

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»
(Университет ИТМО)

Институт дизайна и урбанистики

Образовательная программа: Цифровая урбанистика

Направление подготовки: 27.04.07 Наукоемкие технологии и экономика инноваций

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
РАБОТА МАГИСТРА

по теме:

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМФОРТНОГО ВРЕМЕНИ
ОЖИДАНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕГО СИГНАЛА СВЕТОФОРА
ПЕШЕХОДАМИ В РАСЧЁТЕ СВЕТОФОРНОГО ЦИКЛА

Студент:

Кенесбай Валерия Александровна, С4202

«__» _____ 20__ г.

Руководитель:

Дрожжин Андрей Игоревич, Заместитель директора, ассистент Института дизайна и урбанистики

Консультант:

Баранов Дмитрий Александрович, преподаватель Института дизайна и урбанистики

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	2
Термины и определения	3
Введение.....	4
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
1.1 Нормативная документация в России и зарубежном	6
1.2 Статьи по тематике исследования	9
1.3 Выводы.....	15
ГЛАВА 2 МЕТОДОЛОГИЯ.....	16
2.1 Структура методологии	16
2.2 Разработка метода	18
2.2.1 Социологические исследования	18
2.2.2 Сбор исходных данных для метода	21
2.2.3 Построение математической модели	29
2.2.4 Детальное описание шагов метода.....	31
2.3 Выводы.....	33
ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ	34
3.1 Перечень и обоснование сценариев	34
3.2 Подготовка данных для эксперимента	35
3.2 Применение на сценариях.....	39
3.3 Результаты для тестовых данных	45
3.4 Выводы.....	49
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВНЕДРЕНИЮ МЕТОДА	50
Заключение	52
Список использованных источников	53

РЕФЕРАТ

Отчет 57 с., 27 рис., 24 табл., 36 источн.

ВРЕМЯ КОМФОРТНОГО ОЖИДАНИЯ ПЕШЕХОДАМИ РАЗРЕШАЮЩЕГО СИГНАЛА, СВЕТОФОРНЫЙ ЦИКЛ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Объектом исследования является комфортное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала.

Цель работы – создание метода оптимизации светофорного регулирования, который позволит определить комфортное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала.

В ходе исследования проводились социологический опрос и анализ нормативных документов. В рамках разработки метода построена математическая модель. Для подтверждения практической применимости метода использовано математическое моделирование в программном продукте PTV VISSIM.

Результаты работы показали, что оптимизация времени ожидания светофорного сигнала для пешеходов может снизить количество нарушений правил дорожного движения с их стороны. Полученные данные могут быть применены в совершенствовании существующих стандартов регулирования, а также в разработке новых.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете применяют следующие термины и сокращения с соответствующими определениями:

Дорожно-транспортное происшествие (ДТП) – событие, произошедшее во время движения транспортного средства и повлекшее за собой смерть или травмы участников дорожного движения, повреждение транспортного средства, конструкций или груза, а также другой материальный ущерб

Правила дорожного движения (ПДД) – свод правил, регулирующих обязанности участников дорожного движения [1]

Транспортное средство (ТС) – устройство, предназначенное для перевозки по дорогам людей, грузов или оборудования, установленного на нем

Улично-дорожная сеть (УДС) – территория общего пользования, предназначенная для обеспечения движения транспортных средств и пешеходов, обеспечения транспортными и пешеходными связями территорий населённых пунктов

Интенсивность движения — количество автомобилей, проходящих через сечение дороги за единицу времени

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, в связи с ростом уровня автомобилизации, особо остро стоит проблема безопасности участников дорожного движения. При этом, согласно данным ВОЗ, достаточно уязвимой группой оказываются пешеходы [2]. Это отмечается и на государственном уровне: так, в Российской Федерации до 2030 года в рамках выполнения национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» должно быть реализовано снижение показателя смертности при дорожно-транспортных происшествиях до 4 на 100 тыс. человек, при текущем показателе 10 на 100 тыс. По статистике за 2022 год, 28% ДТП происходят с участием пешеходов, 10% возникают из-за несоблюдения ПДД пешеходами [3].

Существует множество причин, которые побуждают пешеходов игнорировать установленные правила: отсутствие необходимой дорожной инфраструктуры, плохая освещенность УДС, недостаток объектов транспортной инфраструктуры. В том числе можно отметить, что сложившаяся манера поведения пешеходов еще не адаптирована к динамичному росту транспортного потока [4]. Другая причина связана с ожиданием зеленого сигнала светофора: при наступлении критического времени терпеливого ожидания увеличивается вероятность перехода проезжей части с нарушением. Поэтому комфортное время ожидания – в первую очередь связано с безопасностью: оно должно минимизировать вероятность опасного поведения.

Тема, выбранная для исследования, является актуальной, так как в условиях высокой интенсивности транспортных потоков приоритет пропускной способности все больше отдается транспорту, что приводит к увеличению продолжительности запрещающего сигнала для пешеходов в светофорном регулировании. При этом в экспертном сообществе отсутствует четкое понимание оптимального времени горения запрещающего сигнала для пешеходов и метод его оценки, который бы являлся практически применимым при реализации проектов светофорного регулирования. Как показывает обзор

результатов ранее проведенных исследований, именно этот аспект требует особого рассмотрения.

Объектом исследования данной научно-исследовательской работы было определено комфортное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала, а предметом исследования – влияние времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала на поведение участников дорожного движения при пересечении регулируемых пересечений.

Целью данной научно-исследовательской работы является создание метода оптимизации светофорного регулирования, который позволит определить комфортное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала. Задачами являются сбор данных, необходимых для метода, разработка метода и его апробация. В рамках работы был проведен анализ существующих методов, выявлены их недостатки и предложен новый подход, основанный на проведенных измерениях зависимостей параметров перекрестка от времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала. Метод определения комфортного времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала предлагается применять для целей повышения безопасности дорожного движения, при этом задача метода – оптимизация светофорного цикла, рассчитанного по методике Вебстера, с учётом интересов повышения безопасности всех участников дорожного движения.

Рассматриваемый метод может служить основой для разработки новых стандартов и рекомендаций в данной области.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Нормативная документация в России и зарубежном

В России существует несколько стандартов, которые регламентируют длительность светофорных циклов и организацию движения на перекрестках:

1) ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств» [5],

2) Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 70716-2023 «Дороги автомобильные и улицы. Безопасность движения пешеходов. Общие требования» [6],

3) ОДМ 218.6.003-2011 «Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах» [7].

В настоящее время только в [5] указано максимальное время для пешеходов, которое составляет 60 секунд при интенсивности транспортных средств менее 700 ед./ч на одну полосу движения и 90 секунд при большей интенсивности. Несмотря на наличие таких рекомендаций, ограничения распространяются только на светофорные объекты, расположенные на перегонах и при отсутствии вызывной пешеходной фазы.

При высоком уровне интенсивности как транспортных, так и пешеходных потоков возникает необходимость светофорного регулирования. В российском нормативном поле в [7] рекомендована следующая формула (1) для расчета длительности разрешающего сигнала при переходе пешеходами:

$$t_{\text{пш}} = \frac{B_{\text{пш}}}{4v_{\text{пш}}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{пш}}$ – ширина проезжей части, пересекаемой пешеходами в i -ой фазе регулирования [м]; $v_{\text{пш}}$ – расчетная скорость пешеходов (принимаемая 1,3 м/с), [м/с].

Стоит сразу пояснить несостоятельность данного выражения. Во-первых, зачастую на практике закладывается скорость, упомянутая по

умолчанию, однако данный параметр может варьироваться от пересечения к пересечению, в зависимости от процентного соотношения группы пешеходов (например, чем больше пожилых людей в потоке, тем скорость перехода будет дольше). Во-вторых, отсутствует учет плотности пешеходного потока (в то время как для транспортных направлений рассчитывается поток насыщения).

В зарубежной практике Советом по транспортным исследованиям (США) в «Руководство по пропускной способности» [8] было проанализировано оптимальное время, до наступления которого пешеход, скорее всего, не будет пытаться начать переходить улицу. Оно определяется из зазора между двумя транспортными средствами. Пешеходами принимается решение о переходе с нарушением, если зазор не меньше критического. Для одного пешехода критический зазор вычисляется в соответствии с формулой (2):

$$t_c = \frac{L}{S_p} + t_s, \quad (2)$$

где t_c – критический промежуток для одного пешехода, [с]; S_p – скорость шага пешехода, [м/с]; L – длина перехода, [м]; t_s – время начала движения пешехода, [с].

Если известно, что на переходе группа пешеходов, то справедливо следующее уравнение (3):

$$t_G = t_c + 2(N_p - 1), \quad (3)$$

где t_G – групповой критический зазор, [с]; N_p – пространственное распределение пешеходов, [пеш-м].

Для определения размера группы переходящих пешеходов используется (4):

$$N_c = \frac{v_p e^{v_p t_c} + v e^{-v t_c}}{(v_p + v) e^{(v_p - v) t_c}}, \quad (4)$$

где N_c – размер типичной группы пешеходов, пересекающих дорогу, [пеш]; v_p – интенсивность пешеходного потока, [пеш/с], v – интенсивность

транспортного потока, [тс/с]; t_c – критический промежуток для одного пешехода, [с].

При этом, если скопления пешеходов не наблюдается, N_c принимается равным 1.

Для нахождения пространственного распределение пешеходов применяется (5):

$$N_p = INT \left[\frac{0,75(N_c-1)}{W_E} \right] + 1, \quad (5)$$

где N_p – пространственное распределение пешеходов, [пеш-м]; N_c – суммарный объем пешеходов, пересекающих дорогу, [пеш]; W_E – эффективная ширина перехода, [м]; 0,75 – стандартное значение эффективной ширины, применяемое для одного пешехода при избегании столкновения с другими пешеходами.

Наконец, средняя задержка на пешеходном переходе может быть найдена как (6):

$$d_p = \frac{1}{v e^{-v t_G}} - H_m - t_G, \quad (6)$$

где d_p – средняя задержка пешехода, [с]; v – интенсивность транспортного потока, [тс/с]; t_G – критический зазор для группы, [с]; H_m – средний интервал движения, примерно равный обратному значению интенсивности транспортного потока, [с/тс].

При помощи данных вычислений была подготовлена сводная таблица, показанная на рисунке 1, в соответствии с которой с увеличением времени задержки на светофоре возрастает вероятность нарушения, при этом критическое время наступает при 30 секундах. Также авторы отмечают, что пешеходы терпимее относятся к ожиданию на нерегулируемых пересечениях, чем на регулируемых.

Средняя задержка на пешехода (с)	Вероятность рискованного поведения
< 5	Низкая
≥ 5 - 10	Умеренная
> 10 - 20	
> 20 - 30	
> 30 - 45	Высокая
> 45	Очень высокая

Рисунок 1 – Среднее время задержки пешехода и вероятность нарушений

Аналогичные стандарты используются в Швейцарии, показанные на рисунке 2. Согласно «*Диагностика и пешеходные сооружения*» [9], оптимальным считается время до 45 секунд (50 секунд для переходов с островком безопасности). Приемлемость ожидания отражается в уровнях обслуживания, который для пешеходов должен быть эквивалентен уровню обслуживания автомобильного движения.

