

На правах рукописи



**Липенков Александр Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ  
ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Научный руководитель –	<b>Кузьмин Николай Александрович</b> , доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	<b>Якунин Николай Николаевич</b> , доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», зав. кафедрой автомобильного транспорта, г. Оренбург
	<b>Пышный Владислав Александрович</b> , кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», кафедра «Автомобили и автомобильное хозяйство», г. Тула
Ведущая организация –	ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Защита диссертации состоится **«17» декабря 2015 г. в 10:00 часов** на заседании объединенного диссертационного совета Д999.030.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: **302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, аудитория 426.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ([www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)) ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, аудитория 340.

Автореферат разослан **«12» ноября 2015 г.** Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет» ([www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)) и на официальном сайте Министерства образования и науки Российской Федерации ([vak2.ed.gov.ru](http://vak2.ed.gov.ru)).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации направлять в диссертационный совет по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29. Телефон для справок +79058569797*

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.030.03



А.А. Катунин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность.** В Транспортной Стратегии РФ до 2030 г. одной из задач развития транспортной системы России является увеличение пропускной способности (ПС) и скоростных параметров транспортной инфраструктуры. Важным элементом инфраструктуры автобусного городского пассажирского транспорта (ГПТ) являются остановочные пункты (ОП). Они оказывают существенное влияние на ПС дорог и безопасность дорожного движения (БДД). В большинстве городов страны, включая Н.Новгород, в инфраструктуре автобусного ГПТ существенна доля коммерческого транспорта малой и особо малой вместимости. В результате наблюдается: одновременная работа операторов перевозки (коммерческих и муниципальных) с различным классом подвижного состава; высокая интенсивность движения автобусных маршрутных транспортных средств (МТС), усугубляемая дублированием маршрутов при использовании МТС малого и сверхмалого класса; нарушение расписаний движения. В этой связи к ОП, их параметрам и обустройству предъявляются высокие требования, так как недостаточная их ПС является одним из препятствий, ограничивающих провозную способность ГПТ. Данная работа выполнена в рамках создания Комплексной транспортной схемы Нижнего Новгорода на период с 2012 по 2030 г.

**Объект исследований** – остановочный пункт автобусного ГПТ.

**Предмет исследования** – пропускная способность остановочных пунктов автобусного ГПТ.

**Цель работы** – повышение пропускной способности остановочных пунктов автобусного ГПТ путем управления влияющими на неё факторами.

**Задачи исследования:**

- установить закономерности изменения потерь времени от взаимных помех между одновременно находящимися на ОП МТС с ростом числа мест обслуживания;
- оценить степень влияния на ПС регулируемых пересечений на направлении движения МТС до или после ОП;
- установить закономерности изменения времени простоя МТС в ожидании дополнительных пассажиров;
- доказать влияние на ПС ОП месторасположения павильона для пассажиров;
- разработать комплексную методику расчета ПС ОП с учетом непостоянного числа мест обслуживания и программный комплекс на её базе;
- определить условия функционирования ОП, при которых среднее время ожидания в очереди не превышало бы заданной величины;
- провести испытания разработанной комплексной методики в реальных условиях и определить эффективность результатов исследования.

**Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.**

Работа выполнена с использованием теории вероятностей и теории массового обслуживания, метода статистических испытаний Монте-Карло, имитационного моделирования, регрессионного анализа. Достоверность результатов подтверждается коэффициентами детерминации, значения которых не менее 0,8 для всех уравнений регрессии, а также значениями критериев Хи-квадрат Пирсона, Стьюдента и Фишера-Снекорда, значения которых значительно превышают критические для рассматриваемых условий.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта, п.2 «Оптимизация планирования, организации и управления перевозками пассажиров и грузов...».

**Научную новизну представляют:**

- закономерности влияния регулируемых пересечений на направлении движения МТС и месторасположения остановочных павильонов для пассажиров на ПС ОП;
- закономерности влияния потерь времени автобусами с ростом числа мест обслуживания и простоев МТС в ожидании пассажиров на ПС ОП;
- комплексная методика расчета ПС ОП, суммарно учитывающая действующие наиболее значимые факторы и впервые непостоянное число мест обслуживания;
- условия качественного функционирования ОП, при которых среднее время ожидания в очереди не превышало бы заданной величины.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанная комплексная методика позволяет определить параметры ОП автобусного ГПТ (длину, расположение павильона, максимальную интенсивность проходящих через ОП автобусов и т.д.), обеспечивая при этом минимальные потери автобусами времени нахождения на ОП и высокое качество пассажирских перевозок.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований приняты к внедрению Департаментом транспорта и связи администрации Н.Новгорода, внедрены в Нижегородском пассажирском автотранспортном предприятии № 2 (НПАП №2) и в учебном процессе НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

**Апробация работы.** Материалы исследований докладывались и получили одобрение на 2-й и 3-ей МНПК «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» (Орел, 2011 и 2013 гг.), на XIV МНПК «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств» (Владимир, 2011 г.), VII МНТК «Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств» (Пенза, 2012 г.), 79-й МНТК Ассоциации Автомобильных Инженеров (ААИ) «Безопасность транспортных средств в эксплуатации» (Н. Новгород, 2012 г.), МНТК «Проблемы транспортных и технологических машин» ТТМ и К НН 12 (Н.Новгород, 2012 г.), XII МНПК «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (Оренбург, 2015 г.), на ежегодных конференциях НГТУ «Будущее технической науки» (2011-2015 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 статей, 9 из которых входят в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 125 наименований, приложений, и содержит 128 страниц основного текста, 30 таблиц и 57 иллюстраций.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации, краткая характеристика работы, научная новизна и практическая значимость, приводятся сведения о публикациях, структуре и объеме работы.

**В первой главе** проведен анализ работ по исследованию ОП, которое нашло отражение в трудах Гудкова В.А., Димовой И.П., Ефремова И.С., Зедгенизова А.В., Исхакова М.М., Ларина О.Н., Михайлова А.С., Россохи В.И., Спирина И.В., Черновой Г.А., Якунина Н.Н., *R. Fernandes*, а также в руководстве *HCM* и др.

Анализ работ показал, что все существующие методики расчета ПС ОП автобусного ГПТ ориентированы на однотипный подвижной состав, что допускает возможность разбиения ОП на несколько мест обслуживания. В реальности число мест на ОП не является постоянным вследствие работы на маршрутах подвижного состава разного класса. Фактически не изучен также ряд существенных факторов, влияющих на ПС ОП. Прежде всего, это наличие до или после ОП регулируемого пересечения, искусственный простой автобусов в ожидании пассажиров и пр.

