
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

УДК: 519.85

DOI:10.30987/2658-6436-2021-2-4-13

А.Н. Архангельский

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ И ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШОГО ГОРОДА

В статье выполнен анализ существующей системы управления на срединных пешеходных переходах на городских улицах и поставлены задачи, требующие дальнейшего развития и решения. Предложена методика расчета оптимального по экономическим соображениям светофорного цикла пешеходного перехода с вызывной кнопкой. Приведен числовой пример расчета для срединного перехода в г. Брянске.

Ключевые слова: автомобиль, пешеходный переход, светофор, моделирование движения, модель СМО.

A.N. Arkhangelsky

TO THE ISSUE OF SIMULATING TRANSPORT AND PEDESTRIAN FLOWS IN A LARGE CITY

The article analyzes the existing control system at middle pedestrian crossings in city streets and sets tasks that require further development and solutions. A method is proposed for calculating the economically optimal traffic light cycle of a pedestrian crossing with a call button. A numerical example of the estimate for the middle crossing in Bryansk is given.

Keywords: car, pedestrian crossing, traffic light, traffic simulation, Service System Model.

Введение

Управление транспортом в условиях большого города – очень сложный процесс, включающий в себя множество регулируемых и нерегулируемых пересечений транспортных потоков, а также пересечений транспортных и пешеходных потоков на регулируемых и нерегулируемых пешеходных переходах. Ситуация дополнительно усложняется многообразием типов автотранспортных средств, дорожными и метеорологическими условиями, геометрической конфигурацией улично-дорожной сети города. Нельзя не отметить присутствие значительной стохастичности при формировании транспортных потоков и пешеходных потоков, что серьезно усложняет построение и реализацию системы управления их движением.

В тоже время высокие темпы автомобилизации и урбанизации непрерывно повышают актуальность и значимость решения задач управления потоками в условиях города.

В научной литературе можно найти большое число работ по поиску решений различных задач в этой области. [1-4]

В практике проектирования применяются мощные программные комплексы, такие как Vissim, AIMSUN, Transyt-7F и другие. По мнению автора этой статьи, не все алгоритмы этих продуктов являются бесспорными, а сами продукты имеют ограниченную доступность по причине их стоимости.

Большинство работ направлено на определение параметров движения транспортных средств на пересечениях дорог, оснащенных системой светофорного регулирования. Фрагментом этой задачи является назначение минимально необходимых интервалов для движения пешеходов, однозначно включенных в общий цикл светофорного регулирования.

Существенно меньшее внимание уделено рассмотрению вопросов регулирования пешеходного – транспортного взаимодействия на срединных пешеходных переходах.

Механизмы управления движением транспорта на срединных пешеходных переходах делятся на два типа.

Первый тип состоит из традиционных пешеходных переходов с нерегулируемым выходом, таких как зебры, пешеходные островки. Они используются для малообъемного движения по местным дорогам.

Второй тип - с активным управление пешеходным потоком.

Управление пешеходных переходов в местах пересечения средних блоков широко используются в большинстве развитых стран. Их можно разделить на три типа:

- пешеходный переход с фиксированным циклом работы светофора;
- pelican crossing;
- puffin crossing.

Пешеходный переход с фиксированным циклом работы светофора - это автономное управление пешеходным сигналом.

Пешеходы могут вызвать зеленую фазу нажав на кнопку. Пешеходный светофор на дальней стороне проезжей части показывает пешеходам, когда можно переходить. Длительность разрешающего сигнала заранее устанавливается в зависимости от ширины пересечения.

Pelican crossing также управляется пешеходами. Когда пешеходы нажимают на кнопку, фаза пешеходного сигнала становится зеленой; и в то же время обнаруживаются приближающиеся транспортные средства. Поскольку пешеходная фаза заканчивается, зеленая фаза меняется с постоянной на мигающую янтарную фазу, которая позволяет автомобилистам ехать, если нет пешеходов, переходящих дорогу.