Оценка	Уровень обслуживания	Ожидание на светофоре*
++ вполне приемливо	A,B	≤20с (25с)
+ приемливо	C	≤30с (35с)
0 просто приемливо	D	≤40с (45с)
- непримелимо	E	≤45с (50с)
-- совершенно непримелимо	F	>45с (50с)

* Действительно для светофоров с двухступенчатым переездом и временем ожидания на центральном островке, пятисекундная надбавка для пересечений с центральным островком (значение в скобках)

Рисунок 2 – Уровень обслуживания пешеходов по времени ожидания [9]

1.2 Научные исследования

В российском сегменте исследования по рассматриваемой теме представлены скудно. Рассуждая о тенденции роста ДТП с участием пешеходов, в статье «*О причинах наездов на пешеходов на городских улицах*» [10] Н.И. Бутакова называет в качестве причин травматизма пешеходов нарушения требований ПДД, в частности переход на запрещающий сигнал светофора. В целом автор статьи акцентирует внимание на том, что поведение пешеходов слабо изучено и зависит от внутренней культуры, а время ожидания – от необходимости перехода, скорости и интенсивности потока. Вместе с тем констатируется факт, что группа более склонна к нарушению, чем один пешеход.

Королёв И.В. и Лазарев В.А. в статье *«Транспортный узел Суворова – Малиновского. Предложения по совершенствованию ОДД»* [11] рассматривают локальный узел и описывают следующие проблемы организации и безопасности движения: малая пропускная способность, высокая концентрация ДТП, высокая длительность цикла (90 секунд) при максимальном ожидании пешехода в 72 секунды. Одним из решений авторы видят пересчет светофорного цикла до оптимального для обеспечения минимально необходимой пропускной способности (продолжительность фазы транспортного направления при этом должна быть равна всего 55 секунд), при этом максимальное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала снижается до 38 секунд.

Некоторые зарубежные источники, например, *«Нарушение пешеходами ПДД - переход на красный свет на регулируемых перекрестках: влияние социальных и несоциальных факторов»* [12], подчеркивают высокий уровень нарушений красного сигнала, составляющий 64.59% от общего числа совершающих переход, и связывают это с такими факторами, как находится ли человек в толпе, успешно ли переходят другие, время до зеленого сигнала. С другой стороны, в *«Допустимое время ожидания: обобщенная модель распределения Парето с эмпирическим исследованием»* [13] процент нарушений составлял 15.8%. Более того, в [13] было проведено два эксперимента в пиковый и непиковый часы для двух перекрестков со светофорными объектами. Измеренное время ожидания составило 51.5 и 54.4 секунд (peak hours и off-peak).

В статье *«Анализ скорости движения пешеходов и времени ожидания на перекрестках в Дакке»* [14] исследователи из Бангладеш проводили анализ трех перекрестков с различным типом регулирования: нерегулируемое, со светофорным регулированием, регулирование полицейским. Обследование поведения пешеходов проводилось методом видеофиксации во внепиковое время и при хороших погодных условиях. В своей работе авторы получили уравнение модели множественной линейной регрессии (MLR model) для

определения скорости пешеходов (7). Используемые параметры, при предварительной обработке аналитическими методами (The Games-Howell test, Tukey Post Hoc Test), являются значимыми с уровнем достоверности 95%.

$$\begin{aligned} \text{Crossing Speed} = & 0.862 + 0.325 SI + 0.254 TI + 0.116 G - 0.166 O + \\ & 0.186 SS + 0.098 TS - 0.075 CP - 0.106 CG + 0.188 FC + 0.166 PC \pm \\ & 0.063 CL, \end{aligned} \quad (7)$$

где SI – регулирование (1 – светофорное регулирование, 0 – иные); TI – регулирование дорожной инспекцией (1 – регулирование регулировщиком, 0 – иное); G – пол (1 – мужчина, 0 – иной); O – пожилой (1 – пожилой человек, 0 – иное); SS – однофазный цикл (основного направления) (1 – одна фаза, 0 – иное); TS – двухфазный цикл (с второстепенным направлением) (1 – две фазы, 0 – иное); CP – модель пересечения (1 – пешком, 0 – иное); CG – группа пересекающих (1 – группа, 0 – иное); FC – полное соблюдение правил перехода (1 – полное соблюдение, 0 – иное); PC – частичное соблюдение правил перехода (1 – частичное соблюдение, 0 – иное); CL – место перехода (рядом с пешеходным переходом, 0 – иное).

В контексте определения времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала на перекрестке авторы статьи подчеркивают, что 25% совершали переход на красный, еще 42% ожидали зеленого сигнала менее 10 секунд. Для определения времени ожидания уравнение MLR модели описывается следующей формулой (8):

$$\begin{aligned} \ln(\text{wait time}) = & -3.000 + 0.958 SI + 0.682 TI - 0.408 G + 0.208 A - \\ & 0.715 O + 0.410 MG + 0.812 WL + 0.021 VF, \end{aligned} \quad (8)$$

где SI – регулирование (1 – светофорное регулирование, 0 – иные); TI – регулирование дорожной инспекцией (1 – регулирование регулировщиком, 0 – иное); G – пол (1 – мужчина, 0 – иной); A – взрослый (1 – взрослый человек,

0 – иное); О – пожилой (1 – пожилой человек, 0 – иное); MG – минимальный зазор (1 – минимальный, 0 – иное); VF – поток транспортных средств (тс), [тс/мин].

Были использованы отличные параметры, чем при определении скорости, а именно: является ли нарушитель пожилым, значение минимального зазора между транспортными средствами, интенсивность ТС. Помимо минимального зазора, все параметры являются значимыми с уровнем достоверности 95%. Авторы подчеркивают, что с увеличением потока ТС на 1 единицу время терпеливого ожидания увеличивается на 2,1% при постоянстве других показателей. По мнению исследователей, наиболее весомым для оценки времени является тип регулирования на перекрестке. При анализе также определено, что оптимальным для пешеходов является ожидание в течение 20 секунд.

В другом исследовании *«Привычки пешеходов при переходе дороги по бывшему пешеходному переходу «зебра»»* [15] были проанализированы пешеходные переходы в городе Оломоуц (Чехия). На одном из участков УДС пять нерегулируемых переходов, распределенные по улице на протяжении 1 км, были заменены на один светофорный переход. В качестве объекта исследования был выбран один из бывших нерегулируемых переходов (рисунок 3), при этом светофорный объект располагался в 200 метрах.



Рисунок 3 – Точка обследования

Метод обследования включает видеофиксацию в будние дни и интервью пешеходов. Было собрано и обработано 829 случаев людей, переходящих дорогу. В результатах подсчитано время ожидания пешехода до совершения перехода и количество проехавших машин до того, как пешеход перешел. В большинстве случаев пешеходы не ждали (при условии отсутствия машин), а 6% всех наблюдаемых пешеходов ждали более 21 секунды.

В работе *«Анализ времени ожидания рассеянных пешеходов: виртуальная реальность с эффектом погружения»* [16] исследователи проводили эксперимент, связанный с пересечением нерегулируемого пересечения в зависимости от 3 типовых условий: переход без раздражителей, переход с телефоном, переход с установленными световыми табло для безопасности. Интересно, что для своего теста авторы статьи создали специальную симуляцию для того, чтобы волонтеры переходили дорогу в виртуальной реальности (рисунок 4). По результатам проведенных испытаний время ожидания без раздражителей составило 18 секунд и по 21 секунде с отвлечением внимания.



Рисунок 4 – Симуляция для оценки времени ожидания

В статье *«Влияние времени ожидания на поведение пешеходов и водителей автомобилей на регулируемых перекрестках»* [17] французских ученых описано исследование с данными с трех различных светофорно-регулируемых пересечений. Обследование проводилось методом видеосъемки в будние дни в утренний и вечерний пиковые периоды. База данных обработана вручную для достоверности результатов. Пешеходы были разделены на 4 группы: «красные» – пересекающие дорогу на красный свет без ожидания, «красные после ожидания» – пересекающие дорогу на запрещающий сигнал после некоторого ожидания, «ожидающие зеленый» – пересекают на зеленый сигнал, «те, кому приходится ждать зеленый» – пешеходы, которые хотели бы перейти на красный, но из-за плотного трафика дожидаясь зеленого. В результате изучения 8000 случаев перехода было выявлено, что 57,6 – 74% пешеходов показывают тип поведения «красный». Вместе с тем, при короткой длительности запрещающего сигнала нарушили ПДД 64%, а с увеличением ожидания число нарушителей увеличилось до 80%. В заключении авторы называют оптимальным время, не превышающее 90 секунд.

1.3 Выводы

Таким образом, многие работы направлены на получение статистических данных. В российских исследованиях по теме представлено мало информации, о чем свидетельствует скромный объем работ. Исследователи отмечают, что поведение пешеходов плохо изучено и зависит от многих факторов: необходимости перехода, скорости и интенсивности движения, находится ли пешеход в толпе. Зачастую база данных собирается с помощью видеофиксации, а значит, можно судить о достаточной и достоверной выборке. В совокупности оптимальным считается ожидание в течение 30-40 секунд. К недостаткам приведенных научно-исследовательских работ относится то, что не учитываются важные показатели перекрестков: светофорный цикл, длительность фаз, ширина перехода, направление движения, наличие разделительных полос. Дальнейшие исследования и разработка мер по определению оптимального времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала как с психологической точки зрения, так и со стороны подхода к организации перекрестка, поспособствуют повышению безопасности пешеходов и других участников движения.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА СВЕТОФОРНОГО ЦИКЛА

2.1 Структура методики Вебстера

Светофорный цикл представляет собой совокупность последовательных фаз. В фазах объединяются неконфликтные направления движения, либо конфликтующие через маневр на просачивание. Пример допустимых конфликтных направлений – движение автотранспорта по стрелке с одновременным пешеходным движением. Фаза состоит из основного и промежуточного такта. Под основным тактом понимается длительность разрешающего сигнала. Промежуточный такт служит для того, чтобы участники дорожного движения завершили проезд или переход безопасно. К промежуточному такту относят желтый, красно-желтый и красный добавочный сигналы. Пример светофорного цикла приведен на рисунке 5. В светофорных циклах существуют несколько видов управления:

- 1) жесткий (постоянный по времени, независимо от интенсивности движения),
- 2) адаптивный (программы зависят от интенсивности движения, используются детекторы).

В данной работе метод определяется для управления с помощью жесткого регулирования.

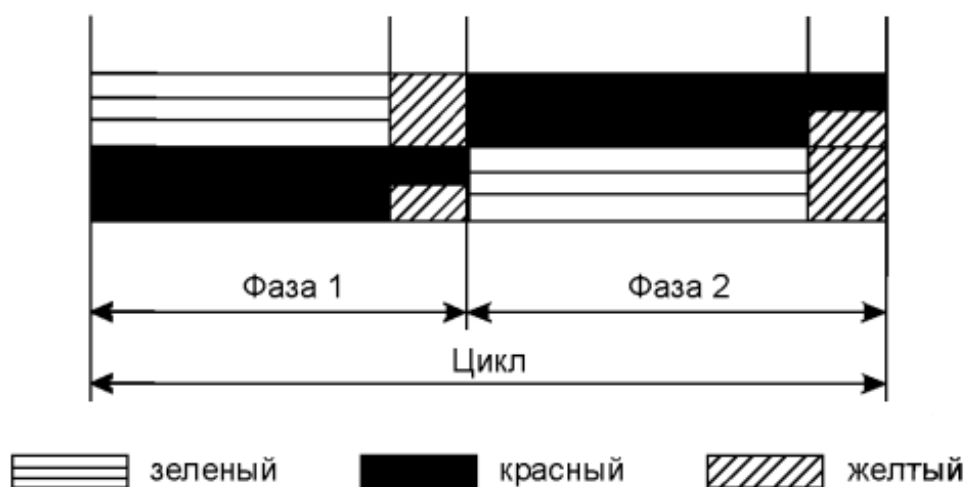


Рисунок 5 – Светофорный цикл

На сегодняшний день в России расчет светофорного цикла производят на основе формул Вебстера, приведенных в ОДМ 218.6.003–011 [7]. Порядок расчета приведен на рисунке 6.

