

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени Г.Ф. МОРОЗОВА

На правах рукописи



**АРТЕМОВ АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ УЛИЦАХ  
МАЛЫХ И СРЕДНИХ ГОРОДОВ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., доцент  
Дорохин С.В.

Воронеж 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В ГОРОДАХ</b> .....	10
1.1 Зарубежные методы.....	10
1.2 Отечественные методы.....	17
1.3 Методы расчета программ координации на магистральных улицах.....	21
1.4 Основные принципы ввода и оценки эффективности координированного управления.....	24
1.5 Выводы по главе 1.....	28
<b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ УЛИЦАХ</b> .....	30
2.1 Анализ координированных участков малых и средних городов.....	31
2.1.1 Исследование магистральной улицы г. Павловск.....	32
2.1.2 Исследование магистральной улицы г. Россошь.....	45
2.2 Моделирование процесса движения в программной среде AnyLogic.....	46
2.3 Разработка подхода к оценке эффективности работы координированного участка.....	62
2.4 Вывод по главе 2.....	66
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ</b> .....	68
3.1 Оценка эффективности координированного управления.....	68
3.1.1. Результаты проведения эксперимента 1.....	77
3.1.2. Результаты проведения эксперимента 2.....	78
3.1.3. Результаты проведения эксперимента 3.....	81
3.1.4. Результаты проведения эксперимента 4.....	82

3.2 Разработка математической модели взаимосвязи интенсивности и задержек транспортных средств при координированном управлении.....	84
3.3 Результаты натурного эксперимента на исследуемом участке.....	90
3.4 Выводы по главе 3.....	96
<b>ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>97</b>
4.1 Оценка изменения величины задержки транспортного потока.....	97
4.2 Оценка изменения расхода топлива.....	100
4.3 Снижение потерь от загрязнения воздуха.....	101
4.4 Выводы по главе 4.....	103
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>104</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>106</b>
Приложение А.....	120

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Активное внедрение и использование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) объясняется довольно быстрым эффектом, в плане управления транспортными потоками на основании снижения задержек транспортных средств и как следствие повышение пропускной способности. Сегодня, ИТС представлены различными видами оборудования, позволяющими управлять транспортными процессами, а также осуществлять их мониторинг. В связи с необходимостью обеспечения безостановочного процесса движения, ИТС в основном располагаются на федеральных участках трасс, в крупнейших и крупных агломерациях и крупнейших и крупных городах. В малых и средних городах, несмотря на аналогичные транспортные проблемы, применение ИТС пока не реализуется в полной мере. В условиях таких городов, на различных участках улично-дорожной сети (УДС) довольно часто возникают длительные задержки автотранспорта, что может стать причиной возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП). В таких условиях, альтернативным подходом к улучшению транспортной ситуации является применение новых методов и алгоритмов для работы имеющегося оборудования, особенно при осуществлении управления движением транспортных потоков с помощью светофоров.

На протяжении многих лет светофорное регулирование продолжает оставаться наиболее эффективным способом управления транспортными потоками, что и объясняет его востребованность как с практической точки зрения, так и с научной. Особое внимание в научном аспекте исследования светофорного управления уделяется методам и алгоритмам, их уточнению и совершенствованию. Сегодня, в малых и средних городах, обладающих отдельными видами исполнительных элементов, развитие ИТС обеспечивается применением новых методов и алгоритмов, которые в определенной степени поддерживают требуемые показатели, в том числе и при управлении транспортными потоками.

В большинстве городов Российской Федерации, имеются магистральные улицы, управление транспортными потоками на которых осуществляется с помощью светофоров. Но определенная загруженность связных участков требует оперативного изменения циклов и, как следствие, режимов работы светофора. Если в больших, крупных, крупнейших и сверхкрупных городах имеются ресурсы для выполнения данных операций, в виду постоянного мониторинга через специализированные центры организации дорожного движения (ЦОДД), то отсутствие таких возможностей в малых и средних городах, приводит к возникновению транспортных проблем – заторов, что в первую очередь требует совершенствования методов управления, чем и объясняется актуальность темы исследования.

**Цель работы** – снижение потерь времени участниками дорожного движения за счет эффективной организации светофорного регулирования на магистральных улицах.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Выполнить анализ методов и условий ввода согласованного типа управления регулируемых перекрестков;
2. Определить значения показателей транспортных потоков на пересечениях магистральной улицы УДС малых и средних городов Воронежской области;
3. Усовершенствовать условия ввода согласованного типа управления транспортными потоками на пересечениях магистральной улицы при изменении показателей транспортного потока;
4. Разработать алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления;
5. Осуществить оценку разработанного алгоритма с помощью определения эколого-экономических показателей.

**Объект исследования** – процесс движения транспортных средств на пересечениях магистральной улицы с согласованными регулируемыми перекрестками.

**Предмет исследования** – транспортные потоки и величина задержки транспортных средств.

**Научная новизна:**

1. Путем корреляционного анализа установлены зависимости между параметрами интенсивности дорожного движения на основной (координируемой) улице и параметрами интенсивности дорожного движения второстепенных (прилегающих) улиц, позволяющие выполнить координированное управление движением транспортных потоков и снизить время задержки транспорта.

2. На основе математической зависимости, описываемой полиномиальной функцией второй степени  $k_t = 0,8264 \cdot k_N^2 - 0,8727 \cdot k_N + 0,834$  с достоверностью 87% установлен параметр коэффициента соотношения задержек транспорта.

3. На основе разработанного алгоритма принятия решения установлены коэффициенты соотношения, позволяющие осуществить выбор наиболее эффективного способа координированного управления движением транспортных потоков путем светофорного регулирования.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Установлены зависимости между показателями транспортных потоков на магистральной улице и согласованными регулируемыми перекрестками. Разработан алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления регулируемых перекрестков, входящих в состав магистральных улиц.

Результаты исследования имеют прикладной характер и могут быть использованы при реализации программ развития систем управления дорожным движением на перекрестках, расположенных в малых и средних городах. Полученные результаты позволяют снизить среднюю величину задержки на регулируемых перекрестках, управление которых согласованно, что позволит

повысить комплексную эффективность функционирования улично-дорожной сети посредством систем светофорного регулирования, в том числе автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД).

**Методология и методы исследования.** Диссертационное исследование выполнено на основе трудов ведущих отечественных и зарубежных ученых в области организации и управления дорожным движением, в числе которых Ю.А. Врубель, М.Ю. Кременец, М.Б. Афанасьев, А.А. Поляков, Д. Дрю, Г.И. Клинковштейн, В.А. Корчагин, Е.М. Лобанов, А.Ю. Михайлов, С.В. Жанказиев, В.В. Зырянов, А.Н. Новиков, И.А. Новиков, С.А. Евтюков, И.Е. Агуреев, В.В. Сильянов, М.Р. Якимов, А.Г. Шевцова, Д. Берри, А. Миллер, Ф. Вебстер, Б. Кобб, Б. Петерсен и др. ученые.

Теоретико-методологической основой исследования явились натурные наблюдения, статистический анализ, математическое моделирование, имитационное моделирование, экспериментальные методы обследования транспортных потоков.

**Информационная база исследования.** Законодательные и нормативные правовые акты, Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозным периодом до 2035 года, Федеральные и региональные целевые программы развития транспортных систем, материалы федеральных и региональных органов власти и управлений, статистические данные.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность диссертационного исследования подтверждена экспериментально, обеспечивается исследованием существующих методов управления движением транспортных потоков, корректным применением продуктов имитационного моделирования и оценкой адекватности выполненных процедур.

**Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.** Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта по пункту 3 «Исследование закономерностей, разработка моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения в решении задач проектирования, организации, пла-

нирования, управления и анализа транспортного процесса» и пункту 5 «Организация и управление грузовыми и пассажирскими автомобильными перевозками, автотранспортными потоками, транспортное планирование и моделирование».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследования доложены, обсуждены и одобрены на Международных научно-практических конференциях и форумах: «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орел, 2020, 2021, 2022, 2023), «Организация и безопасность движения в крупных городах» (Санкт-Петербург, 2020), «Организация и безопасность дорожного движения» (Тюмень, 2020), «2020 International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment» (Севастополь, 2020), «VIII International Scientific Conference Transport of Siberia» (Новосибирск, 2021), «International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia» (Новосибирск, 2021), «Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки» (Воронеж, 2022), «Технология транспортных процессов - настоящее и будущее» (Воронеж, 2021), «Проблемы и перспективы конструктивного совершенствования отечественного автомобилестроения» (Воронеж, 2023), «Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering» (Ростов-на-Дону, 2023), «Технология транспортных процессов: состояние, проблемы, перспективы» (Воронеж, 2023), «Проблемы социально-экономической устойчивости региона» (Пенза, 2021).

**Реализация результатов работы.** Основные теоретические результаты исследования реализованы в виде специализированных алгоритмов и методов, а также методических рекомендаций по их применению на улично-дорожной сети г. Павловск и г. Россошь, расположенных в Воронежской области, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Материалы исследования используются в учебном процессе при обучении бакалавров и магистров по дисциплинам «Технические средства организации дорожного движения», «Организация дорожного движения», «Моделирование и оптимизация в технологии транспортных процессов» на кафедре



«Организации перевозок и безопасности движения» ФГБОУ ВО «Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова».

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 19 статьях, в том числе в 6 ведущих изданиях, из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 6 в изданиях, включенных в зарубежную аналитическую базу данных SCOPUS и WoS и 7 в изданиях, входящих в базу российского индекса научного цитирования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 119 наименований и приложения. Текст диссертации изложен на 124 страницах, включает 21 таблицу, 46 рисунков.

# ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В ГОРОДАХ

## 1.1 Зарубежные методы

Управление транспортными потоками с применением светофорного регулирования на протяжении многих лет продолжает оставаться актуальным направлением в области повышения, как эффективности, так и безопасности дорожного движения. В связи с высокими темпами автомобилизации, с которым сегодня столкнулись многие города, особое внимание в данном вопросе уделяется эффективному управлению и как следствие, развитию новых оптимальных методов управления с целью максимально возможного пропуска транспортных средств через регулируемый участок дорожной сети.

В зарубежной практике, известно много исследований многих в области регулирования движения [1-11], наиболее значимые из них были проведены такими исследователями как N. Gartner [1], D. Hook [2], J. Bonneson [2], В. Asadi [3], N. Bellomo [4], M. Diehl [5]. Результаты данных исследований активно используются в различных руководствах по требованиям к методам расчета необходимых программ координации регулируемого участка, например в HCM (*Highway Capacity Manual*) [12]. В данном документе [12] определено, что продолжительность цикла регулирования состоит из пяти периодов времени:

$$D_p = l_1 + g_s + g_e + Y + R_c, \quad (1)$$

где  $D_p$  – длительность цикла регулирования, с;  $l_1$  – время задержки (простоя) при включении зеленого сигнала светофора, с ( $l_1 = 2$  с);  $g_s$  – время разъезда очереди автомобилей, с;  $g_e$  – время удлинения зеленого сигнала, с;  $Y$  – время желтого сигнала, с;  $R_c$  – время красного сигнала, с.

При расчете длительности фаз регулирования, в зарубежной практике определено две их разновидности, представленных на рисунке 1.

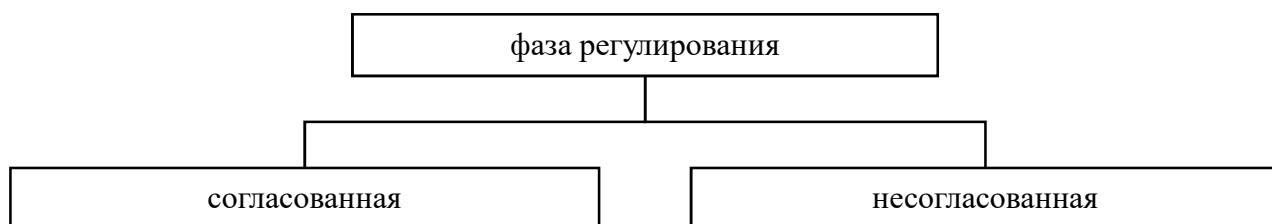


Рисунок 1 – Разновидность фаз регулирования в соответствии с НСМ  
2016[12]

Согласованная фаза регулирования, связана со сложной процедурой управления, которая в основном реализуется на координированных участках, где осуществляется управление несколькими перекрестков. Несогласованная фаза регулирования применяется в основном на изолированных участках, где нет связи с последующими и предыдущими или же регулирование по типу вызова, например при организации движения, на пешеходных переходах.

Согласно анализу методов расчета, представленных фаз регулирования (рис. 1) с учетом цели и задач исследования более подробно был рассмотрен расчет согласованной фазы регулирования. Следует отметить, что для реализации расчета таких фаз необходимо применение сложных аппаратных комплексов, которые позволяют осуществлять постоянный мониторинг движения. В таком случае особое внимание уделяется разъезду транспортных средств находящихся в очереди, которые возможно определить с использованием формул (2)-(4):

$$\lambda^* = \sum_{i=1}^m \lambda_i, \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{\varphi_i q_i}{1 - \Delta_i q_i}, \quad (3)$$

$$\varphi_i = e^{-b_i \Delta_i q_i}, \quad (4)$$

где  $\lambda^*$  – параметр разъезда для определенной фазы регулирования (авт/с);  $\lambda_i$  – параметр разъезда для группы полос  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), авт/с;  $\varphi_i$  – доля свободных (не сгруппированных) автотранспортных средств в группе полос движения  $i$  (десятичная дробь);  $q_i$  – скорость потока на входе для группы полос  $i = v_i / 3600$ , авт/с;  $v_i$  – разъезд потока автотранспортных средств для группы полос

$i$ , авт/час;  $\Delta_i$  – продолжительность разезда потока сгруппированных транспортных средств в группе полос движения  $i$  ( $\Delta_i=1,5$  для однополосной группы;  $\Delta_i= 0,5$  в иных случаях), с/авт;  $m$  – количество групп полос, обслуживаемых в течение согласованной фазы регулирования;  $b_i$  – коэффициент группирования для группы дорожек  $i$  ( $b_i=0,6$  – для групп полос, предназначенных для движения в одном направлении;  $b_i=1$  – для групп полос, предназначенных для движения в разных направлениях).

В дальнейшем, обязательным условием является учет скорости разезда автомобилей и скорости движения транспортного потока на подходе к координированному участку, эти переменные также используются для вычисления времени работы согласованной фазы:

$$\varphi^* = e^{-\sum_{i=1}^m b_i \Delta_i q_i}, \quad (5)$$

$$\Delta^* = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \Delta_i}{\lambda^*}, \quad (6)$$

$$q^* = \sum_{i=1}^m q_i, \quad (7)$$

где  $\varphi^*$  – комбинированная доля свободных (не сгруппированных) транспортных средств для рассматриваемой фазы регулирования;  $\Delta^*$  – эквивалентная продолжительность разезда сгруппированного потока транспортных средств, в рассматриваемой фазе регулирования, с/авт;  $q^*$  – скорость движения транспортного потока на входе для рассматриваемой фазы регулирования, м/с.

Далее возможным становится определение времени разезда скопившейся очереди автомобилей:

$$g_s = \frac{qC(1-P)}{\frac{s}{3,600} - qC(P/g)}, \quad (8)$$

где  $P$  – доля автотранспортных средств, прибывающих во время работы разрешающего сигнала светофора;  $S$  – поток насыщения для одной рассматриваемой полосы для движения, авт/ч/полосу.

Представленный подход, довольно распространен в зарубежной практике [1-6], т.к. позволяет установить многие показатели, связанных в основ-

ном с временем разезда автомобилей и тем самым продлить длительность разрешающего сигнала на управляемом участке, но сам процесс расчета длительности согласованной фазы является сложным стадийным процессом (рис. 2), при котором производится продолжительности разрешающего сигнала и времени смещения для осуществления координированного движения.



Рисунок 2 – Процесс комбинированного расчета длительности фаз при согласованном управлении

*A. Рассчитать эффективный период переключения.* Период переключения рассчитывается для каждой фазы. Он равен сумме продолжительности желтого сигнала и красного ( $Y + R_c$ ).

*B. Оценка зеленого интервала.* Для каждой согласованной фазы предоставляется начальная оценка продолжительности интервала между зелеными сигналами. Для первой итерации с полностью активированным управлением начальная оценка равна максимальной зеленой настройке. Для второй итерации первоначальная оценка равна разделению входной фазы за вычетом периода переключения.

*C. Вычислить эквивалентный максимум зеленого сигнала (скоординированный).* Если контроллер работает как скоординировано-управляемый, то эквивалентный максимум зеленого рассчитывается для каждой фазы. Он основан на оценке продолжительности зеленого сигнала и разделении фаз.

*D. Построение многоугольника накопления очереди (МНО).* МНО строится для каждой группы полос и соответствующей фазы с помощью определенных скоростей потока насыщения и синхронизации сигнала управления.

*E. Время обслуживания очереди скопившихся автомобилей.* Время обслуживания очереди  $g_s$  вычисляется для каждого МНО, построенного в шаге D.

*F. Вычислить скорость вызова для продления зеленого сигнала.* Скорость расширяющихся вызовов представлена параметром скорости потока  $\lambda$ . Этот параметр рассчитывается для каждой группы полос, обслуживаемой задействованной фазой с использованием формулы (2), и затем суммируются с использованием формулы (3).

*H. Вычислить количество расширений до максимального значения.* Среднее количество расширений до того, как фаза завершится максимальным значением, вычисляется для каждой активной фазы:

$$n = q^*[G_{max} - (g_s + l_1)] \geq 0, \quad (9)$$

где  $n$  — количество расширений до того, как зеленый интервал достигнет своего максимальный предела;  $G_{max}$  — максимальное значение зеленого сигнала.

*I. Вычислите вероятность зеленого расширения.* Вероятность продления интервала из-за случайного прибытия количества транспортных средств рассчитывается для каждой задействованной фазы:

$$p = 1 - \varphi^* e^{-\lambda^*(MAN^* - \Delta^*)}, \quad (10)$$

*J. Вычислить время расширения зеленого сигнала.* Среднее время продления зеленого цвета рассчитывается для каждой активированной фазы:

$$g_e = \frac{p^2(1-p^n)}{q^*(1-p)}, \quad (11)$$

*K. Вычислить скорость вызова при активации.* Скорость вызова для активации фазы вычисляется для каждой активированной фазы.

*L. Вычислить вероятность фазового вызова.* Вероятность вызова активированной фазы зависит от того, установлена ли она при отзыве в контроллере. Если он находится в отзыве, то вероятность того, что фаза называется равным 1.0. Если фаза не находится в состоянии отзыва, то вероятность ее вызова можно оценить с помощью уравнений:

$$p_c = p_v(1 - p_p) + p_p(1 - p_v) + p_v p_p, \quad (12)$$

$$p_v = 1 - e^{-q_v^* C}, \quad (13)$$

$$p_p = 1 - e^{-q_p^* P_p C}, \quad (14)$$

где  $p_c$  – вероятность того, что предметная фаза будет вызвана;  $p_v$  – вероятность того, что рассматриваемая фаза будет вызвана при обнаружении транспортного средства;  $p_p$  – вероятность того, что объектная фаза будет вызвана при обнаружении пешехода,  $q_v^*$  – активация скорости автомобильного вызова для фазы (авт/с);  $q_p^*$  – активация скорости вызова пешеходов для фазы (пеш/с);  $P_p$  – вероятность того, что пешеход нажмет кнопку вызова (принимают 0,51).

*M. Вычислить несбалансированную длительность зеленого.* Несбалансированная средняя длительность зеленого интервала вычисляется для каждой активной фазы с помощью уравнений:

$$G_u = G_{|veh,call}p_v(1 - p_p) + G_{|ped,call}p_p(1 - p_v) + \quad (15)$$

$$\max(G_{|veh,call}, G_{|ped,call})p_vp_p \leq G_{max},$$

$$G_{|veh,call} = \max(l_1 + g_s + g_e, G_{min}), \quad (16)$$

$$G_{|ped,call} = Walk + PC, \quad (17)$$

где  $G_u$  – длительность несбалансированного зеленого интервала для фазы или фаз;  $G_{|veh,call}$  – средний интервал между зелеными сигналами при условии, что фаза вызывается транспортным средством;  $G_{min}$  – минимальная длительность зеленого сигнала;  $G_{|ped,call}$  – средний интервал между зелеными сигналами при условии, что фаза вызывается пешеходом;  $Walk$  – настройка пешеходной прогулки;  $PC$  – настройки для пешеходов.

*N. Вычислить длительность несбалансированной фазы.* Средняя длительность несбалансированной фазы вычисляется для каждой активированной фазы. Добавив длительность несбалансированного зеленого интервала и соответствующее изменение компонентов рассматриваемого периода:

$$D_{up} = G_u + Y + R_c, \quad (18)$$

где  $D_{up}$  – длительность несбалансированной фазы, с.

*O. Вычислить среднюю продолжительность фазы, при нескорректированном управлении.*

$$D_{p,b} = \max(D_{up,1} + D_{up,2} + \dots + D_{up,n}) - D_{p,a}, \quad (19)$$

где  $D_{p,b}$  – длительность фазы для фазы  $b$ , которая наступает сразу после фазы  $a$ , с;  $D_{p,a}$  – длительность фазы  $a$ , с;  $D_{up,i}$  – длительность несбалансированной фазы для фаз главной (1,3,n) и второстепенных (2,4,n) улиц

*P. Вычислить среднюю продолжительность фазы - координированное управление.*

$$D_{p,t} = C - \max(D_{up,1} + D_{up,2} + \dots + D_{up,n}) - D_{p,l}, \quad (20)$$

где  $D_{p,t}$  – длительность согласованной фазы, с;  $D_{p,l}$  – длительность фазы левого поворота, с.

Если для рассматриваемого подхода отсутствует фаза левого поворота, то  $D_{p,l}=0$ . Если  $D_{p,t}$ , полученное из уравнения (20), меньше минимальной фазы длительность ( $G_{min} + Y + R_c$ ), то разбиение фазы слишком велико и не оставлять достаточно времени для согласованных фаз, требуется перерасчет по ране определенном координированном расчете (рис. 2).

*Q. Вычислить продолжительность интервала зеленого сигнала.* Средняя продолжительность зеленого сигнала вычисляется для каждой фазы путем вычитания интервалов изменения желтого и красного цвета относительно средней продолжительности фазы:

$$G = D_p - Y - R_c, \quad (21)$$

где  $G$  – длительность зеленого сигнала, с.

*R. Сравните вычисленную и предполагаемую длительность зеленого сигнала.* Продолжительность зеленого сигнала, определенного в шаге Q, сравнивается со значением, определенным в шаге В. Если два значения отличаются на 0,1 с или более, то вычисленный интервал зеленого сигнала становится новой начальной оценкой, а последовательность вычисления повторяются, начиная с шага С, до тех пор, пока два интервала зеленого цвета не будут отличаться менее чем на 0,1 с. Если перекресток полуавтоматизирован или полностью задействован, продолжительность цикла вычисляется с помощью уравнения:



$$C_e = \sum_{i=1}^4 D_{p,i}, \quad (22)$$

где  $C_e$  – продолжительность цикла, а  $i$  – номер фазы.

Представленный алгоритм (рис. 2) реализуется в сложных интеллектуальных системах, в состав которых входят контроллеры и детекторы нового поколения, позволяющие осуществить поиск разрыва в транспортном потоке, оперативно оценить изменения характеристик транспортного потока в режиме on-line, безусловно, применение такой сложной системы требует больших вложений, который в масштабах малых городов не представляется экономически целесообразным. Тем не менее, установлено, что на продолжительность разрешающего сигнала и принятие решения о его смене будет оказывать влияние характеристики транспортного потока, которые в случае зарубежных подходов определяются оперативно – автоматически с использованием специализированного оборудования и сложных программно-аппаратных комплексов.

Таким образом, в результате анализа зарубежных методов расчета параметров координированного управления установлено два основных, подразделяемых в зависимости от сложности расчета, определено что при использовании каждого требуется постоянный мониторинг состояния транспортного потока. В случае такого типа управления в масштабах малых городов, в связи с отсутствием специализированного оборудования, данные методы не применимы.

На следующем этапе исследования, выполнен анализ методов, активно применяемых в отечественной практике.

## 1.2 Отечественные методы

В отечественной практике теорией транспортных потоков и вопросами управления транспортными потоками посвящены труды Сильянова В.В. [13,14], Пугачева И.Н. [15], Зырянова В.В. [16, 17], Миротина Л.Б. [18], Жанказиева С.В. [19], Новикова А.Н. [20] и др. [21-29]. Согласно научным источ-

никам и нормативным [30], расчет цикла заключается в выполнении последовательных действий, представленных на рисунке 3.

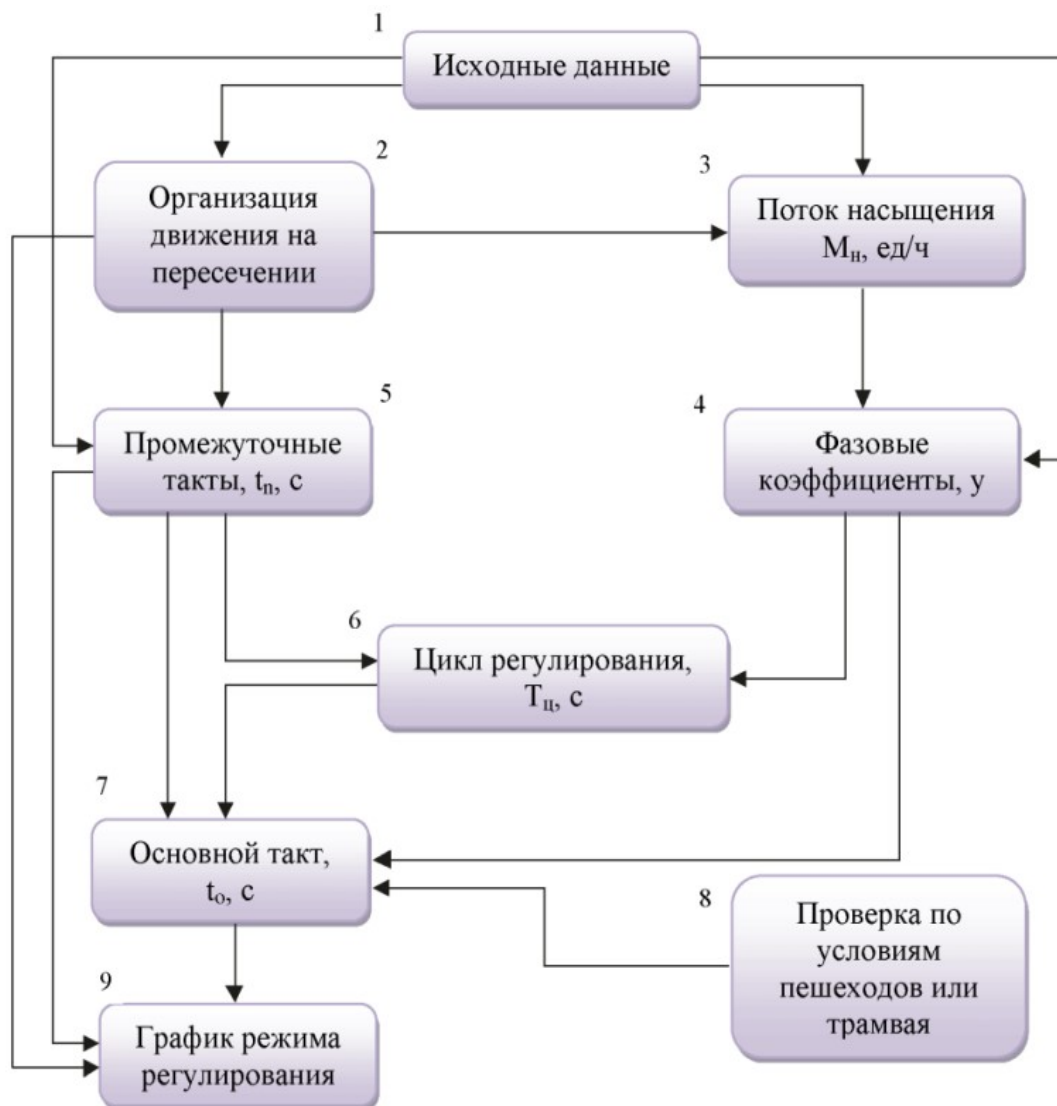


Рисунок 3 – Схема процедуры расчета режима регулирования светофора

В соответствии с методическими рекомендациями [30], расчет длительности фаз регулирования и последующей длительности цикла осуществляется с использованием формул (23) – (32).

Следуя последовательности, определенной на рисунке 3, после определения потока насыщения, необходимо осуществить расчет фазовых коэффициентов –  $y_{ij}$ , которые представляют собой отношение интенсивности движения –  $N_{ij}$ , ед/ч, к пропускной способности  $M_{nij}$ , ед/ч для рассматриваемой

фазы регулирования  $i$  и определенной полосы  $-j$ , с использованием формулы (23):

$$y_{ij} = N_{ij} / M_{nij}, \quad (23)$$

Далее осуществляется выбор максимального значения для каждой фазы и производится их суммирование:

$$y_i \rightarrow \max, \quad (24)$$

$$Y = \sum_1^n y_i. \quad (25)$$

где  $n$  – количество фаз регулирования.