**Вторая глава** посвящена построению математической модели расчета ПС ОП. На первом этапе было проведено комплексное обследование ОП автобусного ГПТ в Н.Новгороде с целью оценки их состояния, сбора статистики о работе на них МТС и пр. Исследовано 789 ОП, что составляет 76% от общего количества ОП города. На базе этого получена формула для определения ПС ОП при использовании однотипного подвижного состава:

$$ПС_{оп} = \frac{3600}{\sum t_3} k_n N_M \text{ ед/ч,} \quad (1) \quad \text{где } \sum t_3 - \text{ суммарные задержки автобуса на ОП, с;}$$

$$N_M - \text{ число мест одновременного обслуживания; } k_n$$

– коэффициент неэффективности использования соответствующего числа мест. Суммарные задержки автобуса  $\sum t_3$  (с) включают в себя времена на смену автобусов в зоне ОП –  $t_{доп}$ , открытие дверей –  $t_{од}$ , обслуживание пассажиров –  $t_{обсл}$ , «простой в ожидании» –  $t_{пво}$ , закрытие дверей –  $t_{зд}$  и убытие с ОП –  $t_{уб}$ .

В случае работы на маршрутах МТС разных классов, различающихся в первую очередь длиной, число мест обслуживания становится непостоянным, а ПС рассчитывается как математическое ожидание дискретной случайной величины:

$$ПС_{оп} = \sum_i ПС_{опi} \cdot p(H_i), \quad (2) \quad \text{где } i - \text{ число комбинаций размещения МТС разных}$$

$$\text{классов на ОП; } ПС_{опi} - \text{ ПС для } i\text{-той комбинации,}$$

ед/ч;  $H_i$  – гипотеза о комбинации МТС (пример – «2 автобуса большого класса ЛИАЗ-5256» или «3 МТС малого класса ПАЗ-3205»),  $p(H_i)$  – вероятность гипотезы  $H_i$ .

Вероятности  $p(H_i)$  находятся с использованием теории вероятностей или с помощью специально разработанного автоматизированного алгоритма, реализованного в окончательном варианте программного комплекса данной работы.

Коэффициент  $k_n$  в (1) учитывает ситуации, когда при числе мест на ОП более одного начинаются взаимные помехи между МТС. В результате ПС ОП растет не прямо пропорционально увеличению числа мест обслуживания. По этой причине на практике и в научной литературе не рекомендуется проектировать ОП более чем на 3-5 мест. В ряде источников коэффициенты  $k_n$ , полученные экспериментальным путем, являются постоянными и затабулированными. По нашим исследованиям значение  $k_n$  не является постоянной величиной, а зависит от ряда факторов, а само снижение ПС при наличии нескольких мест обслуживания происходит по двум основным направлениям:

- ✓ потери времени  $t_{конф}$  из-за взаимных помех и конфликтов между автобусами;
- ✓ уменьшение числа мест за счет неэффективного их использования, например, в ситуации остановки автобуса прямо при въезде на ОП.

Таким образом, формула (1) примет вид:

$$PC_{оп} = \frac{3600}{\sum t_3 + t_{конф}} k_{нм} N_M, \quad (3)$$

где  $k_{нм}$  – коэффициент неэффективного использования мест (табл. 2).

По изучению взаимных помех между автобусами на ОП сделаны выводы:

- когда автобусы движутся строго друг за другом без обгонов, потери времени происходят из-за среднеквадратичного отклонения (СКО) времени обслуживания автобусов на ОП (такой ОП назван ОП без маневрирования);
- когда автобусы на ОП не дожидаются освобождения места впередистоящими автобусами, а сразу производят маневр для занятия места или убытия с ОП, то потери времени происходят из-за взаимных помех между ними (ОП с маневрированием).

При работе автобусов на загруженных ОП водители стараются максимально быстро покинуть такой ОП. Например, если на ОП в среднем наблюдается длительное обслуживание, то водители для поступления и убытия не дожидаются освобождения ОП, а совершают маневр по опережению впередистоящего МТС (ОП с маневрированием). Если же пассажиропоток на ОП невысок и нахождение автобусов на ОП занимает непродолжительное время, то количество маневров минимально, и все водители дожидаются освобождения ОП впередистоящими автобусами (ОП без маневрирования). Таким образом, при расчете ПС ОП предложено рассматривать два режима функционирования ОП (с маневрированием и без маневрирования) и выбирать из них режим с минимальным временем задержки автобуса.

Первоначальная проверка адекватности выражений (1-3) проводилась на специально разработанной имитационной модели ОП. Для этих целей был использован профессиональный инструмент имитационного моделирования *Anylogic*. Фрагмент анимации модели представлен на рис.1, логика работы модели – на рис. 2.

