, а остальные объединить в колонное движение.

Для определения распределения между автомобилями, убывающими из очереди, фиксировалось время разрешающего сигнала светофора (желтый, зеленый) и моменты прохождения заднего бампера автомобиля условного створа, который располагался на стоп-линии, а в случае отсутствия автомобилей – за стоп-линией либо на переднем бампере первого автомобиля. Использование в качестве разрешающего желтого сигнала позволило установить начало эффективной фазы; получены также результаты по использованию второго желтого сигнала, характерные для высокой загрузки.

Итоги обследования сведены в таблицу 2, где также указано, от какого сигнала светофора измерялся первый временной интервал. Если статистики не удовлетворяют требуемым значениям, то предлагаются распределения с максимальным полученным значением p . В таблице 2 неподходящие по обоим критериям распределения выделены жирным шрифтом, курсивом – значения, подходящие по критерию Романовского, т.е. подходящие с понижением уровня значимости. Для значений, неподходящих по обоим критериям, рекомендуется подбирать эмпирическую функцию распределения. P -значение дисперсионного анализа показывает, что по всем, за исключением одного, выбранным направлениям, различия от влияния всевозможных факторов на параметры незначительны и, следовательно, данные параметры применимы для описания движения транспортного потока на всех типовых пересечениях. Для случаев, когда дисперсионный анализ показывает разницу в конфигурации транспортного потока на различных пересечениях, рекомендуется дополнительное обследование с целью установления причины несоответствия. В нашем случае – существенная разница в радиусах поворота. Для указанного направления в таблицу 2 внесены результаты, полученные на типовых пересечениях.

Таблица 2 – Результаты обследования транспортных потоков на регулируемых пересечениях автомобильных дорог Свердловской области

Направление движения и способ отсчета	Номер интервала	Математическое ожидание длины интервала, с	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с	Рекомендуемое распределение	p -значение критерия Пирсона	Значение критерия Романовского (R)	p -значение дисперсионного анализа
Только направо, отсчет с момента включения зеленого сигнала	1	3,87	3,39	0,08	18,41	Логнормальное	0,32	0,006	2,37E-06
	2	3,10	1,23	0,01	6,70	Эмпирическое	–	10,387	0,043
	3	3,49	5,54	1,51	39,32	Логнормальное	0,105	1,145	0,287
	4	2,98	1,20	1,52	6,79	Логнормальное	0,789	–0,797	0,00014

Окончание таблицы 2

Направление движения и способ отсчета	Номер интервала	Математическое ожидание длины интервала, с	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение, с	Максимальное значение, с	Рекомендуемое распределение	<i>p</i> -значение критерия Пирсона	Значение критерия Романовского (R)	<i>p</i> -значение дисперсионного анализа
	5	2,60	1,32	0,65	7,83	Логнормальное	0,41	2,131	0,00139
	Колонное движение	2,67	1,92	1,04	16,38	Эмпирическое	0,0038	5,209	0,293
Прямо и лево, отсчет с момента включения желтого сигнала	1	3,53	1,54	1,11	6,81	Нормальное	0,192	0,494	0,123
	2	2,74	0,81	1,32	5,46	Нормальное	0,297	0,21	0,154
	3	2,66	1,15	1,35	5,91	Эмпирическое	–	–	0,342
	4	2,50	0,88	1,12	4,98	Нормальное	0,379	–0,159	0,112
	5	2,38	0,88	1,41	5,31	Нормальное	0,072	1,576	0,245
	Колонное движение	2,24	0,77	0,71	5,44	Логнормальное	0,371		0,505

В четвертой главе представлены методика имитационного эксперимента и анализ его результатов. Для имитации появления ТС использовались внутренние функции Anylogic. Входящие потоки моделировались в соответствии со значениями, полученными в ходе обследования транспортных потоков Свердловской области. Кроме того, при моделировании учитывались особенности как регулируемых, так и нерегулируемых пересечений.

Для регулируемых пересечений рассматривалась простая двухфазная схема регулирования с конфликтным левым направлением и следующими длительностями сигналов «красный – желтый – зеленый»: 40 – 5 – 20, 90 – 5 – 45, 60 – 5 – 30.

Для нерегулируемых пересечений в соответствии с методом Монте-Карло и разработанными алгоритмами имитационного моделирования разыгрывались значения граничного интервала. Для установления значений граничного интервала некоторые параметры (скорость движения на главной и второстепенной дороге при пересечении конфликтной точки и угол пересечения) уточнялись с использованием нормативной литературы.