В соответствии с утвержденной методикой определения длительности цикла [30] осуществляется расчет промежуточных тактов отдельно для двух типов потоков – транспортных и пешеходных.

При расчете промежуточного такта, необходимого для своевременной остановки транспортного средства или завершении начатого маневра, необходимо натурным методом установить среднюю скорость движения автотранспортных средств при движении на подходе к перекрестку –  $v_a$ , км/ч. Определить среднее замедление автотранспортного средства при включении запрещающего сигнала, обычно принимают  $3 - 4 \text{ м/с}^2$ , измерить расстояние от стоп-линий до самой дальней конфликтной точки –  $l_i$ , м и длину автотранспортного средства, наиболее часто встречающегося в потоке –  $l_a$ , м, что позволяет осуществить расчет искомой величины промежуточного такта с использованием формулы:

$$t_{ni} = v_a / (7,2a_t) + 3,6(l_i + l_a) / v_a, \quad (26)$$

Для расчета промежуточного такта в отношении пешеходного движения, необходимо измерить ширину проезжей части, которую в рассматриваемой фазе регулирования пересекают пешеходы –  $B_{пш}$ , м и определить скорость движения пешеходов –  $v_{пш}$ , м/с, которую обычно принимают  $1,3 \text{ м/с}$  [30], что позволяет осуществить расчет с использованием формулы:

$$t_{ni(пш)} = B_{пш} / 4v_{пш}, \quad (27)$$

По результату расчета при смешанном движении – одновременном движении транспортных и пешеходных потоков, за промежуточный такт принимается максимальное значение, установленное по результату выполненных расчетов с использованием формул (26) и (27).

В дальнейшем, все полученные значения для каждой фазы регулирования суммируются:

$$T_{\Pi} = \sum_1^n t_{\Pi i}, \quad (28)$$

Далее осуществляется определение цикла регулирования, значение которого является не окончательным, а промежуточным и используется для произведения последующих расчетов и определения необходимой длительности цикла и соответствующих фаз регулирования.

$$T_{\text{ц}} = (1,5T_{\Pi} + 5)/(1 - Y), \quad (29)$$

По результату выполненного расчета, возможным становится расчет длительности основного такта, который по аналогии с длительностью промежуточного такта определяется отдельно для транспортного и пешеходного потока, осуществляющего движение в одной фазе регулирования.

1. Основной такт для транспортного потока:

$$t_{oi} = [(T_{\text{ц}} - T_{\Pi})y_i]/Y, \quad (30)$$

2. Основной такт для пешеходного потока:

$$t_{\text{пш}} = 5 + B_{\text{пш}}/v_{\text{пш}}, \quad (31)$$

Заключительным расчетом, согласно общепринятой последовательности (рис. 3), будет определение общей структуры цикла посредством суммирования, установленных ранее длительностей основного и промежуточного такта, в аналитическом виде структура цикла примет следующий вид:

$$T_{\text{ц}} = t_{o1} + t_{\text{п1}} \dots + t_{on} + t_{\text{пн}}, \quad (32)$$

В результате определенных формул, используемых для расчета основных параметров устанавливаемых программ координации, были определены основные параметры, от которых зависит длительность, как самих фаз регулирования, так и цикла.

В зарубежной практике, также как и в отечественной, существует понятие согласованного управления, под которым подразумевается наличие определенной взаимосвязи между соседними перекрестками, что позволяет координировать процесс управления транспортными потоками. С целью определения основных параметров, используемых при расчете программ координации в рамках данной главы выполнен их анализ.

### 1.3 Методы расчета программ координации на магистральных улицах

Анализ научной литературы, посвященной вопросам координированного управления транспортными потоками [31-37] позволила условно подразделить методы расчета программ координации принудительного управления на графоаналитический и автоматизированный (рис. 4). Данные методы очень подробно рассмотрены в труде [27], в рамках данной главы выполнен их анализ.

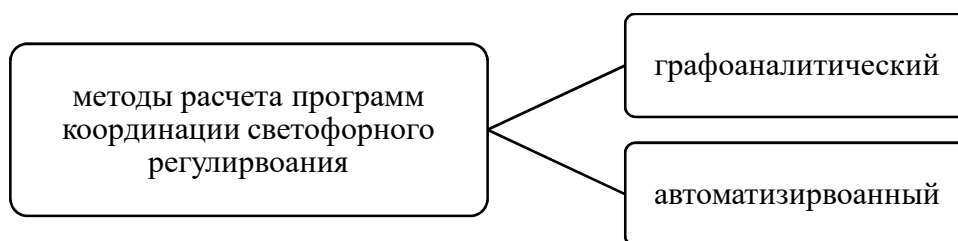


Рисунок 4 – Основные методы расчета программ координации

Наиболее распространённым является графоаналитический метод, что объясняется простотой его использования. Суть данного метода заключается в построении линейных графиков в двумерной плоскости «путь-время», в системе прямоугольных координат. Масштаб графика зависит от длины магистрали и количества светофоров, по оси абсцисс откладывается значение времени в секундах, по оси ординат – протяженность управляемой магистрали в метрах.

В зависимости от количества управляемых участков, включенных в систему координации, на графике ставятся специализированные отметки, в

зависимости от загруженности перекрестков по интенсивности, выбирается ключевой перекресток – координатор, для которого производится расчет длительности цикла, которая является максимальной. В случае ключевого перекрестка – перекрестка координатора, цикл будет являться оптимальным, для остальных участков данное значение будет пониматься как избыточное, т.е. не превышающее полученное максимальное значение.

Далее для ключевого перекрестка осуществляется расчет длительности основного такта характерного для магистральной улицы, затем осуществляют построение специализированных отметок на графике (рис. 5). На оси ординат наносят план магистральной улицы с обязательным указанием расстояний между перекрестками в принятом масштабе. Для каждого перекрестка строится соответствующий цикл управления, с последующим расчетом тангенса угла наклона, который рассчитывается с использованием формулы (33) и для определения значения которого необходимо знать расчетную скорость движения  $v_p$ , км/ч, горизонтальный масштаб –  $M_\Gamma$ , число секунд в 1 см и вертикальный масштаб –  $M_B$ , число метров в 1 см:

$$\tan \alpha = \frac{v_p M_\Gamma}{M_B 3,6} \quad (33)$$

Далее производится расчет длительности основных тактов для каждого перекрестка, с тем условием, чтобы для каждого участка длительность совпала с линией скорости движения, для осуществления безостановочного пропуска транспортных средств по магистральной улице (рис. 5). В результате расчета определяется сдвиг разрешающей фазы для магистральной улицы, которая является максимально нагруженной в сравнении с прилегающими участками. После осуществления необходимой коррекции, законченный график должен иметь вид, представленный на рис.6.

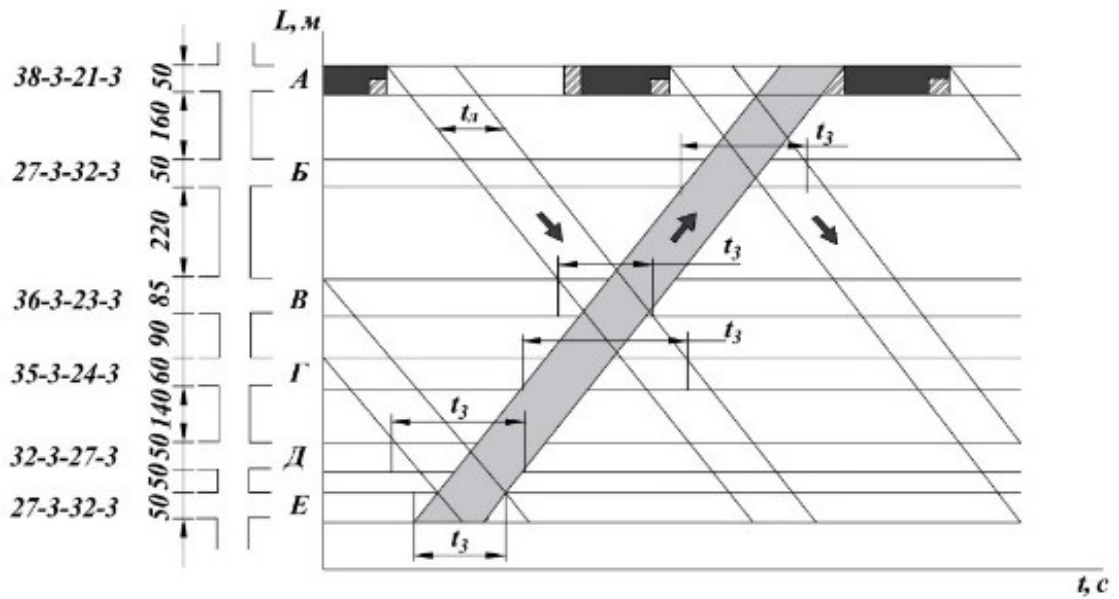


Рисунок 5 – Первоначальный этап построения графика координированного управления[27]

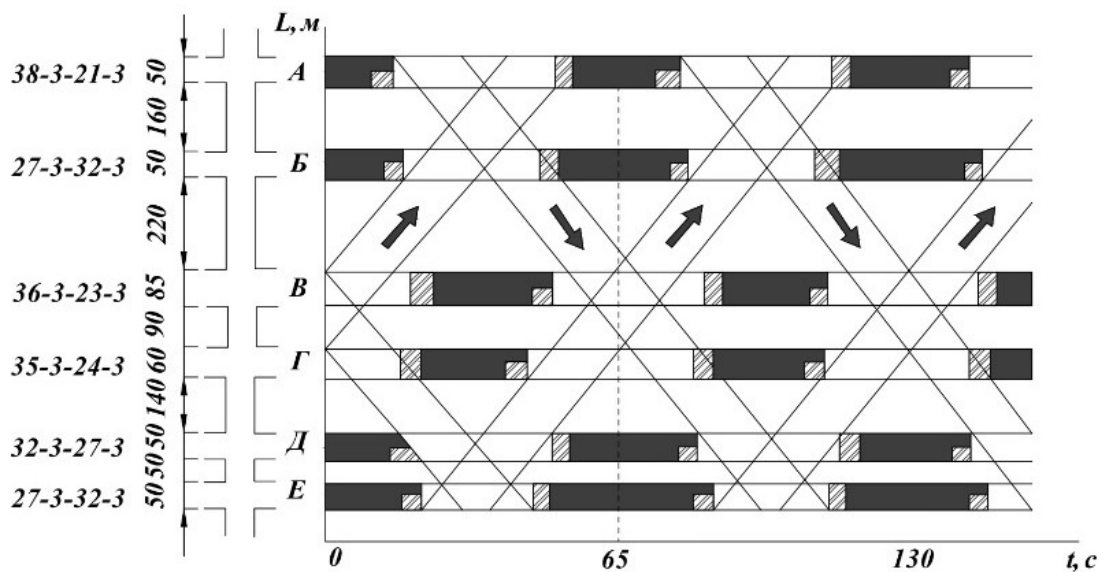


Рисунок 6 – График координированного управления движением на городской магистрали[27]

В случае применения данного метода, эффективность определяется после внедрения полученных режимов управления с включением с соответствующей длительностью сдвига каждой фазы управления, в результате анали-

за научной литературы, по результату выполненных многочисленных наблюдений, время движения на таких участках обычно снижается на 20% [27].

Данный метод является довольно трудоемким, в результате развития автоматизированных систем и применения автоматизированных расчетов, широкое применение получили автоматизированные методы, позволяющие осуществлять расчет необходимых параметров с использованием высокопроизводительных компьютеров. Суть расчета в данном случае заключается в множественном переборе вариантов с изменяемыми параметрами сдвига, длительностей и распределения фаз регулирования. Такие методы подразумевают использование специализированных программ – Transyt, Synchro, VisSim, HCS и др. применяемых как в отечественной практике, так и в зарубежной, которые подробно описаны в научных источниках [30-42].

В результате выполненного анализа существующих методов, установлены основные параметры, оказывающие влияние на изменение времени включения разрешающего сигнала при согласованном (координированном управлении) – скорость и интенсивность дорожного движения, в связи с тем, что данные параметры являются постоянно изменяющимися, необходима разработка более совершенного подхода при установлении согласованного типа управления, который позволит определить ряд программ координации для управления движением транспортных средств на перегонах с минимальным числом задержек. Помимо этого, в рамках данной главы выполним анализ основных принципов для ввода координированного управления.

#### **1.4 Основные принципы ввода и оценки эффективности координированного управления**

Координированное управление – система светофорного регулирования, связывающая ряд светофоров, чтобы обеспечить непрерывный транспортный поток через несколько перекрестков. Основные параметры, включают в себя подробную информацию об УДС, ее геометрические и транспортные показате-



тели. Следует отметить, что по результату многочисленных исследований [27, 43-55] организация координированного управления позволяет повысить эффективность управления за счет снижения задержек и контроля скорости, что способствует повышению эколого-экономических показателей.

Для эффективной организации координированного типа управления необходимо выполнение четырех условий (рис. 7).

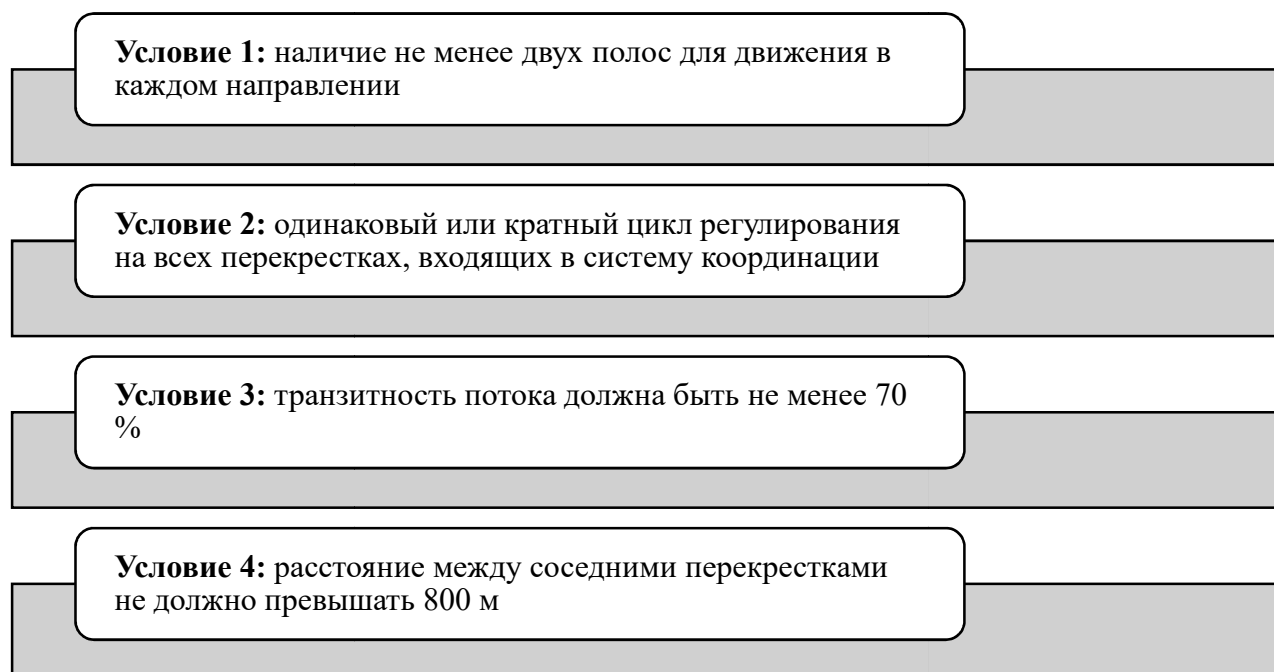


Рисунок 7 – Условия ввода координированного управления

Условие 1 (рис. 7) обосновано необходимостью безостановочного движения транспортных средств с расчетной скоростью и своевременного их прибытия к перекрестку. Условие 2 предоставляет возможность обеспечения необходимой периодичности смены сигналов и сохранения расчетного сдвига включения фаз регулирования по магистральной улице. Условие 3 предъявляет требования в координируемой магистральной улице для движения в прямом направлении, с целью обеспечения бесперебойного, постоянного движения, с минимальным числом непреднамеренных остановок. Условие 4 связано с процессом группообразования в транспортном потоке.

Сегодня, в результате развития автоматизированных методов расчета координации в научной практике активно ведутся исследования в области оценки эффективности такого типа управления [38-42]. В научных источниках присутствует большое количество работ, посвященных координированному управлению, например, в трудах Власова А.А., Пильгейкиной И.А. [41,42], а также в методических рекомендациях представленных на официальном сайте ОАО «НИИАТ», для оценки эффективности применения координированного управления рассматривают специализированный коэффициент координируемости (координационный фактор - coordination factor (CF). Для расчета CF, следует осуществить расчет фактора координируемости по времени – CF1; расчет фактора переполнения транспортной связи – CF2 и установить показатели интенсивности и длительности цикла регулирования –  $A_y$  и  $A_c$  соответственно, а также фактор группообразования в цикле регулирования при установленной интенсивности движения:

$$CF = \max(CF1, CF2) + A_p + A_y + A_c, \quad (34)$$

Для транспортных связей, время движения по которым превышает 80 с, значение CF1 принимается равным 0. Для транспортных связей, время движения по которым составляет менее 4 с, возможно возникновение эффекта блокирования и координация светофорных объектов является обязательной. Соответственно значение CF1 принимается равным 100.

Следует отметить, что согласно методическим рекомендациям, представленным на официальном сайте ОАО НИИАТ, для транспортных связей, время движения которых изменяется в пределах от 4 до 80 с, значение фактора координируемости по времени определяется с использованием формулы:

$$CF1 = 100 - \frac{(time-4) \cdot 100}{76}, \quad (35)$$

Для расчета фактора CF2 необходимо знать среднюю интенсивность движения за цикл регулирования –  $AT$ , ед/цикл, а также пропускную способность рассматриваемого участка –  $SS$ , ед/цикл:

$$CF2 = 100 - \frac{AT}{SS}, \quad (36)$$

В случае расчета фактора CF2, с использованием формулы (36) значение средней интенсивности движения рассчитывается с использованием показателя интенсивности движения – q, ед/ч и длительности цикла регулирования – C, с, по формуле:

$$AT = \frac{q \cdot C}{3600}, \quad (37)$$

В свою очередь, пропускная способность рассматриваемого участка, входящая в состав формулы (36), также рассчитывается, с использованием значения числа полос для движения – n, м, длины связи между участками – LD, м и средней длины автомобиля, м по формуле:

$$SS = \frac{n \cdot LD}{vL}, \quad (38)$$

Полученное значение координационного фактора интерпретируется согласно данным, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Интерпретация диапазонов значений коэффициента координации

Диапазон CF	Наименование действия
CF > 80	Целесообразный ввод координации
20 < CF < 80	Возможный ввод координации
CF < 20	Нецелесообразный ввод координации

При определении целесообразности ввода, с использованием коэффициента координации (34) (табл. 1) и соблюдении установленных условий (рис. 9) производится расчет необходимых параметров управления. Например, на основании фактора координируемости Пильгейкиной И.А. [42], была предложена эмпирическая формула расчета коэффициента координации для оценки эффективности присоединения нового участка к зоне. Но вопрос оценки эффективности существующих участков с координированным управлением, остается открытым. Несмотря на наличие определенных инструментов (детекторов транспорта), позволяющих фиксировать основные характе-

ристики транспортного потока, отсутствие подходов к оценке эффективности, основанных на регистрируемых показателях, например уровне обслуживания и задержек транспортных средств, не позволяют использовать существующие возможности в полной степени.

В результате выполненного анализа основных условий ввода координированного регулирования, остается открытым вопрос контроля основных параметров, которые необходимо учитывать в расчетах, что требует усовершенствования существующих методов оценки эффективности рассматриваемого типа управления.

### **1.5 Выводы по главе 1**

Для осуществления эффективного управления городскими транспортными потоками существует ряд методов, отличных по используемым подходам к оценке эффективности и параметрам. В результате их анализа, определено, что для управления движением на магистральных улицах используются сложные алгоритмы, позволяющие реализовать координацию, обеспечив безостановочное движение автомобилей по наиболее транзитному направлению – магистральному. Обеспечить эффективность такого типа управления позволяет постоянный мониторинг движения за счет применения различных исполнительных элементов интеллектуальных транспортных систем, например детекторов транспорта, специализированных дорожных видеокамер, беспилотников, а также активно развивающихся лидарных технологий. В большинстве своем, такие элементы активно применяются к крупным городам и городским агломерациях, где это стратегически обосновано, но в малых и средних городах, которые не входят в состав агломераций они не используются. В таком случае весь процесс управления осуществляется по средствам имеющегося оборудования и применением общепринятых методов.

Высокие темпы автомобилизации, сегодня характерны для всех без исключения городов, в том числе малых и средних, что оказывает влияние на

перераспределение транспортных потоков, которое также характерно и для магистральных улицах, на которых наблюдается временное изменение трафика. При возникновении таких ситуаций, необходимо осуществлять изменение режима управления, но отсутствие постоянного мониторинга движения и возможности оперативного изменения режима, появляется особая потребность в использовании методов управления, основанных на сопоставлении параметров транспортного потока, как по магистральной улице, так и по второстепенным участкам, аналогичным образом, входящих в координацию.

Выполненный анализ существующих методов управления показал, что в большинстве своем они не учитывают показатели второстепенных улиц и не регламентируют изменение режима управления при определённом снижении трафика на магистральной улице.

С целью оценки изменения транспортной ситуации на магистральных улицах малых и средних городов в диссертационном исследовании выполнены натурные исследования.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ УЛИЦАХ

В результате выполненных исследований в главе 1 были определены основные методы, применяемые для расчета координированного управления. Установлено, что для их реализации требуется применение сложных программно-аппаратных комплексов, входящих в состав интеллектуальных транспортных систем[56-61]. В результате применения такого рода систем требуется обеспечить постоянный мониторинг транспортной ситуации, что является очень затратным с точки зрения используемого оборудования и обеспечения его функциональности. Данные системы активно применяются в масштабах крупнейших и крупных агломераций, а также в крупнейших и крупных городах, но в масштабе малых и средних городов, такие системы, сегодня не получают должного развития, что связано с экономическими показателями. Транспортные проблемы, связанные в первую очередь с заторовыми ситуациями, которые характерны для всех без исключения городов, отличных по численности населения и экономической составляющей. Имеющиеся сегодня на балансе малых и средних городов исполнительные элементы, обеспечивающие управление, не в полной мере обеспечивают эффективность процесса управления. В таком случае требуется разработка альтернативных подходов, способствующих изменению ситуации и минимизации заторов. Особенно остро проблемы такого рода наблюдаются на магистральных улицах, в состав которых входит несколько регулируемых перекрестков, управление которых координировано, что позволяет обеспечить безостановочное движение автомобилей по магистрали, но повышение уровня автомобилизации и перераспределение транспортных потоков способствует повышению спроса на связных участках, что вызывает длительные простои и как следствие, повышение задержки. При возникновении таких ситуаций, применение координированного управления должно быть оправданным, в связи

с этим в рамках данной главы определены наиболее загруженные магистральные улицы, регулирование на которых координировано, расположенных в малых городах Воронежской области и выполнен их анализ и исследование.

## 2.1 Анализ координированных участков малых и средних городов

В состав Воронежской области входит большое количество городов, которые в соответствии с численностью населения относятся к малым, средним и крупным городам. В качестве исследуемых определены два города, г. Павловск и г. Россошь (рис. 8).



Рисунок 8 – Карта Воронежской области с обозначением городов по численности населения\*

\* население более 1 млн. чел.; от 50 000 до 100 000 чел.; от 20 000 до 50 000 чел.; от 10 000 до 20 000 чел.; от 5000 до 10 000 чел.; от 2000 до 5000 чел.

Согласно анализу официальных бах данных – Федеральной государственной статистики, численность в г. Павловск составляет около 25 тыс. человек, а численность в г. Россошь более 60 тыс. человек.

В каждом из рассматриваемых городов (рис. 8) есть магистральные улицы, движение на которых управляется с помощью светофоров, находящихся в координации. В г. Павловск такой магистральной улицей является ул. 40 лет Октября, в г. Россошь – ул. Пролетарская. Для установления числовых показателей основных характеристик транспортного потока выполнено натурное исследование движения по данным магистральным улицам.

### 2.1.1 Исследование магистральной улицы г. Павловск

Исследование территории города и определение его геометрических показателей позволили установить что  $S$  г. Павловск  $\approx 10$  км<sup>2</sup>. Основной магистральной улицей является ул. 40 лет Октября, протяженность которой составляет около 2 км. На протяжении данного участка имеются регулируемые перекрестки – перекресток с мкр. Гранитный, перекресток с ул. Гоголя и перекресток с ул. Лесной, что наглядно отражено на рисунке 9, где 1 – перекресток ул. 40 лет Октября – мкр. Гранитный; 2 – перекресток ул. 40 лет Октября – ул. Гоголя; 3 – перекресток ул. 40 лет Октября – ул. Лесной.



Рисунок 9 – Спутниковый снимок магистральной улицы 40 лет Октября в г. Павловск



Протяженность ( $L$ ) координируемого участка составляет 840 м, расстояние между перекрестком №1 и перекрестком №2 ( $L_{1-2}$ ) составляет 460 м, между перекрестком №2 и перекрестком №3 ( $L_{2-3}$ ) – 380 м.

Перекресток №1 – перекресток ул. 40 лет Октября – мкр. Гранитный это Т-образный перекресток (рис. 10). По ул. 40 лет Октября въезд на рассматриваемый участок осуществляется по двум полосам движение, на которых частично смешаны и предназначены для движения прямо и направо, а также прямо и налево для обратного направления (рис. 10). Установленные технические средства организации дорожного движения (ТСОДД) – дорожные знаки, дорожная разметка, направляющие устройства и светофоры соответствуют требованиям нормативной документации [62-64].

Геометрический анализ позволил определить что полосы для движения на перекрестке №1 имеют ширину от 3,5 м до 3,7 м, радиусы закругления проезжей части 16 м (рис. 11).

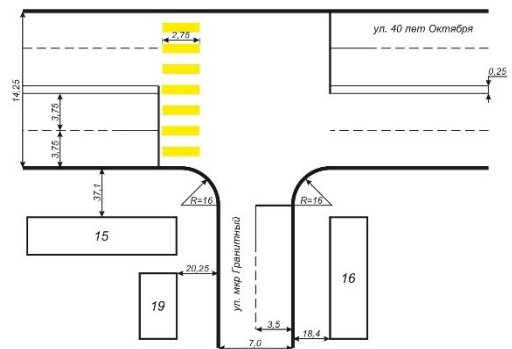
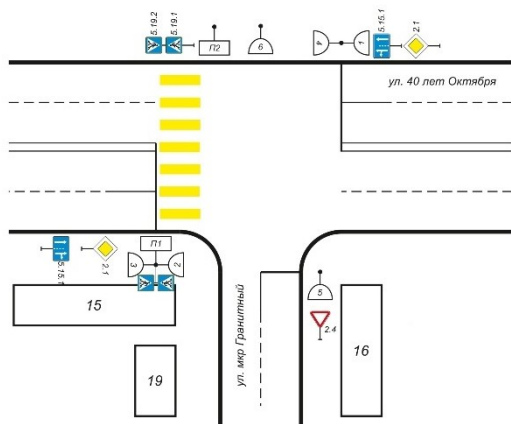


Рисунок 10 – Расположение ТСОДД на перекрестке №1

Рисунок 11 – Геометрическая схема перекрестка №1

На исследуем перекрестке, движение организовано в 8-ми направлениях, наглядно обозначенных на рис. 12 (а, б, в, г), где:

№1 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы;

N2 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы;

N3 – левоповоротный транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы в сторону ул. мкр. Гранитный;

N4 – правоповоротный транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы в сторону ул. мкр. Гранитный;

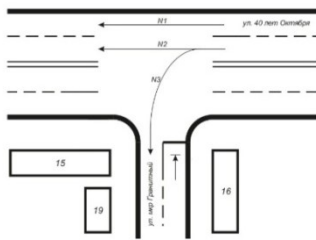
N5 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы;

N6 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы;

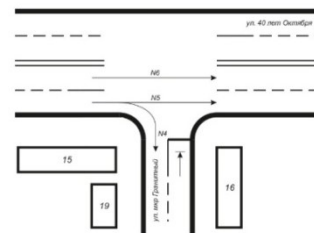
N7 – правоповоротный транспортный поток по направлению с ул. мкр. Гранитный в сторону ул. 40 лет Октября;

N8 – левоповоротный транспортный поток по направлению с ул. мкр. Гранитный в сторону ул. 40 лет Октября.

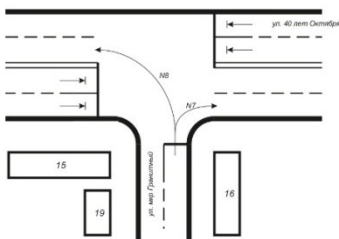
Следует отметить, что на рассматриваемом участке в специализированной фазе организовано движение пешеходов, в направлении Nп1, что наглядно отражено на рис. 12 г.