пропускная способность = 203.789234356

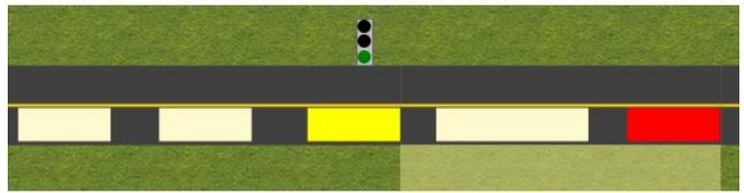


Рисунок 1 – Фрагмент анимации имитационной модели ОП

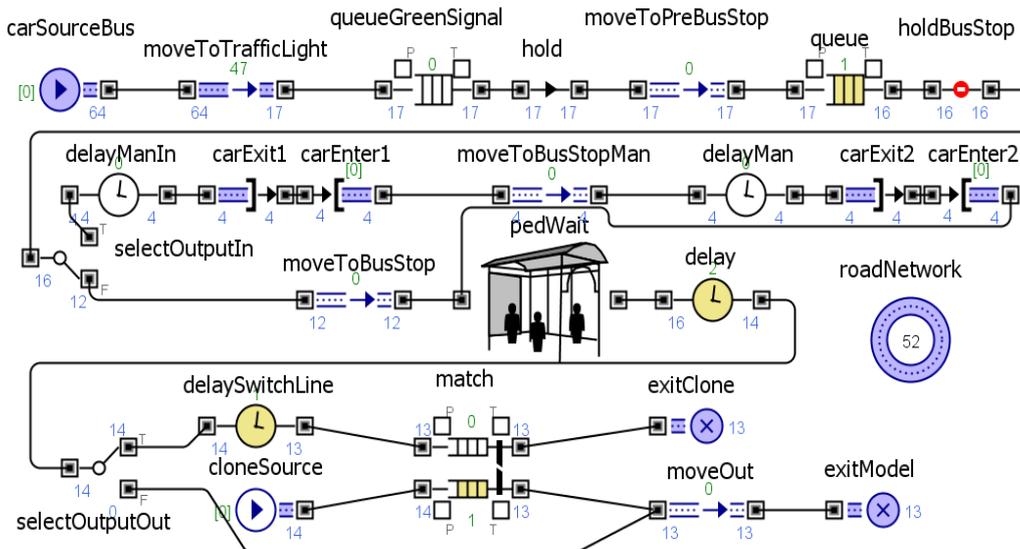


Рисунок 2 – Логика работы имитационной модели ОП

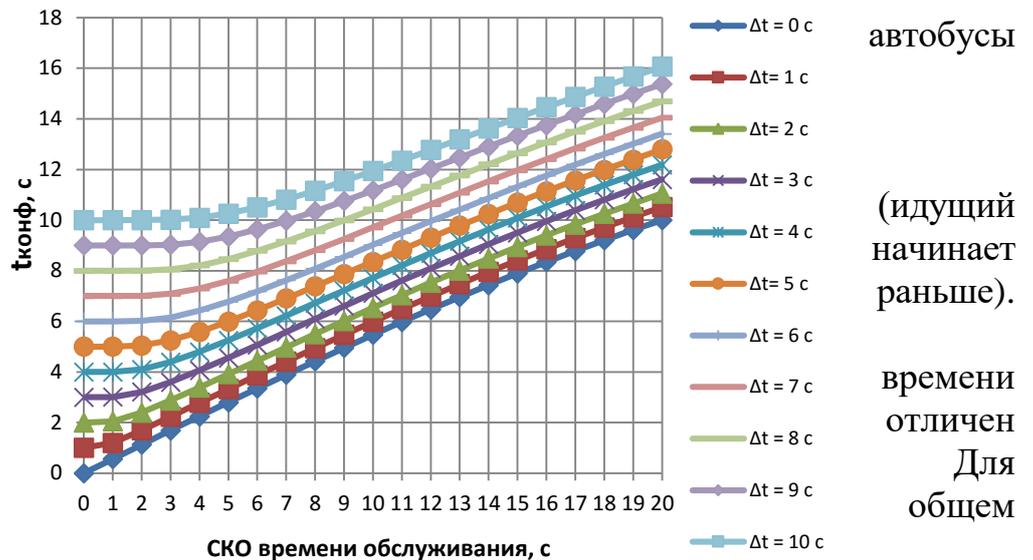
Рассматривался ОП с фактической длиной 25 м, способный вместить два МТС ЛИАЗ-5256 или три ПАЗ-3205. Результаты математического и имитационного моделирования отличаются не более чем на 3,74%.

**Третья глава** содержит исследования наиболее существенных факторов, влияющих на ПС. Их учет позволил бы применить выражения (1)-(3) к реальным ОП. Всего было выделено шесть таких факторов.

**Потери времени от взаимных помех.** В случае одновременного поступления автобусов на ОП без маневрирования и нормальном законе распределения времени обслуживания потери времени  $t_{\text{конф}}$  могут быть найдены математически:

$$t_{\text{конф}} = \sigma \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}}, \quad (4) \quad \text{где } \sigma \text{ – СКО случайной величины (времени обслуживания).}$$

На практике начинают обслуживание не одновременно, а с задержкой  $\Delta t$  первым автобусом обслуживание. К тому же закон распределения обслуживания от нормального. решения задачи в случае был использован метод статистических испытаний Монте-Карло. Графический интерфейс и код решателя были разработаны также в *Anylogic*. Время обслуживания моделировалось Гамма-распределением в соответствии с полученными результатами. Согласно им же величина  $\Delta t$  в среднем составила 4 с. Результаты моделирования для двух мест представлены на рис. 3. После обработки результатов получены регрессионные модели (табл. 1):



**Рисунок 3 – Потери времени  $t_{\text{конф}}$  (с) для двух мест в зависимости от СКО времени обслуживания и смещения моментов начала обслуживания  $\Delta t$  (с)**

Время обслуживания моделировалось Гамма-распределением в соответствии с полученными результатами. Согласно им же величина  $\Delta t$  в среднем составила 4 с. Результаты моделирования для двух мест представлены на рис. 3. После обработки результатов получены регрессионные модели (табл. 1):

**Таблица 1 – Регрессионные модели для расчета времени  $t_{\text{конф}}$**

Число мест	Регрессионная модель*	$R^2$
2	Без маневрир.: $t_{\text{конф}} = 0,4686 \sigma + 2,9828$ ( $3 \leq \sigma \leq t_{\text{п-в}}$ ), $t_{\text{конф}} = \Delta t$ ( $\sigma < 3$ )	0,999
	С маневрир.: $t_{\text{конф}} = 3,1636 - 0,085 t_{\text{п-в}} + 0,2525 t_{\text{уб}}$	0,969
3	Без маневрир.: $t_{\text{конф}} = 0,7661 \sigma + 5,7457$ ( $3 \leq \sigma \leq t_{\text{п-в}}$ ), $t_{\text{конф}} = 2\Delta t$ ( $\sigma < 3$ )	0,999
	С маневрир.: $t_{\text{конф}} = 7,025 - 0,17 t_{\text{п-в}} + 0,435 t_{\text{уб}}$	0,975
4	Без маневрир.: $t_{\text{конф}} = 0,9678 \sigma + 8,7194$ ( $3 \leq \sigma \leq t_{\text{п-в}}$ ), $t_{\text{конф}} = 3\Delta t$ ( $\sigma < 3$ )	0,997
	С маневрир.: $t_{\text{конф}} = 10,308 - 0,232 t_{\text{п-в}} + 0,6 t_{\text{уб}}$	0,976
5	Без маневрир.: $t_{\text{конф}} = 1,1107 \sigma + 11,9109$ ( $3 \leq \sigma \leq t_{\text{п-в}}$ ), $t_{\text{конф}} = 4\Delta t$ ( $\sigma < 3$ )	0,994
	С маневрир.: $t_{\text{конф}} = 11,877 - 0,255 t_{\text{п-в}} + 0,77 t_{\text{уб}}$	0,941

\*–  $t_{п-в}$  – среднее время обслуживания с учетом открытия и закрытия дверей, с.

Для ОП с маневрированием установлена зависимость потерь времени  $t_{конф}$  от среднего времени обслуживания пассажиров и времени, затрачиваемого на убытие с ОП. В отличие от ОП без маневрирования, для которых можно применить математический аппарат по описанию процессов функционирования, для ОП с маневрированием использование чисто математического подхода трудно осуществимо. Это связано с более сложной схемой функционирования, когда важную роль играют взаимные физические помехи автобусов. Исследование потерь времени в этом случае проводилось с помощью разработанной имитационной модели. Результаты также представлены в табл. 1.