Стоит отметить, что в алгоритме расчета пешеходы учитываются только в части оптимальности их прохода через пешеходный переход. В случае одномоментного разрешающего транспортного сигнала и запрещающего пешеходного сигнала, длительность последнего определяется из времени горения транспортной сигнальной группы.

Длительность основных тактов (зеленых сигналов) всех фаз определяется по формуле (9):

$$t_{0i} = \frac{(T_{\text{ц}} - T_{\text{п}}) \cdot y_i}{1 - Y}, \quad (9)$$

где $T_{\text{ц}}$ – полная длительность цикла, $T_{\text{п}}$ – длительность промежуточных тактов, y_i – фазовый коэффициент; Y – сумма фазовых коэффициентов.

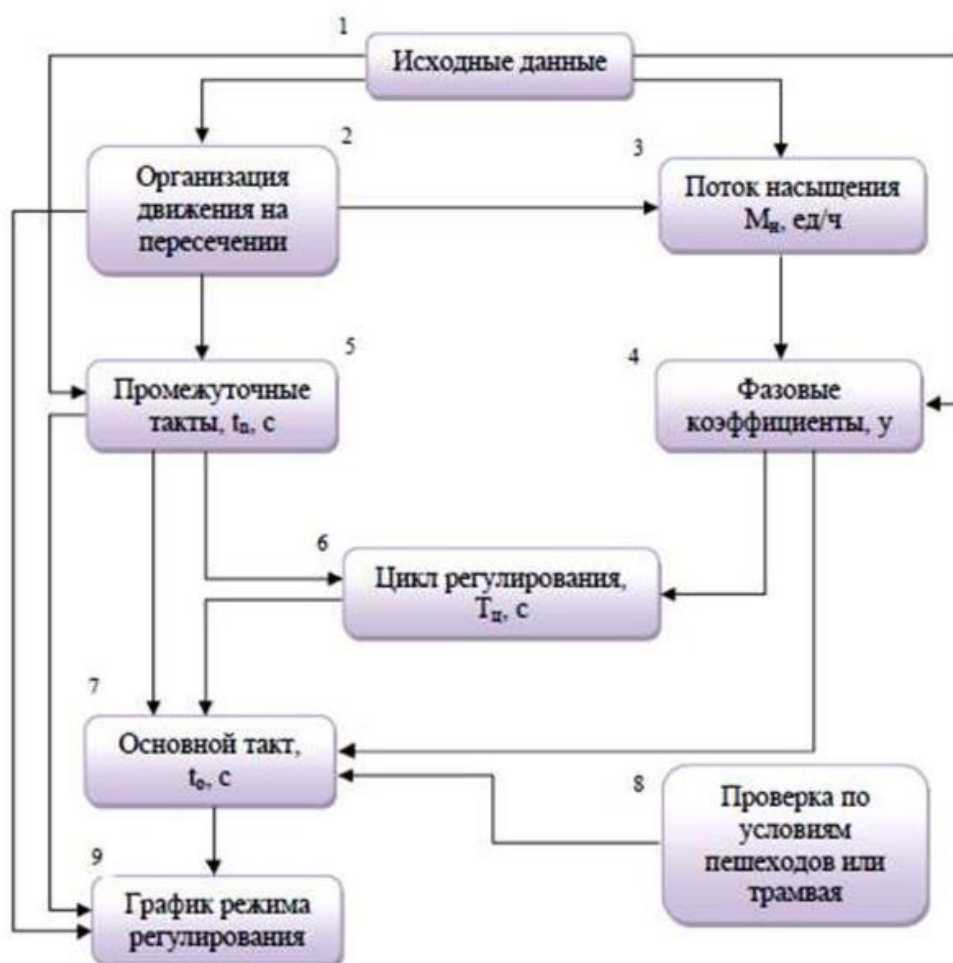


Рисунок 6 – Порядок расчета светофорного цикла

Очевидно, что светофорное регулирование необходимо для обеспечения безопасности движения, упорядочения движения транспортных средств и пешеходов, оптимизации времени проезда транспортных средств, уменьшения заторов, предоставления пешеходам и велосипедистам безопасных и удобных условий для пересечения проезжей части. Несмотря на кажущееся равенство транспорта и пешехода, в реальности при светофорном регулировании предпочтение отдается именно транспортной сигнальной группе. Это подтверждается, в том числе, и отсутствием в методике указания к подсчету интенсивности пешеходного движения (в то время как интенсивность ТС определяется обязательно и первоначально), как следствие, не учитывается время, которое человек готов потратить, ожидая проезд всех транспортных средств. Что, в свою очередь, приводит к вынужденным нарушениям со стороны пешеходов и дорожно-транспортным происшествиям. Для оптимизации методики автором данной работы предлагается модернизация расчета светофорного цикла с учетом комфортного времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала.

2.2 Разработка метода

2.2.1 Социологические исследования

Для оценки комфортного времени ожидания был проведен онлайн-опрос. Опрос проводился по 5 крупнейшим городам России: Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург и Казань. Общее число респондентов составило 240 человек. Во время прохождения опроса участникам было предложено ответить на вопросы, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень вопросов для социологического опроса

№	Вопрос
1	Как часто Вы переходите на красный свет?
2	Если Вы переходите на красный, то с чем это связано чаще всего?

3	Переходите ли Вы на красный, если видите, что другие пешеходы перебегают?
4	Перешли бы Вы дорогу на красный свет, если бы на дороге не было машин?
5	Перешли бы Вы дорогу на красный свет, если бы на дороге машины стояли в пробке?
6	Перейдите ли Вы дорогу, если Вам горит красный, а машины продолжают движение с небольшой скоростью?
7	Переходите ли Вы на красный сигнал, если у пешеходного перехода плохое освещение?
8	Переходите ли Вы на красный сигнал на пешеходных переходах, оборудованных кнопкой вызова зеленого?
9	Как Вы считаете, пойдут ли другие люди на красный при отсутствии машин, если запрещающий сигнал горит слишком долго?
10	Чувствуете ли Вы себя безопасно, переходя на красный сигнал?
11	Какое время Вы считаете приемлемым для ожидания зеленого, чтобы не было потребности перехода на красный?
12	При наличии ожидания, указанного Вами в вопросе выше, будете ли Вы переходить на красный?

В результате были получены следующие ответы: на вопрос о количестве нарушений 45,4% опрошенных с уверенностью утверждают, что никогда не переходят на красный сигнал (рисунок 7). Однако при постановке вопроса относительно других людей («Считаете ли Вы, что будут переходить другие?») только 1,7% ответили, что при длительном красном сигнале и отсутствии машин пешеходы будут дожидаться зеленого.

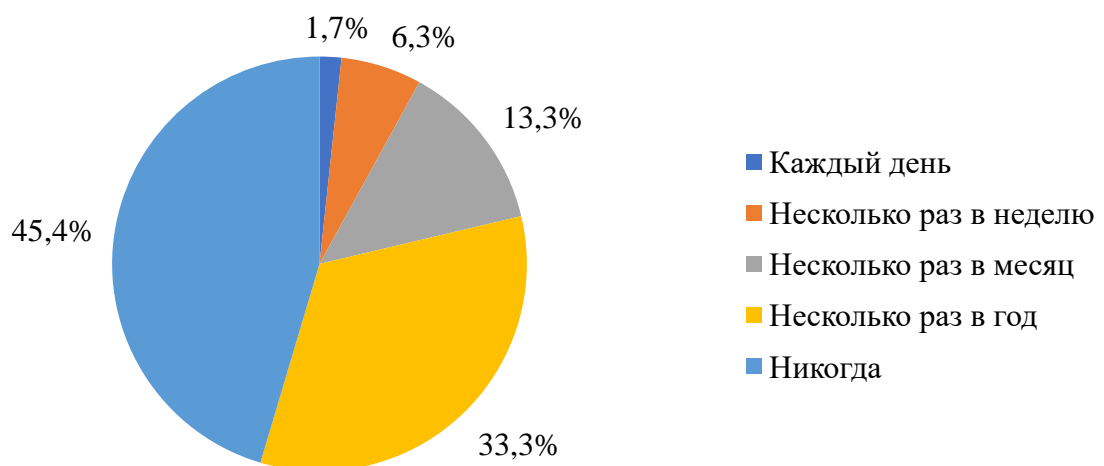


Рисунок 7 – Распределение ответов по долям в зависимости от количества нарушений

Говоря о причинах перехода на красный сигнал (рисунок 8), респонденты отмечали, что они нарушают из-за того, что торопятся (15% и 13%), красный сигнал горит слишком долго (12%), переходят при отсутствии транспортных средств (12%), реже всего нарушают при неисправности светофора.

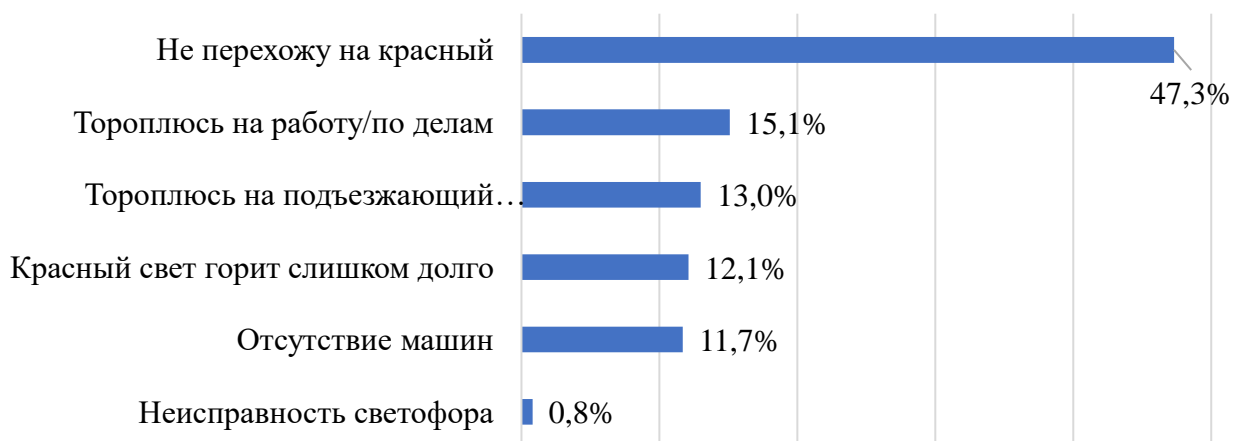


Рисунок 8 – Распределение ответов в зависимости от причин нарушений

В литературе, рассмотренной ранее, авторы [10, 12] утверждали, что время ожидания зависит, в том числе, от того, успешно ли переходят другие нарушители. Однако проведенный социологический опрос это не подтверждает. Согласно полученным данным, только 8,8% будут переходить вместе с другими (другие же переходят вне зависимости от этого, либо не нарушают).

На вопрос «перешли бы Вы на красный свет при отсутствии машин?» 43,3% ответили положительно в случае, если еще долго ждать зеленый сигнал. Одновременно с этим наличие автомобилей существенно сказывается на принятии решения о переходе. Так, если транспортное направление неподвижно, на красный перейдут 3,3%. При транспортном потоке, движущемся с низкой скоростью, – 1,7%.