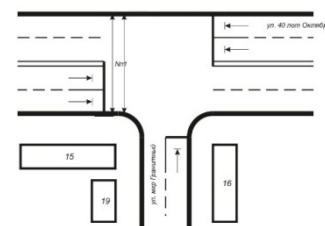
а) направления движения N1, N2, N3



б) направления движения N4, N5, N6



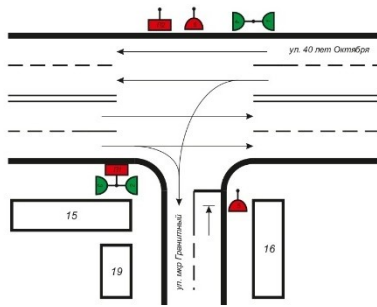
в) направления движения N7, N8



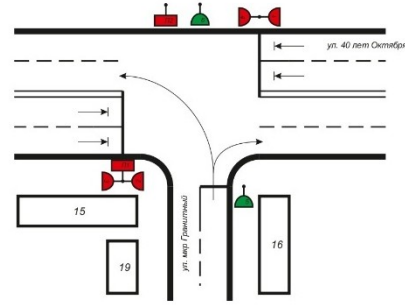
г) направление движения Nп1

Рисунок 12 – Обозначение направлений движения на перекрестке №1

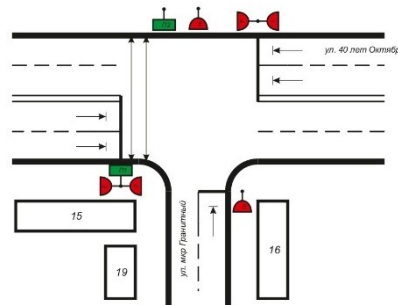
На исследуемом участке движение организовано в три фазы регулирования, что наглядно отражено на рисунке 13 а-в. В фазе 1 транспортные средства движутся по всем направлениям ул. 40 лет Октября (рис. 13 а). В фазе 2 транспортные средства движутся по направлениям мкр. Гранитный (рис. 13 б). В фазе 3 осуществляется движением пешеходов (рис. 13 в).



а) фаза 1 на перекрестке №1



б) фаза 2 на перекрестке №1



в) фаза 3 на перекрестке №1

Рисунок 13 – Схема пофазного разъезд на перекрестке №1

В результате выполненного натурного обследования перекрестка №1, были определены значения интенсивностей по основным въездным направлениям (рис. 14). Среднесуточное значение интенсивности на перекрестке №1 составляет 9404 ед/сут, загрузка полосы движения в среднем составляет около 500 ед/ч. По направлениям ул. 40 лет Октября – магистральной улицы, значение интенсивности в среднем составляет – 497 ед/ч, по направлениям мкр. Гранитный – 646 ед/ч. Следует отметить, что в основном транспортный поток составляют легковые автомобили, объем которых в общем транспортном потоке более 90%. Помимо этого в анализируемом транспортном потоке

также встречаются грузовые автомобили и автобусы, доля которых в сумме меньше 10%.

Установлено, что уровень загрузки направления по направлениям мкр. Гранитный несколько выше среднего уровня загрузки по магистральной улице – ул. 40 лет Октября, что наглядно отражено на рисунке 14. Для оценки эффективности используемого типа управления – координированного необходимым мероприятием является оценка времени проезда участка, а также время задержки, что может быть оценено в результате моделирования процесса движения и установления числовых значений данных характеристик на рассматриваемом участке – всей магистральной улице.

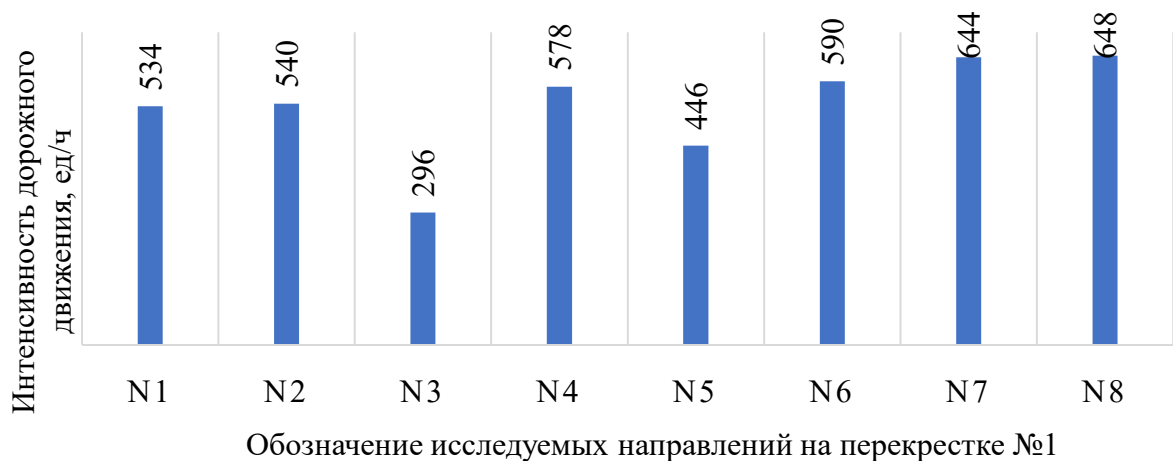


Рисунок 14 – Распределение интенсивности дорожного движения по основным направлениям перекрестка №1

Следующим исследуемым перекрестком стал перекресток №2 (рис. 9 обозначение 2). Перекресток ул. 40 лет Октября – ул. Гоголя является классическим перекрестком. По магистральной улице – ул. 40 лет Октября движение осуществляется по двум полосам, по ул. Гоголя по одной, что наглядно изображено на рисунке 15 и рисунке 16. Все установленные и применяемые ТСОДД – дорожная разметка, дорожные знаки и светофоры соответствуют требованиям нормативной документации (рис. 15) [62-64]. Ширина по-

лос по ул. 40 лет октября составляет 3,55 и 3,7 м, по ул. Гоголя ширина полос составляет 3,2 м (рис. 16).

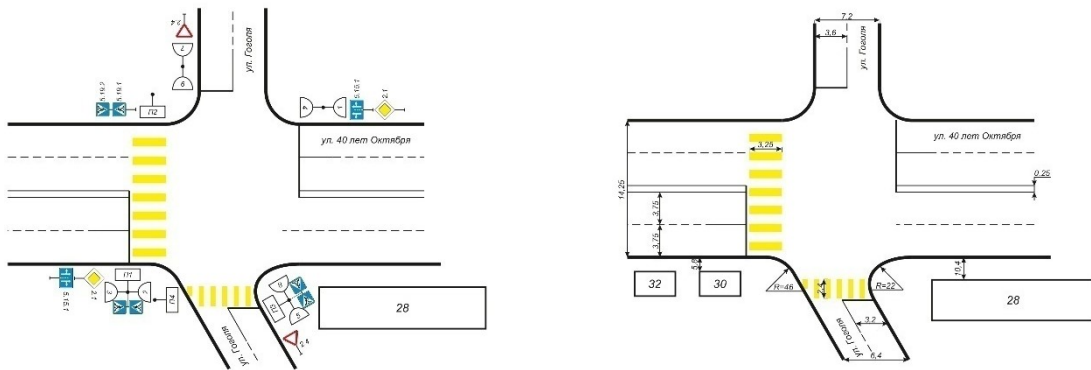


Рисунок 15 – Расположение ТСОДД  
на перекрестке №2

Рисунок 16 – Геометрическая схема  
перекрестка №2

В случае данного перекрестка движение является довольно сложным и осуществляется в 14 направлениях движения, наглядно представленных на рис. 17 (а-г), где:

N1 – правоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Гоголя, движение осуществляется из крайней правой полосы;

N2 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы;

N3 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы;

N4 – левоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Гоголя, движение осуществляется из крайней левой полосы;

N5 – правоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Гоголя, движение осуществляется из крайней правой полосы;

N6 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы;

N7 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы;

N8 – левоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Гоголя, движение осуществляется из крайней левой полосы;

N9 – правоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Гоголя в сторону ул. 40 лет Октября;

N10 – прямой транспортный поток движущийся с ул. Гоголя в сторону ул. 40 лет Октября;

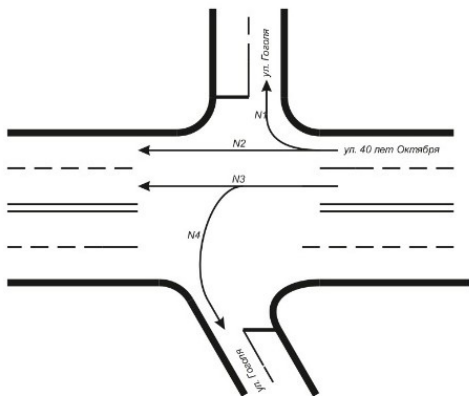
N11 – левоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Гоголя в сторону ул. 40 лет Октября;

N12 – правоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Гоголя в сторону ул. 40 лет Октября;

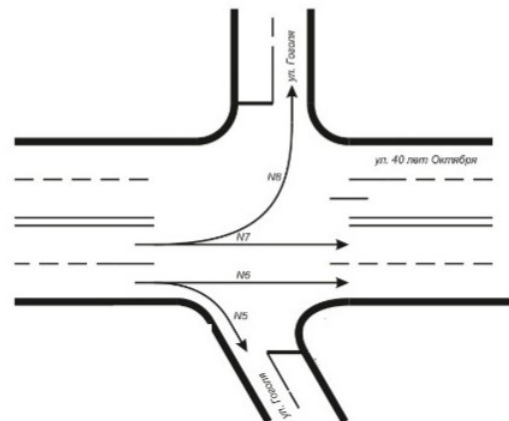
N13 – прямой транспортный поток движущийся с ул. Гоголя в сторону ул. 40 лет Октября;

N14 – левоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Гоголя в сторону ул. 40 лет Октября.

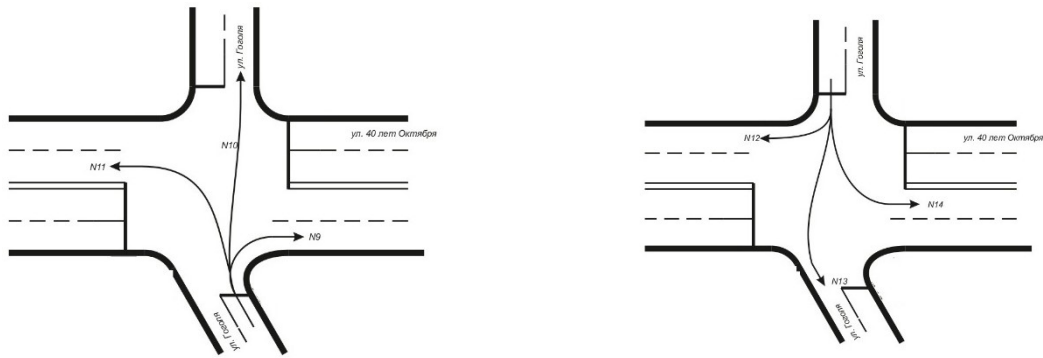
Следует отметить, что как и в случае движения на первом участке, на пересечении ул. 40 лет Октября – ул. Гоголя движутся пешеходы, движение которых осуществляется в специализированной фазе регулирования.



а) направления движения N1, N2,  
N3, N4



б) направления движения N5, N6, N7,  
N8



в) направления движения  $N9$ ,  $N10$ ,  
 $N11$

г) направления движения  $N12$ ,  $N13$ ,  
 $N14$

Рисунок 17 – Обозначение въездных направлений на перекрестке №2

Пофазный разъезд представлен тремя фазами управления, где в фазе 1 движутся транспортные средства по магистральной улице – ул. Октябрьской по всем направлениям; в фазе 2 – движение осуществляется по ул. Гоголя, аналогичным образом во всех направлениях; в фазе 3 – движение осуществляется переход проезжей части пешеходами как по ул. 40 лет Октября, так и по ул. Гоголя.

Натурное исследование интенсивности дорожного движения на рассматриваемом перекрестке показали что средний суточный транспортный поток составляет 10 498 ед/сут, в среднем по каждому направлению движутся 669 ед/ч. Средняя интенсивность движения по ул. 40 лет Октября составляет 684 ед/ч, по ул. Гоголя – 584 ед/ч, распределение интенсивности по направлениям представлено на рис. 18. Следует отметить, что, несмотря на транзитность ул. 40 лет Октября, видно, что загрузка полосы движения по ул. Гоголя является высокой, в результате смешанного движения на данном перекрестке наблюдаются заторовые ситуации.

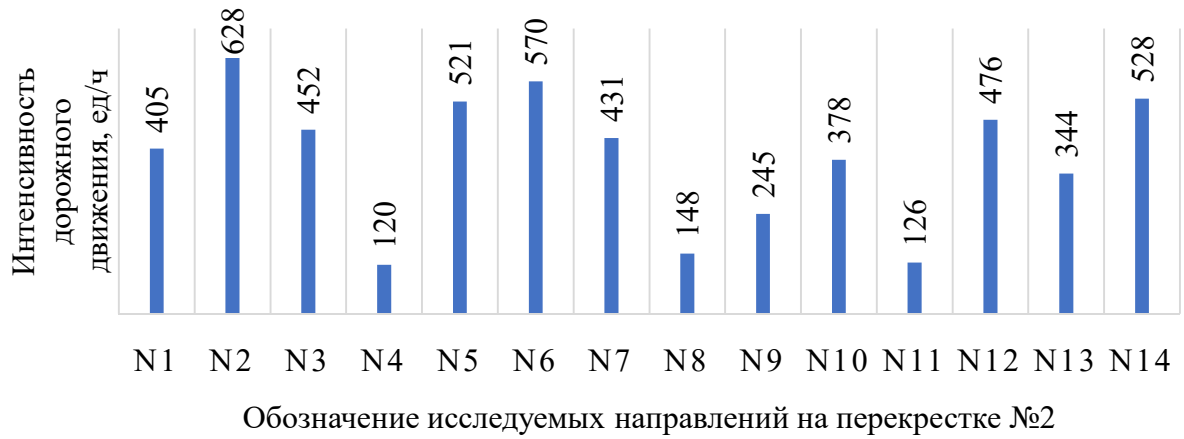


Рисунок 18 – Распределение интенсивности дорожного движения по основным направлениям движения перекрестка №2

Заключительным исследуемым перекрестком, входящим в координацию на рассматриваемой улице, расположенной в г. Павловск является перекресток №3 (рис. 9) – перекресток ул. 40 лет Октября – ул. Лесная. Перекресток является классическим крестообразным, что наглядно отражено на рисунке 19. Как и в случае предыдущих рассмотренных участков УДС – перекрестка №1 и перекрестка №2, установленные и применяемые ТСОДД, такие как дорожные знаки, дорожная разметка, направляющие устройства и светофоры, полностью соответствуют требованиям нормативной документации [62-64].

Движение по магистральной улице – ул. 40 лет Октября осуществляется по двум полосам, по второстепенной улице – ул. Лесной по одной, движение на которой смешанное. Ширина полос по магистральной улице – ул. 40 лет Октября оставляет 3,75 м, по ул. Лесной составляет 3,5 м. Радиусы закруглений проезжей части составляют 14 м, что наглядно отражено на рисунке 20. Пешеходный переход располагается на магистральной улице, оборудованный соответствующими дорожными знаками, дорожной разметкой и светофором типа П1 (рис. 19).



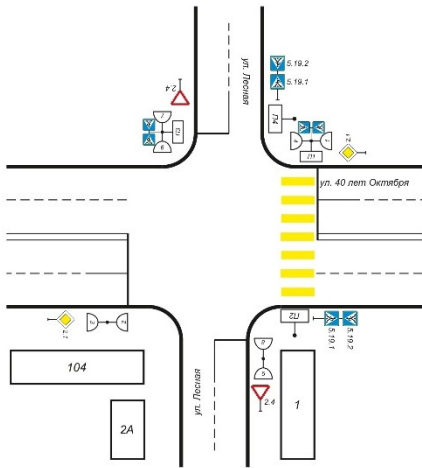


Рисунок 19 – Расположение ТСОДД  
на перекрестке №3

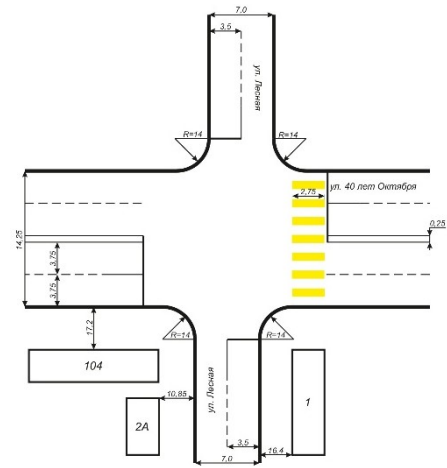


Рисунок 20 – Геометрическая схема  
перекрестка №3

Как и в случае перекрестка №2, движение осуществляется по 14 направлениям, что наглядно представлено на рис. 21 (а-г), где:

N1 – правоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Лесной, движение осуществляется из крайней правой полосы;

N2 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы;

N3 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы;

N4 – левоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Лесной, движение осуществляется из крайней левой полосы;

N5 – правоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Лесной, движение осуществляется из крайней правой полосы;

N6 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней правой полосы;

N7 – прямой транспортный поток по ул. 40 лет Октября, движущийся из крайней левой полосы;

N8 – левоповоротный транспортный поток по направлению с ул. 40 лет Октября в сторону ул. Лесной, движение осуществляется из крайней левой полосы;

N9 – правоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Лесной в сторону ул. 40 лет Октября;

N10 – прямой транспортный поток движущийся с ул. Лесной в сторону ул. 40 лет Октября;

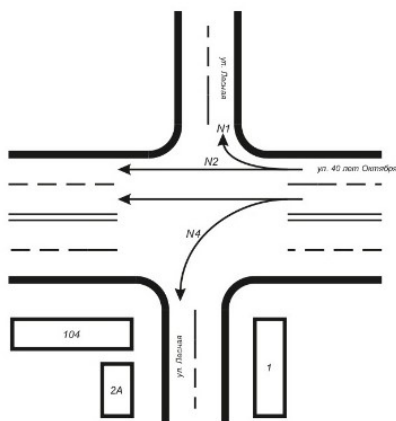
N11 – левоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Лесной в сторону ул. 40 лет Октября;

N12 – правоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Лесной в сторону ул. 40 лет Октября;

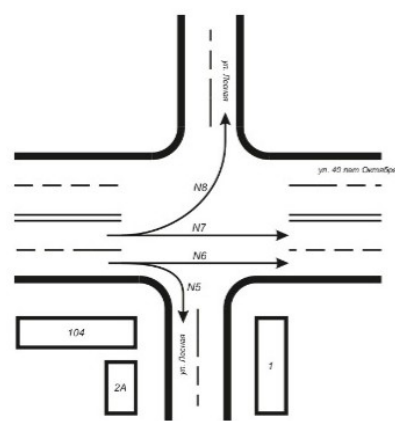
N13 – прямой транспортный поток движущийся с ул. Лесной в сторону ул. 40 лет Октября;

N14 – левоповоротный транспортный поток движущийся с ул. Лесной в сторону ул. 40 лет Октября.

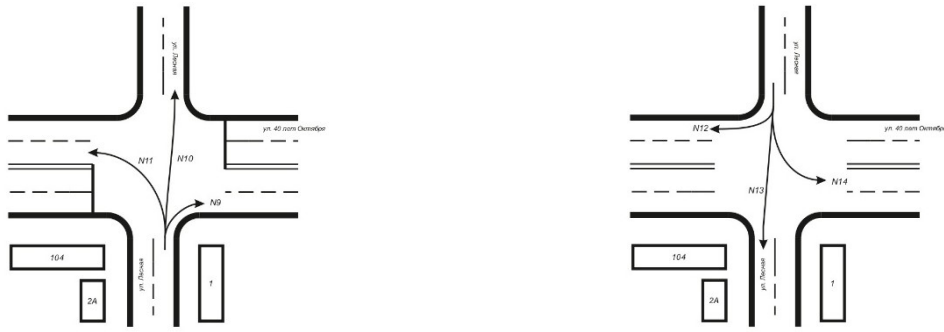
На перекрестке ул. 40 лет Октября – ул. Лесная движутся пешеходы, движение которых осуществляется в специализированной фазе регулирования.



а) направления движения N1, N2,  
N3, N4



б) направления движения N5, N6, N7,  
N8



в) направления движения  $N9$ ,  $N10$ ,  
 $N11$

г) направления движения  $N12$ ,  $N13$ ,  
 $N14$

Рисунок 21 – Обозначение въездных направлений на перекрестке №3

На исследуемом участке движение, с целью сохранения координации, движение организовано в три фазы регулирования:

- фаза 1 движение разрешено во всех направлениях по магистральной улице - ул. 40 лет Октября;
- фаза 2 движение разрешено во всех направлениях по ул. Лесной;
- фаза 3 – осуществляется движение пешеходов.

Исследование перекрестка №3, позволило установить значения интенсивности дорожного движения, по основным направлениям движения (рис. 22).

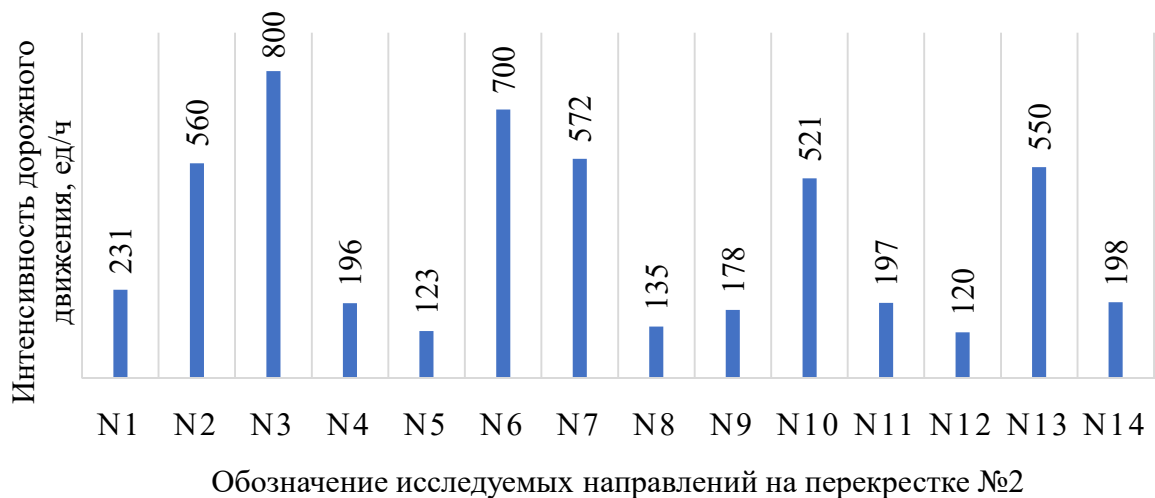


Рисунок 22 – Гистограмма интенсивности движения по исследованным направлениям движения на перекрестке №3

На перекрестке №3 суммарная суточная интенсивность движения составляет 8 484 ед/сут, по ул. 40 лет Октября среднее значение интенсивности по всем направлениям составляет 414 ед/ч, по ул. Лесной 294 ед/ч.

В результате выполненного натурного обследования магистральной улицы, расположенной в г. Павловск и обработки полученных результатов были получены данные по распределению средней величины интенсивности, как на магистральной улице, так и на второстепенных участках. На магистральной улице 40 лет Октября в ходе мониторинга установлено что средняя интенсивность на второстепенных участках – Микрорайона гранитного, ул. Гоголя и ул. Лесной в определенные периоды превышает интенсивность движения по магистральной ул. 40 лет Октября (рис. 23), что выделено на представленном графике, где  $N_M$  – средняя интенсивность движения по магистральной улице, ед/ч;  $N_C$  – средняя интенсивность движения на второстепенных участках, ед/ч.

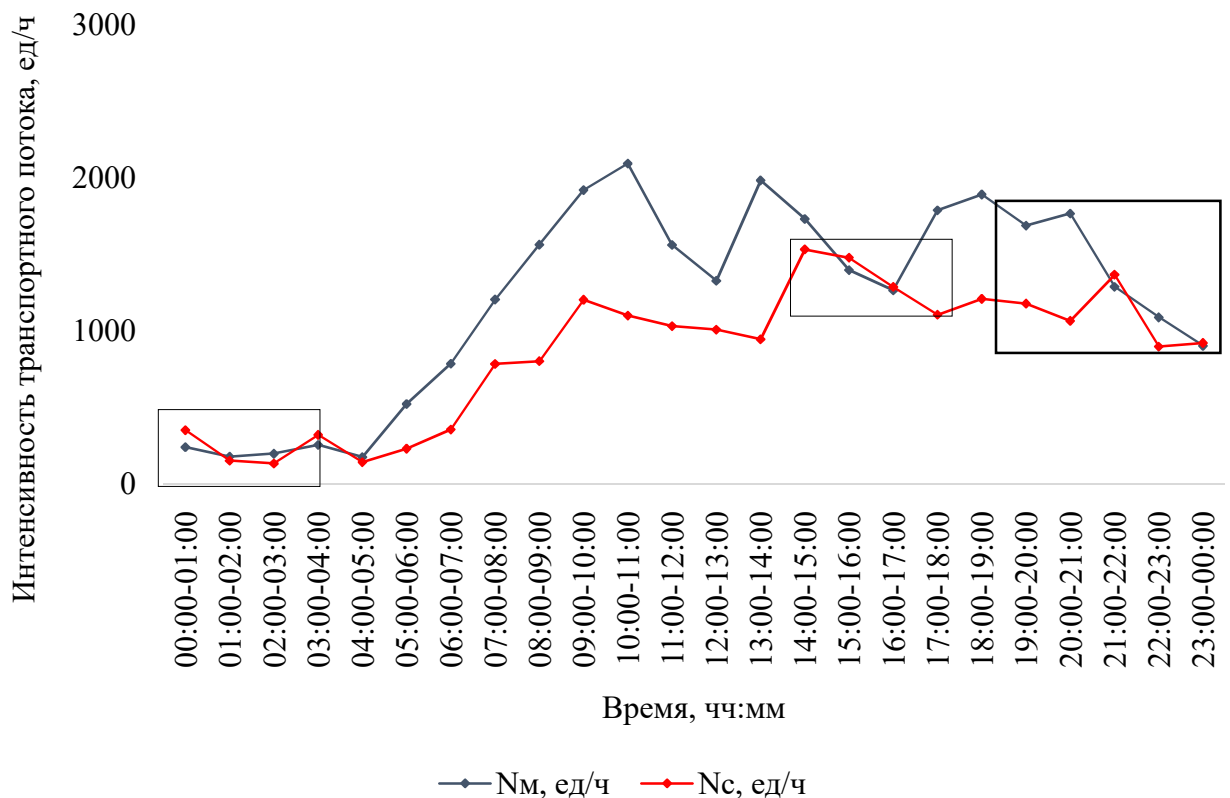


Рисунок 23 – Результаты исследования интенсивности дорожного движения на магистральной улице в г. Павловск

Аналогичным образом выполнено исследование второй магистральной улицы, расположенной в г. Россошь

### 2.1.2 Исследование магистральной улицы г. Россошь

Площадь г. Россошь составляет около 59,08 км<sup>2</sup>, одной из основных магистральных улиц ул. Пролетарская, протяженность которой составляет более 3 км., в координации находится 3 перекрестка, протяженность координированного участка составляет 1 105 м. В систему координации входит перекресток №1 – перекресток ул. Пролетарской – ул. Фрунзе, перекресток №2 – перекресток ул. Пролетарской – пр. Труда и перекресток №3 – перекресток ул. Пролетарской – ул. Белинского, что наглядно отражено на рисунке 24.

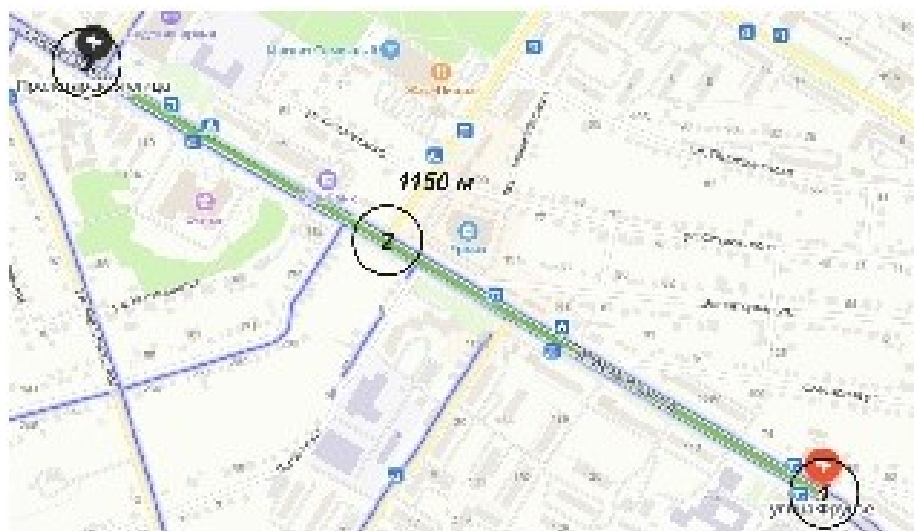


Рисунок 24 – Спутниковый снимок магистральной улицы – ул. Пролетарской в г. Россошь

Аналогичным образом, как и в случае с первой рассмотренной магистральной улицы, расположенной в г. Павловск, выполнен анализ каждого перекрестка, в результате выполненных исследований, были получены данные по изменению интенсивностей движения как на магистральной улице, так и на связных участках – ул. Фрунзе, пр. Труда и ул. Белинского, что наглядно

отражено на рисунке 25, где  $N_m$  – средняя интенсивность движения по магистральной улице, ед/ч;  $N_c$  – средняя интенсивность движения на второстепенных участках, ед/ч.