Примеры итоговых зависимостей представлены на рисунках 7 и 8.

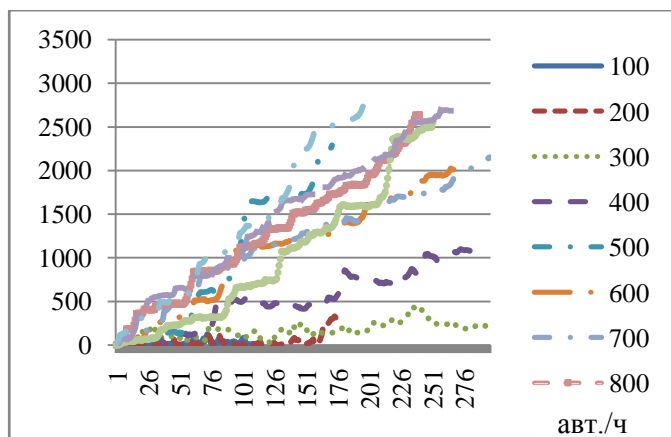


Рисунок 7 – Задержка транспортного средства в очереди при интенсивности главной дороги 2000 авт./ч и различной интенсивности второстепенного направления

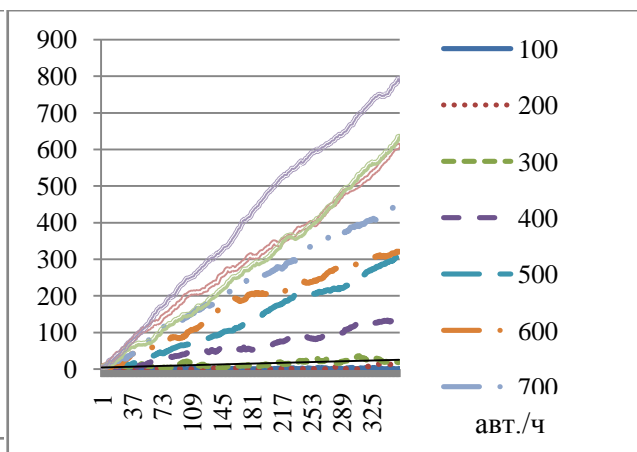


Рисунок 8 – Количество автомобилей в очереди на пересечении при интенсивности главной дороги 2000 авт./ч и различной интенсивности второстепенного направления

Результаты исследования показывают, что при превышении пропускной способности количество автомобилей в очереди и, следовательно, задержка в очереди начинают линейный рост. В случае же, когда интенсивность движения не превышает пропускной способности, очередь описывается эмпирической функцией распределения.

Наблюдения показывают, что вероятность отсутствия очереди на второстепенном направлении снижается с ростом интенсивности движения и стремится к нулю. Учитывая это, пределом пропускной способности предлагается называть такую интенсивность второстепенного направления при заданной интенсивности главной дороги, при которой вероятность отсутствия очереди равна нулю. Данное значение устанавливается на основе подобранных регрессионных зависимостей, которые в большинстве случаев являются параболами.

Учитывая, что в линейном уравнении коэффициент перед x и есть скорость нарастания функции, а на практике рост очереди не начинается с нуля, а с какого-то значения, характерного для интенсивности движения предыдущего периода, подобраны многомерные функции регрессии для определения скорости нарастания и убывания очереди (таблицы 3 и 4).

Таблица 3 – Зависимости для определения скорости нарастания очереди

Направление	Зависимость	Коэф. детерминации
Левоповоротный съезд	$k = 0,077P_{\text{пл}} + 1,002N_{\text{вт}} - 2,648$	0,897
Правосторонний съезд	$k = 0,2P_{\text{пл}} + 1,008N_{\text{вт}} - 5,242$	0,919
Нерегулируемое пересечение направление прямо-налево	$k = 0,879N_{\text{гл}} - 0,729N_{\text{вт}} - 0,9$	0,801
Регулируемое пересечение направление прямо-налево	$k = 0,909N_{\text{гл}}' - 0,855N_{\text{вт}} - 2,48$	0,982
Регулируемое пересечение только правый поворот	$k = 0,903N_{\text{гл}}' - 0,39N_{\text{вт}} - 1,632$	0,984

Таблица 4 – Зависимости скорости убывания очереди от интенсивности пересекающихся потоков