Вместе с тем респонденты ответили на вопрос об оптимальном времени ожидания (рисунок 9). Большая часть ответили, что считают оптимальным такое время, которое требуется для обеспечения безопасности (28,3%). Чуть меньше людей указали 30 секунд (24,2%) и 60 секунд (16,3%).

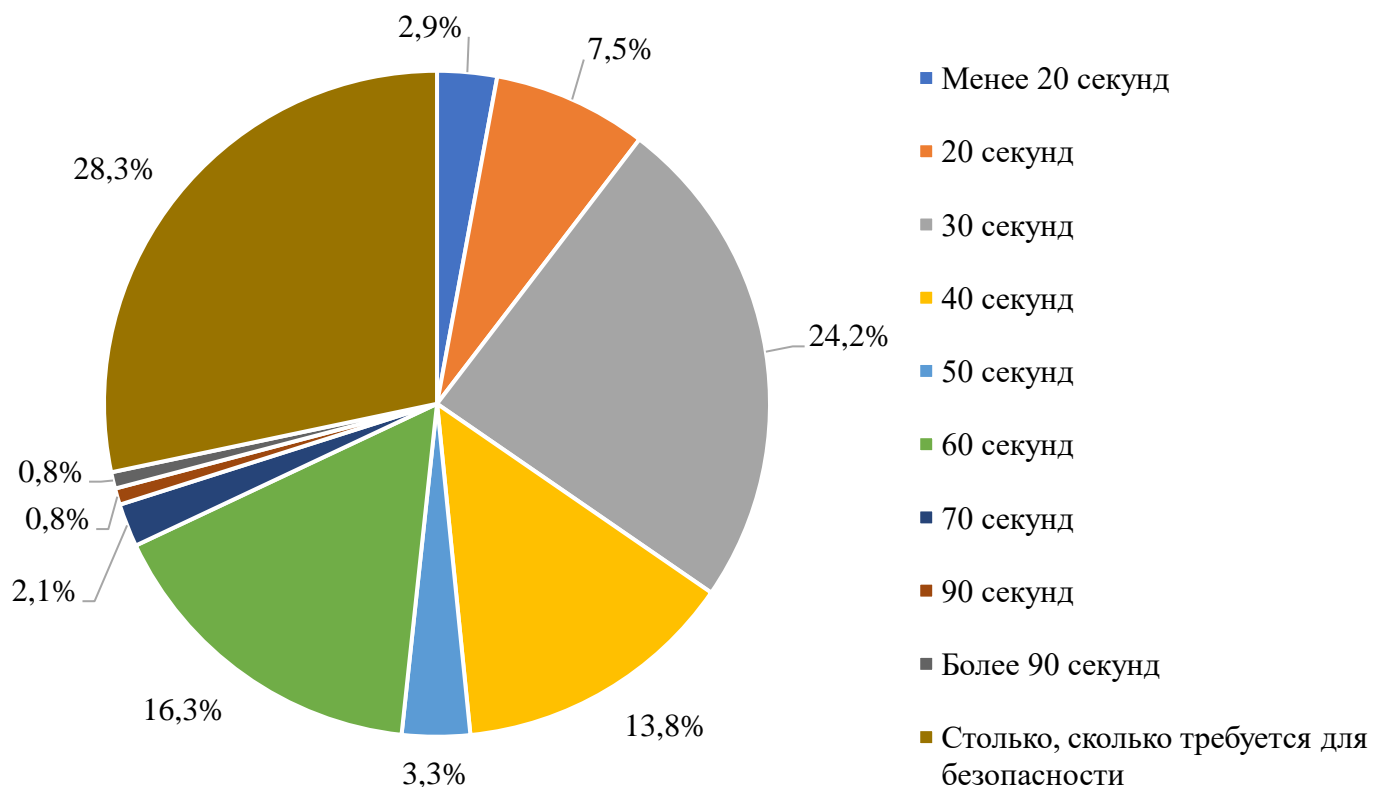


Рисунок 9 – Ответы об оптимальном времени ожидания

Таким образом, можно заключить, что в части получения информации о причинах нарушений социологический вопрос оказывается неэффективен, так как люди не воспринимают собственные нарушения объективно. Однако, информация о причинах, которые были указаны (из-за опозданий, долгого ожидания подъезжающего транспорта), может считаться применимой. Также показательным является вопрос о комфортном времени ожидания. По ощущениям респондентов, приемлемым будет ожидание в 30 секунд, что соотносится с выводами авторов других исследователей, приведенных в главе 1.

2.2.2 Сбор исходных данных для исследования

Вторым этапом работы над исследованием был сбор данных полевых обследований для определения влияния различных параметров пешеходного перехода и непосредственного времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала. Данные собраны без привязки к часу пик, так как, во-первых,

существуют сложности, связанные с его определением для конкретного пересечения, во-вторых, нет необходимости такой взаимосвязи. В теории час пик мог показывать больший процент нарушений в связи с тем, что большая часть людей спешит на работу, однако в исследованиях, приведенных в главе 1, это не подтверждается. Более того, «торопиться» пешеход может в любое время суток.

Порядок сбора исходных данных состоит в следующем: на каждом объекте в течение 15-ти минут производилась видеосъемка в различное время дня, в дальнейшей обработке были проанализированы такие параметры, как:

- 1) количество полос,
- 2) интенсивность транспортного потока,
- 3) интенсивность пешеходного потока,
- 4) длина пешеходного перехода,
- 5) число нарушителей и их ожидание, а также время, оставшееся до зеленого сигнала,
- 6) параметры светофорного цикла (полная длительность цикла, время горения красного сигнала для пешеходов).

Для построения зависимостей были выбраны те факторы, которые оказываются наиболее значимыми в контексте проводимого исследования, а именно: интенсивность транспортного потока, интенсивность пешеходного потока, количество полос движения, длина пешеходного перехода. Влияние транспортного потока подтверждается в работах [8, 10, 14]. Количество полос движения и длина пешеходного перехода являются производными от интенсивности. Интенсивность пешеходных потоков необходима для учета пешеходов в расчетах.

Для более заметных тенденций, связанных именно с перечисленными переменными, были рассмотрены пересечения, которые:

- 1) имеют икс-образную топологию,
- 2) программа светофорного регулирования состоит из 2 фаз,
- 3) пересечение не имеет трамвайных путей.

Были обследованы пересечения, местоположения которых показаны на рисунке 10. Всего обследовано 8 участков на каждое число полос в сечении (от 1 до 8) и произведено по 3 замера для сглаживания неравномерности потока. Общее число измерений – 24. Количество замеров является оптимальным для выявления трендов и закономерностей, что достаточно для анализа.

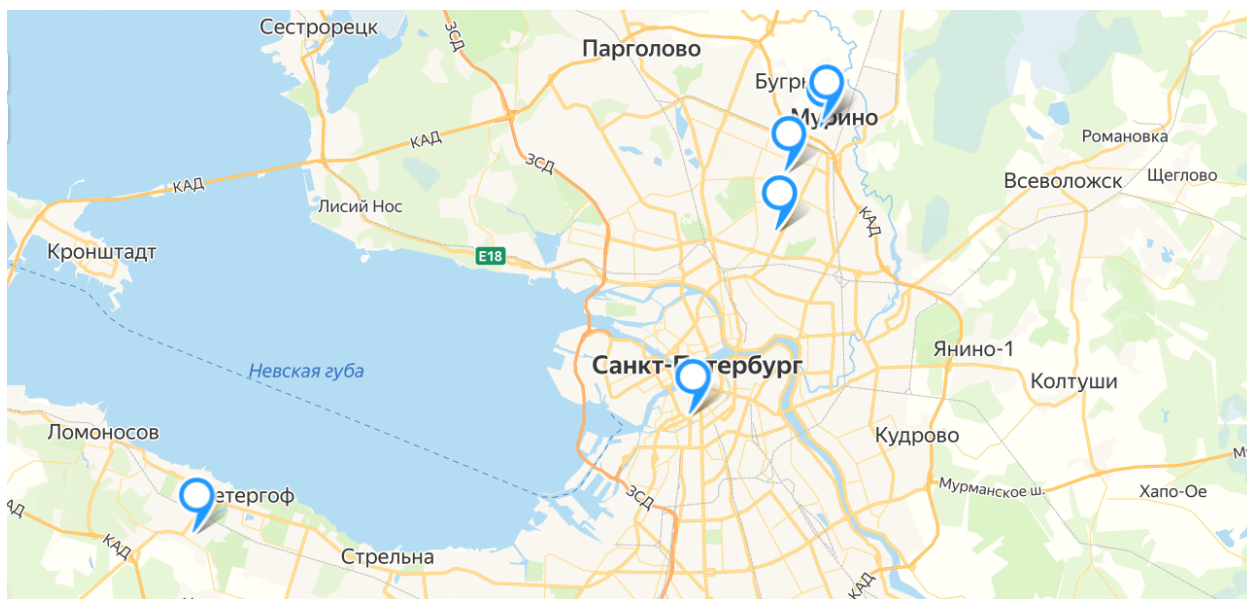


Рисунок 10 – Схематичное отображение мест полевых обследований

Для определения допустимого времени ожидания пешехода рассматриваются одновременно два параметра:

1) потенциальное комфортное время – показывает, сколько времени осталось до зеленого от начала движения нарушителя на красный до начала горения разрешающего сигнала. Это критическое время, меньше которого пешеходы не стали бы переходить,

2) фактическое время ожидания – показывает, сколько времени ожидал пешеход от подхода к переходу до начала движения на красный.

В исследованиях, описанных в главе 1, под временем ожидания понималось время от подхода к переходу до начала нарушения. В дальнейших расчетах используется фактическое комфортное время. На рисунках 11-18 приведены внешние виды объектов подсчета. Результаты показаны в таблице 2.