В последнее время современные Pelican crossing включили в себя систему управления транспортными средствами. Если же приближающихся транспортных средств нет, то пешеходная фаза быстрее загорается зеленым.

Puffin crossing - это обновленная версия Pelican crossing с добавлением детекторов транспорта и пешеходов, реализующий интеллектуальный подход при назначении разрешающих движение интервалов, как для пешеходов и транспортных средств. Добавление детекторов существенно повышает стоимость оборудования таких переходов.

Исследование 2008 г., проведенное по заказу Министерства транспорта Великобритании, показало, что пункты пропуска пассажиров Puffin оказались более безопасными, чем переходы типа Pelican, на них приходится меньшее количество ДТП. Но, к сожалению, четких указания по целесообразности их использования в разных местах отсутствуют [3].

Постановка задачи

Анализ работ в рассматриваемой области позволит выявить ряд вопросов, требующих дальнейшего рассмотрения и поиска новых решений.

Таковыми являются:

1. Отсутствие четкой связи между параметрами системы управления на переходе и параметрами взаимодействующих между собой пешеходных и транспортных потоков.
2. Отсутствие учета влияния соседних объектов управления движением транспортных средств, как-то нерегулируемых и регулируемых пешеходных переходов, светофорных и саморегулирующих систем на пересечениях и примыканиях дорог.

3. Одностороннего подхода к оценке потерь времени пешеходов и водителей,
4. Отсутствие учета расхода топлива на разгон автомобиля после остановки перед пешеходным переходом.

Широко применяемым допущением, используемым при построении математических и имитационных моделей, является гипотеза о том, что пешеходные потоки являются простейшими. Это в свою очередь означает, что случайная величина – интервал между движущимися автомобилями (пешеходами) можно описать экспоненциальным законом распределения вероятности. Такое допущение позволяет получить конечные формулы для расчета ряда важных характеристик потоков. Экспериментальные исследования указывают на несоответствие допущения параметрам реальных потоков, в особенности в условиях стесненного движения в условиях города. Наиболее приемлемым в таких условиях интервал между движущимися автомобилями (пешеходами) нужно описать гамма распределением. В зависимости от значений параметров этого распределения можно получить большое многообразие вариантов для описания реальных потоков.

Но использование такого распределения вероятности оставляет только один вариант получения решений – имитационное моделирование на ЭВМ.

Построение имитационной модели для определения алгоритма управления светофорными объектами на срединном переходе при использовании вызывной кнопки включает следующие этапы:

- получение набора количественных и качественных оценок транспортных и пешеходных потоков;
- моделирование движения транспортного потока с целью получения оценки величины потери времени, обусловленной последовательностью проезда пешеходного перехода;
- моделирование взаимодействия транспортного и пешеходного потоков при различных режимах работы светофорных объектов на переходе;
- количественная оценка финансовых потерь пешеходов и водителей при проезде регулируемого пешеходного перехода.

Рассмотрим процессы реализации каждого из перечисленных этапов с иллюстрацией решения на конкретном примере - рассмотрении вопросов организации работы пешеходного (так называемого срединного) перехода, оборудованного пешеходными и транспортными светофорами. Пример расположения такого перехода приведен на рис. 1.

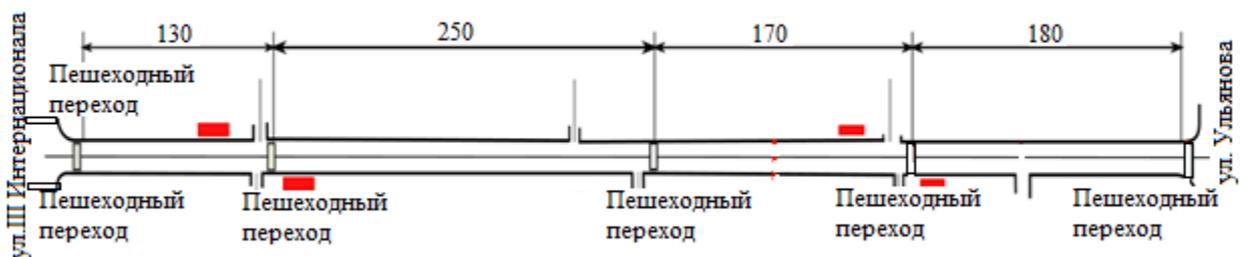


Рис. 1. Схема расположения пешеходных переходов на участке ул. Брянской Пролетарской Дивизии