Направление	Зависимость	Коэф. детерминации
Левоповоротный съезд	$K = 0,006N_{gl} + 0,001N_{vt} - 2,522$	0,839
Правосторонний съезд	$K = -0,043N_{gl} - 0,039N_{vt} + 37,16$	0,209
Нерегулируемое пересечение направление прямо-налево	$K = -0,001N_{gl} + 0,000805N_{vt} - 0,987$	0,3422
Регулируемое пересечение направление прямо-налево	$K = 22,34P + 0,003N_{vt} - 4,52$	0,92
Регулируемое пересечение правый поворот	$K = 17,82P + 0,002N_{vt} - 3,24$	0,959

$N_{гл}$, N_{gl} – интенсивность движения на главной дороге, авт./ч; $N_{вт}$, N_{vt} – интенсивность движения по данному направлению второстепенной дороги, авт./ч; $P_{пл}$, $P_{п}$, P – пропускная способность регулируемого пересечения по заданным направлениям авт./с.

Все значения коэффициента детерминации больше 0,8, что говорит об адекватности полученных зависимостей. Результаты решения уравнений регрессии для определения предела пропускной способности представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Определение пределов пропускной способности второстепенных направлений пересечения (частично)

Левоповоротный съезд	Нерегулируемое пересечение правый поворот	Нерегулируемое пересечение направление прямо-налево	Регулируемое пересечение направление прямо-налево	Регулируемый правый поворот
1195	1 167	1016	555	363
838	1 026	901	422	244
809	1 078	785	464	326
...
462	653	421		
645	732	481		
773	872	570	481	311

Также произведено усовершенствование метода определения средней задержки транспорта для случаев высокого значения коэффициента загрузки движением. В имитационной модели средняя задержка транспорта определялась как

$$t_w = \frac{\delta \sum_{i=1}^n n_{ст}}{n_{пр}}, \quad (5)$$

где δ – время наблюдения, с; n – число замеров в имитационной модели; i – номер замера; $n_{пр}$ – число автомобилей, проехавших перекресток за тот же период (практическая пропускная способность); $n_{ст}$ – количество автомобилей в очереди.

Числитель формулы (5) является оценкой площади криволинейной трапеции (рисунок 9), где $f(x)$ есть функция количества автомобилей в очереди в зависимости от времени. В случаях, когда загрузка движением больше единицы, данная площадь является треугольником, площадь которого составит:

$$S = \delta (N - P) / 2, \quad (6)$$

где N – интенсивность движения за время наблюдения авт./ч; P – практическая пропускная способность за время наблюдения авт./ч.