**Регулируемые пересечения до или после ОП** (на направлении движения МТС) оказывают существенное влияние на ПС за счет запрета доступа к ОП или убытия автобусов с него во время запрещающего сигнала светофора (рис. 4). С ростом удаленности регулируемого пересечения (РП) от ОП ПС возрастает, так как между ними создается своеобразная «буферная» зона, в которой могут находиться автобусы, впоследствии обслуживаемые во время действия запрещающего сигнала светофора. Принято допущение, что если время цикла светофора полностью использовано, то влияние светофорного регулирования считается нивелированным и ПС вычисляется по формулам (3) и (2).

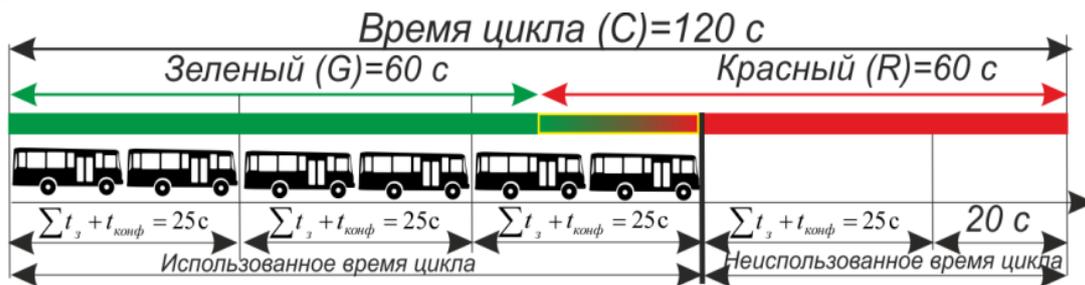


Рисунок 4 – Процесс функционирования ОП при светофорном регулировании

Если ОП располагается после РП (наиболее частая ситуация), то ПС (ед/ч) можно посчитать по формуле:

$$ПС_{ОП} = \frac{3600 k_{нм}}{C} \left( \left\lfloor \frac{G}{\sum t_3 + t_{конф}} \right\rfloor N_M + m + \left\lfloor \frac{l_{факт}}{(\bar{l}_{МТС} + l_{без})} \right\rfloor \right), \quad l_{факт} < l_{max}, \quad (5)$$

где  $C$  – длительность цикла регулирования, с;  $G$  – длительность действия разрешающего сигнала, с;  $m$  – число автобусов, которые могут поступить на ОП в оставшееся время действия разрешающего сигнала светофора;  $l_{факт}$  – расстояние между ОП и РП, м;  $\bar{l}_{МТС} + l_{без}$  – сумма длины МТС и дистанции безопасности между автобусами, м;  $l_{max}$  – расстояние, при котором влияние РП отсутствует, м.

Согласно (5) обслуживание на ОП будет происходить циклами, равными  $C$ . За время действия разрешающего сигнала гарантированно будут обслужены

$\left\lfloor \frac{G}{\sum t_3 + t_{конф}} \right\rfloor N_M$  автобусов. В оставшееся время до окончания разрешающего сигнала на ОП могут поступить еще  $m$  автобусов, которые обслужатся уже во время действия запрещающего сигнала. Если ОП расположен от РП на расстоянии, способном

вместить  $\left\lfloor \frac{l_{\text{факт}}}{(\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}})} \right\rfloor$  автобусов, то последние позволят более полно использовать время цикла светофора за счет обслуживания их во время запрещающего сигнала.

Величина  $m$ :

$$m = \left\lfloor \frac{\Delta t_{\text{зел}}}{\Delta t_{\text{сеч}}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{1}{\Delta t_{\text{сеч}}} \left( G - \left( \sum t_3 + t_{\text{конф}} \right) \left\lfloor \frac{G}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \right\rfloor \right) \right\rfloor, \left\lfloor \frac{\Delta t_{\text{зел}}}{\Delta t_{\text{сеч}}} \right\rfloor < N_{\text{М}} \text{ или } m = N_{\text{М}}, \left\lfloor \frac{\Delta t_{\text{зел}}}{\Delta t_{\text{сеч}}} \right\rfloor \geq N_{\text{М}} \quad (6)$$

где  $\Delta t_{\text{зел}}$  – остаток времени действия разрешающего сигнала, с;  $\Delta t_{\text{сеч}}$  – интервал времени между автобусами, необходимый для проезда сечения, в котором располагается светофорный объект. По натурным данным  $\Delta t_{\text{сеч}} = 2 \div 4$  с.

Величина  $l_{\text{max}}$ :

$$\begin{cases} l_{\text{max}} = (\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}}) \left\lfloor \frac{(C - G) + \Delta t_{\text{зел}}}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \right\rfloor N_{\text{М}}, & m = 0 \\ l_{\text{max}} = (\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}}) \left( \left\lfloor \frac{C}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{G}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \right\rfloor \right) N_{\text{М}} + (N_{\text{М}} - m), & m > 0 \end{cases} \quad (7)$$

При приближении расстояния  $l_{\text{факт}}$  к пределу  $l_{\text{max}}$  наблюдается ситуация, когда несколько мест обслуживания заняты в течение всей фазы светофора, а остальные еще находятся под влиянием последнего. С учетом этого ПС примет вид:

$$\begin{cases} \text{ПС}_{\text{ОП}} = \frac{3600k_{\text{нм}}}{C} \left( \left\lfloor \frac{G}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \right\rfloor N_{\text{М}} + m + \left\lfloor \frac{l_{\text{факт}}}{(\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}})} \right\rfloor \right), & l_{\text{факт}} \leq l_{\text{полн}}; \\ \text{ПС}_{\text{ОП}} = \frac{3600k_{\text{нм}}}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \eta + \frac{3600k_{\text{нм}}}{C} \left( \left\lfloor \frac{G}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}} \right\rfloor N_{\text{М}} + m + \left\lfloor \frac{l_{\text{полн}}}{(\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}})} \right\rfloor \right) \times \\ \times \frac{(N_{\text{М}} - \eta)}{N_{\text{М}}}, & l_{\text{полн}} < l_{\text{факт}} < l_{\text{max}}; \quad \text{ПС}_{\text{ОП}} = \frac{3600N_{\text{М}}k_{\text{нм}}}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}}, & l_{\text{факт}} \geq l_{\text{max}}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\eta$  – число мест обслуживания, для которых будет полностью использовано время цикла  $C$ ;  $l_{\text{полн}}$  – длина участка между РП и ОП, способного вместить такое число МТС, которое позволит максимально полно загрузить ОП во время действия запрещающего сигнала, не превысив при этом время цикла  $C$ , м. Величина  $l_{\text{полн}}$  считается так же как и  $l_{\text{max}}$  в (7) или (10), только в вместо функции «потолок» используется функция «пол» (за исключением вложенных).

$$\text{Величина } \eta: \quad \eta = \left\lfloor \frac{l_{\text{факт}} - l_{\text{полн}}}{(\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}})} \right\rfloor, \quad l_{\text{полн}} < l_{\text{факт}} < l_{\text{max}}. \quad (9)$$

Аналогично оказывает влияние на ПС удаленность РП и в случае, когда оно располагается после ОП. При этом в первой и второй строке выражения (8) применяется функция «потолок» вместо «пол» для слагаемого  $\frac{G}{\sum t_3 + t_{\text{конф}}}$  и отсутствует параметр

$m$ ; величина  $l_{max}$  имеет тот же смысл, что и в (7), только высчитывается как:

$$l_{max} = (\bar{l}_{МТС} + l_{без}) \left[ \frac{C}{\sum t_3 + t_{конф}} - \left[ \frac{G}{\sum t_3 + t_{конф}} \right] \right] N_M. \quad (10)$$

Под действием РП ПС принимает дискретный характер изменения (рис. 5).