Объектом рассмотрения является нерегулируемый пешеходный переход и пересечения улиц Ростовская и Брянской Пролетарской Дивизии, на котором уже установлены, но пока не работают транспортные светофоры и пешеходные светофоры. Необходимо разработать алгоритм оптимального управления этими светофорами по критерию минимума совокупных финансовых затрат водителей и пешеходов.

Для выбора способа решения задачи управления светофорными объектами необходимо учесть следующие специфические особенности сформировавшегося на данный момент транспортного процесса:

–регулирующими и формирующими транспортный поток являются транспортные светофоры, установленные на пересечении ул. Ульянова и ул. Брянской Пролетарской Дивизии, с одной стороны, и ул. III Интернационала и ул.22 Съезда КПСС с другой стороны;

–между этими объектами расположены 7 нерегулируемых пешеходных переходов, обозначенные соответствующими дорожными знаками и разметкой «зебра»;

–наличие шести переходов, на которых случайным образом происходит прерывание непрерывного движения транспортного потока и относительно наибольших расстояниях между переходами вызывает переформирование транспортного потока групповой структуры в поток с резко выраженной неравномерной структурой.

Следует отметить три важных момента относительно структуры транспортных потоков:

–распределение интервалов времени между соседними составляющими потока изменяется по длине городской улицы из-за наличия на них регулируемых и нерегулируемых пересечений с транспортными и пешеходными потоками.

–степень влияния этих пересечений существенно зависит от расстояний между ними.

–динамические свойства различных типов транспортных средств не успевают проявиться на относительно коротких отрезках дороги между пересечениями.

Методика расчета оптимальной структуры цикла пешеходного светофора с вызывной кнопкой

Первым этапом в решении поставленной задачи является детальный анализ параметров движения автомобильных потоков и суммарного пешеходного потока.

Со стороны ул. Ульянова автомобильный поток регулируется светофорами на пересечении ул. Ульянова и ул. Брянской Пролетарской Дивизии. Схема пересечения приведена на рис. 2.

Полный цикл светофорного регулирования составляет 119 с. Входящий поток на ул. Брянской Пролетарской Дивизии состоит из трех составляющих:

1. Левоповоротное движение с ул. Ульянова (40 с) (до 17 авто за цикл).
2. Правоповоротное движение с ул. Ульянова (28 с) (до 2 авто за цикл).
3. Прямое движение по ул. Брянской Пролетарской Дивизии (17 с) (1 авто за цикл).