Рисунок 11 – Вид пешеходного перехода на Ботанической улице



Рисунок 12 – Вид пешеходного перехода на Чебышевской улице



Рисунок 13 – Вид пешеходного перехода на Вознесенском проспекте



Рисунок 14 – Вид пешеходного перехода на улице Гидротехников

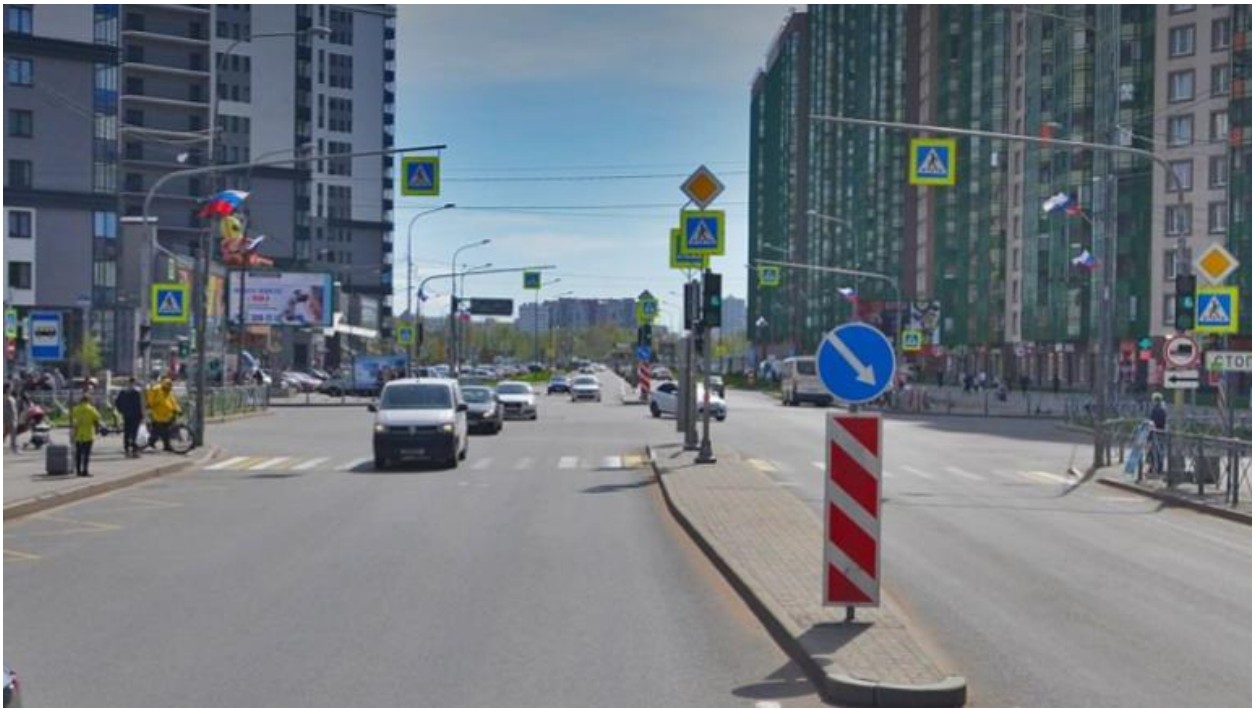


Рисунок 15 – Вид пешеходного перехода на улице Шувалова



Рисунок 16 – Вид пешеходного перехода на улице Шувалова



Рисунок 17 – Вид пешеходного перехода на Петровском бульваре



Рисунок 18 – Вид пешеходного перехода на Светлановском проспекте

Таблица 2 – Результирующая таблица

Объект	Количество полос	Средняя интенсивность ТС, [тс/ч]	Средняя интенсивность пешеходов, [пеш/15 мин.]	Длина пешеходного перехода (с учетом островка), [м]	Полная длительность цикла, [с]	Длительность красного сигнала для пешеходов, [с]	Среднее число нарушителей, [чел.]	Среднее время ожидания, [с]
Ботаническая - Чебышевская (по улице Ботаническая)	1	37	9	10,9	70	30	1	4,17
Чебышевская - Ботаническая (по улице Чебышевская)	2	207	36	11,3	70	50	2	1,56
Вознесенский - Римского-Корсакова (по Вознесенскому проспекту)	3	952	41	12,4	94	78	3	13,90
Гидротехников - Гжатская (по улице Гидротехников)	4	870	44	14,2	88	69	4	6,33
Шувалова - Менделеева (по улице Шувалова)	5	1606	221	20,9	82	59	6	19,61
Шувалова - Петровский (по улице Шувалова)	6	1422	87	23,3	90	64	2	36,56
Петровский - Шувалова (по Петровскому проспекту)	7	1158	126	29,6	90	57	12	11,53
Светлановский - Учительская (по Светлановскому проспекту)	8	1566	103	38,8	102	65	12	17,17

2.2.3 Построение математической модели

Метод определения комфортного времени ожидания разрешающего сигнала светофора пешеходами в расчете светофорного цикла основан на использовании аналитической математической модели. Математическая модель основана на эмпирических данных, полученных в результате наблюдений за поведением пешеходов на перекрестках. Результаты этих наблюдений используются для построения зависимости между временем ожидания пешеходами разрешающего сигнала и интенсивностью движения транспорта.

Для разработки метода были изучены те факторы, которые, предположительно, оказывают наибольшее влияние на среднее время ожидания.

Отбор значимых факторов производится на основе матрицы показателей корреляции. Значение корреляции показывает степень взаимосвязи между переменными. Принято считать, что коэффициенты корреляции, которые по модулю больше 0,7, свидетельствуют о сильной связи [18]. В метод войдут факторы с сильной зависимостью от результативного признака. Коэффициент корреляции определяется следующим образом (10):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (10)$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции; n – объем выборки; x_i, y_i – i -тые элементы выборки X и Y ; \bar{x}, \bar{y} – среднее значение выборок.

На основе исходных данных таблицы 2 построена матрица корреляции зависимости среднего времени ожидания от факторов (таблица 3).

Таблица 3 – Матрица корреляции

Факторы \ Факторы	Среднее время ожидания, [с]	Количество полос	Средняя интенсивность ТС, [тс/ч]	Средняя интенсивность пешеходов, [пеш/15 мин.]	Длина пешеходного перехода (с учетом островка), [м]	Полная длительность цикла, [с]	Длительность красного сигнала для пешеходов, [с]	Среднее число нарушителей, [чел.]
Среднее время ожидания, [с]	1,00							
Количество полос	0,58	1,00						
Средняя интенсивность ТС, [тс/ч]	0,75	0,87	1,00					
Средняя интенсивность пешеходов, [пеш/15 мин.]	0,46	0,61	0,78	1,00				
Длина пешеходного перехода (с учетом островка), [м]	0,46	0,95	0,74	0,53	1,00			
Полная длительность цикла, [с]	0,51	0,79	0,78	0,28	0,71	1,00		
Длительность красного сигнала для пешеходов, [с]	0,41	0,46	0,64	0,21	0,25	0,79	1,00	
Среднее число нарушителей, [чел.]	0,08	0,83	0,59	0,53	0,88	0,63	0,24	1,00

Исходя из обоснования, приведенного выше, для метода следует использовать фактор средней интенсивности транспортного потока.

Для построения математической модели используется метод идентификации, который заключается в определении коэффициентов уравнения регрессии, описывающего зависимость между входными и выходными параметрами системы. С помощью этого метода можно выделить ключевые характеристики и паттерны, что облегчает дальнейший анализ и интерпретацию данных. В данном случае входным параметром является сведения об интенсивностях, а выходным параметром является время ожидания пешеходами разрешающего сигнала. В методе используется линейная модель, описывающую линейную, пропорциональную зависимость.

Для разработки метода были рассчитаны зависимости среднего времени ожидания от выбранного фактора (рисунок 19). С помощью линии тренда описано уравнение, которое предлагается использовать при расчете оптимального времени горения красного сигнала. В предложенном уравнении x – исходный параметр, y – искомое время.

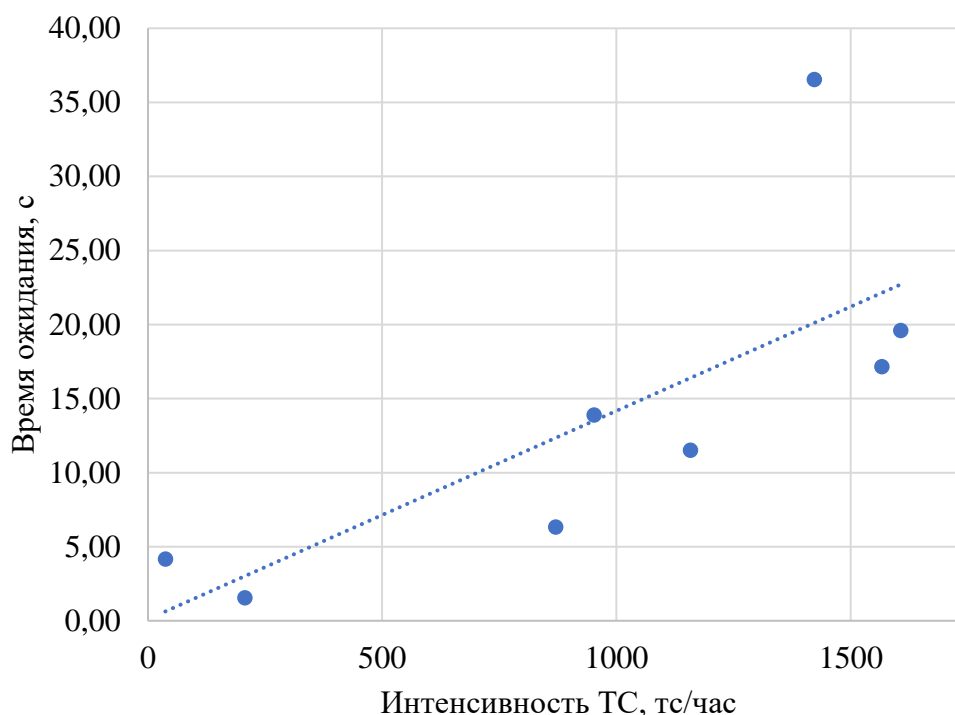


Рисунок 19 – Зависимость времени ожидания от интенсивности ТС

Для описания функции используется уравнение (11):

$$y = 0,01x + 0,11 \quad (11)$$

2.2.4 Детальное описание шагов метода

На рисунке 20 приведена детализация метода. Стоит еще раз подчеркнуть, что метод применим для 4-подходных перекрестков с 2-фазным жестким светофорным регулированием. При этом, для каждого пешеходного перехода следует производить подобный расчет. Затем из двух значений одной группы сигналов выбирается наименьшее значение, применимое для всей фазы. Этот выбор обусловлен тем, что наименьшее значение представляет собой максимально допустимое время ожидания, комфортное для пешеходов. Также стоит обратить внимание, что одновременно должна проводиться проверка по условиям минимального времени перехода для пешеходов (приведенного в ОДМ).

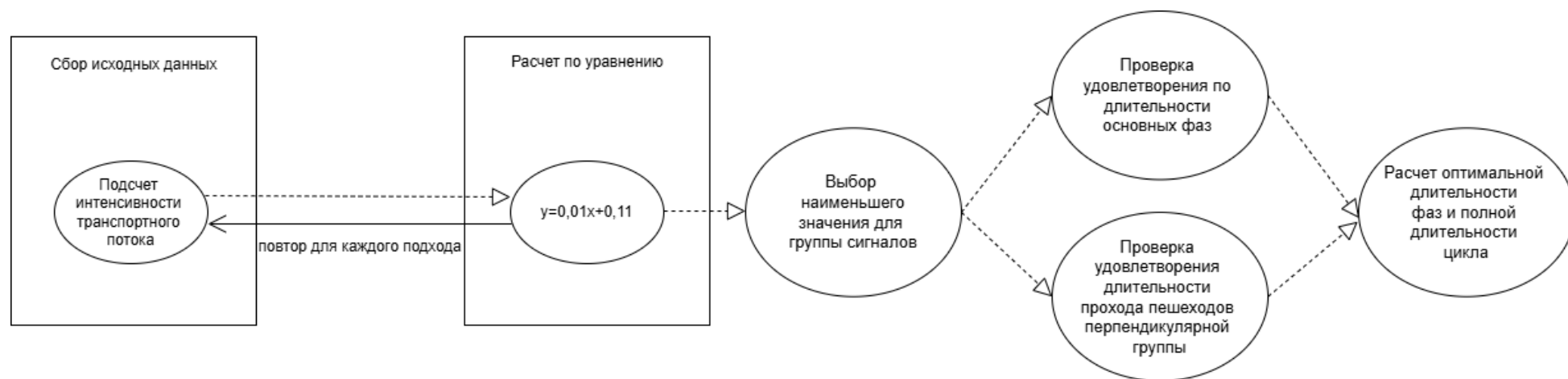


Рисунок 20 – Блок-схема метода

2.3 Выводы

Основное внимание при разработке метода уделяется необходимости учета комфортного времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала при проектировании светофорного регулирования, что может снизить количество нарушений и повысить безопасность на дорогах. Проведенные социологические исследования показали, что пешеходы часто переходят на красный сигнал из-за длительного ожидания, что подчеркивает важность внедрения оптимизации. В методе предлагается математическая модель, основанная на эмпирических данных, для определения комфортного времени ожидания, что поможет улучшить условия для пешеходов и повысить общую безопасность дорожного движения. Предполагается, что использование метода позволит усовершенствовать существующую методику ОДМ.