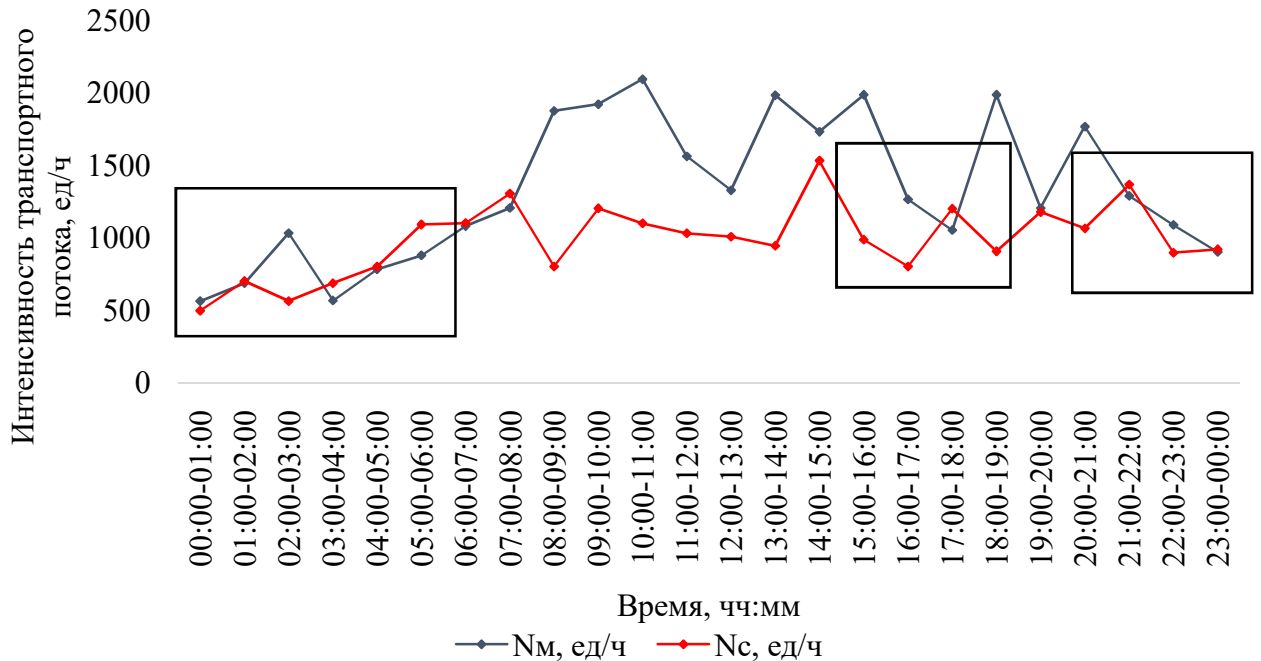


Рисунок 25 – Распределение интенсивности дорожного движения на магистральной улице в г. Россошь







Для оценки эффективности определенного типа управления на объектах исследования – магистральных улиц малых и средних городов, необходимым мероприятием является моделирование рассмотренных участков, для установления значений основных характеристик транспортного потока – времени проезда и задержки транспортных средств. С этой целью выполнено моделирование процесса движения в программной среде AnyLogic [65].











## 2.2 Моделирование процесса движения в программной среде AnyLogic

Программная среда AnyLogic позволяет осуществить моделирование различных процессов, в том числе и дорожного движения[66-71]. Средства программы позволяют создать имитационную модель, в том числе и коорди-











нированного участка, в таблице 2 определены основные блоки для построения логического процесса модели координируемого участка. В данном случае каждый блок более подробно описан для первой моделируемой улицы – ул. 40 лет Октября.









Таблица 2 – Основные блоки и их обозначения для создания координируемого участка




№ п/п	Вид	Обозначение	Наименование
перекресток №1			
1	ВН_1 	CarSource	Въездное направление 1 (ВН_1)
2	ВН_2 	CarSource	Въездное направление 2 (ВН_2)
3	ВН_3 	CarSource	Въездное направление 3 (ВН_3)
4	ВН_4 	CarSource	Въездное направление 4 (ВН_4)
5	распределитель_ВН_1 	SelectOutput5	Распределить_ВН_1
6	распределитель_ВН_2 	SelectOutput5	Распределитель_ВН_2

7	<p>распределитель_ВН_3</p> 	SelectOutput5	Распределитель_ВН_3
8	<p>распределитель_ВН_4</p> 	SelectOutput5	Распределитель_ВН_4
9	<p>выход_ВН_1</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_1 (выход_ВН_1)
10	<p>выход_ВН_2</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_2 (выход_ВН_2)
11	<p>выход_ВН_3</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_3 (выход_ВН_3)
12	<p>выход_ВН_4</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_4 (выход_ВН_4)
13	<p>светофор_перекресток_1</p> 	TrafficLight	Светофорный объект на пере- крестке №1
перекресток №2			
14	<p>ВН_5</p> 	CarSource	Въездное направление 5 (ВН_5)
15	<p>ВН_6</p> 	CarSource	Въездное направление 6 (ВН_6)
16	<p>ВН_7</p> 	CarSource	Въездное направление 7 (ВН_7)



17	<p>распределитель_ВН_5</p> 	SelectOutput5	Распределитель_ВН_5
18	<p>распределитель_ВН_6</p> 	SelectOutput5	Распределитель_ВН_6
19	<p>распределитель_ВН_7</p> 	SelectOutput	Распределитель_ВН_7
20	<p>выход_ВН_5</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_5 (выход_ВН_5)
21	<p>выход_ВН_6</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_6 (выход_ВН_6)
22	<p>выход_ВН_7</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_7 (выход_ВН_7)
23	<p>светофор_перекресток_2</p> 	TrafficLight	Светофорный объект на пере- крестке №2
перекресток №1			
24	<p>ВН_8</p> 	CarSource	Въездное направление 8 (ВН_8)
25	<p>ВН_9</p> 	CarSource	Въездное направление 9 (ВН_9)
26	<p>ВН_10</p> 	CarSource	Въездное направление 10 (ВН_10)

27	<p>BH_11</p> 	CarSource	Въездное направление 11 (BH_11)
28	<p>распределитель_BH_8</p> 	SelectOutput5	Распределить_BH_8
29	<p>распределитель_BH_9</p> 	SelectOutput5	Распределитель_BH_9
30	<p>распределитель_BH_10</p> 	SelectOutput5	Распределитель_BH_10
31	<p>распределитель_BH_11</p> 	SelectOutput5	Распределитель_BH_11
32	<p>выход_BH_8</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для BH_8 (выход_BH_8)
33	<p>выход_BH_9</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для BH_9 (выход_BH_9)
34	<p>выход_BH_10</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для BH_10 (выход_BH_10)

35	<p>выход_ВН_11</p> 	CarMoveTo	Выездное направление для ВН_11 (выход_ВН_11)
36	<p>светофор_перекресток_3</p> 	TrafficLight	Светофорный объект на перекрестке №3
37	<p>carDispose</p> 	CarDispose	CarDispose

Для построения модели в программной среде AnyLogic на первоначальном этапе потребуется блок создания автомобилей – CarSource. С помощью данного блока в моделируемой среде создаются автомобили и помещаются на установленную полосу для движения. Следует отметить, что в основном по рассматриваемым полосам для движения автомобили движутся смешанно, т.е. могут осуществлять движение в различных направлениях, специализированный блок SelectOutput, позволяет задать требуемую логику такого рода процесса. Для точного задания распределения автомобилей по направлениям, необходимо задать долю транспортных средств движущихся в определенном направлении. Рассматриваемый блок SelectOutput, позволяет подразделить движение на два основных направления, например прямо и направо. В случае усложнения процесса, а именно увеличения количества направлений, например – прямо, направо или налево, или – прямо, направо, налево и разворот, рекомендуется использовать сложный блок распределитель – SelectOutput5, который также представлен в таблице 2. В заключении, для создания простой блок-схемы необходимо использовать блок CarMoveTo, который позволяет задать траекторию движения, а именно определить полосу по которой движется автомобиль.

Для регулирования движения на координированном участке применяются светофорные объекты при помощи блока TrafficLight, это элемент биб-

лиотеки дорожного движения, который может контролировать движение транспорта на указанных перекрестках или стоп-линиях.

Для моделирования перекрестка №1 было использовано 10 блоков, в соответствии с данными, представленными в таблице 2. Следует отметить, что для определения направлений движения применены блоки CarSource в количестве – 3 единиц, для распределения по направлениям, применены сложные блоки – блоки SelectOutput5 в количестве 3 единиц и 3 блока для задания траектории движения – блок CarMoveTo, также в количестве 3 единиц. Для регулирования движения транспортными потоками применен блок управления – блок светофора – TrafficLight. С учетом данных по интенсивности на перекрестке №1 – перекрестке ул. 40 лет Октября – м-н Гранитный был запущен процесс движения.

Для моделирования движения на втором перекрестке – перекрестке ул. 40 лет Октября – ул. Гоголя также как и в случае первого перекрестка применено 13 блоков: блок CarSource – 4 единицы; блок SelectOutput5 – 4 единицы; блок CarMoveTo – 4 единицы; блок TrafficLight – 1.

В соответствии с выполненными исследованиями, представленными в п.п. 2.1 главы 2, были установлены основные показатели интенсивностей движения и долями их распределения, определяемыми в модели как вероятности.

Для перекрестка ул. 40 лет Октября – ул. Лесная также, как и в первых двух случаях было применено 13 блоков.

Для завершения процесса моделирования и завершения логической схемы соединенных блоков, добавляется блок CarDispose, представленный в таблице 2 как блок удаления автомобилей из системы.

Общие данные по каждому из направлений с обозначением направления движения представлены в таблице 3.

Таблица 3– Доли распределения интенсивностей дорожного движения для осуществления моделирования в программной среде AnyLogic для первого моделируемого участка – ул. 40 лет Октября (г. Павловск)

№ п/п	Наименование въездных направлений	Доли распределения
<b>перекресток №1 – ул. 40 лет Октября – ул. Микрорайон гранитный</b>		
1	ВН_1	<b>1,00</b>
	прямо	0,81
	направо	0,11
	налево	0,08
2	ВН_2	<b>1,00</b>
	прямо	0,86
	направо	0,07
	налево	0,08
3	ВН_3	<b>1,00</b>
	прямо	0,29
	направо	0,40
	налево	0,31
<b>перекресток №2 – ул. 40 лет Октября – ул. Гоголя</b>		
4	ВН_4	<b>1,00</b>
	Прямо	0,906
	направо	0,076
	разворот	0,018
5	ВН_5	<b>1,00</b>
	Прямо	0,90
	налево	0,07
	разворот	0,03
6	ВН_6	<b>1,00</b>
	направо	0,71
	налево	0,29
7	ВН_7	1174
	прямо	298
	направо	508

№ п/п	Наименование въездных направлений	Доли распределения
<b>перекресток №3– ул. 40 лет Октября – ул. Лесная</b>		
8	ВН_8	<b>1,00</b>
	прямо	0,85
	направо	0,08
	налево	0,07
9	ВН_9	<b>1,00</b>
	прямо	0,80
	направо	0,11
	налево	0,10
10	ВН_10	1,00
	прямо	0,32
	направо	0,45
	налево	0,23
11	ВН_11	<b>1,00</b>
	прямо	0,36
	направо	0,37
	налево	0,26

Аналогичная процедура была выполнена и для второго моделируемого участка, в состав которого входят Т-образные перекрестки (рис. 24), в данном случае, в связи с ограниченным количеством полос для движения на связанных участках, распределение значительно отличалось от распределения на первой исследуемой магистральной улице.

В результате моделирования, для каждого перекрестка, в частности в исследуемом г. Павловск, были получены логические процессы, позволяющие выполнить процедуру имитации движения с последующим анализом основных показателей транспортного потока, в частности времени проезда и времени задержки (рис. 26 – рис. 27). В связи с тем, что перекресток ул. 40 лет Октября – ул. Гоголя по результату исследований оказался наиболее за-

грузенным, он в данном случае определен как координатор, его логическая схема была построена первоочередной (рис. 26)

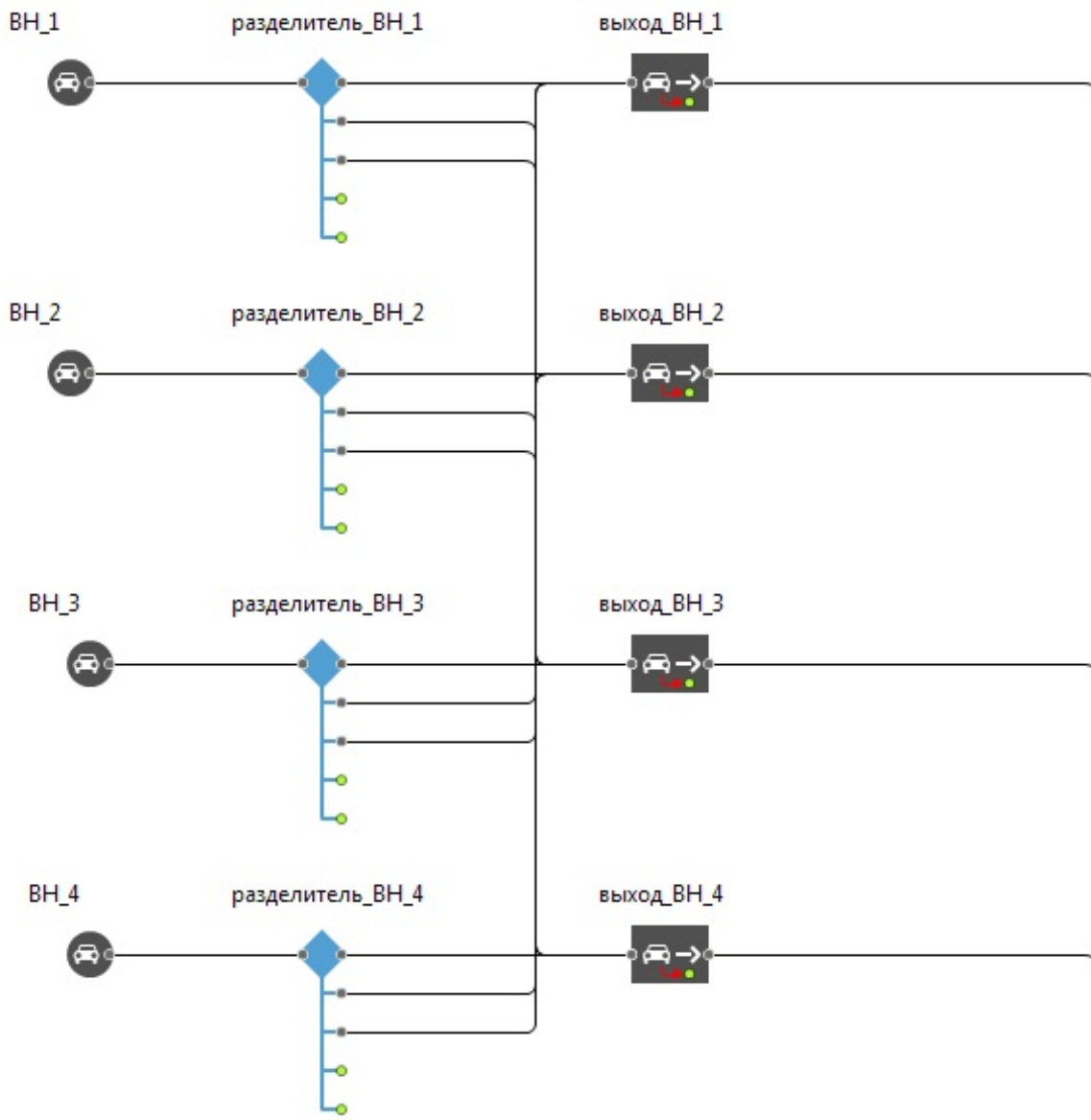


Рисунок 26 – Логическая схема перекрестка №2 в программной среде Any-Logic

Перекресток № 1 - ул. 40 лет Октября – мкр. Гранитный является Т-образным перекрестком, что объясняет меньшее количество блоков, использованных для построения логики процесса движения на данном участке, что наглядно представлено на рис. 27.

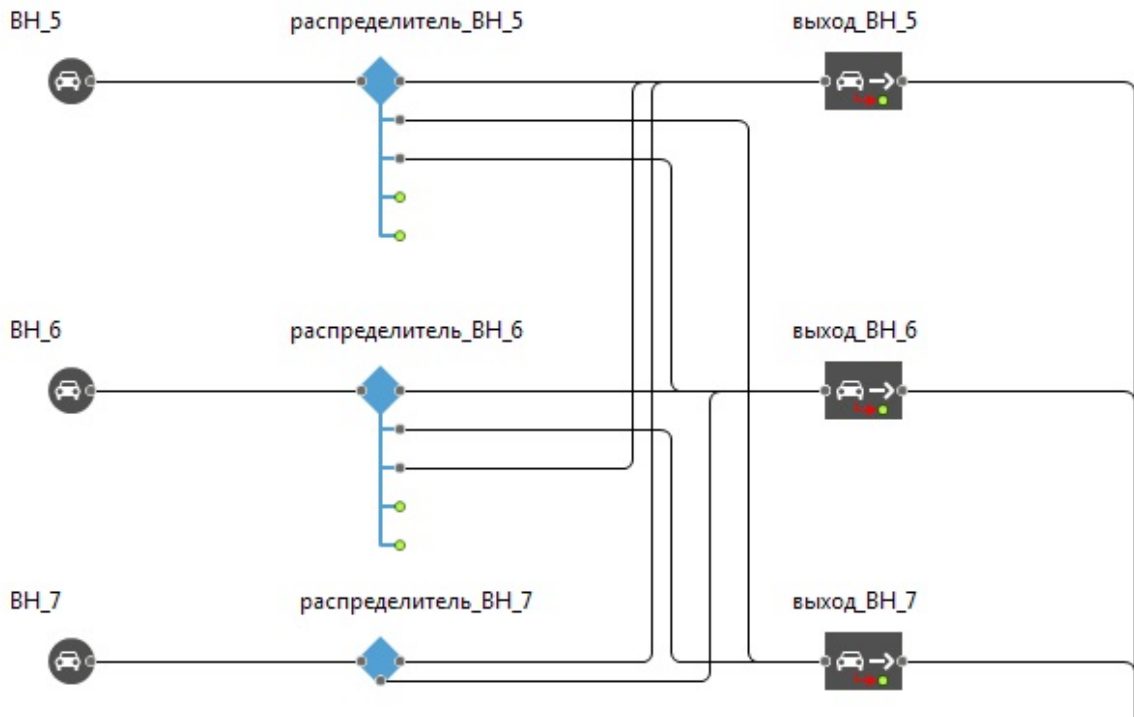


Рисунок 27 – Логическая схема перекрестка №1 в программной среде AnyLogic

Заключительным перекрестком, при моделировании координированного участка магистральной улицы, расположенной в г. Павловск, является пересечение ул. 40 лет Октября – ул. Лесная. Данный участок является классическим перекрестком, аналогично с перекрестком координатором, для построения его логики процесса потребовалось большее количество блоков (рис. 28). Объединенные логические схемы моделируемых перекрестков, по средством блока удаления машин, рассмотренного в табл. 2, позволили получить полную логическую схему координируемого участка (рис. 29).



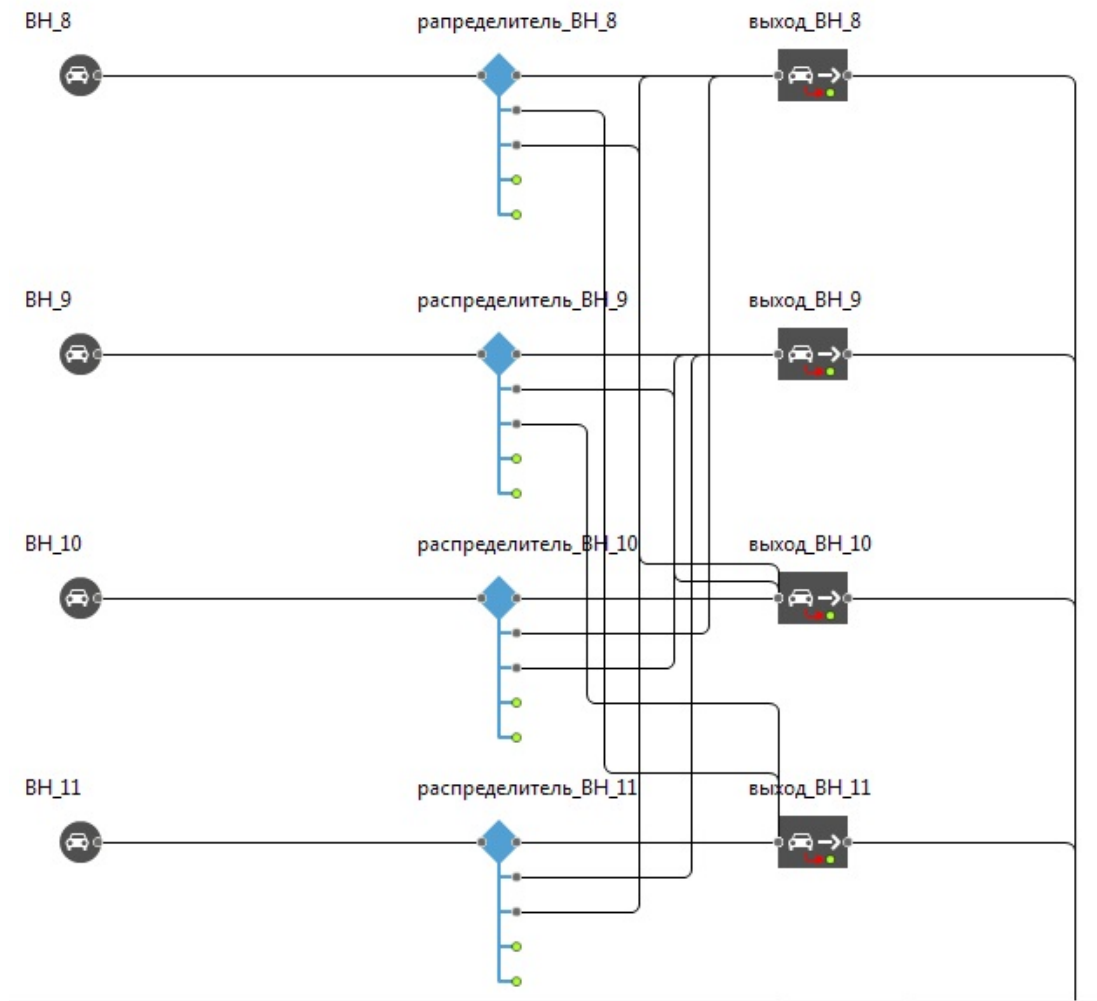


Рисунок 28 – Логическая схема перекрестка №3 в программной среде AnyLogic

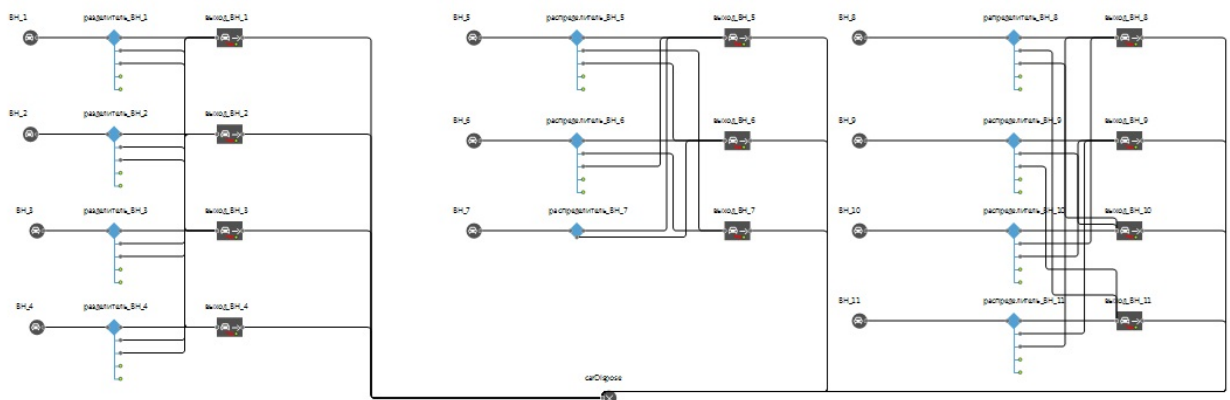


Рисунок 29 – Полная логическая схема координируемого участка, расположенного в г. Павловск – ул. 40 лет Октября в программной среде AnyLogic

При выполнении процедуры моделирования, была выполнена оценка адекватности построенного координированного участка [72, 73], по величине интенсивности, в результате моделирования, было выполнено сравнение показателей въезжающих автомобилей в модельной среде и на исследуемом участке в течение часа, последующая верификация построенной модели позволила обеспечить адекватность процесса моделирования с достоверностью 0.93, что для используемого программного продукта является довольно высоким значением.

В результате моделирования были установлены значения времени проезда по каждому из одиннадцати направлений координированного участка. Следует отметить, что данный показатель является одним из основных, например, при установлении необходимых методов управления транспортными потоками с использованием АСУДД [74-76]. В основные блоки логики процесса движения были заданы полученные значения интенсивностей дорожного движения, полученные в результате проведения исследований магистральных улиц малых и средних городов и длительности циклов и фаз регулирования. Для определения количества необходимого количества модельных измерений произведено соответствующее вычисление с применением метода итераций [77-83].

Для непрерывных событий, к которым относится и процесс дорожного движения, довольно часто решается уравнение типа:

$$f(x) = 0, \quad (34)$$

где функция  $f(x)$  определена и непрерывна на некотором конечном или бесконечном интервале  $a < x < b$ .

Приведем исходное уравнение к виду итерационного уравнения. Для этого уравнение (34) представим в форме:

$$x = \varphi(x) \quad (35)$$

Приняв условие:

$$x_n = \varphi(x_{n-1}) \quad (36)$$

Далее значение  $n$  определяется методом половинного деления:

$$n > \ln\left(\frac{b-a}{\varepsilon}\right) / \ln(2) \quad (37)$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность вычислений.

Количество итераций для выполнения эксперимента в результате выполненных расчетов составило 12. Эксперимент по оценке времени проезда был выполнен по всем одиннадцати направлениям рассматриваемого участка. В частности для направлений магистральной улицы – ул. 40 лет Октября рассмотрено шесть въездов – ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9 и отдельно для связных улиц, создающих пересечения на магистральной улице, с учетом их направлений, в количестве пяти – ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11, а также в среднем по всей сети с учетом всех направлений. Окно визуализации проведения эксперимента представлено на рис. 30.

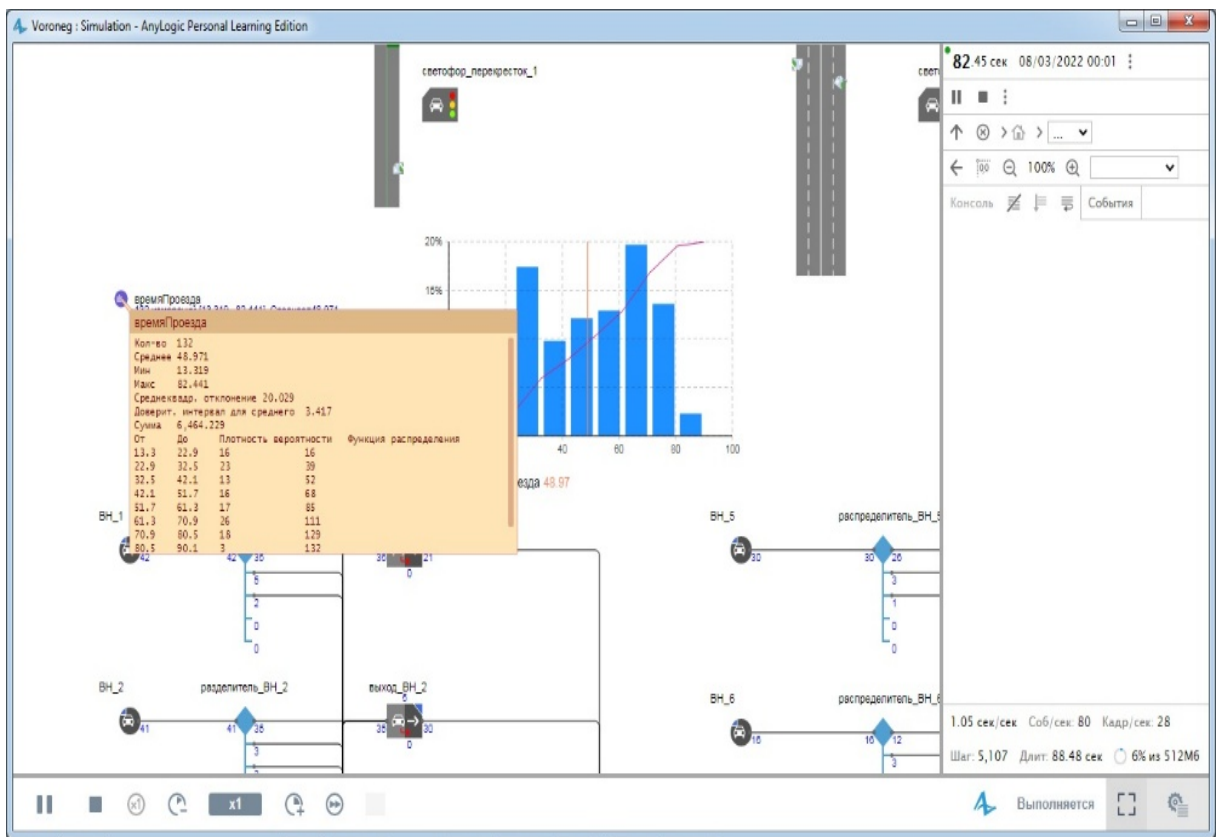


Рисунок 30 – Пример визуализации эксперимента в программной среде AnyLogic

В соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [77] оценку измеряемой величины  $\bar{x}$  и  $x$ , за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (38)$$

где  $x_i$  –  $i$ -й результат измерений;  $n$  – число исправленных результатов измерений ( $n=50$ ).