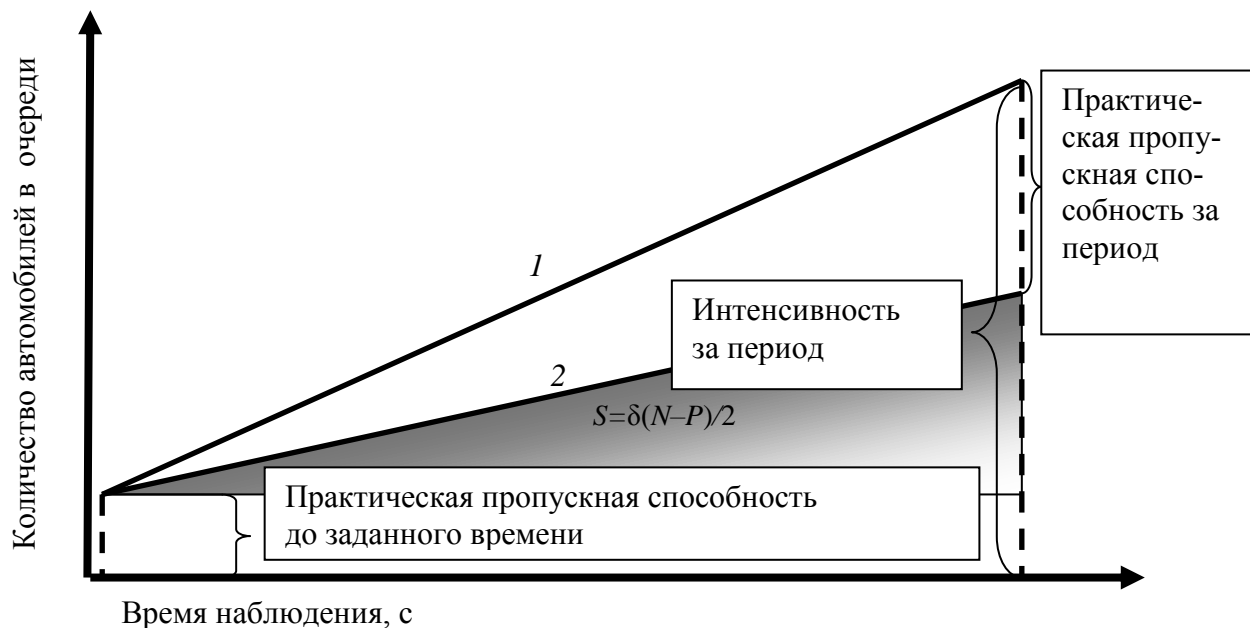


Рисунок 9 – Графическое определение средней задержки при коэффициенте загрузки движением больше 1

Учитывая полученные результаты исследования (таблицы 3, 4), при определении средней задержки транспорта в очереди на заданном направлении пересечения рекомендуется следующая зависимость:

$$t_w = \frac{\delta N - P}{2N}. \quad (7)$$

В пятой главе установлена область эффективного применения основных типов пересечений на основании зависимости предела пропускной способности от интенсивности движения на главной дороге (рисунок 10) и произведено сравнение эффективности функционирования основных типов пересечений при высоком значении коэффициента загрузки движением (таблица 6).

Таблица 6 – Сравнение вариантов пересечения по критерию задержки транспорта

Интенсивность движения на второстепенной дороге авт./ч	Нерегулируемое пересечение		Транспортная развязка		Параметры цикла светофора (зеленый-красный)		
	Интенсивность движения на главной дороге, авт./ч						
	500	1000	500	1000	20–40	45–90	30–60
200	8,33	7,38	6,58	8,29	12,36	34,46	25,61
300	10,90	12,47	7,69	9,39	19,717	150,96	37,38
600		38,74		9,45	27,07	267,46	49,14
900		108,72		10,62	188,8105	473,61	294,49
1000		193,40		12,95	401,55	679,77	539,84

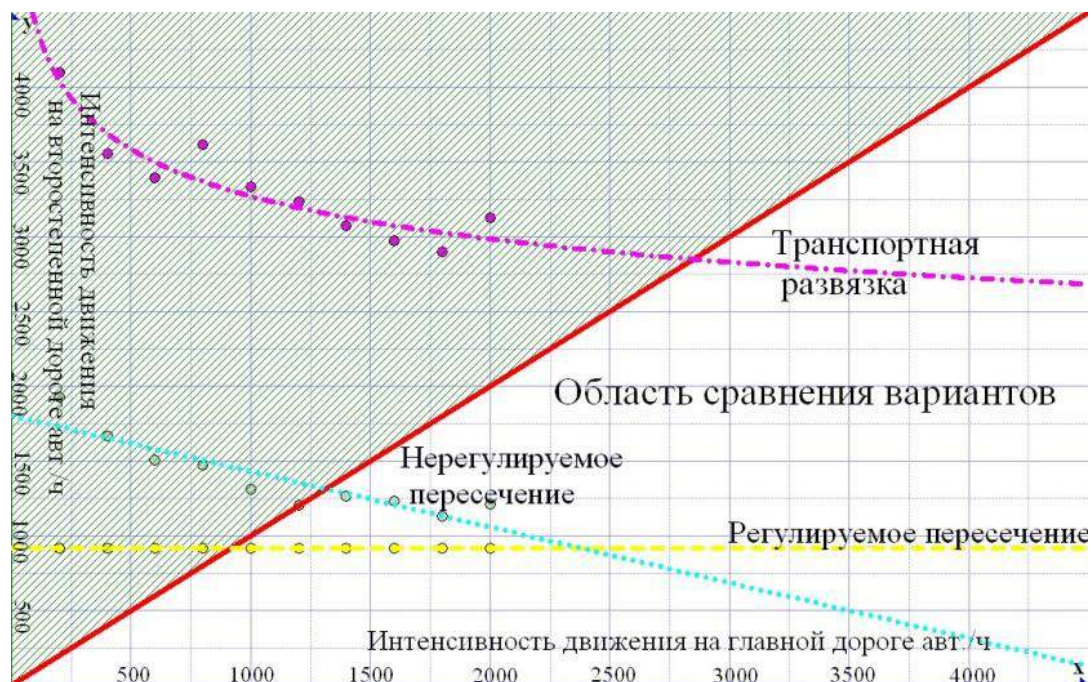


Рисунок 10 – Номограмма областей эффективного применения основных типов пересечений

Установлено, что сфера применения регулируемых пересечений очень ограничена и по всем показателям уступает транспортной развязке, которая, в случае загрузки движением больше единицы, демонстрирует лучшие показатели, по критерию задержки транспорта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты и выводы.