ГЛАВА 3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

3.1 Перечень и обоснование сценариев

В работе было рассмотрено 4 сценария:

- 1) исходный,
- 2) проектный базовый,
- 3) проектный с увеличенной нагрузкой – нагрузка увеличена в 1,5 раза в створе Гражданского проспекта со стороны пр. Непокоренных,
- 4) проектный с увеличенным количеством полос – добавлена полоса в створе Гражданского проспекта со стороны пр. Непокоренных.

Исходный сценарий воспроизводит существующее положение при текущем светофорном цикле на объекте апробации. Проектный базовый сценарий включает в себя все те же показатели узла (перекрестка), такие как геометрия и интенсивности транспортных потоков, однако с измененными параметрами светофорного цикла. Проектные сценарии с изменениями в транспортном потоке и количестве полос необходимы для подтверждения устойчивости метода. В таблице 4 приведены сохраняемые и изменяемые показатели существующего и проектных сценариев.

Вместе с тем апробация метода выполнена только для определённых условий, при которых были получены эмпирические данные. Исследование применимости на других видах объектов не проводилось.

Таблица 4 – Сравнение изменяемых данных

Параметр	Проектные по сравнению с исходным
Количество полос, [пол.]	Не изменяется
Интенсивность ТС в час, [авт/ч]	Не изменяется
Интенсивность пешеходов в час, [чел.]	Не изменяется

Продолжение таблицы 4

Длина пешеходного перехода, [м]	Не изменяется
Полная длительность цикла, [с]	Может изменяться
Длительность 1 фазы	Может изменяться
Длительность 2 фазы	Может изменяться

Несмотря на предполагаемую эффективность метода, проверка по условию ожидания пешеходами разрешающего сигнала может не дать существенных изменений в светофорном цикле. При этом, закономерно, что параметры цикла не будут изменяться. Эффективность проверки условий ожидания пешеходами разрешающего сигнала может зависеть от множества факторов, таких как плотность транспортного потока, наличие островков безопасности и другие, не рассматриваемые в методе. Поэтому, на некоторых перекрестках изменения могут быть незначительными, тогда как на других они могут привести к заметным улучшениям. В некоторых случаях изменения в светофорных циклах могут быть менее заметны в краткосрочной перспективе, но со временем могут привести к улучшению общей ситуации на дороге и повышению безопасности.

3.2 Подготовка данных для эксперимента

В качестве объекта для апробации был выбран перекресток Гражданского проспекта и улицы Фаворского (его вид приведен на рисунке 21). Данный перекресток удовлетворяет требованиям апробации методики: перекресток четырехпроходный, в светофорном цикле 2 фазы, трамвайные пути отсутствуют. Входные данные для каждого подхода приведены в таблицах 5-8. На рисунке 22 приведен существующий светофорный цикл для выбранного объекта.



Рисунок 21 – Гражданский проспект - улица Фаворского

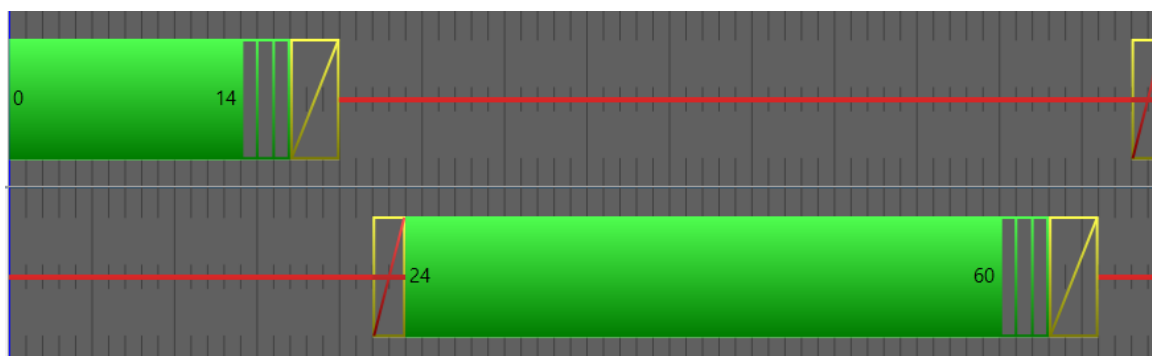


Рисунок 22 – Циклограмма для пересечения Гражданского пр. - ул. Фаворского

Таблица 5 – Исходные данные для Гражданского проспекта со стороны ул. Гидротехников

№ п/п	Наименование входного параметра	Значение
1	Количество полос, [пол.]	4
2	Интенсивность ТС в час, [авт/ч]	1772
3	Интенсивность пешеходов за 15 мин., [чел.]	30
4	Длина пешеходного перехода, [м]	15,3
5	Полная длительность цикла, [с]	68

Таблица 6 – Исходные данные для улицы Фаворского со стороны Старо-муринской ул.

№ п/п	Наименование входного параметра	Значение
1	Количество полос, [пол.]	2
2	Интенсивность ТС в час, [авт/ч]	468
3	Интенсивность пешеходов за 15 мин., [чел.]	15
4	Длина пешеходного перехода, [м]	9,7
5	Полная длительность цикла, [с]	68

Таблица 7 – Исходные данные для Гражданского проспекта со стороны пр. Непокоренных

№ п/п	Наименование входного параметра	Значение
1	Количество полос, [пол.]	5
2	Интенсивность ТС в час, [авт/ч]	1886
3	Интенсивность пешеходов за 15 мин., [чел.]	12
4	Длина пешеходного перехода, [м]	17,8
5	Полная длительность цикла, [с]	68

Таблица 8 – Исходные данные для улицы Фаворского со стороны Гжатской ул.

№ п/п	Наименование входного параметра	Значение
1	Количество полос, [пол.]	2
2	Интенсивность ТС в час, [авт/ч]	425
3	Интенсивность пешеходов за 15 мин., [чел.]	18
4	Длина пешеходного перехода, [м]	11,7
5	Полная длительность цикла, [с]	68

Ниже на рисунке 23 приведена схема пофазного разъезда для данного пересечения.

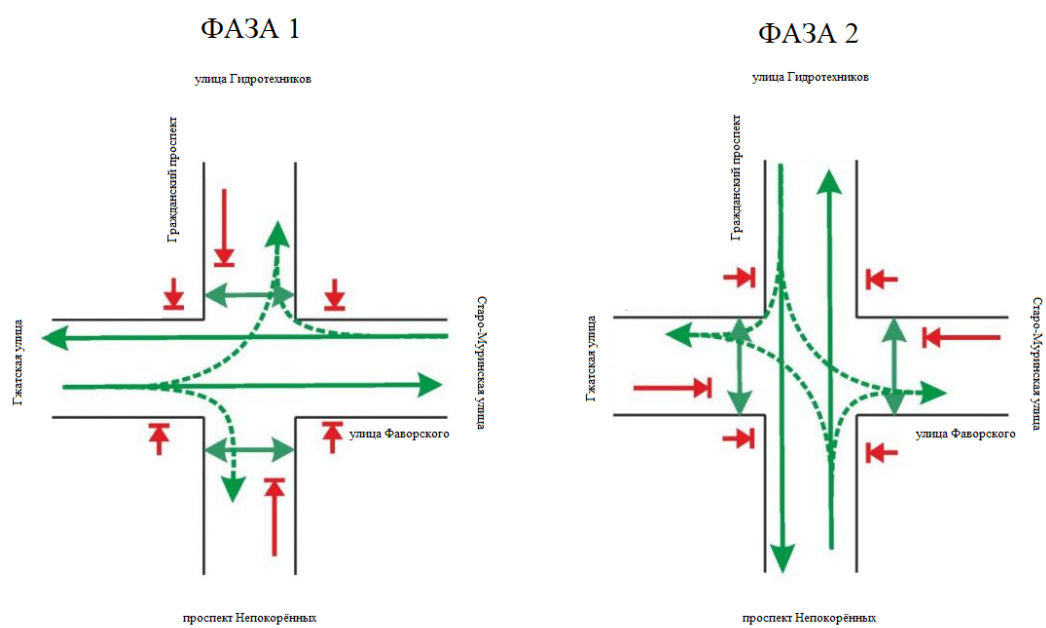


Рисунок 23 – Схема пофазного разъезда

3.2 Применение на сценариях

Для демонстрации использования метода следует предварительно произвести расчет полной длительности цикла и фаз, исходя из интенсивности транспортного движения согласно нормативным документам. Согласно ОДМ 218.6.003–011 [7], был произведен расчет требуемых показателей и получены следующие значения.

1. Расчет промежуточных тактов

В таблице 9 приведены результаты расчетов промежуточных тактов для перекрестка.

Таблица 9 – Результаты расчета промежуточных тактов

Фаза	Расчет t_{ni}	Расчет t_{ni} (пеш)	Значение промежуточного такта
Фаза 1	8	3	8
Фаза 2	10	3	10

2. Расчет потоков насыщения

Результаты расчетов потоков насыщения приведены в таблицах 10-11.

Таблица 10 – Расчет для Гражданского проспект

Направление	Тип полосы движения	Поток насыщения
Со стороны пр. Непокоренных	Смешанный (налево и прямо)	1601,25
Со стороны пр. Непокоренных	Только прямо	1727,25
Со стороны пр. Непокоренных	Направо	1608,38
Суммарный поток насыщения по Гражданскому пр. (со стороны пр. Непокоренных)		4936,88
Со стороны ул. Гидротехников	Смешанный (направо и прямо)	528,50
Со стороны ул. Гидротехников	Только прямо	1543,50
Суммарный поток насыщения по Гражданскому пр. (со стороны ул. Гидротехников)		2072,00

Таблица 11 – Расчет для улицы Фаворского

Направление	Тип полосы движения	Поток насыщения
Со стороны Старо-Муринской ул.	Смешанный (налево, направо и прямо)	1938,14
Суммарный поток насыщения по ул. Фаворского (Старо-Муринской ул.)		1938,14
Со стороны Гжатской ул.	Смешанный (направо и прямо)	2710,46
Суммарный поток насыщения по ул. Фаворского (со стороны ул. Гидротехников)		2710,46

3. Фазовые коэффициенты

Результирующая таблица 12 показывает расчет фазовых коэффициентов для всех направлений. Расчетный фазовый коэффициент для фазы 1 – 0,11, для фазы 2 – 0,47.

Таблица 12 – Фазовые коэффициенты

Направление	Поток насыщения	Интенсивность	Фазовый коэффициент
Гражданский пр. (со стороны пр. Непокоренных)	4936,88	822	0,17
Гражданский пр. (со стороны ул. Гидротехников)	2072,00	964	0,47
Ул. Фаворского (Старо-Муринской ул.)	1938,14	213	0,11
Ул. Фаворского (со стороны ул. Гидротехников)	2710,46	284	0,11

4. Полная длительность цикла и длительности основных тактов

Полная длительность цикла по расчету составляет 76 секунд. Длительность зеленого сигнала для первой фазы – 11 секунд, для второй – 47 секунд.

5. Проверка по пешеходным направлениям

По полученным подсчетам, длительность первой фазы должна составлять минимум 19 секунд, а второй фазы – 15 секунд.