Тогда среднее квадратическое отклонение  $S$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (39)$$

В программе, значение итераций ( $n$ ) установлено оператором, а значения:  $\bar{t}$  – среднего времени проезда, с;  $t_{min}$  – минимального время проезда, с;  $t_{max}$  – максимального время проезда, с;  $S$  – среднеквадратического отклонения и доверительного интервала для среднего, определены автоматически.

Определенные значения среднего ( $\bar{t}$ ), минимального ( $t_{min}$ ) и максимального ( $t_{max}$ ) времени проезда, для связных участков – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная в результате выполненного моделирования движения при существующем цикле управления значительно превышают аналогичные показатели по магистральной улице – ул. 40 лет Октября, что наглядно отражено в таблице 1 и на рисунке 31.

Например, значения  $\bar{t}$  для направлений ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11 варьируются в пределах  $\bar{t} \in [497,07; 1180,19]$ , в то время как по направлениям магистральной улицы – ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9  $\bar{t} \in [87,16; 275,48]$ . Аналогичным образом  $t_{min}$  для направлений ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11 изменяется в пределах  $t_{min} \in [90,26; 121,77]$ , тогда как по направлениям магистральной улицы – ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9 значение находится в пределах  $t_{min} \in [13,32; 22,12]$ . Значения  $t_{max}$  для направлений связных участков – для направлений ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11 изменяются в пределах  $t_{max} \in [1023,43; 1237,21]$ , для магист-

ральной улицы, направлений ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9 изменяются в пределах  $t_{max} \in [165,92; 2094,83]$ .

Таблица 4 – Данные времени проезда координированного участка в результате моделирования

№ п/п	Наименование направления	Количество измерений (n)	Среднее время проезда ( $\bar{t}$ , сек)	Минимальное время проезда ( $t_{min}$ , сек)	Максимальное время проезда ( $t_{max}$ , сек)	среднеквадратическое отклонение (S)	доверительный интервал для среднего
1	ВН_1	50	115,21	14,50	274,48	78,43	22,27
2	ВН_2	50	87,16	13,32	205,77	60,30	16,72
3	ВН_3	50	497,07	90,26	1023,43	291,78	81,71
4	ВН_4	50	587,07	90,59	1237,21	316,23	89,802
5	ВН_5	50	131,42	20,63	236,73	64,42	17,53
6	ВН_6	50	275,48	22,12	513,02	165,42	46,33
7	ВН_7	50	1180,19	121,77	2094,83	784,88	215,62
8	ВН_8	50	198,52	14,74	431,13	133,54	37,92
9	ВН_9	50	94,67	20,70	165,92	49,16	13,26
10	ВН_10	50	586,83	92,64	1156,77	343,58	96,22
11	ВН_11	50	575,94	90,56	1051,51	324,69	90,05

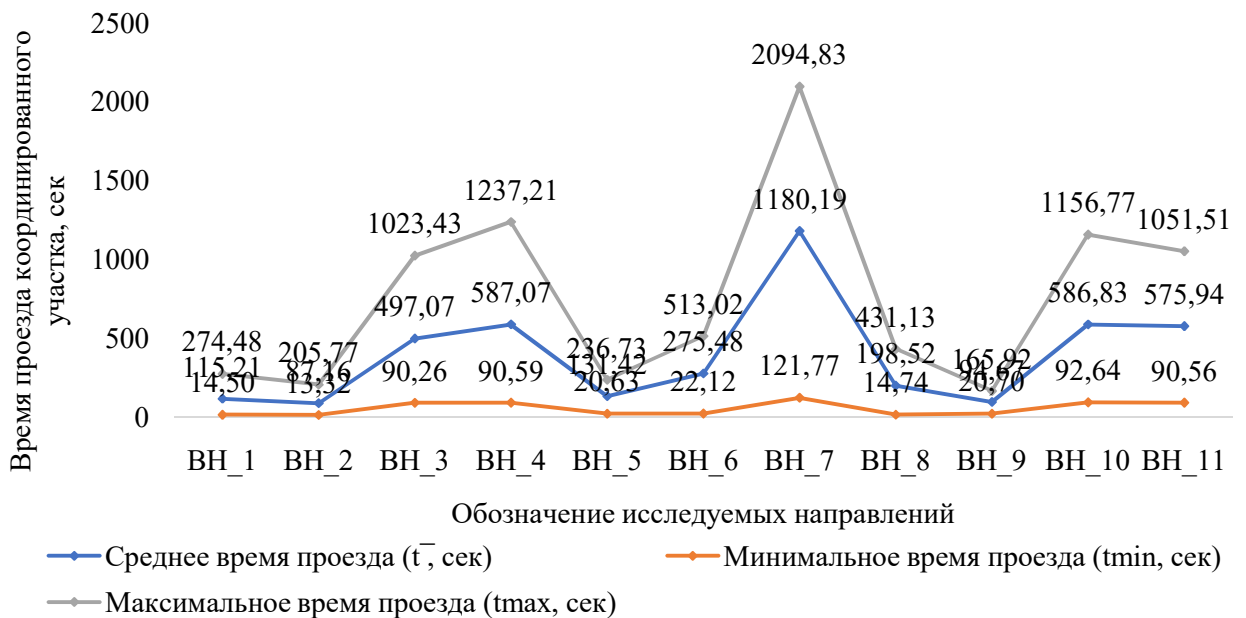


Рисунок 31 – Линейные графики среднего, минимального и максимального времени проезда координированного участка

По результату моделирования установлено, что для направлений второстепенных улиц – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная координиро-

ванное управление является мало эффективным что подтверждено значительным временем проезда в отличии от времени проезда магистральной улицы. Несмотря на обеспечение безостановочного движения по магистральной улице – 40 лет Октября, полученные значения свидетельствуют о высокой величине задержки, что приводит к образованию заторовых ситуаций на связных участках сети. Для снижения времени простоя, как на связных участках, так и в целом по рассматриваемой магистральной улице, необходимо разработать подход к определению необходимого способа управления – координированного и жесткого.

### **2.3 Разработка подхода к оценке эффективности работы координированного участка**

Для оценки эффективности применения координированного типа управления производится расчет показателей отраженных в главе 1. Но при отсутствии специализированных алгоритмов и исполнительных элементов, обеспечивающих постоянный мониторинг транспортной ситуации, что характерно для малых и средних городов, вопрос оценки эффективности функционирования существующих координируемых участков, остается открытым. Несмотря на наличие определенных инструментов (детекторов транспорта), позволяющих фиксировать основные характеристики транспортного потока, отсутствие подходов к оценке эффективности, основанных на регистрируемых показателях, например интенсивности транспортного потока (уровень обслуживания) и задержек транспортных средств, не позволяют использовать существующие возможности в полной степени.

Следует отметить, что в отечественной практике и зарубежной практике, для оценки соотношения интенсивности дорожного движения к пропускной способности активно используется понятие уровня обслуживания [12, 84-86], которое позволяет определить состояние транспортного потока и оценить его параметры. Для возможности оценки эффективности примене-

ния координированного управления в пользование предлагается ввести коэффициент эффективности координированного управления ( $k_{эку}$ ), который по аналогии с рассмотренным зарубежным методом позволит на основании данных об основных характеристиках транспортного потока и соответствии их определенным уровням обслуживания, определить целесообразность ввода координированного управления. В отличие от зарубежной методики, предлагается расширить диапазон вводимого коэффициента –  $k_{эку}$  и кроме определения необходимых действий, отразить значения характеристик транспортного потока на пересечениях, входящих в состав координируемой магистральной улицы.

Следует отметить, что произвести оценку эффективности светофорного управления, и в частности координированного управления позволяет расчет средней величины задержки –  $d$ , с/авт [12, 87-89]. Подробное описание процедуры определения рассматриваемой величины представлено в Highway Capacity Manual [12], где отражено что для расчета необходимо знать постоянную задержку –  $d_1$  (с/авт), связанную одинаковым прибытием автомобилей, коэффициента прогрессии, учитывающего процесс управления –  $k_{пр}$  определяемый с использованием формулы 41, а также дополнительную задержку  $d_2$  (с/авт), связанную со случайным характером прибытия, что позволяет осуществить расчет с использованием формулы:

$$d = d_1(k_{пр}) + d_2, \quad (40)$$

$$k_{пр} = \frac{(1-P)f_{Tn}}{1-\left(\frac{g}{C}\right)}, \quad (41)$$

где  $P$  – доля транспортных средств, прибывших в течение зеленого сигнала, ед./цикл;  $g/C$  – доля зеленого сигнала в цикле;  $f_{Tn}$  – коэффициент, учитывающий тип прибытия транспортных средств к регулируемому пересечению.

Коэффициент  $k_{пр}$ , в данном случае зависит от степени насыщения и находится в пределе от 0...1 и экипажного времени, в зависимости от установленных данных (табл. 5), производится выбор значения рассматриваемого коэффициента.

Таблица 5 – Значение коэффициента прибытия  $f_{Tn}$ 

Экипажное время, с	Уровень загрузки (коэффициент насыщения) $X$					
	$\leq 0,5$	0,6	0,7	0,8	0,9	$\geq 1,0$
$\leq 2,0$	0,04	0,13	0,22	0,32	0,41	0,50
2,5	0,08	0,16	0,25	0,33	0,42	0,50
3,0	0,11	0,19	0,27	0,34	0,42	0,50
3,5	0,13	0,20	0,28	0,35	0,43	0,50
4,0	0,15	0,22	0,29	0,36	0,43	0,50
4,5	0,19	0,25	0,31	0,38	0,44	0,50
5,0	0,23	0,28	0,34	0,39	0,45	0,50

Для определения стандартной задержки  $d_1$  необходимо знать длительность цикла регулирования –  $C$ , с; длительность разрешающего сигнала –  $g$ , с; степень насыщения –  $X$ , что позволяет осуществить расчет с использованием формулы:

$$d_1 = \frac{0,5c\left(1-\frac{g}{c}\right)^2}{1-\left[\min\left(1,X\right)\frac{g}{c}\right]}, \quad (42)$$

Вторая задержка – дополнительная  $d_2$ , также является расчетной величиной, для которой необходимы такие параметры как пропускная способность –  $c$ , ед/ч; длительность анализируемого периода –  $T$ , ч; коэффициент, учитывающий удаленность предыдущего участка от рассматриваемого –  $I$  (табл. 6) и степень насыщения –  $X$ :

$$d_2 = 900T \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8k_{np}IX}{cT}} \right], \quad (43)$$

Таблица 6 – Рекомендуемые значения коэффициента  $I$ 

Уровень загрузки на предыдущем перекрестке $X$	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	$\geq 1,0$
$I$	0,922	0,858	0,769	0,650	0,500	0,314	0,090

В рассмотренном методе производится учет задержки, но в случае применения модели (40), необходим расчет нескольких видов задержек – стандартной и дополнительной, что в условиях существующих пересечений не представляется возможным в виду отсутствия оборудования для такого



подробного анализа. Расчет с использованием модели (43) подразумевает применение специализированных продуктов имитационного моделирования, что усложняет возможность применения полученных результатов, в связи с тем, что потребует дополнительный вид работ, связанный с процедурой оценки адекватности моделирования.

Анализ технологического оборудования, а именно исполнительных элементов, позволяющих осуществлять управление городскими транспортными потоками, а также мониторинг транспортной ситуации, в малых и средних городах, на примере г. Россошь и г. Павловск (Воронежская область) позволил установить, что на рассматриваемых магистральных улицах используются детекторы транспорта ИНФОПРО. Данные детекторы позволяют оценить такие показатели как скорость движения транспортного потока, длину очереди, и среднюю величину задержки. Полученные значения величины задержки, как на связных участках, так и на магистральной улице, что позволяют осуществить расчет введенного коэффициента эффективности координируемого управления с использованием формулы:

$$k_{\text{эку}} = \frac{t_{\text{ср(сущ)}}}{t_{\text{ср(уо)}}, \quad (44)$$

где  $k_{\text{эку}}$  – коэффициент эффективности координированного управления;  $t_{\text{ср(сущ)}}$  – величина средней существующей задержки, с;  $t_{\text{ср(уо)}}$  – величина средней задержки, соответствующей уровню обслуживания, с.

В ходе выполнения эксперимента, необходимым мероприятием является определение значения средней величины задержки, соответствующей уровню обслуживания ( $t_{\text{ср(уо)}}$ ) с учетом рассматриваемого типа управления. Согласно рабочей гипотезе, при получении значения  $k_{\text{эку}} > 1$ , координированное управление будет считаться не эффективной, что связано со значительным превышением величины задержки в сравнении с допустимым. Для проверки введенного коэффициента и предлагаемого метода оценки эффективности, в рамках диссертационного исследования выполнен эксперимент на исследуемых магистральных улицах.

## 2.4 Вывод по главе 2

В результате выполненных работ в рамках главы 2 определены объекты исследования, расположенные в малых и средних городах Воронежской области – г. Павловск – ул. 40 лет Октября, г. Россошь – ул. Пролетарская, выполнено натурное исследование значений интенсивности по всем направлениям, определены существующие длительности цикла и фаз регулирования, осуществлено моделирование процесса движения и предложен подход к оценке эффективности координированного участка, что позволило получить следующие результаты:

1. В результате выполненных натурных исследований и анализа полученных результатов, были получены данные по интенсивности движения двух магистральных улиц, что позволило определить, что значение интенсивности движения на связных участках довольно часто превышает значение интенсивности на магистральной улице, что оказывает влияние на время проезда участка.

2. В ходе выполнения моделирования были установлены значения  $\bar{t}$  для направлений ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11, которые варьируются в пределах  $\bar{t} \in [497,07; 1180,19]$ , в то время как по направлениям магистральной улицы – ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9  $\bar{t} \in [87,16; 275,48]$ . Аналогичным образом  $t_{min}$  для направлений ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11 изменяется в пределах  $t_{min} \in [90,26; 121,77]$ , тогда как по направлениям магистральной улицы – ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9 значение находится в пределах  $t_{min} \in [13,32; 22,12]$ . Значения  $t_{max}$  для направлений связных участков – для направлений ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11 изменяются в пределах  $t_{max} \in [1023,43; 1237,21]$ , для магистральной улицы, направлений ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9 изменяются в пределах  $t_{max} \in [165,92; 2094,83]$ .

3. В пользование введен коэффициент оценки эффективности координированного типа управления  $k_{эку} = \frac{t_{ср(сущ)}}{t_{ср(уо)}}$ , позволяющий на основании данных о средней величине задержки и допустимых значениях величины задержки определить целесообразность использования координированного управления или применения жесткого.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

### 3.1 Оценка эффективности координированного управления

По результату оценки работы координированного участка был определен один из основных параметров, который позволяет определить эффективность работы всей сети – «время проезда». В рассмотренных в главе 2 методах оценки ввода координированного управления используется такой показатель как интенсивность дорожного движения, но он является общим для всей сети, но в виду постоянного изменения интенсивности движения необходимо анализировать суммарную интенсивность на въездах, как второстепенных участков, так и основного.

В ходе выполнения исследования в рамках главы 3 необходимо осуществлять анализ въездных второстепенных направлений в виду того что интенсивность в данных направлениях может значительно отличаться от интенсивности главного координируемого направления – магистральной улицы.

С использованием построенных имитационных моделей в программной среде AnyLogic выполнен анализ величины задержек на каждом рассмотренном направлении движения рассматриваемых магистральных улиц, расположенных в г. Павловск и г. Россошь.

Для оценки величины задержки в ранее построенных логических блок-схемах были использованы новые блоки – блок TimeMeasureStart, позволяет оценить момент начала отсчета времени при входе транспортного средства на рассматриваемое направление движение – полосу и блок TimeMeasureEnd позволяет оценить момент окончания времени выхода. В результате добавления новых блоков, возможно, оценить среднюю величину задержки по каждому из рассматриваемых направлений и в целом на исследуемом участке, что значительно усложняет логику процесса (рис. 32).

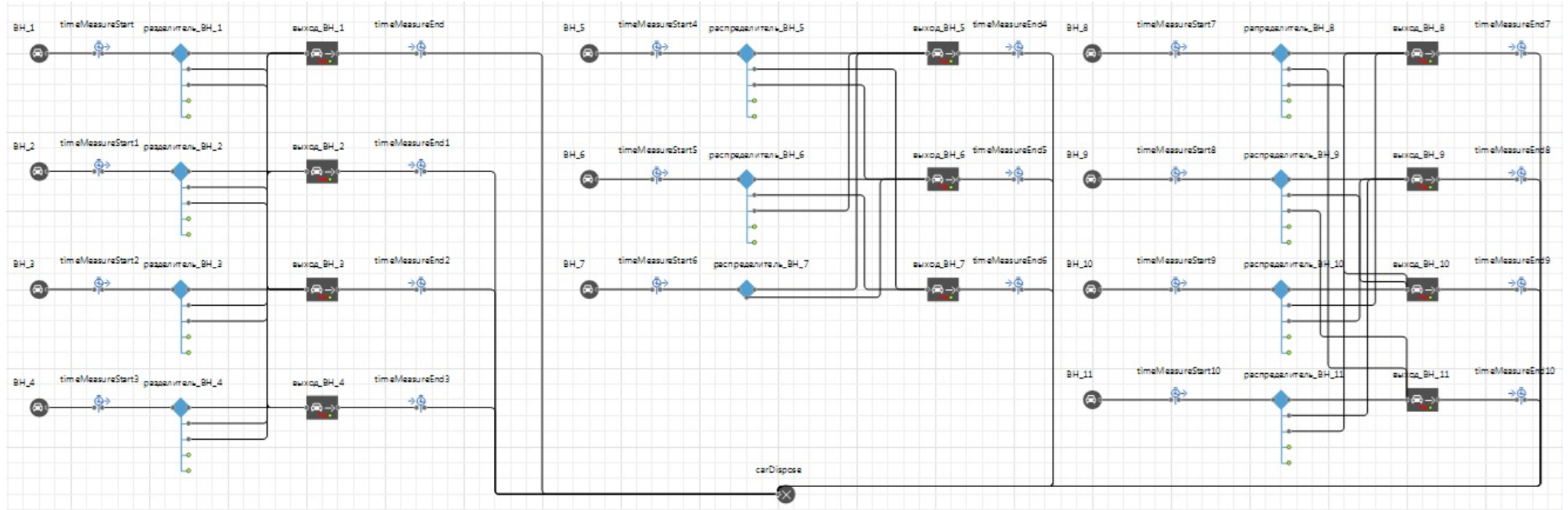
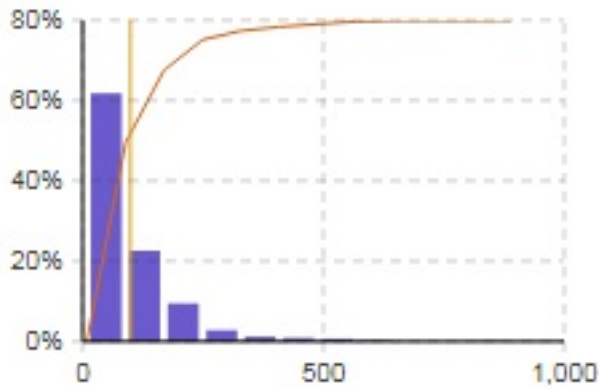
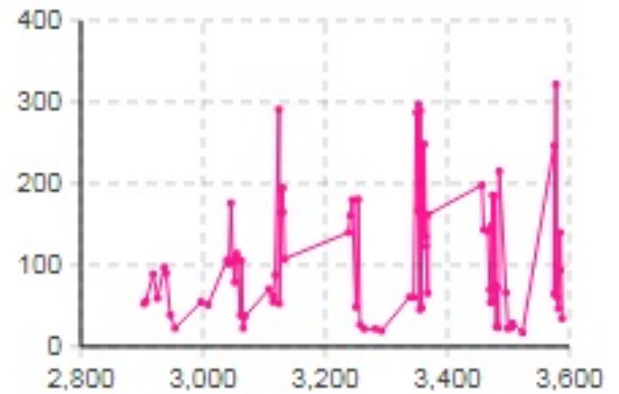


Рисунок 32 – Блок-схема работы магистральной улицы в г. Павловск с возможностью оценки средней величины задержки

С учетом показателей заданных интенсивностей движения на каждом въездном направлении, подробно описанном в главе 2 и установленным координированным циклом регулирования, были получены данные по величине задержки, представленных на рисунке 33 а-л и таблице 7.



● время задержки\_ВН\_1 99.24

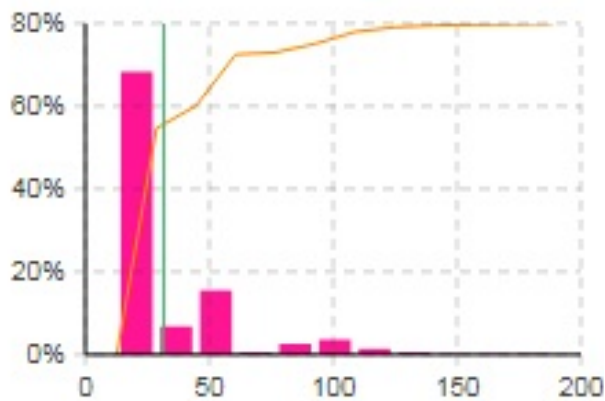


● время задержки\_ВН\_1

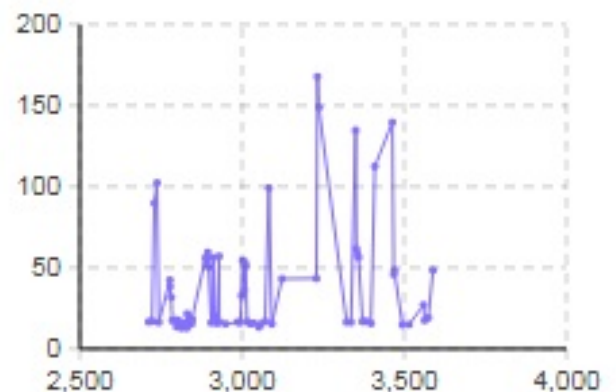
1) вид гистограммы

2) линейный вид

а) время задержки по направлению ВН 1



● время задержки\_ВН\_2 31.74



● время задержки\_ВН\_2

1) вид гистограммы

2) линейный вид

б) время задержки по направлению ВН 2



1) вид гистограммы



2) линейный вид

в) время задержки по направлению ВН 3



1) вид гистограммы



2) линейный вид

г) время задержки по направлению ВН 4



1) вид гистограммы



2) линейный вид

д) время задержки по направлению ВН 5



1) вид гистограммы



2) линейный вид

е) время задержки по направлению ВН 6



1) вид гистограммы



2) линейный вид

ж) время задержки по направлению ВН 7



1) вид гистограммы



2) линейный вид

з) время задержки по направлению ВН 8





1) вид гистограммы



2) линейный вид

и) время задержки по направлению ВН 9



1) вид гистограммы



2) линейный вид

к) время задержки по направлению ВН 10



1) вид гистограммы



2) линейный вид

л) время задержки по направлению ВН 11

Рисунок 33 – Визуализация результатов определения времени задержки по направлению рассматриваемого участка

Для целостности восприятия полученных результатов, данные по каждому рассмотренному направлению представлены в виде таблицы 7.

Таблица 7 – Результаты моделирования процесса движения и определение величины задержки по каждому рассматриваемому направлению

Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН1	ул. 40 лет Октября	5064	99,24
ВН2	ул. 40 лет Октября	5636	31,74
ВН3	ул. Гоголя	1530	73,49
ВН4	ул. Гоголя	1174	166,64
ВН5	ул. 40 лет Октября	5942	114,93
ВН6	ул. 40 лет Октября	4948	146,34
ВН7	м-н Гранитный	1000	131,03
ВН8	ул. 40 лет Октября	6394	36,63
ВН9	ул. 40 лет Октября	5606	96,53
ВН10	ул. Лесная	1174	107,12
ВН11	ул. Лесная	1310	151,24

Согласно основным критериям ввода координации, подробно рассмотренных в главе 1 (рис. 7), координация считается эффективной при транзитности магистральной улицы более 70%. В случае рассматриваемой магистральной улицы – ул. 40 лет Октября, расположенной в г. Павловск, среднее значение интенсивности по магистральной улице – основному участку ( $\bar{N}_0$ ) составляет 5598 ед/ч, а по связным участкам – направлениям мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесной – второстепенным улицам ( $\bar{N}_B$ ) составляет 1238 ед/ч. Соотношения представленных интенсивностей представляют собой коэффициент соотношения интенсивностей ( $k_N$ ) при координированном управлении:

$$k_N = \frac{\overline{N}_0}{\overline{N}_B} \quad (45)$$

где  $k_N$  – коэффициент соотношения интенсивностей дорожного движения;  $\overline{N}_0$  – средняя интенсивность движения по основному (координируемому) участку, ед/ч;  $\overline{N}_B$  – средняя интенсивность движения по второстепенным (не координируемым) участкам, ед/ч.

С учетом существующих данных по интенсивности, представленных в таблице 7 с использованием формулы (45) был определен введенный коэффициент  $k_N$  значение которого составило 0,22. Следует отметить, что существующие значения интенсивностей, соответствуют требованиям ввода координированного управления (рис. 7) т.к. транзитность магистральной улицы – ул. 40 лет Октября составляет 78%.

В ходе имитационного моделирования в программной среде AnyLogic были определены значения задержек транспортных средств, представленных в таблице 7. Установлено, что среднее значение по направлениям магистральной улицы – направлениям ВН\_1, ВН\_2, ВН\_5, ВН\_6, ВН\_8, ВН\_9 ( $\overline{t}_0$ ) составляет 87,57 с, по направлениям ВН\_3, ВН\_4, ВН\_7, ВН\_10, ВН\_11 второстепенных улиц, таких как мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная ( $\overline{t}_B$ ) составляет 125,9 с. Соотношение полученных значений задержек, аналогичным образом может быть выражено через специализированный коэффициент:

$$k_t = \frac{\overline{t}_0}{\overline{t}_B} \quad (46)$$

где  $k_t$  – коэффициент соотношения средних задержек на рассматриваемом участке;  $\overline{t}_0$  – средняя задержка при движении по основному (координируемому) участку, с;  $\overline{t}_B$  – средняя задержка при движении по второстепенным (не координируемым) участкам, с.

Выполненный расчет с использованием формулы (46) позволил установить значение коэффициента 0,7, при котором, согласно требованиям, описанным в главе 1 с обеспеченной транзитностью координируемого участка в 70%, управление считается эффективным.

Несмотря на наблюдаемые значительные задержки по второстепенным улицам, которые превышают простои на основном направлении более чем на 40%, в соответствии с интенсивностью, превышающей в 4 раза, такое значение является допустимым, но как было установлено ранее, в современных городах довольно часто наблюдаются ситуации, при которых значение интенсивностей второстепенных улиц равнозначно или превышает значение интенсивности по основному направлению. При возникновении таких ситуаций, требует оперативное вмешательство со стороны управляющих организаций, в введении которых находятся такие координируемые участки.

Для разработки математического аппарата и усовершенствования ранее разработанного алгоритма в рамках главы 3 выполнен ряд имитационных экспериментов, целью которых является установлении определенных ранее коэффициентов –  $k_N$  и  $k_t$  для определения эффективности применения координируемого управления.

При проведении экспериментов определены следующие условия:

- эксперимент 1 – интенсивность второстепенных участков увеличена на 50%, интенсивность, коэффициент соотношения интенсивностей движения составляет 0,33, координированное управление обеспечено, осуществлена проверка времени задержек.

- эксперимент 2 – интенсивность второстепенных участков увеличена на 100%, интенсивность, коэффициент соотношения интенсивностей движения составляет 0,44, координированное управление обеспечено, осуществлена проверка времени задержек.

- эксперимент 3 – интенсивность второстепенных участков увеличена на 150%, интенсивность, коэффициент соотношения интенсивностей движения составляет 0,55, координированное управление обеспечено, осуществлена проверка времени задержек.