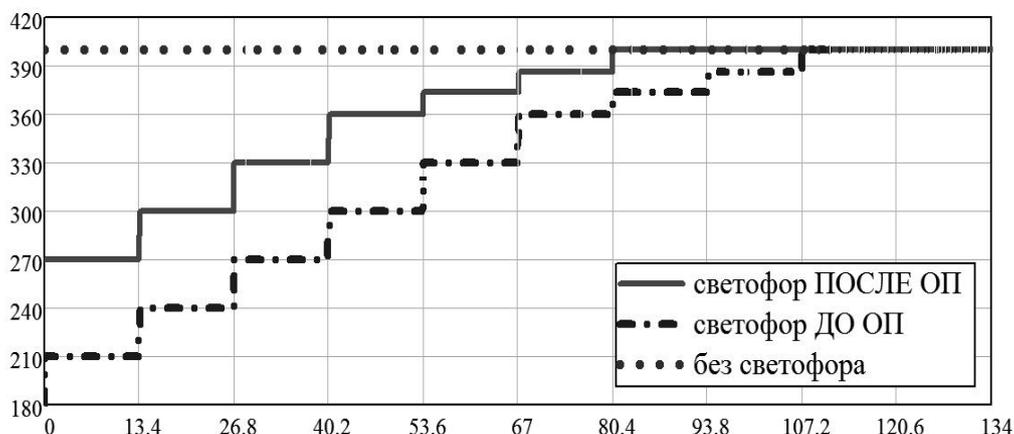


Рисунок 5 – График изменения ПС (ед/ч) с удалением РП от ОП (м) при  $G = 60$  с,  $C = 120$  с,  $N_m = 3, k_{nm} = 1, \sum t_3 + t_{конф} = 27$  с

В случае, когда ОП находится в зоне влияния двух РП и расположен после них, то возможны два варианта: интенсивности потоков по обоим направлениям совпадают ( $I_1 \cong I_2$ ) или автобусы движутся в основном по одному из направлений ( $I_1 \gg I_2$ ). В первом случае ОП будет загружен в течение всего времени, поэтому влиянием РП можно пренебречь. Во втором случае в формулу (8) добавляется еще одно слагаемое  $I_2 \cdot C/3600$ . При этом проверяется условие влияния РП, которое может быть нарушено, так как автобусы с менее загруженного направления будут обслуживаться во время действия запрещающего сигнала главного светофора.

**Время обслуживания пассажиров (время посадки-высадки пассажиров).** Для описания времени обслуживания пассажиров был использован опыт иркутских специалистов, установивших связь между данным временем и удельным пассажирообменом ОП. Однако ввиду отличий в используемом подвижном составе и способах оплаты за проезд в ГПТ, необходимо было уточнить эти зависимости. Для этого необходимо было провести натурный эксперимент.

**Время убытия автобусов с ОП.** Последней составляющей общего времени задержки автобуса на ОП является время, затрачиваемое на убытие автобуса с ОП из заездного кармана или путем совершения маневра по опережению впередистоящего МТС. Для расчетов времени убытия в работе принята модель, разработанная Зедгенизовым А.В, которая учитывает взаимосвязь транспортного потока на соседней полосе движения, класс транспортного средства и факт совершения или несоблюдения маневра при убытии. Данная модель была использована при расчете потерь времени для ОП с маневрированием (табл. 1) и в выражении (3).

**Влияние месторасположения остановочного павильона на ПС ОП.** При проведении комплексного обследования ОП Н.Новгорода был выявлен новый фактор, влияющий на ПС ОП – смещение остановочного павильона относительно начала ОП (рис. 6). На практике водителями МТС при выборе места остановки на ОП чаще всего

используется область прямо напротив остановочного павильона, внутри и возле которого находятся пассажиры. Это связано с отсутствием в Правилах перевозки пассажиров четких рекомендаций к месту остановки автобуса на ОП. На тех ОП, где павильон был заметно смещен относительно начала, наблюдались дополнительные задержки автобусов, связанные с тем, что, несмотря на наличие свободного места в начале ОП, МТС не доезжали до него и в результате создавали очередь (рис. 6). Для проверки гипотезы о влиянии месторасположения остановочного павильона был проведен отдельный эксперимент (гл. 4).

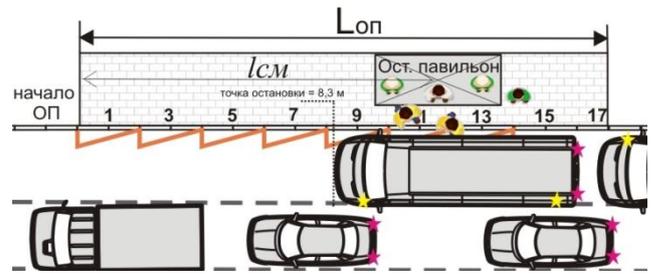


Рисунок 6 – Простой автобуса из-за смещения остановочного павильона

**Простой МТС в ожидании дополнительных пассажиров.** В ходе комплексного обследования ОП был выявлен еще один не изученный ранее фактор, влияющий на ПС ОП – простой МТС на ОП с открытыми дверями с целью ожидания дополнительных пассажиров. Для данного фактора предложен термин «простой в ожидании» (ПвО). Это наблюдалось на 5% от общего количества ОП Н.Новгорода, практически все из них наиболее загруженные. Причинами появления ПвО являются: избыточное количество МТС, работающих на городских маршрутах, высокая степень дублирования маршрутной сети и, как следствие, высокая конкуренция в борьбе за пассажиров.