Для проектных сценариев расчеты будут отличаться в пунктах 1-5 в связи с изменениями интенсивности и количества полос. Далее в таблицах 13-15 приведен пересчет.

Таблица 13 – Промтакты для проектных сценариев

Сценарий Фаза	Проектный базовый	Проектный с нагрузкой	Проектный с полосой
	Длительность, с		
1 фаза	8	8	8
2 фаза	10	10	10

Таблица 14 – Потoki насыщения и фазовые коэффициенты для проектных сценариев

Направление	Проектный базовый			Проектный с нагрузкой			Проектный с полосой		
	Поток насыщения	Интенсивность	Фазовый коэффициент	Поток насыщения	Интенсивность	Фазовый коэффициент	Поток насыщения	Интенсивность	Фазовый коэффициент
Гражданский пр. (со стороны пр. Непокоренных)	4936,88	822	0,17	7405,32	1233	0,17	6664,1	822	0,12
Гражданский пр. (со стороны ул. Гидротехников)	2072,00	964	0,47	2072,00	964	0,47	2072,00	964	0,47
Ул. Фаворского (Старо- Муринской ул.)	1938,14	213	0,11	1938,14	213	0,11	1938,1	213	0,11
Ул. Фаворского (со стороны ул. Гидротехников)	2710,46	284	0,10	2710,46	284	0,10	2710,5	284	0,10

Таблица 15 – Проверка длительности по пешеходным направлениям для проектных сценариев

Фаза \ Сценарий	Проектный базовый	Проектный с нагрузкой	Проектный с полосой
	Длительность, с		
1 фаза	19	19	21
2 фаза	15	15	15

Полная длительность цикла и длительность основных фаз совпадает со значениями, полученными в пункте 4.

Далее следует пример расчета согласно вышеизложенному методу для проектного сценария.

6. Проверка длительности основных фаз по времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала

Гражданский проспект со стороны ул. Гидротехников:

Время ожидания от интенсивности ТС, рассчитывается по формуле (12):

$$y = 0,01x + 0,1 = 0,014 \cdot 1772 + 0,11 = 24,92 \text{ с}, \quad (12)$$

где x – приведенная транспортная интенсивность в час.

Гражданский проспект со стороны пр. Непокоренных:

Время ожидания от интенсивности ТС, рассчитывается по формуле (13):

$$y = 0,01x + 0,11 = 0,01 \cdot 1886 + 0,11 = 26,51 \text{ с} \quad (13)$$

В таблице 16 на основании исходных данных перекрестка приведены расчетные значения для каждого из рассматриваемых сценариев.

Таблица 16 – Результаты для проектных сценариев

Время ожидания, с \ Сценарий	Гражданский проспект со стороны ул. Гидротехников	Гражданский проспект со стороны пр. Непокоренных	ул. Фаворского со стороны Старо-муринской ул.	ул. Фаворского со стороны Гжатской ул.
Проектный базовый	24,92	26,51	6,06	6,66
Проектный с нагрузкой	24,92	39,71	6,06	6,66
Проектный с полосой	24,92	26,51	6,06	6,66

В соответствии с методом определения времени ожидания выбирается наименьшее значение. В общем виде расчеты должны удовлетворять следующим условиям:

a = время пешеходного перехода смежной группы сигналов,

b = время проезда для транспортных средств,

c = время ожидания пешеходов.

При этом действительна следующая последовательность действий:

1. Если $a \leq b$ и $b \leq c$, тогда условие соблюдается, иначе следующий шаг
2. Если $a \leq c$, но $b \geq c$, тогда присвоить b значение c , иначе следующий шаг
3. Если $a > c$ и $b > c$, тогда присвоить b и c значение a , иначе следующий шаг
4. Если $a \leq c$, $b < c$, тогда присвоить b и c значение a , иначе следующий шаг
5. Если $a > c$, но $b < c$, тогда присвоить b и c значение a

Таким образом, для перехода Гражданского проспекта во всех базовых сценариях комфортное время ожидания составляет 24,92 сек, а для улицы Фаворского – 6,06 сек. Обе фазы проверяются по алгоритму выше.

Для фазы 1 (улица Фаворского):

$$\begin{cases} a = 19 \\ b = 11 \rightarrow \text{по п. 3 алгоритма } t_{1 \text{ фаза}} = 19 \text{ с} \\ c = 7 \end{cases}$$

Для фазы 2 (Гражданский проспект):

$$\begin{cases} a = 15 \\ b = 47 \rightarrow \text{по п. 2 алгоритма } t_{1 \text{ фаза}} = 25 \text{ с} \\ c = 25 \end{cases}$$

7. Пересчет оптимального соотношения фаз

Оптимальная длительность фаз принимается из расчета длительности основных фаз и удовлетворения условий проверок. Для проектного базового сценария применима следующая длительность цикла, согласно формуле (14):

$$T_{\text{ц}} = t_o + t_{\text{п}} = 19 + 8 + 25 + 10 = 62 \text{ сек.} \quad (14)$$

На рисунке 24 приведена циклограмма.

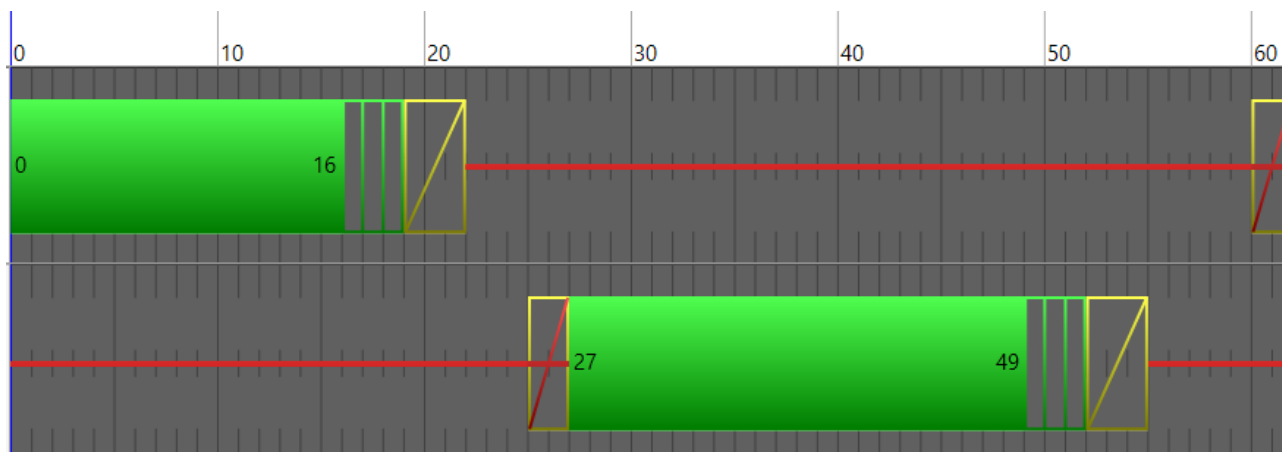


Рисунок 24 – Циклограмма

3.3 Результаты для тестовых данных

Для апробации метода был использован программный продукт PTV Vissim. Данная программа предназначена для моделирования дорожного движения на микроуровне. Vissim позволяет создавать имитационные транспортные модели, которые воспроизводят поведение всех участников движения с учетом их характеристик и взаимодействия, а также транспортной инфраструктуры. Программный продукт Vissim был выбран, так как он позволяет создавать разные сценарии движения, учитывая различные факторы, такие как интенсивность движения, состав потока, поведение участников дорожного движения и т.д. Это дает возможность проверить метод в различных условиях. Вместе с тем, возможно произвести оценку показателей, которые невозможно рассчитать по методике ОДМ, таких как длина очереди и время в пути. Эти показатели позволяют оценить влияние изменения светофорного цикла на транспортную ситуацию и убедиться, что метод не приводит к ухудшению условий для автомобилистов.

В контексте проверки данного метода модель используется для подтверждения того, что цикл, пересчитанный с использованием метода определения комфортного времени ожидания, не приведет к дисбалансу в транспортном движении. Для этого использованы показатели длины затора и среднего времени в пути.

Для оценки эффектов в модели были использованы 2 показателя: длина затора и среднее время в пути. В таблицах 17-22 приведены результаты до и после пересчета цикла для каждого из сценариев по сравнению с исходным.

Таблица 17 – Результаты оценки длины затора для базового сценария

Счетчик затора	Длина Затора до, м	Длина Затора после, м	Изменение
Гражданский пр. (ул. Гидротехников)	6,91	13,19	+6,29
Гражданский пр. (пр. Непокоренных)	5,83	9,43	+3,60
Ул. Фаворского (Старо- Муринская ул.)	6,95	3,23	-3,72
Ул. Фаворского (Гжатская ул.)	16,96	11,14	-5,83

Таблица 18 – Результаты оценки среднего времени в пути для базового сценария

Направление	Время в пути ТС до, с	Время в пути ТС после, с	Изменение
Гражданский пр. (ул. Гидротехников)	20,39	26,10	+5,71
Гражданский пр. (пр. Непокоренных)	20,00	27,23	+7,23
Ул. Фаворского (Старо- Муринская ул.)	77,24	45,46	-31,78
Ул. Фаворского (Гжатская ул.)	46,41	36,72	-9,69

Таблица 19 – Результаты оценки длины затора для базового сценария с нагрузкой

Счетчик затора	Длина Затора до, м	Длина Затора после, м	Изменение
Гражданский пр. (ул. Гидротехников)	6,91	12,97	+6,07
Гражданский пр. (пр. Непокоренных)	5,83	29,90	+24,07
Ул. Фаворского (Старо- Муринская ул.)	6,95	3,23	-3,72
Ул. Фаворского (Гжатская ул.)	16,96	11,14	-5,83

Таблица 20 – Результаты оценки среднего времени в пути для базового сценария с нагрузкой

Направление	Время в пути ТС до, с	Время в пути ТС после, с	Изменение
Гражданский пр. (ул. Гидротехников)	20,39	25,65	+5,26
Гражданский пр. (пр. Непокоренных)	20,00	39,51	+19,51
Ул. Фаворского (Старо-Муринская ул.)	77,24	45,46	-31,78
Ул. Фаворского (Гжатская ул.)	46,41	36,72	-9,69

Таблица 21 – Результаты оценки длины затора для базового сценария с увеличенным количеством полос

Счетчик затора	Длина Затора до, м	Длина Затора после, м	Изменение
Гражданский пр. (ул. Гидротехников)	6,91	13,18	+6,28
Гражданский пр. (пр. Непокоренных)	5,83	7,52	+1,69
Ул. Фаворского (Старо-Муринская ул.)	6,95	2,18	-4,77
Ул. Фаворского (Гжатская ул.)	16,96	11,97	-4,99

Таблица 22 – Результаты оценки среднего времени в пути для базового сценария с увеличенным количеством полос

Направление	Время в пути ТС до, с	Время в пути ТС после, с	Изменение
Гражданский пр. (ул. Гидротехников)	20,39	26,10	+5,71
Гражданский пр. (пр. Непокоренных)	20,00	25,36	+5,36
Ул. Фаворского (Старо-Муринская ул.)	77,24	45,46	-31,78
Ул. Фаворского (Гжатская ул.)	46,41	37,33	-9,08

Анализируя результаты, стоит отметить, что для Гражданского проспекта есть увеличение как длины затора, так и времени в пути. Однако для улицы Фаворского индикаторы уменьшаются. В целом увеличение показателей для Гражданского проспекта нельзя назвать критичными, так как увеличение затора на 24 метра (максимальное значение из всех тестов) соответствует пяти автомобилям, движущимся в потоке. Более того, данный показатель получен при увеличенной нагрузке, что можно считать закономерным.