- эксперимент 4 – интенсивность второстепенных участков увеличена на 200%, интенсивность, коэффициент соотношения интенсивностей движе-

ния составляет 0,66, координированное управление обеспечено, осуществлена проверка времени задержек.

### 3.1.1. Результаты проведения эксперимента 1

При проведении эксперимента 1, без изменения режима координации были получены следующие результаты, представленные в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты проведения эксперимента 1

Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН1	ул. 40 лет Октября	5064	66,23
ВН2	ул. 40 лет Октября	5636	35,46
ВН3	ул. Гоголя	3060	92,37
ВН4	ул. Гоголя	2348	89,61
ВН5	ул. 40 лет Октября	5942	72,02
ВН6	ул. 40 лет Октября	4948	81,94
ВН7	м-н Гранитный	2000	100,52
ВН8	ул. 40 лет Октября	6394	30,8
ВН9	ул. 40 лет Октября	5606	70,24
ВН10	ул. Лесная	2348	46,4
ВН11	ул. Лесная	2620	152,98

В рассматриваемом случае – «эксперимент 1»  $\bar{N}_0$  остается неизменной и составляет 5598 ед/ч, а среднее значение по второстепенным улицам ( $\bar{N}_B$ ) составляет 1856 ед/ч, что позволяет определить коэффициент соотношения интенсивностей ( $k_N$ ) при координированном управлении с использованием формулы (45), который составил 0,33.

Выполненная процедура имитационного моделирования также позволила оценить значение задержки транспортных средств (табл. 8). Установлено, что среднее наблюдаемое значение по основному направлению ( $\bar{t}_0$ ) составляет 59,44 с, по второстепенным направлениям ( $\bar{t}_B$ ) – 96,38 с, что в свою очередь позволяет рассчитать значение коэффициента задержки  $k_t$ , значение которого в случае эксперимента 1 составило 0,62, полученные результаты отражены на рисунке 34.

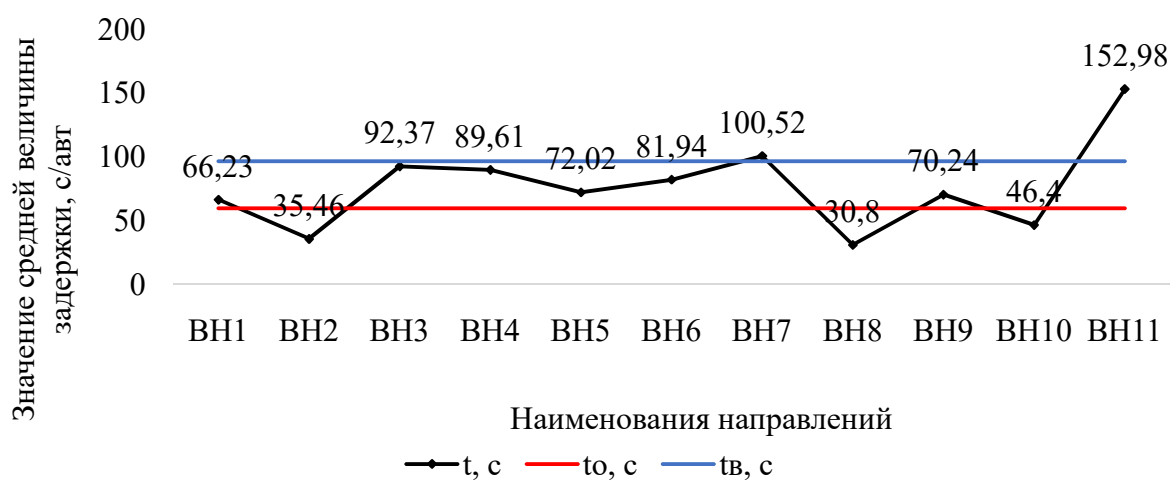


Рисунок 34 – Графическое представление изменения величины задержки по основным направлениям магистральной улицы по результату выполнения эксперимента 1

Представленный график (рис. 34) наглядно показывает, что значение средней величины задержки по направлениям магистральной улицы – ул. 40 лет Октября (красный цвет линии) ниже значения величины задержки по второстепенным направлениям – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная (синий цвет линии).

### 3.1.2. Результаты проведения эксперимента 2

При проведении эксперимента 2, без изменения режима координации были получены следующие результаты, представленные в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты проведения эксперимента 2

Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН1	ул. 40 лет Октября	5064	76,89
ВН2	ул. 40 лет Октября	5636	30,7
ВН3	ул. Гоголя	2295	75,72
ВН4	ул. Гоголя	1761	137,38
ВН5	ул. 40 лет Октября	5942	91,17
ВН6	ул. 40 лет Октября	4948	132,38
ВН7	мкр. Гранитный	1500	179,77
ВН8	ул. 40 лет Октября	6394	32,64
ВН9	ул. 40 лет Октября	5606	88,69
ВН10	ул. Лесная	1761	62,08
ВН11	ул. Лесная	1965	166,78

Как и в случае предыдущего эксперимента – «эксперимент 2» интенсивность основного направления  $\bar{N}_0 = 5598$  ед/ч, а среднее значение по второстепенным улицам  $\bar{N}_B = 2475$  ед/ч, что позволяет определить коэффициент  $k_N$  с использованием формулы (45), который по результату расчета составил 0,44.

Выполненная процедура имитационного моделирования также позволила оценить значение задержки транспортных средств (табл. 9), установлено, что среднее наблюдаемое значение по основному направлению ( $\bar{t}_0$ ) составляет 75,41 с, по второстепенным направлениям ( $\bar{t}_B$ ) – 124,35 с (рис. 35) что в свою очередь позволяет рассчитать значение ранее введенного коэффициента эффективности, значение которого в данном случае составило 0,61.

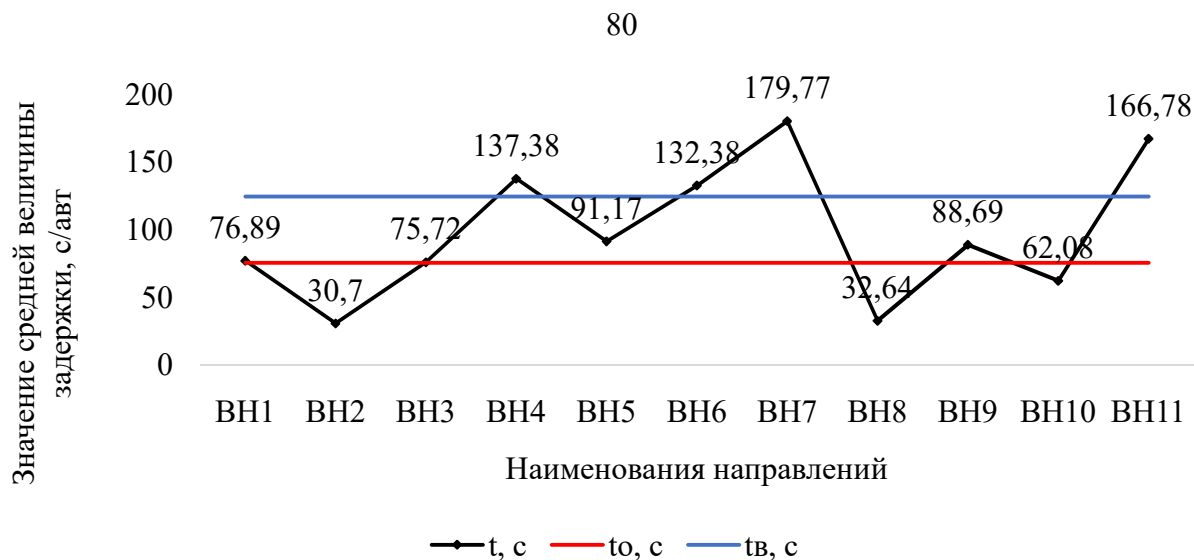


Рисунок 35 – Графическое представление изменения величины задержки по основным направлениям магистральной улицы по результату выполнения эксперимента 2

Представленный график (рис. 35) наглядно показывает, что значение средней величины задержки по направлениям магистральной улицы – ул. 40 лет Октября (красный цвет линии) ниже значения величины задержки по второстепенным направлениям – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная (синий цвет линии).

### 3.1.3. Результаты проведения эксперимента 3

При проведении эксперимента 3, без изменения режима координации были получены следующие результаты, представленные в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты проведения эксперимента 3

Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН1	ул. 40 лет Октября	5064	71,61
ВН2	ул. 40 лет Октября	5636	38,72



Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН3	ул. Гоголя	3825	110,48
ВН4	ул. Гоголя	2935	88,13
ВН5	ул. 40 лет Октября	5942	86,19
ВН6	ул. 40 лет Октября	4948	93,9
ВН7	мкр. Гранитный	2500	127,6
ВН8	ул. 40 лет Октября	6394	34,08
ВН9	ул. 40 лет Октября	5606	103,84
ВН10	ул. Лесная	2935	57
ВН11	ул. Лесная	3275	196,82

В рассматриваемом случае – «эксперимент 3»  $\bar{N}_0$  остается неизменной и составляет 5598 ед/ч, а среднее значение по второстепенным улицам – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесной ( $\bar{N}_B$ ) составляет 3094 ед/ч. Значения интенсивностей позволяют осуществить расчет коэффициента соотношения интенсивностей ( $k_N$ ) с использованием формулы (45) и получить значение 0,55.

С учетом полученных данных по величине задержки в ходе имитационного моделирования, что отражено в таблице 10 было определено, что значение  $\bar{t}_0$  составляет 71,39 с, а значение  $\bar{t}_B$  – 116,01 с (рис. 36). В случае эксперимента 3 значение коэффициента соотношения задержек ( $k_t$ ) составило 0,62.

Представленный график (рис. 36) наглядно показывает, что значение средней величины задержки по направлениям магистральной улицы – ул. 40 лет Октября (красный цвет линии) ниже значения величины задержки по второстепенным направлениям – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная (синий цвет линии).

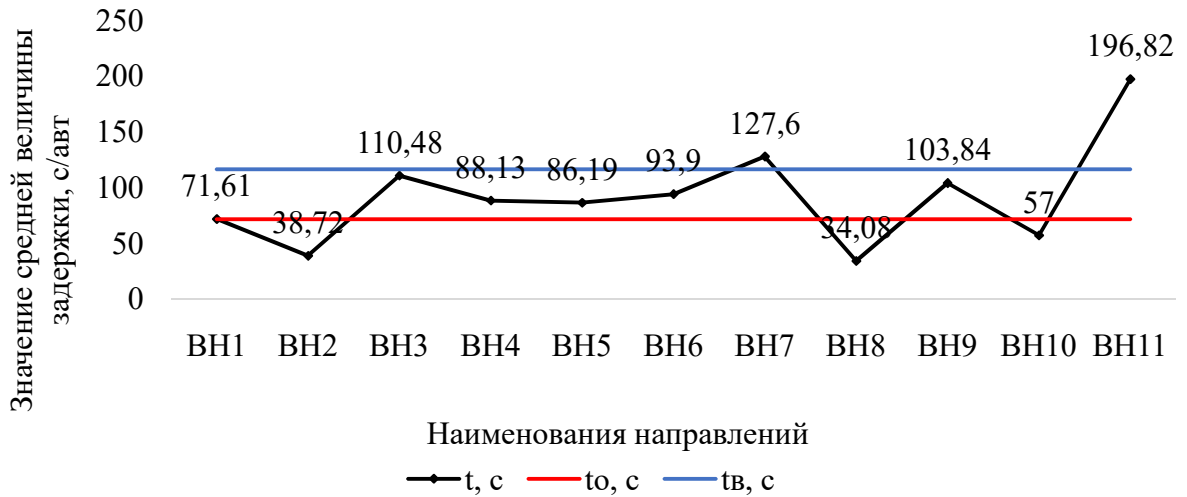


Рисунок 36 – Графическое представление изменения величины задержки по основным направлениям магистральной улицы по результату выполнения эксперимента 3

Для анализа изменения ситуации на рассматриваемом участке, далее, в рамках главы 3 диссертационного исследования выполнен эксперимент 4, в соответствии с ранее принятыми условиями.

### 3.1.4. Результаты проведения эксперимента 4

При проведении эксперимента 4, без изменения режима координации были получены следующие результаты, представленные в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты проведения эксперимента 4

Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН1	ул. 40 лет Октября	5064	54,62
ВН2	ул. 40 лет Октября	5636	35,4
ВН3	ул. Гоголя	4590	147,49
ВН4	ул. Гоголя	3522	55,63

Обозначение направлений	Наименование улиц	N, ед/ч	t, с
ВН5	ул. 40 лет Октября	5942	94,14
ВН6	ул. 40 лет Октября	4948	89,78
ВН7	мкр. Гранитный	3000	161,4
ВН8	ул. 40 лет Октября	6394	31,92
ВН9	ул. 40 лет Октября	5606	148,13
ВН10	ул. Лесная	3522	81,79
ВН11	ул. Лесная	3930	178,02

При проведении «эксперимента 4» средняя интенсивность по магистральной улице – основному направлению ( $\bar{N}_0$ ) как и в случае предыдущих экспериментов остается неизменной и составляет 5598 ед/ч. Среднее значение по второстепенным улицам ( $\bar{N}_B$ ) составляет 3713 ед/ч, что позволяет определить коэффициент соотношения интенсивностей ( $k_N$ ) при координированном управлении с использованием формулы (45), который составил 0,66.

Выполненная процедура имитационного моделирования также позволила оценить значение задержки транспортных средств (табл. 11), установлено, что среднее наблюдаемое значение по основному направлению ( $\bar{t}_0$ ) составляет 75,67 с, по второстепенным направлениям ( $\bar{t}_B$ ) – 124,87 с (рис. 37), что в свою очередь позволяет рассчитать значение ранее введенного коэффициента эффективности, значение которого в данном случае составило 0,61.

Представленный график (рис. 37) наглядно показывает, что значение средней величины задержки по направлениям магистральной улицы – ул. 40 лет Октября (красный цвет линии) ниже значения величины задержки по второстепенным направлениям – мкр. Гранитный, ул. Гоголя и ул. Лесная (синий цвет линии).

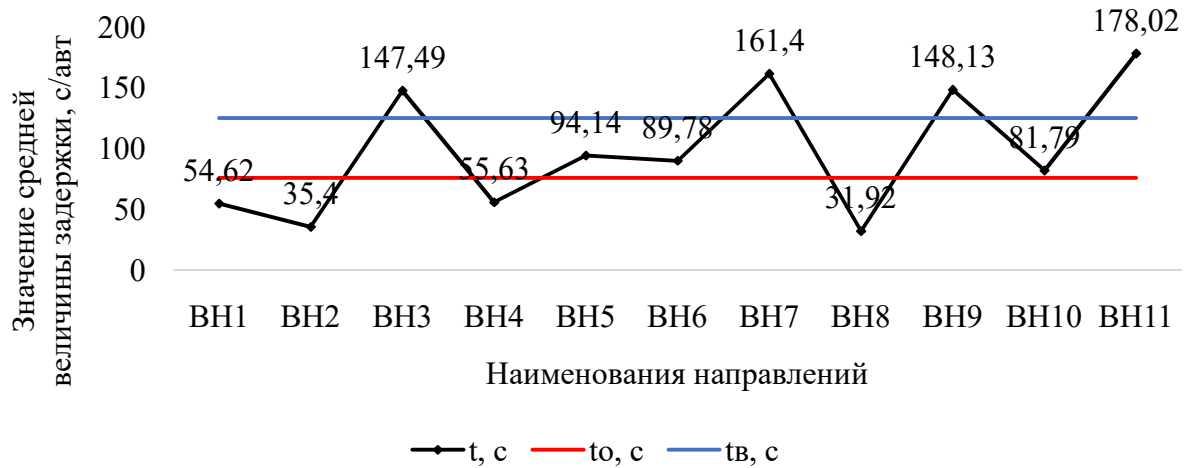


Рисунок 37 – Графическое представление изменения величины задержки по основным направлениям магистральной улицы по результату выполнения эксперимента 4

По результату выполненных экспериментов был получен набор данных, отражающих зависимость между интенсивностью и задержками транспортных средств.

### 3.2 Разработка математической модели взаимосвязи интенсивности и задержек транспортных средств при координированном управлении

Анализ полученных в результате выполнения эксперимента (табл. 12) с использованием специализированного пакета в MSExcel, позволяет определить большое количество показателей.

Таблица 12 – Соответствие значений коэффициентов соотношений интенсивностей и задержек на координированном участке по результату имитационного моделирования

№ п/п	$k_N$	$k_t$
1	0,22	0,69
2	0,33	0,62

№ п/п	$k_N$	$k_t$
3	0,44	0,61
4	0,55	0,62
5	0,66	0,61

Из таблицы видно, что при изменении интенсивности, значения коэффициентов соотношения задержек изменяется не значительно в пределах от 0,61 до 0,69, с использованием пакета «Описательная статистика» был выполнен анализ каждого рассмотренного коэффициента, что наглядно представлено в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты математического анализа полученных коэффициентов

Математические величины для анализа $k_N$	Значения	Математические величины для анализа $k_t$	Значения
Среднее	0,44	Среднее	0,63
Стандартная ошибка	0,077782	Стандартная ошибка	0,015166
Медиана	0,44	Медиана	0,62
Мода	-	Мода	0,62
Стандартное отклонение	0,173925	Стандартное отклонение	0,033912
Дисперсия выборки	0,03025	Дисперсия выборки	0,00115
Эксцесс	-1,2	Эксцесс	4,570888
Асимметричность	$-1,5 \cdot 10^{-15}$	Асимметричность	2,115472
Интервал	0,44	Интервал	0,08
Минимум	0,22	Минимум	0,61
Максимум	0,66	Максимум	0,69
Сумма	2,2	Сумма	3,15
Счет	5	Счет	5

Математические величины для анализа $k_N$	Значения	Математические величины для анализа $k_t$	Значения
Уровень надежности (95,0%)	0,215957	Уровень надежности (95,0%)	0,042107

По итогу выполненного анализа была получен точечный график, отражающий зависимость между установленными коэффициентами – интенсивности и задержки, наглядно представленный на рисунке 38.

Графический анализ полученных зависимостей с использованием общеизвестных функций, позволил установить величину аппроксимации и получить уравнение определенных функций – линейной, экспоненциальной, логарифмической и полиномиальной (табл. 14).

Таблица 14 – Результаты графического анализа установленных зависимостей

№ п/п	Наименование функциональной зависимости	Уравнение	Величина аппроксимации
1	Линейная	$y = -0,1455x + 0,694$	$R^2 = 0,56$
2	Логарифмическая	$y = -0,065\ln(x) + 0,5719$	$R^2 = 0,7$
3	Полиномиальная	$y = 0,8264x^2 - 0,8727x + 0,834$	$R^2 = 0,87$
4	Степенная	$y = 0,5755x^{-0,1}$	$R^2 = 0,7$
5	Экспоненциальная	$y = 0,6945e^{-0,224x}$	$R^2 = 0,56$

Установлено, что наиболее точно описать полученные распределения позволяет полином второй степени, таким образом, между установленными коэффициентами с достоверностью 87% получена функциональная зависимость, описываемая следующим уравнением:

$$k_t = 0,8264 \cdot k_N^2 - 0,8727 \cdot k_N + 0,834 \quad (47)$$

или

$$\bar{t}_0 / \bar{t}_B = 0,8264 \cdot \left( \bar{N}_0 / \bar{N}_B \right)^2 - 0,8727 \cdot \bar{N}_0 / \bar{N}_B + 0,834 \quad (48)$$

где  $k_N$  – коэффициент соотношения интенсивностей дорожного движения;  $\bar{N}_0$  – средняя интенсивность движения по основному (координируемому) участку, ед/ч;  $\bar{N}_B$  – средняя интенсивность движения по второстепенным (не координируемым) участкам, ед/ч;  $k_t$  – коэффициент соотношения средних задержек на рассматриваемом участке;  $\bar{t}_0$  – средняя задержка при движении по основному (координируемому) участку, с;  $\bar{t}_B$  – средняя задержка при движении по второстепенным (не координируемым) участкам, с.

Таким образом, зная соотношение интенсивностей при координированном управлении, возможно, определить соотношение задержек автомобилей и осуществить анализ коэффициента эффективности координированного управления ( $k_{\text{эку}}$ ) соответствующий значению  $k_t$ :

$$k_{\text{эку}} = k_t, \quad (49)$$

были определены условия эффективного применения координированного управления рассматриваемого участка:

$$k_{\text{эку}} < 1, \quad (50)$$

и не эффективного:

$$k_{\text{эку}} > 1. \quad (51)$$

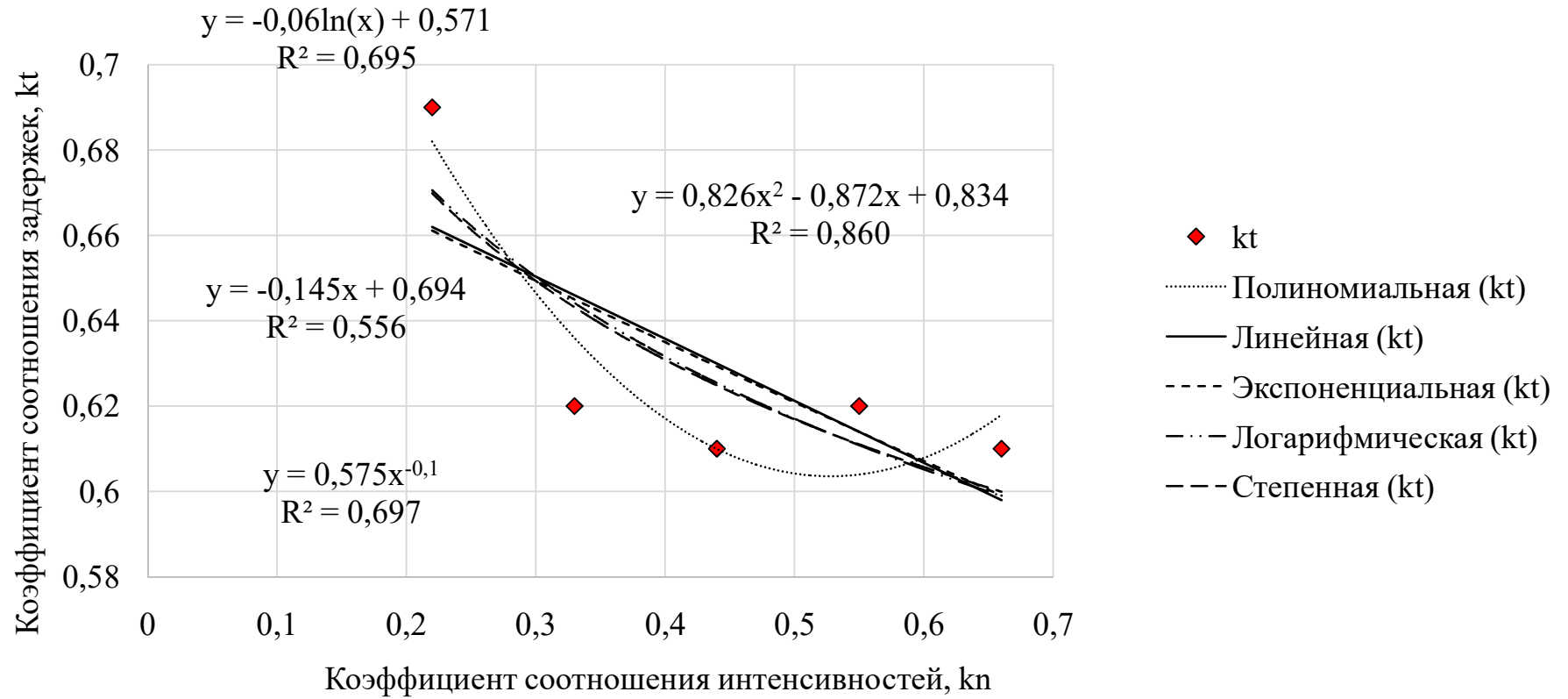


Рисунок 38 – Точечный график зависимости значений коэффициентов соотношений интенсивностей и задержек на координированном участке по результату имитационного моделирования



В результате расчета получена графическая зависимость, которая будет иметь вид, представленный на рис. 39, где «область 1» обозначена область, при которой эффективно применение координированного управления, что соответствует ранее установленным требованиям по вводу такого типа организации принудительного управления; «область 2» также является эффективной в связи с тем, что значение коэффициента эффективности управления в данном случае не превышает 1, в виду того что среднее время задержки наблюдаемое на второстепенных улицах все еще не превышает время задержки на основной (координируемой магистрали); «область 3» наглядно отражает условия при которых применение координации является неэффективным.

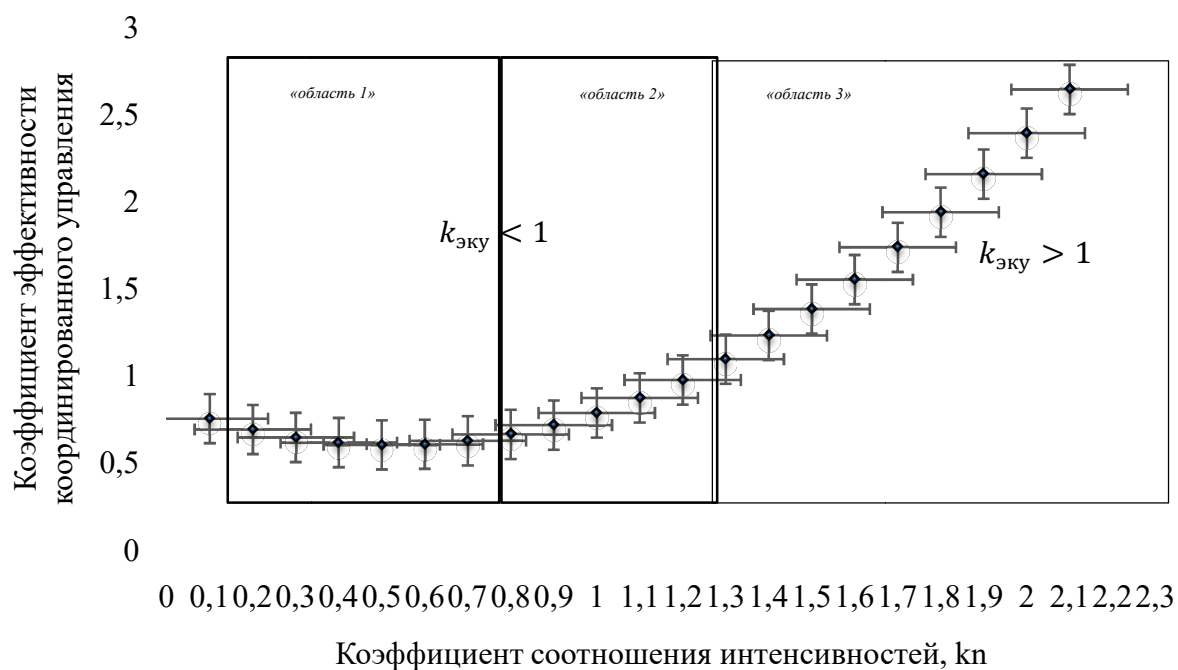


Рисунок 39 – Графическое изображение полученных результатов применительно к оценке эффективности координированного управления

Полученные результаты позволили разработать алгоритм оценки эффективности координированного управления (рис. 40).