Данные задержки свойственны, в первую очередь, для коммерческих МТС малого класса (ПАЗ-3204/05), поэтому в дальнейшем все результаты приводятся именно для данного типа МТС, хотя они периодически могут наблюдаться и у муниципальных автобусов большого класса, работающих по расписанию. Этот фактор присутствует на тех ОП маршрута, где наблюдается существенно большая интенсивность поступления пассажиров по сравнению с другими ОП.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям, анализу полученных результатов и разработке комплексной методики расчета ПС ОП. К экспериментальной части работы относится и упомянутое комплексное обследование ОП, одним из результатов которого было получение вспомогательных характеристик для выражения (3), что представлено в табл. 2.



Рисунок 7 – Разметка на ОП «3-й микрорайон Верхние Печеры»

Таблица 2 – Значения величин  $t_{доп}$  и  $k_{нм}$

Число мест	$t_{доп}$ , с		$k_{нм}$	
	Без маневр.	С маневр.	Без кармана	С карманом
1	6,0	6,0	1	1
2	9,0	8,0	0,970	0,975
3	12,5	9,5	0,927	0,937
4	16,5	11,0	0,870	0,885
5	21,0	13,0	0,798	0,816

Базовый эксперимент заключался в фиксации процесса функционирования ОП на цифровую видеокамеру с последующей обработкой и занесением полученных данных в *Excel*. Для построения регрессионных моделей использовался пакет *Statistica*. При исследовании влияния месторасположения павильона на ПС, дополнительно в ночное время производилась разметка ОП (рис.

6 и 7). В утренний «час-пик» проводилась фиксация точек остановки МТС в специально разработанном бланке. Под точкой остановки МТС понимается расстояние от начала ОП до переднего торца МТС при его полной остановке (рис. 6).

После анализа экспериментальных данных получены следующие выражения для определения времени обслуживания пассажиров (табл. 3). При этом  $p$  рассчитывалось по выражению Зедгенизова А.В. как отношение пассажирообмена ОП ( $P$ , пасс/ч) к интенсивности движения МТС ( $I$ , ед/ч).

На рис. 8 представлено графическое отображение результатов исследования точек остановки первых МТС по отношению к расположению павильона на ОП «Донецкая». Как можно видеть, пик концентрации точек остановки автобусов, прибывающих первыми на ОП, находится в зоне остановочного павильона. Из-за сильного смещения павильона на данном ОП было зафиксировано всего шесть случаев остановки МТС на первых 15 метрах длины ОП.

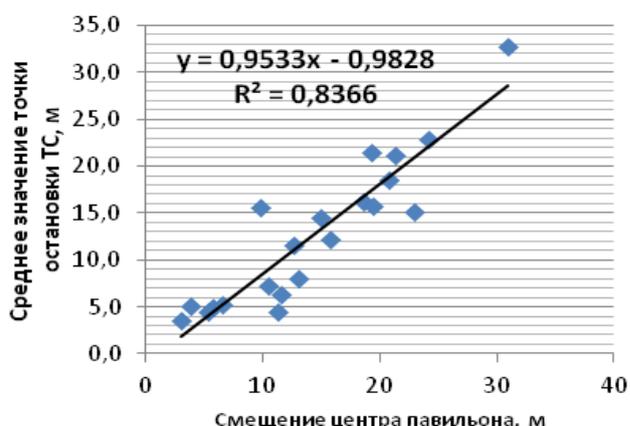
На рис. 9 представлены результаты регрессионного анализа по нахождению зависимости между математическим ожиданием точек остановки автобусов и смещением остановочного павильона. Обнаружена взаимосвязь между этими величинами с коэффициентом детерминации 0,8366. По известной шкале Чеддока такая теснота связи считается «весьма высокой».



**Рисунок 8 – Гистограмма распределения точек остановки МТС на ОП «Донецкая»**

**Таблица 3 – Время обслуживания для различных классов МТС**

Класс МТС	Уравнения регрессии	$R^2$
Особо малый (Газель)	$t_{\text{обсл}} = 9,030 + 1,490 \cdot p$	0,93
Малый (ПАЗ-3205/04)	$t_{\text{обсл}} = 5,565 + 1,128 \cdot p$	0,99
Большой (ЛИАЗ-5256)	$t_{\text{обсл}} = 5,671 + 0,550 \cdot p$	0,97



**Рисунок 9 – Зависимость точек остановки МТС от смещения павильона**

Используя свойства нормального распределения и функцию Лапласа, можно утверждать, что вероятность остановки МТС не дальше чем в  $1\sigma$  от математического ожидания составляет 68,26%, а не дальше чем в  $2\sigma$  – 95,44%. Исходя из этого, не рекомендуется устанавливать павильоны дальше, чем на  $1\sigma$  от среднего значения точек остановки МТС. Отсюда эффективная длина ОП определяется по выражению:

$$L_{\text{эфф}} = \begin{cases} L_{\text{ост}} - l_{\text{см}} + l_{\sigma}, & l_{\text{см}} \geq l_{\sigma}, \text{ М} \\ L_{\text{ост}}, & l_{\text{см}} < l_{\sigma}, \text{ М} \end{cases}, \quad N_{\text{М}} = \frac{L_{\text{эфф}}}{\bar{l}_{\text{МТС}} + l_{\text{без}}}, \quad (11)$$

где  $L_{эфф}$  – эффективная длина ОП, принимаемая при определении числа мест на ОП, м;  $l_{см}$  – смещение центра остановочного павильона относительно начала ОП (рис. 6), м;  $l_{г} = 4 \div 10$  м – расстояние от центра павильона, за которое с большой вероятностью не заедет передний торец МТС (для ПАЗ рекомендуется принимать  $l_{г} = 4$  м, для автобусов ЛиАЗ  $l_{г} = 8 \div 10$  м, для смешанного потока  $l_{г} = 4 \div 8$  м).

При исследовании ПвО была установлена статистически значимая зависимость (рис. 10) между временем ПвО и наполняемостью МТС:  $t_{ПвО} = 1,7459(47,75 - N) = k_{ПвО}(N_{max} - N)$ , (12) где  $N_{max}$  – максимальная наполняемость МТС, чел;  $N$  – средняя наполняемость МТС, чел;  $k_{ПвО} = 1,75$  – коэффициент увеличения ПвО на каждого «недостающего» пассажира, с/чел.

Известно, что предела ПС любой системы можно добиться только при такой же или большей интенсивности поступления требований (автобусов) в систему. Поэтому для проверки адекватности математической модели необходимо было выбрать ОП, на которых могла бы наблюдаться максимальная загрузка. Однако возникла проблема – как только интенсивность транспорта приближается к пределу ПС, на ОП в массовом количестве начинаются нарушения: технические остановки транспорта в 2-3 ряда, посадка-высадка за пределами ОП, проезды мимо и т.п. В этой ситуации проверка математической модели, в которой одним из основополагающих условий является остановка всех автобусов только в зоне ОП, невозможна. Проблема была решена организацией общегородского «Дня культурного обслуживания» (ДКО) (22.10.2014 г.). При этом водителям предписывалось – не допускать остановок МТС вторым рядом, производить посадку-высадку только в зоне ОП, не проезжать мимо ОП и т.д. Предела ПС удалось добиться на четырех ОП в утренний «час-пик» (табл. 4).