Данный вид моделирования позволяет оценить задержки и время для ТС, но предсказать процент нарушений для пешеходов таким способом не представляется возможным. Исходя из данных, полученных в ходе социологического опроса, 31,3% отметили, что не будут нарушать при оптимальном времени. Как видно из таблицы 23 [19], риск опасного поведения пешеходов снижается с уменьшением времени ожидания, а значит, можно судить о закономерном снижении количества ДТП, связанных с пешеходами, а следовательно, и о возможных положительных эффектах при применении метода определения комфортного ожидания.

Таблица 23 – Зависимость времени ожидания

Уровень ожидания	Уровень обслуживания	Описание	Время ожидания, с
Низкий	A	Обычно конфликтующего трафика нет	0-5
Средний	B	иногда возникает задержка из-за трафика	5-10
	C	Задержка заметна для пешеходов, но не причиняет неудобств	10-20
	D	Задержка заметна и раздражает, повышается риск опасного поведения	20-30
Высокий	E	Высокая вероятность задержки, вероятно опасное поведение	30-45
	F	Задержка превышает допустимый уровень, высока вероятность того, что пешеход подвергнется риску	≥45

Метод можно считать устойчивым, так как он не меняет в корне суть расчета светофорного цикла согласно ОДМ, однако дополняет его и вносит дополнительный параметр для проверки.

3.4 Выводы

Предложенный метод позволяет оптимизировать длительность светофорного цикла, что, в свою очередь, должно сократить время ожидания для пешеходов на переходах, не приводя к существенному снижению транспортной пропускной способности. В свою очередь, данные моделирования с использованием программного продукта PTV Vissim позволяют оценить целесообразность предложенных изменений в светофорном цикле за счет показателей длины заторов и времени в пути для транспорта. Эффективность метода с точки зрения движения пешеходов подтверждается результатами использования данного метода в целом, с учётом результатов социологического опроса, представленного в главе 2.

Таким образом, применение данного метода может обеспечить более комфортные и безопасные условия для всех участников движения. Однако важно учитывать, что эффективность метода может варьироваться в зависимости от конкретных условий и характеристик каждого перекрестка.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВНЕДРЕНИЮ МЕТОДА

В первую очередь, для внедрения метода определения времени комфортного ожидания разрешающего сигнала пешеходами потребуется внести соответствующие изменения в существующие стандарты. На текущий момент расчет светофорного цикла производится на основе методических рекомендаций по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. В связи с чем рекомендуется изменение применяемого ОДМ 218.6.003–2011 [7] путем включения в методические рекомендации раздела, посвященного расчету комфортного времени ожидания пешеходами разрешающего сигнала. Предлагается добавить следующую формулировку:

«При расчете светофорного цикла необходимо учитывать комфортное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала, определяемое по методу определения комфортного времени ожидания разрешающего сигнала светофора пешеходами в расчете светофорного цикла».

Вместе с тем предлагается включить сам метод, описанный выше.

Одновременно с этим возможна и разработка новых стандартов, которые бы учитывали интересы всех участников дорожного движения, включая пешеходов.

В обоих случаях, согласно описанному ранее методу, потребуется расширение базы исходных эмпирических исследований и построение новых математических моделей. Для этого потребуется анализ существующих светофорных циклов, анализ зависимости параметров метода от ожидания пешеходами разрешающего сигнала на перекрестках. Для проведения масштабной работы потребуется формирование рабочей группы, состоящей из специалистов в области транспортного планирования, урбанистики и безопасности дорожного движения. Эта группа будет отвечать за сбор данных, реализацию нового метода и его адаптацию к различным условиям.

Вместе с тем, для успешного внедрения метода определения комфортного времени ожидания светофорного сигнала необходимо изменить существующий

процесс проектирования и расчетов, провести широкое информирование и обучение специалистов данной области. Потребуется провести семинары для проектировщиков и специалистов по транспортной инфраструктуре, чтобы они могли эффективно использовать новый метод в своей работе.

Ожидаемые эффекты от внедрения нового метода могут включать:

- 1) улучшение безопасности дорожного движения: снижение количества дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов,
- 2) повышение уровня комфорта для пешеходов: уменьшение времени ожидания на переходах, что сделает городскую среду более удобной для передвижения,
- 3) оптимизация транспортного потока: возможное сокращение заторов за счет более сбалансированного распределения времени светофорного цикла между транспортными средствами и пешеходами,
- 4) социальное одобрение: повышение удовлетворенности граждан от использования городской инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была проведена оценка проблемы безопасности дорожного движения с акцентом на комфортное время ожидания пешеходами разрешающего сигнала на регулируемых перекрестках. Исследование показало, что время ожидания на светофорах напрямую влияет на поведение пешеходов и, как следствие, на уровень нарушений правил дорожного движения.

Анализ существующих нормативных документов и зарубежного опыта выявил недостатки в действующих методах расчета светофорных циклов, которые не учитывают интересы пешеходов. На основе собранных данных и социологического опроса был разработан метод определения комфортного времени ожидания, который позволяет оптимизировать светофорное регулирование с учетом параметров конкретного перекрестка.

Результаты апробации предложенного метода на реальных данных показали его пригодность в снижении времени ожидания для пешеходов, что, в свою очередь, может способствовать уменьшению числа дорожно-транспортных происшествий с их участием. Однако инструменты имитационного моделирования не позволяют оценить эффективность с точки зрения снижения риска ДТП. Для достоверных данных об эффективности метода следует провести обширные исследования перекрестков различной типологии и интенсивности, а также дальнейшее наблюдение после применения метода в реальных условиях. Вместе с тем, не отмечается существенного изменения времени в пути или заторов для транспортных средств. Безусловно, внедрение данного метода требует изменений в нормативной базе и методических рекомендациях.

Таким образом, результаты исследования подтверждают актуальность и необходимость дальнейшей работы в направлении оптимизации светофорного регулирования, что будет способствовать повышению безопасности на дорогах и улучшению качества городской инфраструктуры. В будущем следует продолжить исследования в данной области, расширяя базу эмпирических данных и развивая новые подходы к проектированию светофорных объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 02.06.2023) «О Правилах дорожного движения» (вместе с «Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения»)
2. World Health Organization. Global status report on road safety 2018. – Geneva: WHO, 2018. – 200 p.
3. Государственный совет. Расширенное заседание президиума Государственного совета в г. Сочи от 28.09.2020 [Электронный ресурс]. – 28.09.2020. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/64105> (Дата обращения: 19.11.2023)
4. Горбовской А. В., Несмеянов А. А. Обеспечение безопасности пешеходов в условиях дорожного движения //Актуальные вопросы транспортной безопасности. – 2017. – С. 12-17.
5. Национальный стандарт Российской Федерации. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств. [Текст]: ГОСТ Р 52289-2019. - Введ. 2020-04-01. - М.: Стандартиформ, 2020. – 134 с.: ил.
6. Национальный стандарт Российской Федерации. «Дороги автомобильные и улицы. Безопасность движения пешеходов. Общие требования» [Текст]: ГОСТ Р 70716-2023. - Введ. 2023-05-01. - М Система ГАРАНТ, 2023. - 42 с.: ил.
7. ОДМ 218.6.003–2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. М.: ФДА «Росавтодор», 2013. 69 с.
8. Manual H. C. Highway capacity manual //Washington, DC. – 2000. – Т. 2. – №. 1.
9. Diagnostic et aménagements piétons // Berne. – 2019. – №. 1.

10. Бутакова Н. И. О причинах наездов на пешеходов на городских улицах //Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования. – 2012. – С. 235-239.
11. Королёв И. В., Лазарев В. А. Транспортный узел Суворова – Малиновского. Предложения по совершенствованию ОДД //Автомобильный транспорт Дальнего Востока. – 2018. – №. 1. – С. 172-177.
12. Raoniar R., Maurya A. K. Pedestrian red-light violation at signalised intersection crosswalks: Influence of social and non-social factors //Safety science. – 2022. – Т. 147. – С. 105583.
13. Xiong H. et al. The tolerable waiting time: A generalized Pareto distribution model with empirical investigation //Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Т. 137. – С. 106019.
14. Zafri N. M., Rony A. I., Adri N. Analysis of pedestrian crossing speed and waiting time at intersections in Dhaka //Infrastructures. – 2019. – Т. 4. – №. 3. – С. 39.
15. Sucha M. Pedestrians' habits while crossing the road at a former zebra crossing //Социальная психология и общество. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 33-46.
16. Kalatian A., Sobhani A., Farooq B. Analysis of distracted pedestrians' waiting time: Head-Mounted Immersive Virtual Reality application //arXiv preprint arXiv:1903.11812. – 2019.
17. Speisser N. S. et al. Impact of waiting times on pedestrians' and car drivers' behavior at signalized intersections. – 2018.
18. Чалганова А. А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel //СПб.: РГГМУ. – 2022.
19. Amirnazmiafshar E., Onur Tezcan H. An Analysis of Pedestrian Waiting Time at Uncontrolled Crosswalks Using Discrete Choice Model //International Conference on Transportation and Development 2020. – Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2020. – С. 25-38.

20. Тарасов А.Ю., Тарасова И.А. Некоторые аспекты изучения взаимодействия пешеходов и водителей транспортных средств // Вопросы безопасности. 2022. №3.
21. Khayesi M. Vulnerable Road users or vulnerable transport planning? // Frontiers in sustainable cities. – 2020. – Т. 2. – С. 25.
22. Евсеева А. И. Новая городская мобильность: тенденции развития транспортных систем // Государственное управление. Электронный вестник. – 2016. – №. 59. – С. 238-266.
23. Галушко В. Н. Математические модели в транспортных системах. – 2015.
24. Государственная программа Российской Федерации "Безопасные и качественные автомобильные дороги". – Москва: Министерство транспорта Российской Федерации, 2021. – 120 с.
25. Traffic Engineering Handbook. 7th Edition. – New Jersey: Institute of Transportation Engineers, 2016. – 800 p.
26. PTV Group. PTV Vissim [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim> (дата обращения: 13.04.2024).
27. Краткое руководство по выполнению проектов в PTV Vissim 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim> (дата обращения: 13.04.2024).
28. Государственная инспекция безопасности дорожного движения. Официальная статистика [Электронный ресурс]. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 13.04.2025).
29. Koonce P. et al. Traffic signal timing manual. – United States. Federal Highway Administration, 2008. – №. FHWA-HOP-08-024.
30. ГОСТ Р 50597-93. Системы управления дорожным движением. Общие требования [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1993.
31. Заорожный В. Н., Юдин Е. Б. Обзор программ моделирования транспортных потоков //Динамика систем, механизмов и машин. – 2012. – №. 1. – С. 254-257.

32. Горев А.Э., Бёттгер К., Прохоров А.В., Гизатуллин Р.Р. Основы транспортного моделирования. Практическое пособие. — спб.: ООО «Издательско–полиграфическая компания «КОСТА», 2015. — 168 с.
33. Мулеев Е. Ю. Транспортное поведение населения России: краткий отчет о социологическом исследовании //М.: Институт экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ. – 2015. – Т. 37.
34. ГОСТ Р 52282-2004. Системы управления дорожным движением. Общие требования к проектированию [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 2004.
35. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги. Нормы проектирования [Текст]. – М.: Стандартиформ, 1985.
36. Kučera T., Chocholáč J. Design of the city logistics simulation model using PTV VISSIM software //Transportation Research Procedia. – 2021. – Т. 53. – С. 258-265.