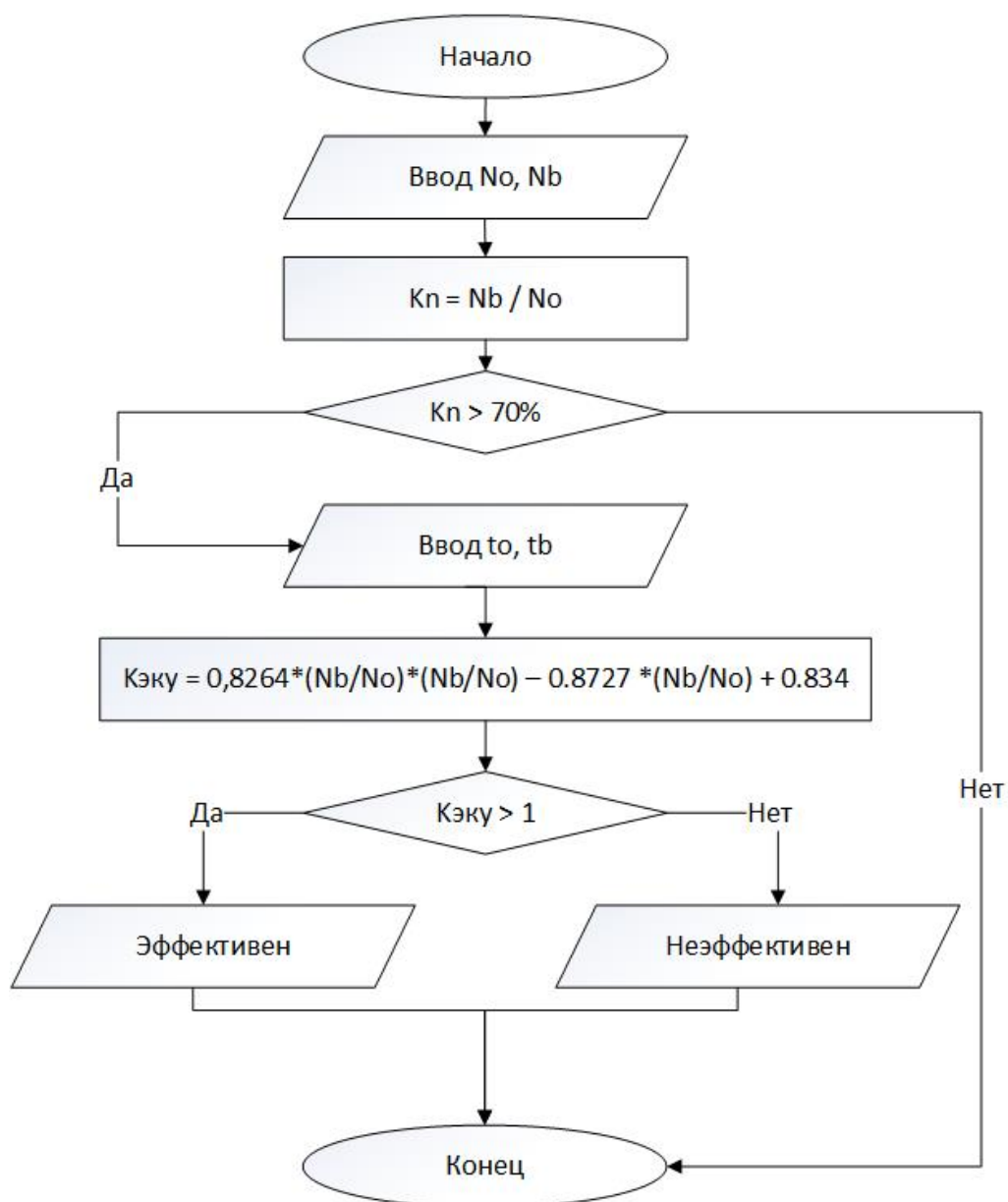


Рисунок 40 – Алгоритм оценки эффективности координированного управления

Для проверки усовершенствованного алгоритма, в рамках исследования рассматриваемой магистральной улицы – ул. 40 лет Октября выполнен натурный эксперимент.

### 3.3 Результаты натурного эксперимента на исследуемом участке

В результате расчетов, с использованием алгоритма (рис. 36), установлено, что, при вводе координированного регулирования на рассматриваемом

проспекте возможно снижение времени задержки в среднем на 21% при условии, что степень насыщения рассматриваемых участков составляет 0,9, которая соответствует уровню обслуживания D и выше, что свидетельствует о том, что при таком условии – ввод координации для магистральной улицы является целесообразным и оправданным, но в случае увеличения интенсивности дорожного движения на второстепенных улицах – изменения уровня загрузки, характеризуемого коэффициентом загрузки без изменения режима координации, необходима корректировка (табл. 15).

Таблица 15 – Результаты расчета величины задержки при вводе и без ввода координированного управления при уровне обслуживания С

№ п/п	Наименование перекрестков	значение задержки без ввода координированного	значение задержки при вводе координированного регулирования, (t, с)	Снижение средней величины задержки, с	Изменение величины задержки, %
1	Перекрёсток №1	63,28	52,35	10,93	-17%
2	Перекрёсток №2	225,27	185,39	39,88	-18%
3	Перекрёсток №3	373,38	261,19	112,19	-30%

Согласно общепринятой характеристике уровней обслуживания, в соответствии с ОДМ 218.2.020-2012 и рассмотрении ее в области регулируемых участков, установлено, что коэффициент загрузки обладает определенной связью со степенью насыщения, которую математически можно выразить через систему уравнений:

$$\begin{cases} z = N/P \\ x = N/M_H \end{cases} \quad (52)$$

где  $N$  – интенсивность движения, ед/ч;  $P$  – практическая пропускная способность участка дороги, ед/ч;  $M_n$  – поток насыщения, ед/ч.

И на основании фактических данных для объекта исследования, напрямую связанных с величинами, входящими в состав системы уравнений (52), в первую очередь геометрическими характеристиками определить следующую зависимость:

$$x = 2z \quad (52)$$

Тогда, для существующих характеристик уровней обслуживания, предлагается ввести коэффициент степени насыщения (применительно к управляемым магистральным улицам) что наглядно представлено в табл. 16.

Сегодня, наиболее эффективным способом оценки изменения транспортных характеристик на объекте в результате внедрения каких-либо мероприятий, является применение продуктов имитационного моделирования. В результате моделирования с использованием имитационного продукта AnyLogic рассматриваемого координируемого участка, подробно описанного в главе 2 были определены оптимальные значения средней величины задержки соответствующие определенным уровням обслуживания пересечения и степени насыщения (табл. 16).

При оценке адекватности моделирования, коэффициент корреляции составил 0,97, что свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов.

Несмотря на разные значения величин интенсивности на рассматриваемых участках, характер изменения графиков является идентичным, так на первом перекрестке (рис. 41) на котором значение интенсивности было минимальным в сравнении с остальными перекрестками, минимальное значение величины задержки составило 2 с. На более загруженном перекрестке – перекрестке №2 (рис. 42), минимальное значение величины задержки составило 7 с при вводе координации и 9 с без ввода. Заключительный перекресток – перекресток №3 (рис. 43), показал минимальное значение 10 с при вводе коор-

динации и 14 с без ввода с учетом одинаковых условий движения и степени насыщения 0,5.

Таблица 16 – Основные показатели уровней обслуживания

Уровень обслуживания	Коэффициент загрузки, z	Коэффициент скорости движения, с	Коэффициент насыщения движением, p	Коэффициент степени насыщения, x	Значение величины средней
A	<0,20	>0,9	<0,1	<0,4	6,65
B	0,2-0,45	0,7-0,9	0,1-0,3	0,4-0,9	37,14
C	0,45-0,7	0,55-0,7	0,3-0,7	0,9-1,0	68,19
D	0,7-0,9	0,4-0,55	0,7-1,0	>1,00	83,16
E	0,9-1,00	<0,4	1,00	>1,00	-
F	>1,00	0,30	1,00	>1,00	-

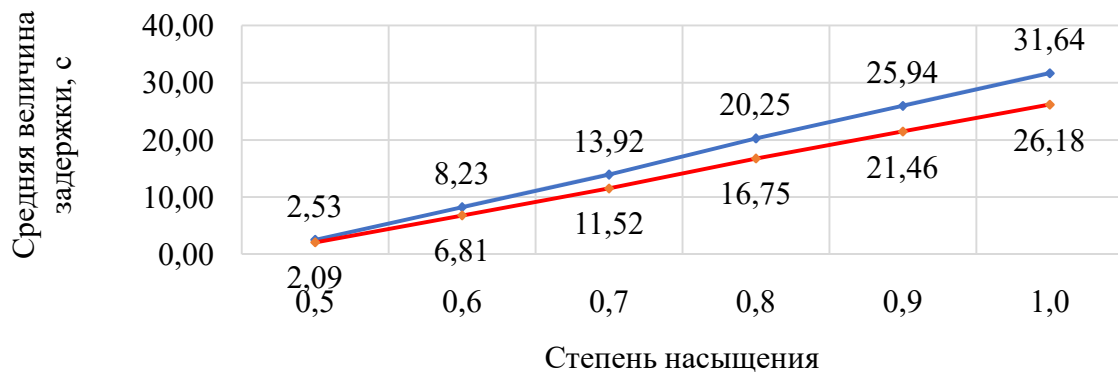


Рисунок 41 – График изменения величины задержки при изменении степени насыщения на участке – перекресток №1

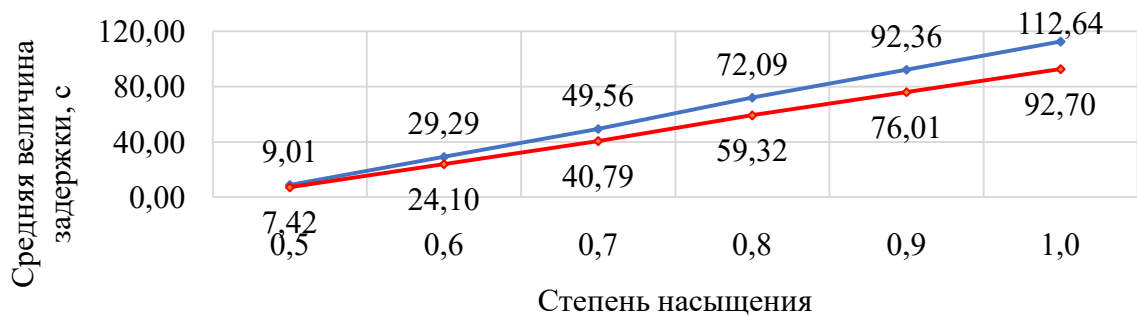


Рисунок 42 – График изменения величины задержки при изменении степени насыщения на участке – перекресток №2

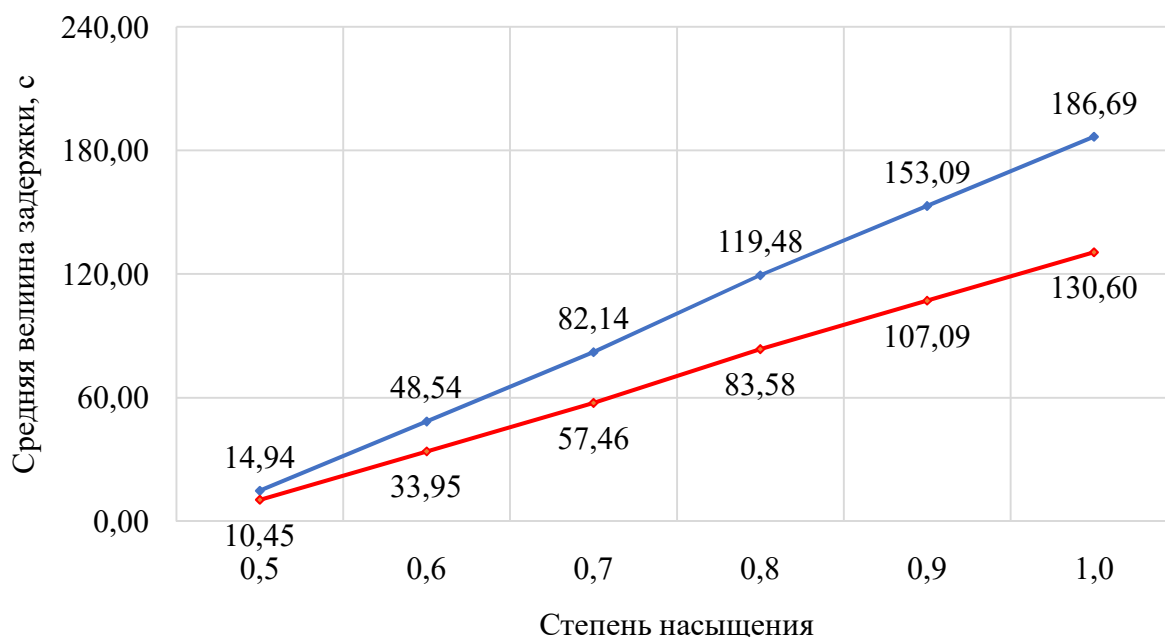


Рисунок 43 – График изменения величины задержки при изменении степени насыщения на участке – перекресток №3

Моделирование координируемого участка позволило установить, что для данного типа управления возможна оценка по четырем уровням обслуживания А,В,С,Д в связи с тем, что для уровней обслуживания Е и F характерна идентичная степень насыщения как и для уровня D, что наглядно представлено в табл. 17.

В результате выполненных работ был предложен метод оценки эффективности координированного управления, который основан на анализе степени насыщения и значения величины средней задержки, характерных для определенных уровней обслуживания, позволяющий оперативно оценить изменение ситуации, с применением детекторов транспорта. Определено, что для рассматриваемого типа управления, возможно использование оценки по четырем уровням обслуживания и предложена характеристика для каждого по значению степени насыщения и средней величины задержки (табл. 17)

Таблица 17 – Предлагаемая характеристика движения для управляемой магистральной улицы

Уровень обслуживания	Коэффициент степени насыщения, $x$	Значение величины средней задержки на пересечении ( $t_{cp(yo)}$ ), с
A	<0,4	<10
B	0,4-0,9	10-40
C	0,9-1,0	40-70
D	>1,00	>70

В пользование предложено ввести коэффициент эффективности координируемого управления, который позволяет оценить целесообразность применения координации, на основании анализа существующей средней величины задержки, которую возможно определить с использованием детекторов транспорта и, сопоставив ее с установленным значением величины средней задержки характерной для уровня обслуживания (определенный по результату детектирования управляемого участка, на основании сопоставления существующей величины интенсивности с пропускной способностью), определить искомый коэффициент.

При получении  $k_{эку} > 1$ , для определенного уровня обслуживания применение координации будет считаться не эффективным, т.к. при существующем способе управления – координации, величина задержки будет выше величины задержки соответствующей уровню обслуживания, полученному по результату детектирования, что требует изменения типа координации или применения иного типа управления – например – не координируемого. На исследуемой магистральной улице, установлено, что наибольшую эффективность координация дает при уровне обслуживания C, для иных уровней обслуживания, довольно часто наблюдается значение  $k_{эку} > 1$ , что требует изменения координации или применение иного типа управления.

### 3.4 Выводы по главе 3

В рамках главы 3 были получены следующие результаты:

1. Для проверки эффективности применения координированного управления в пользование был введен коэффициент соотношения интенсивностей дорожного движения по основному (координируемому) участку и второстепенным участкам ( $k_N$ ), физический смысл которого заключается в установлении средних значений рассматриваемых величин и определении искомого коэффициента.

2. В результате выполнения экспериментов в имитационной модели были получены средние значения задержек при установленных режимах управления, которые было предложено учитывать через расчет введенного коэффициента соотношения задержек ( $k_t$ ), соответствующих установленным значениям интенсивностей дорожного движения.

3. Установленная функциональная зависимость между введенными коэффициентами, описываемая полиномиальной функцией второй степени  $k_t = 0,8264 \cdot k_N^2 - 0,8727 \cdot k_N + 0,834$  с достоверностью 87% позволяет определить искомый параметр коэффициента соотношения задержек, по результату значения которого оценить эффективность координированного управления.

4. В результате выполненных работ был усовершенствован алгоритм оценки эффективности координированного управления учитывающий варьирование средней величины интенсивности на основном и второстепенных направлениях координируемых магистральных улиц.

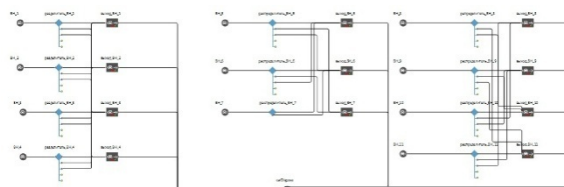


## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

### 4.1 Оценка изменения величины задержки транспортного потока

В результате выполненного исследования был разработан алгоритм оценки эффективности применения координированного типа управления. Для оценки выполненного исследования и предлагаемого к выработке алгоритма, осуществлена оценка эколого-экономических показателей в масштабах магистральных улиц малых и средних городов, на примере Воронежской области – г. Павловск и г. Россошь.

В ходе натурного обследования определенных магистральных улиц, выполненных в главе 2 были установлены значения интенсивностей на основных и второстепенных улицах и определены их геометрические характеристики, которые позволили построить модели каждой рассматриваемой улицы (рис. 44, рис. 45).



*а) обозначения координируемых перекрестков на протяжении ул. 40 лет Октября*

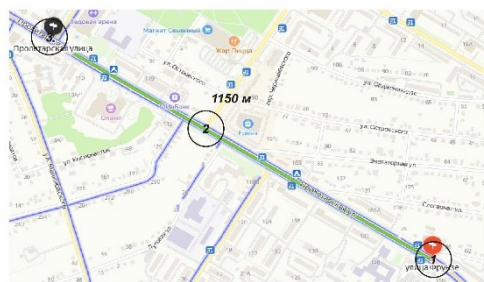
*б) схема работы координированного участка в программной среде AnyLogic*

Рисунок 44 – Результаты исследования магистральной ул.40 лет Октября (г. Павловск)

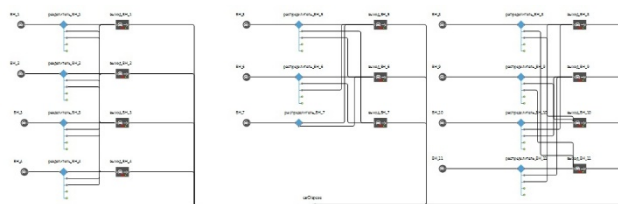
В течение недели на рассматриваемой магистральной улице (рис. 58), действует режим координации, переключение которого происходит по времени, в зависимости от загрузки магистральной улицы. Несмотря на соблюдение основных требований к координации, на рассматриваемой магистраль-

ной улице наблюдаются значительные простои, особенно на второстепенных улицах.

Следующим рассматриваемым участком является ул. Пролетарская г. Россошь (рис. 59), на протяжении данной магистральной улицы в координации находится 3 перекрестка, аналогичным образом с использованием программного продукта получена схема работы рассматриваемого участка.



а) обозначения координируемых перекрестков на протяжении ул. Пролетарская



б) схема работы координированного участка в программной среде AnyLogic

Рисунок 45 – Результаты исследования магистральной ул. Пролетарской (г. Россошь)

В результате моделирования определены значения величины задержки, наблюдаемой на каждом направлении рассматриваемых магистральных улиц (табл. 18).

Таблица 18 – Существующие значения средней величины задержки на исследуемых направлениях магистральных улиц

№ п/п	Наименование магистральных улиц	Существующее значение задержки ТС на магистральной улице, t	Существующее значение задержки ТС на второстепенных улицах, t
1	ул. 40 лет Октября	78,21	63,28
2	ул. Пролетарская	128,37	79,32

В результате апробации разработанного алгоритма были установлены периоды при которых использование координации не является эффективным, за счет чего на рассматриваемых магистральных улицах, наблюдается снижение величины задержки, наблюдаемой в течении рассматриваемого периода – 24 часа (рис. 46, табл. 19).

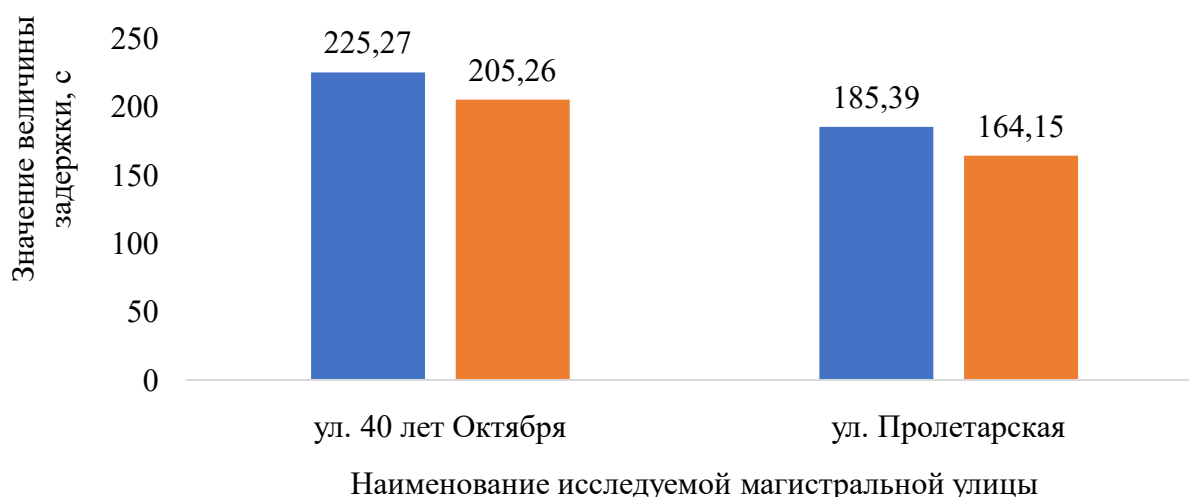


Рисунок 46 – Гистограмма изменения средней величины задержки в результате оценки эффективности координированного управления и установления периодов неэффективного применения

Таблица 19 – Оценка изменения средней величины задержки транспортных средств на исследуемых магистральных улицах

№ п/п	Наименование магистральных улиц	Существующее значение задержки ТС, t (сек.)	Предполагаемое значение задержки ТС, t (сек.)	Снижение средней величины задержки, сек	Изменение величины задержки, %
1	ул. 40 лет Октября (г. Павловск)	225,27	185,39	39,88	-18%
2	ул. Пролетарская (г. Россошь)	205,26	164,15	41,11	-20%

По результату анализа средней величины задержки на всех исследуемых перекрестках установлено, что минимальное значение средней величины задержки составляет 39,88 с (для магистральной ул. 40 лет Октября г. Павловск) максимальное значение составляет 41,11 с (для ул. Пролетарской г. Россошь). Результатом улучшения транспортной ситуации является снижение величины задержки на всех исследуемых магистральных улицах в среднем на 19%.

Для оценки снижения расхода топлива в связи с изменением величины задержки и эффективного применения координированного управления в рамках диссертационного исследования выполнен анализ изменения расхода топлива на исследуемых магистральных улицах г. Павловск и г. Россошь

#### 4.2 Оценка изменения расхода топлива

В результате анализа расхода топлива на всех исследуемых перекрестках было установлено, что в результате постоянного применения координированного управления средний расход топлива составил 531 литр, при использовании разработанного алгоритма и оценки эффективности рассматриваемого управления – определения период не применения координации, расход топлива в среднем снизился и составил 427 литров ( $\downarrow 10\%$ ) (табл. 20).

Экономия топлива будет определена согласно формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{топ}} = PАСХ_{\text{сущ.}} - PАСХ_{\text{пол.}} \quad (53)$$

где  $PАСХ_{\text{сущ.}}$  – средний расход топлива при существующем способе организации движения потока, л/ч;  $PАСХ_{\text{пол.}}$  – средний расход топлива при организации предлагаемого способа движения потока, л/ч.

Таблица 20 – Оценка изменения расхода топлива на исследуемых магистральных улицах

№ п/п	Наименование магистральных улиц	Существующее значение расхода топлива $RACX_{\text{сущ}}$ , литр	Предполагаемое значение расхода топлива в $RACX_{\text{пред}}$ , литр	Экономия топлива, $\Delta_{\text{топ}}$ , литр	Экономия топлива, %
1	ул. 40 лет Октября (г. Павловск)	793	624	169	19%
2	ул. Пролетарская (г. Россошь)	717	592	125	15%

Годовой экономический эффект будет определен:

$$\Delta_{\text{год}} = \Delta_{\text{топ}} C_{\text{АИ-92}} K_n D \quad (54)$$

где  $\Delta_{\text{топ}}$  – экономия топлива, литр./час;  $C_{\text{АИ-92}}$  – стоимость 1л. бензина марки АИ-92, руб;  $K_n$  – коэффициент неравномерности транспортного потока 0,1...0,36;  $D$  – количество дней в году.

В результате оценки эффективности применения координированного управления и использования иных способов регулирования, происходит снижение задержки транспортных средств и как следствие, снижение расхода топлива, что в денежном эквиваленте составляет 1 115 823 руб.

### 4.3 Снижение потерь от загрязнения воздуха

Народнохозяйственные потери от загрязнения воздуха  $C_3$  вредными веществами, поступающими в атмосферу с отработавшими газами от автомобилей в течение года на определенном участке магистрали, определяется с учетом удельного выброса вредных веществ (ВВ), и оценивается т/1000 км пробега или г/1 км пробега:

$$C_3 = \frac{0,365LN_{\text{мик}}m}{k_n} \sum D_{\text{yoi}} C_{\text{yoi}} b_i \quad (55)$$

где  $L$  – длина магистрали, км;  $N_{ПИК}$  – интенсивность движения автомобилей определенного типа в час пик, авт/ч;  $m$  – коэффициент, учитывающий увеличение расхода топлива при движении с частыми остановками;  $k_H$  – коэффициент неравномерности движения ( $k_H = 0,1$ );  $D_{y\delta i}$  – удельный выброс  $i$ -го вредного вещества;  $C_{y\delta i}$  – удельный ущерб от выброса  $i$ -го вредного вещества, р/1 т вещества;  $b_i$  – коэффициент, учитывающий влияние технического состояния транспортного средства на выброс вредных веществ (при отсутствии данных можно принимать  $b_i = 1$ ).

Согласно инструкции [92] удельный выброс основных загрязняющих веществ составляет для  $CO$  – 21,5 г/кг;  $CH_{1,85}$  – 2,4 г/кг;  $NO_x$  – 5,8 г/кг;  $SO_2$  – 0,54 г/кг;  $CO_2$  – 3120 г/кг.

В результате расчета определено, что на всех магистральных улицах происходит снижение концентрации вредных выбросов за счет снижения расхода топлива, в течение года, возможно, снизить выброс окиси углерода на 21,161 т., углеводорода на 2,363 т., окиси азота на 5,708 т. и сернистого ангидрида на 0,53 т, что наглядно отражено в таблице 21.

Таблица 21 – Значения сокращения основных вредных веществ

№ п/п	Наименование магистральных улиц	$\Delta$ окись углерода, т/год	$\Delta$ углеводорода, т/год	$\Delta$ окись азота, т/год	$\Delta$ сернистый ангидрид, т/год
1	ул. 40 лет Октября (г. Павловск)	1,074	0,120	0,290	0,027
2	ул. Пролетарская (г. Россошь)	1,082	0,121	0,292	0,027

При использовании алгоритма оценки эффективности координированного управления, была снижена концентрация ВВ на 9% , что в целом улучшит экологическую ситуацию на магистральных улицах г. Павловск и г. Россошь

#### **4.4 Выводы по главе 4**

Экономическая эффективность проведенного мероприятия по оценке эффективности координированного типа управления, позволила на исследуемых магистральных улицах определить изменение величины задержек в среднем на 19%. Экономия топлива на всех исследуемых перекрестках более 12%, что по экономической оценке составляет более 1 млн. руб. Снижение концентрации вредных веществ на 9%, что в значительной мере положительно отразится на экологической обстановке в исследуемых городах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, направленная на повышение безопасности дорожного движения и снижение потери времени участников дорожного движения путем оценки эффективности применения согласованного типа управления регулируемых перекрестков и имеющая существенное значение для эксплуатации автомобильного транспорта и развития страны в целом.

### Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ основных методов и условий ввода согласованного типа управления регулируемых перекрестков, установлено, что в большинстве малых и средних городов отсутствует возможность постоянного мониторинга транспортной ситуации, что не позволяет оперативно изменять режимы управления. В таком случае необходимо применением ресурсов имеющегося оборудования и разработки новых методов управления, основанных на изменении характеристик транспортных потоков, как на основных магистральных улицах, так и на второстепенных.

2. В результате исследований УДС – г. Павловск и г. Россошь Воронежской области, определено, что на связных направлениях координированного участка, средние, минимальные и максимальные значения измеряемого параметра при существующем цикле управления является значительно высоким в сравнении с аналогичными показателями по магистральной улице:

- средние значения по направлениям связующих участков варьируются в пределах  $\bar{t} \in [497,07; 1180,19]$ , по направлениям магистральной улицы  $\bar{t} \in [87,16; 275,48]$ ;

- минимальные значения по направлениям связующих участков варьируются в пределах  $t_{min} \in [90,26; 121,77]$ , по направлениям магистральной улицы  $t_{min} \in [13,32; 22,12]$ ;



- максимальные значения по направлениям связующих участков варьируются в пределах  $t_{max} \in [1023,43;1237,21]$ , по направлениям магистральной улицы  $t_{max} \in [165,92;2094,83]$ .

3. Усовершенствованы условия ввода согласованного типа управления транспортными потоками на регулируемых перекрестках с применением показателей – интенсивности и задержки, определенными соответствующими коэффициентами  $k_N$  и  $k_t$ . Установлена функциональная зависимость между определенными коэффициентами  $k_N$  и  $k_t$ , позволяющая с достоверностью 87% оценить значение задержек транспортных средств на магистральной улице и прилегающих участках.

4. Разработан алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления с использованием установленных зависимостей между основными показателями транспортного потока – интенсивности и задержки.

5. В результате внедрения и оценки эффективности разработанного алгоритма были определены изменения экологических и экономических показателей на исследуемых участках УДС Воронежской области, расположенных в г. Павловск и г. Россошь снижение задержек на 16%, снижение расхода топлива на 10%, снижение концентрации вредных веществ на 9%.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Gartner, N., Optimization of Traffic Signal Settings by Mixed-Integer Linear Programming / N. Gartner, J. Little, and H. Gabbay. // Part I: The Network Coordination Problem. Transportation Science – 1975. – Vol. 9(4). – pp. 321–343.
2. Hook, D. Comparison of alternative methodologies to determine breakpoints in signal progression [Text] / D. Hook, A. Albers // In conference proceedings, 69th Annual meeting of the institute of transportation engineers, 1999.
3. Bonneson, J., Traffic Signal Operations Handbook/ Bonneson, J., S. Sunkari, and M. Pratt // Report FHWA/TX-09/0-5629-PI, Texas Transportation Institute, College Station, Mar. 2009
4. Asadi, B., Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time / B. Asadi and A. Vahidi // IEEE Transactions on Control Systems – 2011. – Vol. 19(3). – pp. 707–714.
5. Bellomo, N., On the modeling of traffic and crowds: A Survey of models, speculations, and perspectives. / N. Bellomo, C. Dogbe. // SIAM Review – 2011. – Vol. 53(3). – pp. 409–463.
6. Diehl, M., A Real-time iteration scheme for nonlinear optimization in optimal feedback control/ M. Diehl, H. Bock, J. Schlöder // SIAM Journal on Control and Optimization. – 2005. – Vol. 43(5). – pp. 1714–1736.
7. Dresner, K., A reservation-based multiagent system for intersection control/ K. Dresner and P. Stone // In proceedings of the third International joint Conference on autonomous agents and multiagent systems. – 2004. – pp. 530–537.
8. Kraub, S. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics / S. Kraub // - PhD Thesis – 1998.
9. Lin, S., Fast model predictive control for urban road networks via MILP/ S. Lin, B. de Schutter, Y. Xi, and H. Hellendoorn // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. 2011 – vol. 12(3). – pp. 846–856.