Окончательный учет основных действующих факторов позволил разработать методику расчета ПС ОП, а также программный комплекс на её базе. Блок-схема методики представлена на рис. 11. На трех ОП фактическая ПС оказалась выше расчетной.

Вычисленное значение ПС ещё не говорит о её достаточности для качественного обслуживания пассажиров на ОП. Необходимо сравнить полученное значение ПС ОП с интенсивностью движения ГПТ. Если ПС ОП будет больше, равна или незначительно меньше интенсивности движения, то согласно теории массового обслуживания перед ОП будет наблюдаться бесконечно большая очередь.

Таким образом, необходимо найти такое соотношение между интенсивностью движения автобусов и ПС ОП, которое обеспечит его качественное и безопасное функционирование. В качестве критерия эффективности может выступать среднее время ожидания в очереди.

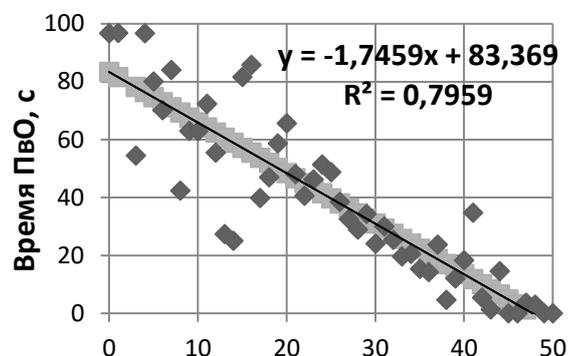


Рисунок 10 – Зависимость ПвО (с) от наполняемости МТС (чел)

Таблица 4 – Статистика ДКО

№	ОП	Расчет. ПС, ед/ч	Факт. ПС, ед/ч	Погреш., %
1	Стрелка	163,5	182	-11,3%
2	Московское Шоссе	182,9	196	-7,2%
3	Донецкая (обр.)	211,2	215	-1,8%
4	Казанское Шоссе	147,4	136	7,7%

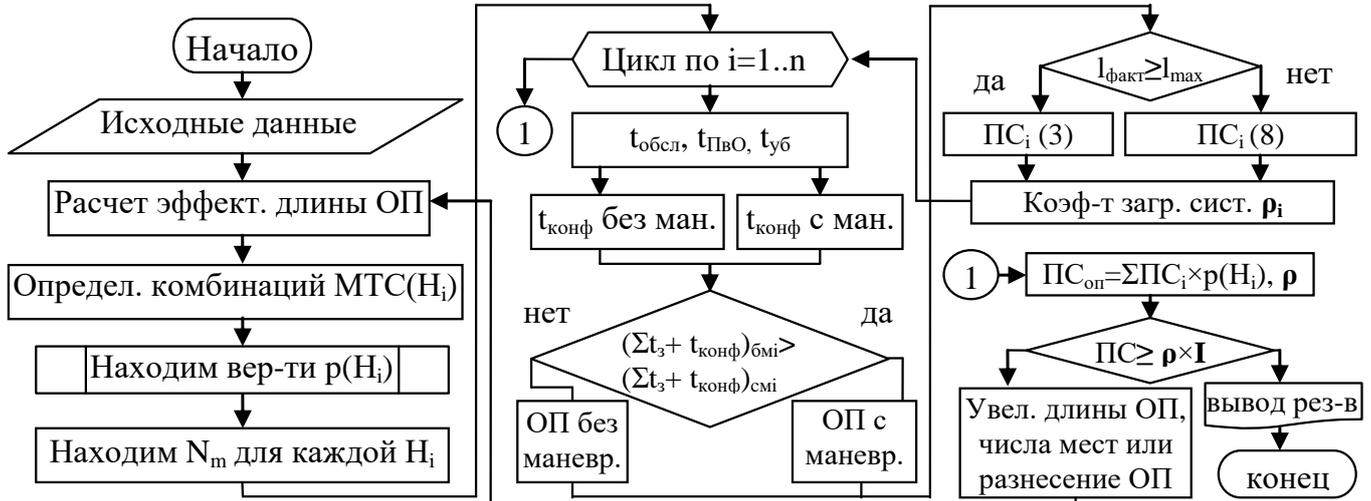


Рисунок 11 – Блок-схема комплексной методики расчета ПС ОП

ОП с маневрированием можно рассматривать как многоканальную систему массового обслуживания с ожиданием. Среднее время ожидания ( $c$ ) в очереди:

$$W_q = \frac{1}{r \mu N_M} \left[ \frac{r N_M^2}{N_M^2 (1-r)^2} \right] \frac{r^{N_M}}{N_M!} \left[ \sum_{n=0}^{N_M-1} \frac{(r N_M)^n}{n!} + \frac{(r N_M)^{N_M}}{N_M! (1-r)} \right]^{-1} \left[ \frac{1 + C_v^2}{2} \right], \quad (13)$$

где  $\mu = \frac{3600}{\sum t_z + t_{\text{конф}}} k_{\text{нм}}$  – интенсивность обслуживания одного места, ед/ч;  $r = \frac{\lambda}{\mu N_M}$ ;

$\lambda$  – интенсивность поступления автобусов, ед/ч;  $C_v$  – коэффициент вариации.

Соотношение интенсивности поступления автобусов и ПС ОП находится в этом случае путем планомерного снижения интенсивности входящего потока ( $\lambda$ ) до тех пор, пока среднее время ожидания в очереди не будет равно заданному.

Для ОП без маневрирования теория массового обслуживания не может быть применена – будет наблюдаться групповое поступление МТС (пока автобус, занявший крайнее место обслуживания не уедет, доступ на ОП заблокирован). В этой связи для получения необходимых зависимостей была использована уже имеющаяся имитационная модель. После модельных экспериментов и обработки полученной статистики построены регрессионные модели (табл. 5).

Для ОП, находящихся в зоне действия светофорного регулирования, также нельзя применить аппарат теории массового обслуживания, так как она не рассматривает системы с периодическим запрещением доступа к постам обслуживания.