1. Научно обоснованы критерии оценки эффективности функционирования узлов УДС и сетей автомобильных дорог общего пользования в условиях высокого уровня их загрузки. Этими критериями выбраны: величина средней и суммарной задержки транспорта на пересечении; длина очереди на подходе к пересечению, характеризующая вероятность сетевого затора.

2. Обоснована стохастическая дискретно-событийная модель, позволяющая оценивать задержки транспорта и длину очереди на основных типах пересечений, и уточнены значения параметров, входящих в эту модель. Определены параметры наполнения модели для регулируемых пересечений. Установлено, что риск ДТП, допускаемый водителями в Свердловской области, составляет в среднем $r = 0,001183$, средняя величина интервала между автомобилями в заторе – 2,9 м. Произведено имитационное моделирование движения транспортных потоков на пересечениях. Сформулировано определение предела пропускной способности пересечения и установлены его значения для направлений основных пересечений с учетом допускаемого водителями риска ДТП.

3. Определены области применения основных типов пересечений. Установлено, что для нерегулируемого левоповоротного съезда предел пропускной способности в среднем равен 773 прив. авт./ч, для правого поворота – 872, для направления прямо-налево – 570. Для регулируемого пересечения предел пропускной способности для простой двухфазовой схемы регулирования составил: для направления прямо-налево – 481, правый поворот – 311. Выявлено, что для случаев превышения пропускной способности количество автомобилей в очереди имеет линейный рост. Установлена зависимость между интенсивностью пересекающихся потоков и скоростью нарастания очереди для нерегулируемых пересечений. Определена зависимость от интенсивности движения и практической пропускной способности для количества автомобилей в очереди на регулируемом пересечении.

4. Предложены рекомендации по совершенствованию организации движения на основе уточнения выбора типа пересечения. Установлены области эффективного применения основных типов пересечений для уровня риска, допускаемого водителями в Свердловской области, на основе среднего предела пропускной способности. Определены области эффективного применения основных типов пересечений по зависимости предела пропускной способности от интенсивности движения на пересекающихся дорогах. Определено, что с ростом интенсивности движения нерегулируемые пересечения становятся менее эффективными по сравнению с регулируемым. В частности, начиная с интенсивности главной дороги 2350 авт./ч рекомендуется применять регулируемые пересечения. Также регулируемые пересечения используются в случаях, регламентированных ГОСТ Р 52289–2004 «Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах в изданиях ВАК:

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

2. Боярский С.Н. Результаты имитационного моделирования задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог/С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев// Автотранспортное предприятие. 2014. №2. С. 53–55.

3. Боярский С.Н. Совершенствование методов определения средней задержки транспорта на пересечении автомобильных дорог с высоким значением коэффициента загрузки движением // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3 (Электронный журнал). URL: <http://www.science-education.ru/117-13368>.

В других изданиях:

1. Боярский С.Н. Исследование параметров конфликтных зон на пересечениях автомобильных дорог в зависимости от скоростей пересекающихся транспортных потоков/ С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев, О.В. Минин// Транспорт Урала. 2005. №2. С. 21–24.

2. Боярский С.Н. Моделирование параметров зоны влияния на пересечениях автомобильных дорог в одном уровне/С.Н. Боярский, Р.Н. Ковалев//Транспорт Урала. 2006. №1. С. 76–78.
3. Боярский С.Н. Обоснование выбора теоретической модели транспортного потока на регулируемом пересечении автомобильных дорог/С.Н. Боярский // Транспорт XXI века: исследования, инновации, инфраструктура : м-лы научн.-техн. конференции, посв. 55-летию УрГУПС : в 2 т. – Екатеринбург : УрГУПС, 2011. – Вып. 97(180), т. 2.– С. 529–535.
4. Боярский С.Н. Моделирование задержки транспорта на пересечениях автомобильных дорог и транспортных развязках /С.Н. Боярский/ Сб. науч. тр. ученых и специалистов факультета экономики и управления. Вып. 3. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2012. С. 14–22.
5. Боярский С.Н. Результаты имитационного моделирования задержки транспорта на нерегулируемых пересечениях автомобильных дорог/С.Н. Боярский// Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. – Пермь : Пермский национальный исследовательский университет, 2014. С.82–91.