10. Nunzio, G., Eco-driving in urban traffic networks using traffic signals information / G. de Nunzio, C. Wit, P. Moulin, and D. Di Domenico // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2015.
11. Chang, E.C.P., Warrants for interconnection of isolated traffic signals / E.C.P. Chang, C.J. Messer // Report 293-1F, Texas Transportation Institute, College Station. – 1986.
12. Highway Capacity Manual: A Guide to Multimodal Mobility Analysis. 6th ed. Transportation Research Board, Washington, D.C. – 2016
13. Сильянов, В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977 – 303 с.
14. Сильянов В.В. Моделирование транспортного потока для оценки уровня аварийности и эффективности мероприятий по организации и безопасности дорожного движения / Сильянов В.В., Уткин А.В. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2007. - № 7. – С. 15-17.
15. Пугачев, И.Н. Организация и безопасность дорожного движения: учеб. пособие / И.Н. Пугачев. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2004. – 232 с.
16. Зырянов, В. В. Управление дорожным движением и перевозки : монография / В. В. Зырянов ; В. В. Зырянов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Ростовский гос. строительный ун-т". – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. строительный ун-т, 2012. – 148 р.
17. Зырянов, В. В. Управление дорожным движением при возникновении заторов / В. В. Зырянов, А. А. Феофилова, М. С. Володина. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2017. – 63 с.
18. Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах / Л. Б. Миротин, В. А. Гудков, В. В. Зырянов [и др.]. – Москва : Горячая линия - Телеком, 2014. – 704 с.

19. Технические средства для организации и безопасности дорожного движения : учебник / С. В. Жанказиев, В. Я. Буйленко, Ю. А. Короткова [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграф-центр", 2022. – 208 с.
20. Новиков, А. Н. Безопасное и эффективное управление транспортными потоками в городской транспортной системе / А. Н. Новиков, А. Г. Шевцова. – Москва : Академия, 2022. – 205 с.
21. Анализ работы и расчет регулируемых перекрестков / А. Е. Боровской, П. А. Воля, А. Н. Новиков [и др.]. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – 117 с.
22. Управление транспортными потоками в городах : Монография / Е. А. Андреева, К. Беттгер, Е. В. Белкова [и др.] ; Под общей редакцией А.Н. Бурмистрова, А.И. Солодкого. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. – 207 с.
23. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения : монография / А. П. Буслаев, А. В. Новиков, А. Г. Таташев, М. В. Яшина. – Москва : Мир, 2003. – 367 с.
24. Домбровский, А. Н. Транспортные потоки на улично-дорожной сети городов: моделирование и управление / А. Н. Домбровский. – Краснодар : Общество с ограниченной ответственностью "Издательский Дом - Юг", 2012. – 124 с.
25. Брайловский, Н.О. Управление движением транспортных средств [Текст] / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. - М.: Транспорт. - 1978. - 112 с.
26. Новиков И.А. Технические средства организации дорожного движения / Новиков И.А., Шевцова А.Г. учебное пособие / Белгород, 2020. – 175 с.
27. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения / Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. // учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Организация и безопасность движения (автомобильный транспорт)" направления подготовки ди-

пломированных специалистов "Организация перевозок и управление на транспорте" / Москва, 2005. Сер. Учебник для вузов – 279 с.

28. Плотников, А. М. Разработка схем организации движения транспортных и пешеходных потоков на регулируемых перекрестках: учеб. пособие для вузов. - СПб.: Нестор-История. – 2010.

29. ОДМ 218.6.003-2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. Разработан ФГУП «РосдорНИИ», Москва, 2013 – 64 с.

30. Washburn, S. S. Signalized intersection delay estimation: Case study comparison of TRANSYT-7F, synchro and HCS / S. S. Washburn, N. Larson // . – 2002. – Vol. 72, No. 3. – P. 30.

31. Liu, Y. An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage / Y. Liu, G. L. Chang // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2011. – Vol. 19, No. 1. – P. 130-144.

32. Cohen, S.L., The bandwidth-constrained TRANSYT signal optimization program / Cohen S.L., Liu C.C. // Transportation Research Record. – 1986. - Vol. 1057. – pp. 1-7.

33. Li, M.-T., Signal timing optimization for oversaturated networks using TRANSYT-7F / Li M.-T., Gan A.C. // Transportation Research Record. – 1999. Vol. 1683. – pp.118-126.

34. Stevanovic, A., VisSim-based genetic algorithm optimization of signal timings. / Stevanovic A., Martin P.T., Stevanovic J. // Transportation Research Record. – 2007. Vol. – 2035. - pp. 59-68.

35. Кадасев, Д. А. Внедрение элементов интеллектуальной транспортной системы на участке М4 "дон" альтернативная в г. Задонск липецкой области / Д. А. Кадасев, М. В. Казарина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4, № 5-3(25-3). – С. 251-256.

36. Рахмангулов, А. Н. Выбор направления совершенствования систем светофорного регулирования транспортных потоков в городах / А. Н.

Рахмангулов, М. Г. Ломакина // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2017. – Т. 7, № 1. – С. 27-34.

37. Власов, В.М., Транспортная телематика в дорожной отрасли / Власов В.М., Ефименко Д.Б., Богумил В.Н. // - учебное пособие. М.: МАДИ, - 2013. – 80 с.

38. Петров, В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / В.В. Петров // Омск: Изд-во СиБАДИ. – 2007. – 104 с.

39. Шуть, В.Н., Оптимизация и координация управления светофорными объектами / Шуть В.Н., Войцехович О.Ю. // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Научные материалы XVI междуна. науч.-практ. конф. 16-17 июня 2010 года. Екатеринбург. – 2010. – С. 201-204.

40. Титов, А.Ю. Сравнительный анализ аппаратно-программных средств управления дорожным движением / А.Ю. Титов // XXII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. С. 8864-8870.

41. Власов, А.А., Методика расчета режимов работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения / Власов А.А., Орлов Н.А., Чушкина К.А. // Интернет - журнал Науковедение. – 2014. - № 2 (21). – С. 99.

42. Пржибыл, П, Телематика на транспорте / Пржибыл П, Свитек М. // М.: МАДИ (ГТУ) – 2003. – 540 с.

43. Naumova, N. A. Modelling of optimal scheme of traffic flows distribution in urban transportation networks/N. A. Naumova, O. N. Safonova. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, - 2020. – 144 p.

44. Левашев, А. Г. Проектирование регулируемых пересечений : учебное пособие / А. Г. Левашев, А. Ю. Михайлов, И. М. Головных ; А. Г. Левашев, А. Ю. Михайлов, И. М. Головных ; М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Иркутский гос. технический ун-т. – Иркутск : Изд-во Иркутского гос. технического ун-та, - 2007. – 208 с.

45. Современные информационные технологии в транспортных исследованиях / А. Ю. Михайлов, Ю. О. Полтавская, Т. А. Копылова, О. А. Лебедева. – Ангарск : Ангарский государственный технический университет, 2021. – 155 с.

46. Вопросы управления городскими транспортными системами / И. Е. Агуреев, В. А. Пышный, Л. Е. Кущенко [и др.] // Современные социально-экономические процессы: проблемы, закономерности, перспективы : монография. – Пенза : "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. – С. 72-94.

47. Д. Дрю, Д., Теория транспортных потоков в управление ими / Д. Дрю // М.: Транспорт. - 1974. - 424 с.

48. Капитанов, В.Т., Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. М.; Транспорт. - 1985. - 94 с.

49. Петров В.В. Управление движением транспортных потоков в городах: Монография. Омск: Изд-во СибАДИ. - 2007. – 92 с.

50. Robertson D.I. The TRANSYT method of coordinating traffic signals // Traffic Eng.+ Contr. 1997. V. 38, N. 2. P. 76–77.

51. Иваненко М.А. Координированное управление движением транспортных потоков как метод повышения пропускной способности городской дорожной сети крупных городов / Иваненко М.А. // Вестник транспорта. 2011. № 10. С. 31-32.

52. Кузин М.В. Программное обеспечение для имитационного моделирования координированного управления транспортными потоками / Кузин М.В. // Математические структуры и моделирование. 2008. № 18. С. 46-50.

53. Петров, Е.А., Технология координированного управления транспортными потоками высокой интенсивности / Петров Е.А., Рябоконт Ю.А. // В сборнике: Прогрессивные технологии в транспортных системах. Сборник докладов шестой российской научно-технической конференции. Рассоха В.И. (ответственный редактор), Архирейский А.А. (ответственный секретарь). 2003. С. 163-165.

54. Пильгейкина И.А. Критерии формирования зон координированного управления координированными объектами / И.А. Пильгейкина, А.А. Власов // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2017. № 2 (9). С. 202-208.

55. Пильгейкина И.А. Влияние эффекта координации на задержку транспортных средств / И.А. Пильгейкина // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 1 (68). С. 59-64.

56. Жанказиев, С. В. Интеллектуальные транспортные системы : Учебное пособие / С. В. Жанказиев. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2016. – 120 с.

57. Булатова, О. Ю. Интеллектуальные транспортные системы / О. Ю. Булатова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2022. – 101 с.

58. Иванов, Ф. Ф. Интеллектуальные транспортные системы / Ф. Ф. Иванов. – Минск : Белорусская наука, 2014. – 216 с.

59. Санжапов, Р. Р. Интеллектуальные транспортные системы / Р. Р. Санжапов, С. В. Ганзин. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2021. – 96 с.

60. Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives. – Switzerland : Springer International Publishing, 2016. – 303 p.

61. Боровской, А. Е. Внедрение интеллектуальных транспортных систем в рамках национальных программ повышения безопасности дорожного движения / А. Е. Боровской, И. А. Новиков, А. Г. Шевцова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2013. – № 61-62. – С. 279-283.

62. ГОСТ 52282-2004 Технические средства организации дорожного движения. Светофоры дорожные. Типы и основные параметры. Общие технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2004. – 27 с.



63. ГОСТ 52289-2019 Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств – М.: Стандартинформ, 2020. – 134 с.
64. ГОСТ 52290-2004 Технические средства организации дорожного движения. Знаки дорожные – М.: Стандартинформ, 2004. – 129 с.
65. Коломеец, А. О. Имитационное моделирование транспортных потоков в AnyLogic : практикум / А. О. Коломеец, В. И. Хабаров ; Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2019. – 69 с.
66. Андронов, С. А. Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов светофорного регулирования в среде AnyLogic / С. А. Андронов // Программные продукты и системы. – 2019. – № 1. – С. 150-158.
67. Скакальская, Е. Д. Разработка модели перекрестка средствами AnyLogic / Е. Д. Скакальская, И. А. Самойлова // Молодой ученый. – 2022. – № 21(416). – С. 209-211.
68. Solving a Traffic Congestion Problem at T-intersections using AnyLogic Simulation / S. M. M. Kazmi, Xu. Sun, H. Yu [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2022. – No 32. – P. 359-365.
69. Койнова, А. С. Использование AnyLogic для моделирования транспортных процессов / А. С. Койнова // Научный альманах. – 2017. – № 1-3(27). – С. 83-85.
70. Реенко, Н. А. Разработка имитационной модели дорожного движения в программной среде AnyLogic / Н. А. Реенко, А. С. Михайлов // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 2. – С. 153-155.
71. Моделирование процесса движения на магистральной улице г. Воронеж в программной среде AnyLogic / С. В. Дорохин, Д. В. Лихачев, А. Ю. Артемов, А. В. Марусин // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 4. – № 4(42). – С. 73-84.

72. Зырянов, В. В. Методы оценки адекватности результатов моделирования / В. В. Зырянов // Инженерный вестник Дона. - 2013. - № 2(25). - С. 132.

73. Новиков, И.А., Разработка методики адаптации модели регулируемого пересечения / И. А. Новиков, А. Г. Шевцова, А. А. Кравченко, А. Г. Бурлуцкая // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 6(76). – С. 726-735.

74. Зырянов, В. В. Управление дорожным движением и перевозки : монография / В. В. Зырянов ; В. В. Зырянов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Ростовский гос. строительный ун-т". – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. строительный ун-т, 2012. – 148 р.

75. Наумова, Н. А. Автоматизированное управление транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования / Н. А. Наумова, В. В. Зырянов, Р. А. Наумов. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2018. – 266 с.

76. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения : монография / А. П. Буслаев, А. В. Новиков, А. Г. Таташев, М. В. Яшина. – Москва : Мир, 2003. – 367 с.

77. ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

78. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие для студентов вузов по направлению "Прикладные математика и физика" / [А. В. Гасников и др.] ; под ред. А. В. Гасникова ; М-во образования и науки Российской Федерации, Московский физико-технический ин-т (гос. ун-т). – Москва : МФТИ, 2010. – 360 с.

79. Итерации функций в задачах / В. А. Шестаков, Р. С. Будучин, М. А. Тихомиров, М. С. Панарин // Актуальные исследования. – 2021. – № 36(63). – С. 11-13.

80. Канель-Белов, А. Я. Дробные итерации функций / А. Я. Канель-Белов // Математическое образование. – 2021. – № 4-1(100). – С. 43-47.

81. Модестов, Д. Г. Метод простой итерации со стохастической правой частью / Д. Г. Модестов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2013. – № 1. – С. 59-68.

82. Нечепуренко, М. И. Итерации вещественных функций и функциональные уравнения / М. И. Нечепуренко ; М. И. Нечепуренко ; отв. ред. А. С. Алексеев ; Рос. акад. наук, сиб. отд., ин-т вычисл. математики и мат. геофизики. – 2-е изд., испр. и доп.. – Новосибирск : Ин-т вычисл. математики и мат. геофизики СО РАН, 2005. – 231 с.

83. Оптимизация. Псевдообращение. Итерации и рекурсии : Учебное пособие / А. К. Погодаев, С. Л. Блюмин, С. П. Миловидов, А. С. Сысоев ; Рецензенты: кафедра «Информационные системы и защита информации» Тамбовского государственного технического университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Громов Ю.Ю.); Рубан А.И., д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой информатики Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2015. – 193 с.

84. Михайлов, А.Ю. Анализ методик расчета пропускной способности пересечений в одном уровне / А.Ю. Михайлов, Е.Л. Попова, И.Л. Гайворонский // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12 (143). С. 231-238

85. Некрасова, Е.Е. Основные критерии оценки эффективности функционирования перекрестков / Е.Е., Некрасова, А.Г. Шевцова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 4-1 (15-1). С. 363-366.

86. Кураксин, А.А., Методика оценки качества принятых решений в организации дорожного движения на регулируемых пересечениях по крите-

рию задержки регулирования / Кураксин А.А., Шемякин А.В. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2016. № 1-2. С. 30-33.

87. Новиков И.А. Влияние изменения задержек транспортных средств на количество режимов работы светофорного объекта / И.А. Новиков, А.Г. Шевцова // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 4 (35). С. 62-68.

88. Robertson, D.I., «TRANSYT: Traffic Network Study Tool» Fourth International Symposium on the Theory of Traffic Flow, Karlsruhe, Germany, 1968.

89. Lorick, H.C., Analysis of Fuel Consumption and Platoon Dispersion Models / Lorick H.C., C.E. Wallace and R.E. Jamagin // University of Florida Transportation Research Center, Report No. UF-TRC-U32-TR-02 – 1980.

90. Котухов, А.Н., Экономика дорожного движения / Котухов А.Н., Новописный Е.А.// : Учеб. пособие. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 235 с.

91. Корчагин, В.А., Оценка эффективности инженерных решений: учебное пособие / В.А. Корчагин, Ю.Н. Ризаева; под ред. В.А. Корчагина. – Липецк: ЛГТУ, 2008. – 160 с.

92. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов. – Изд-во:Автополюс-плюс, 2008. – 78 с.

93. Lan, C.J., New optimal cycle length formulation for pretimed signals at isolated intersections / Lan, C.J. // Journal of Transportation Engineering. – 2004. - vol. 130, no. 5. - pp. 637–647.

94. Han, L.D., Short or long-which is better? Probabilistic approach to cycle length optimization / L.D. Han and J.-M. Li// Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. - vol. 2035. - pp. 150–157.

95. Ma, W., Signal timing optimization models for two-stage midblock pedestrian crossing / W. Ma, X. Yang, W. Pu, and Y. Liu // *Transportation Research Record* – 2010. - vol. 2264. - pp. 133–144.
96. Chang, T.H., Optimal signal timing for an oversaturated intersection / T.H. Chang and J.-T. Lin // *Transportation Research Part B: Methodological*. – 2000. - vol. 34, no. 6. – pp. 471 – 491.
97. Putha, R., Comparing ant colony optimization and genetic algorithm approaches for solving traffic signal coordination under oversaturation conditions / R. Putha, L. Quadrioglio, and E. Zechman // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*– 2012. - vol. 27, no. 1. - pp. 14–28.
98. Zhao, L. A fast signal timing algorithm for individual oversaturated intersections/ L. Zhao, X. Peng, L. Li, and Z. Li, // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2011. - vol. 12, no. 1. – pp. 280–283.
99. Li, H., Research on the optimal method of cycle length for signalized intersection/ H. Li, D. Wang, and Z. Qu// in *Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*. – 2004. - pp. 371–376.
100. Li, X., Signal timing of intersections using integrated optimization of traffic quality, emissions and fuel consumption: a note / X. Li, G. Li, S.-S. Pang, X. Yang, and J. Tian// *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2004. – vol. 9, no. 5. – pp. 401–407.
101. Ma, D., Cycle length optimization at isolated signalized intersections from the viewpoint of emission / D. Ma and H. Nakamura// *Traffic and Transportation Studies*. – 2010. - vol. 383. - pp. 275–284.
102. Park, B., Assessment of stochastic signal optimization method using microsimulation/ B. Park, N. M. Roupail, and J. Sacks// *Transportation Research Record*. – 2001. – vol. 1748. - pp. 40-45.
103. Kim, J., Performance comparison between artificial neural network and analytical models for real-time cycle length design / J. Kim, J. Lee, and M.

Chang // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2006. - vol. 1988. - pp. 102-115.

104. Yang, X.-G., Optimal cycle calculation method of signal control at Roundabout / X.-G. Yang, J. Zhao, and T. Wang // China Journal of Highway and Transport. – 2008. – vol. 21, no. 6. – pp. 90-95.

105. Kotusevski, G. A Review of Traffic Simulation Software / G. Kotusevski, K. A. Hawick // Technical Report CSTN-095. – 2009.

106. Артемов, А.Ю. Информационные системы технологий транспортных процессов в моделях многокритериального поэтапного выбора / В. П. Белокуров, С. В. Белокуров, Г. А. Денисов [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. – 2015. – Т. 4. – № 2-2(12). – С. 35-44.

107. Цариков, А.А. Пути повышения пропускной способности и безопасности движения поворотных маневров / А.А. Цариков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2009. - № 3 (13). - С. 31-36.

108. Цариков, А.А. Развитие методов расчета регулируемых узлов на улично-дорожной сети / Цариков А.А. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2009. - № 3-4. – С. 118-123.

109. Поляков, А.А. Городское движение и планировка улиц / А.А. Поляков // М.-Л.; Госстройиздат. – 1953. – 251 с.

110. Поляков, А.А. Методика расчета потребной ширины проезжей части улиц на подходах к перекресткам/ А.А. Поляков // Науч. Труды АКХ, вып. Д. – 1950.

111. Поляков, А.А. Организация движения на улицах и дорогах / А.А. Поляков // изд-во: М.: Транспорт. – 1965 – 376 с.

112. Поляков, А.А., Организация и регулирование городского движения / А.А. Поляков // М., изд. ЦНИИАТ НКВД РСФСР. – 1941. – 242 с.

113. Артемов, А.Ю. Моделирование и управление конкурентной транспортной среды / А. В. Кононова, Ю. В. Бусарина, Е. А. Панявина [и др.]

// Воронежский научно-технический Вестник. – 2017. – Т. 4. – № 4(22). – С. 44-48.

114. Артемов, А.Ю. Исследование субъективных факторов, влияющих на работоспособность водителя / В. Я. Буйленко, Г. Н. Климова, В. А. Зеликов [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2020. – № 4(94). – С. 33-36.

115. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. М., Стройиздат. - 1974. – 97с.

116. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 23.12.2017) «О Правилах дорожного движения» (вместе с «Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения»)

117. McShane, W. R. Traffic Engineering / McShane, W. R., and Ross, R. P. // Prentice Hall, Englewood Cliffs. – 1990.

118. Asante, S.A. Selection Criteria for Left-Turn Phasing, Indication Sequence and Auxiliary Sign / Asante, S.A., S.A. Ardekani, and J.C. Williams // HPR Research Report 1256- IF, University of Texas at Arlington, Arlington, TX, February. – 1993. – pp. 105.

119. Robert, L. Traffic Control Systems Handbook/ Robert L. Gordon, P.E., Warren Tighe, P.E. // FHWA-HOP-06-006. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC. October. – 2005

УТВЕРЖДАЮ  
 Директор  
 муниципального бюджетного учреждения  
 городского округа город Воронеж  
 «Центр организации дорожного движения»

Губин А.М.  
 «17» 08 2022 г.



### АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования «Повышение эффективности управления транспортными потоками на магистральных улицах малых и средних городов» Артемова А.Ю.

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационного исследования, выполненного Артемовым Александром Юрьевичем, выполненного на кафедре организации перевозок и безопасности дорожного движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» рекомендованы в работе Муниципального бюджетного учреждения «Центр организации дорожного движения», при осуществлении управления транспортными потоками на магистральных улицах г. Воронежа при идентичных показателях транспортного потока.

Вид внедренных результатов: Аргументировано применение координированного типа управления, использован коэффициент эффективности координированного управления, сформированы условия эффективного применения координированного управления  $k_{эку} < 1$  и не эффективного  $k_{эку} > 1$ . В результате исследования получена графическая зависимость позволяющая определить эффективность применения координированного типа управления.

Полученные результаты позволяют разработать алгоритм оценки эффективности координированного управления, применительно к магистральным улицам, что позволяет снизить задержку транспортных средств и обеспечить пропускную способность управляемых магистральных улиц.

Характеристика масштаба внедрения: магистральные улицы городского округа город Воронеж.

Формы внедрения: использование разработанного Артемовым А.Ю. алгоритма принятия решения об эффективности применения координированного типа управления на магистральных улицах.

Главный инженер



Ряскин А.И.



УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по учебной работе  
 Федерального государственного  
 бюджетного образовательного учреждения  
 высшего образования «Воронежский  
 государственный лесотехнический университет  
 имени Г.Ф. Морозова»  
 А.С. Черных  
 «20» января 2023 г.



#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научных исследований в учебный процесс

Заказчик: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра «Организации перевозок и безопасности движения».

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационного исследования Артемова Александра Юрьевича «Повышение эффективности управления транспортными потоками на магистральных улицах малых и средних городов», выполненного на кафедре «Организации перевозок и безопасности движения» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» внедрены в учебный процесс.

Вид внедренных результатов: полученные аналитические зависимости между характеристиками транспортных потоков, алгоритм принятия решения об эффективности применения координированного типа управления на магистральных улицах малых и средних городов.

Формы внедрения: результаты выполненных исследования используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Технические средства организации дорожного движения», «Организация дорожного движения», «Моделирование дорожного движения» студентами обучающихся по направлению 23.03.01 Технология транспортных процессов (уровень бакалавриата) и дисциплины магистратуры «Моделирование и оптимизация в технологии транспортных процессов», «Безопасность транспортного процесса», «Интеллектуальные системы управления» студентов обучающихся по направлению подготовки 23.04.01 Технология транспортных процессов (уровень магистратуры), а также при выполнении выпускных квалификационных работ студентами выше указанных направлений.

Эффективность практической реализации: повышение качества подготовки специалистов в области управления транспортными процессами и повышения безопасности дорожного движения.

Заведующий кафедрой «Организации  
 перевозок и безопасности движения»,  
 д.т.н., доцент

В.А. Зеликов

## Продолжение приложения А

УТВЕРЖДАЮ  
 Директор  
 Казенного учреждения городского  
 поселения город Павловск  
 «Управление городского хозяйства»



*А.А. Павлов*  
 2023 г.

## АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования «Повышение эффективности управления транспортными потоками на магистральных улицах малых и средних городов» Артемова А.Ю.

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационного исследования, выполненного Артемовым Александром Юрьевичем, выполненного на кафедре организации перевозок и безопасности дорожного движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» внедрены в работе казенного учреждения городского поселения город Павловск «Управление городского хозяйства», при осуществлении управления транспортными потоками на магистральных улицах г. Павловск Воронежский области.

Вид внедренных результатов: Аргументировано применение координированного типа управления, использован коэффициент эффективности координированного управления, сформированы условия эффективного применения координированного управления  $k_{эку} < 1$  и не эффективного  $k_{эку} > 1$ . В результате исследования получена графическая зависимость позволяющая определить эффективность применения координированного типа управления.

Полученные результаты позволяют разработать алгоритм оценки эффективности координированного управления, применительно к магистральным улицам малых и средних городов, что позволяет снизить задержку транспортных средств и обеспечить пропускную способность управляемых магистральных улиц.

Характеристика масштаба внедрения: ул. 40 лет Октября г. Павловск Воронежской области.

Формы внедрения: использование разработанного Артемовым А.Ю. алгоритма принятия решения об эффективности применения координированного типа управления на магистральных улицах.

Заместитель директора  
 по дорожной деятельности и  
 жилищно-коммунальному хозяйству

Павлов А.А.

## Продолжение приложения А

УТВЕРЖДАЮ  
 Директор  
 муниципального бюджетного учреждения  
 городского поселения город Россошь  
 «Городское благоустройство»  
 Медведев А.М.  
 14.08.2023 г.



## АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования «Повышение эффективности управления транспортными потоками на магистральных улицах малых и средних городов» Артемова А.Ю.

Настоящим актом подтверждаю, что результаты диссертационного исследования, выполненного Артемовым Александром Юрьевичем, выполненного на кафедре организации перевозок и безопасности дорожного движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» внедрены в работе Муниципального бюджетного учреждения городского поселения город Россошь «Городское благоустройство», при осуществлении управления транспортными потоками на магистральных улицах г. Россошь Воронежский области.

Вид внедренных результатов: Обосновано применение координированного типа управления, введен в пользование коэффициент эффективности координированного управления, определены условия эффективного применения координированного управления и не эффективного. В результате расчета получена графическая зависимость позволяющая определить эффективность применения координированного типа управления.

Полученные результаты позволили разработать алгоритм оценки эффективности координированного управления, применительно к магистральным улицам малых и средних городов, что позволяет снизить задержку транспортных средств и обеспечить пропускную способность управляемых магистральных улиц.

Характеристика масштаба внедрения: ул. Пролетарская г. Россошь Воронежской области.

Формы внедрения: использование разработанного Артемовым А.Ю. алгоритма принятия решения об эффективности применения координированного типа управления на магистральных улицах.

Главный инженер

Ковалев А.В.

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник управления  
ГИБДД ГУ МВД России  
по Воронежской области,  
полковник полиции

  
Е.В. Шаталов  
«07» апреля 2023 г.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
результатов научно-исследовательской работы

**Настоящим актом подтверждается**, что результаты диссертационной работы Артемова Александра Юрьевича «Повышение эффективности управления транспортными потоками на магистральных улицах малых и средних городов», выполненной на кафедре «Организации перевозок и безопасности движения» ФГБОУ ВО «Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова» рекомендованы для управления транспортными потоками при эффективном применении согласованного типа управления на регулируемых магистральных улицах Воронежской области за счет снижения задержек транспортных средств.

**Вид внедренных результатов:** алгоритм принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления на регулируемых магистральных улицах Воронежской области при идентичных параметрах транспортных потоков.

**Характеристика масштаба внедрения:** улично-дорожная сеть Воронежской области (магистральные улицы).

**Новизна результатов НИР:** определена взаимосвязь эффективности применения согласованного типа управления на регулируемых перекрестках с использованием зависимостей между основными показателями транспортных потоков.

**Ожидаемый эффект от внедрения:** применение разработанного алгоритма принятия решения об эффективности применения согласованного типа управления на регулируемых магистральных улицах позволят снизить задержки транспортных средств на 16%.

Начальник отдела дорожного  
надзора управления ГИБДД  
по Воронежской области



С. Л. Гуринов