Обслуживание на таких ОП происходит циклами, равными циклу светофорного регулирования. Таким образом, интенсивность движения должна быть такой, чтобы после каждого цикла светофора очередь перед ОП обнулялась, то есть за каждый цикл поступало столько авто-

Таблица 5 – Коэффициент загрузки системы для ОП без маневрирования

Число мест	Регрессионная модель ( $W_q, c; ПС_{\text{оп}}$ , ед/ч)	$R^2$
2	$\rho = \frac{\ln(W_q ПС_{\text{оп}}^{1,03548})}{5,76907} - 0,8218$	0,995
3	$\rho = \frac{\ln(W_q ПС_{\text{оп}}^{1,13075})}{5,98271} - 0,8552$	0,987
4	$\rho = \frac{\ln(W_q ПС_{\text{оп}}^{1,19191})}{6,03761} - 0,9082$	0,992
5	$\rho = \frac{\ln(W_q ПС_{\text{оп}}^{1,26539})}{6,16292} - 0,96$	0,992

бусов, сколько способен пропустить ОП. В противном случае время ожидания у последних в очереди МТС превысит время цикла светофора, что часто приводит к попыткам водителей «проскочить» на запрещающий сигнал светофора, осуществить высадку пассажиров вне границ ОП и т.п. Вероятность того, что число поступивших автобусов за цикл светофора  $C$  будет больше  $k$ :

$$P(x < k) = 1 - \sum_{i=0}^k \frac{(\lambda C)^i}{i!} e^{-\lambda C}, \quad (14) \quad \text{где } \lambda - \text{интенсивность движения ГПТ, ед/с.}$$

Величина  $k$  определяет число автобусов, способных пройти через ОП за каждый цикл светофора. Например, в выражении (5) это величина в скобках.

Анализируя (13), (14), а также табл. 5, можно утверждать, что для обеспечения качественного функционирования ОП ( $W_q \leq 30$  с,  $P(x < k) \leq 10\%$ ) необходимо снижать интенсивность потока автобусов на 30-40% от ПС ОП.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача по повышению эффективности функционирования ГПТ путем управления ПС ОП.

1. Построены закономерности изменения потерь времени от взаимных помех между одновременно находящимися на ОП МТС в зависимости от режима функционирования (с маневрированием или без него). Установлено, что ОП функционирует в том режиме, при котором суммарная задержка автобусов на нем будет наименьшей.

2. Установлены закономерности влияния на ПС ОП имеющихся до и после них регулируемых пересечений. Влияние на ПС может достигать 47,5% и нивелируется при расположении регулируемого пересечения на расстоянии 80-110 м от ОП.

3. Произведен анализ фактора «простой в ожидании» МТС, когда они искусственно задерживаются на ОП. Эти временные простои могут превосходить все остальные задержки в совокупности и линейно зависят от наполняемости МТС. Например, для автобусов ПАЗ реальные задержки составляют до 34,52 с, полученное по математической модели значение составляет 30,64 с.

4. Определены рациональные геометрические параметры расположения павильонов, которые должны находиться на расстоянии не более 4-10 м от своего центра до выезда с ОП (зависит от класса МТС). Введено понятие эффективной длины ОП, которая реально заполняется МТС; расположенная за павильоном на выезде часть ОП фактически не используется.

5. Разработана комплексная методика расчета ПС ОП с учетом непостоянного числа мест обслуживания и прочих наиболее значимых факторов. Расхождение расчетных и экспериментальных значений ПС не превышает 11,3%.

6. Определены условия функционирования ОП, при которых потери времени автобусами на ожидание обслуживания не будут более установленных. Доказано, что для работы ОП без дополнительных очередей и простоев МТС необходимо снижать интенсивность их движения в среднем на 30-40% от ПС.

7. Расчетный экономический эффект от использования результатов исследования составляет 107 070,4 руб/год на один загруженный ОП.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

### - в рецензируемых научных журналах из «Перечня...» ВАК:

1. **Липенков А.В.** О результатах комплексного исследования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта в г. Нижнем Новгороде // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №4. – с. 93-102.

2. **Липенков А.В.** О подходах к моделированию времени простоя автобусов на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта / А.В.Липенков, О.А. Маслова, М.Е. Елисеев // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №3. – с. 84-93.

3. **Липенков А.В.** О влиянии месторасположения павильона для пассажиров на пропускную способность остановочного пункта городского пассажирского транспорта // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №5. – с. 177-183.

4. **Липенков А.В.** Исследование простоев маршрутных транспортных средств в ожидании дополнительных пассажиров на остановочных пунктах // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – №2. – с. 160-166.

5. **Липенков А.В.** Определение пропускной способности остановочного пункта городского пассажирского транспорта при непостоянном числе мест обслуживания / А.В. Липенков, М.Е. Елисеев// Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. - № 3(130). – (Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 8). – 2014. – с. 79-81.

6. **Липенков А.В.** Математическая модель пропускной способности остановочного пункта в случае отсутствия маневров по обгону автобусами друг друга /А.В. Липенков, Н.А. Кузьмин, Л.Н. Ерофеева// Вестник Оренбургского государственного университета –2015. – №4(179). – с. 87-94.

7. **Липенков А.В.** Исследование потерь времени от взаимных помех между автобусами на остановочных пунктах / А.В. Липенков, Н.А. Кузьмин // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – №3. – с. 84-95.

8. **Липенков А.В.** Определение допустимого уровня интенсивности движения городских автобусов при известной пропускной способности остановочного пункта / А.В. Липенков, Н.А. Кузьмин// Интеллект, Инновации, Инвестиции. – 2015. –№3. – с. 97-102.

9. **Липенков А.В.** Исследование влияния регулируемого пересечения на пропускную способность остановочного пункта // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №9. – с. 113-120.

### - в других изданиях:

10. **Липенков А.В.** Имитационная модель остановочного пункта городского пассажирского транспорта // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №4. – с. 50-55.

11. **Липенков А.В.** Факторы, влияющие на пропускную способность остановочного пункта городского пассажирского транспорта: матер. XII межд. науч.-практ. конф. «Прогрессивные технологии в транспортных системах»/А.В. Липенков – Оренбург: ОГУ, 22-24 апреля 2015. – с. 129-136.

12. **Липенков А.В.** Анализ состояния и функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта г. Нижнего Новгорода: материалы 3-ей межд. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» / А.В. Липенков, Н.А. Кузьмин. – Орел, Госуниверситет – УНПК, 21-23 мая 2013 г. – с. 188-192.

13. **Липенков А.В.** О влиянии регулируемых пересечений на пропускную способность остановочных пунктов городского пассажирского транспорта: материалы XIV межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств» /А.В. Липенков, О.А. Маслова, Т.С. Перцева. Владимир, ВГУ им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – 21-23 ноября 2011 г. – с. 147-149.

14. **Липенков А.В.** Анализ закона распределения времени обслуживания пассажиров на остановочных пунктах городского пассажирского транспорта: материалы VII межд. науч.-техн. конф. «Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств» / А.В. Липенков, О.А. Маслова. Пенза, ПГУАС. – 16-18 мая 2012 г. – с. 328-334.