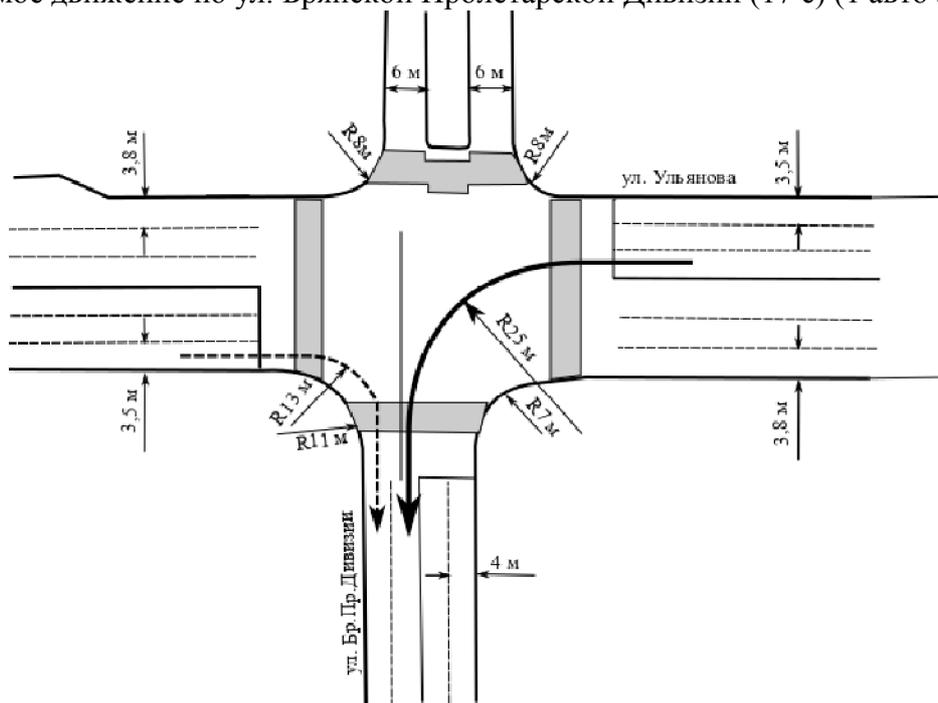


Рис.2. Схема движения на перекрестке

Для выполнения моделирования необходимо получить набор количественных и качественных оценок транспортных и пешеходных потоков. Для этого необходимо выполнить видеофиксацию движения этих потоков в характерные по интенсивности периоды суток. Обработка результатов видеофиксации позволяет оценить структуру потоков по типу транспортных средств, а также обоснованно подобрать теоретический закон распределения вероятности случайной величины – интервала времени между соседними составляющими потока. Результаты обработки данных наблюдений приведены в таблицах 1 - 3.

Таблица 1. Параметры пешеходного потока

Время	Направление	Ср. интервал	Интенсивность	Параметр масштаба	Параметр формы
18-00	Пешеходы (суммарно)	10,49	321	0,0727	0,762

Таблица 2. Параметры транспортных потоков

Время	Направление	χ^2	Параметр масштаба	Параметр формы
8-00	К центру района	11,83	0,1139	0,694
	От центра района	6,33	0,187	1,173
13-00	К центру района	5,44	0,109	0,632
	От центра района	9,22	0,096	0,656
18-00	К центру района	2,74	0,1336	0,640
	От центра района	22,54	0,208	1,414

Таблица 3. Параметры транспортных потоков

Время	Направление движения	Интенсивность, авт/час	Средний интервал, с	Коэффициент вариации
8-00	К центру района	591	6,09 (+0,63)	1,2
	От центра района	574	6,27 (+0,48)	0,92
13-00	К центру района	551	5,80 (+0,73)	1,26
	От центра района	462	6,86 (+0,93)	1,23
18-00	К центру района	649	4,79 (+0,76)	1,25
	От центра района	506	6,79 (+0,33)	1,41

Анализ процессов движения автомобилей стартовой линии на пересечении до рассматриваемого в работе пешеходного перехода выполнен с использованием специальной программы, которая позволяет имитировать движения автомобиля [5].

Программа построена на принципе движения за «лидером». Используемая модель существенно отличается от известной модели «разумного водителя», которая используется в большинстве известных программных продуктов. Отличие заключается во включение в модель регрессионной зависимости реализуемого ускорения конкретного автомобиля (пример такой зависимости приведен на рис. 3), от скорости его движения и способе поддержания безопасной дистанции между автомобилями с учетом времени реакции водителя и величины максимального замедления.

На рис. 4 приведен график скорости автомобиля при старте с нулевой скоростью, разгон на кривой радиуса 25 м до скорости 8 м/с. После проезда кривой продолжается разгон до желаемой скорости 17 м/с (ограничение ПДД) и последующим торможением перед следующим переходом. По этому графику автомобиль достигает скорости 16 м/с за 12,5 с. После стоянки в течение (12 с.) происходит разгон автомобиля до желаемой скорости 17 м/с. Время необходимое для реализации трех режимов движения автомобиля:

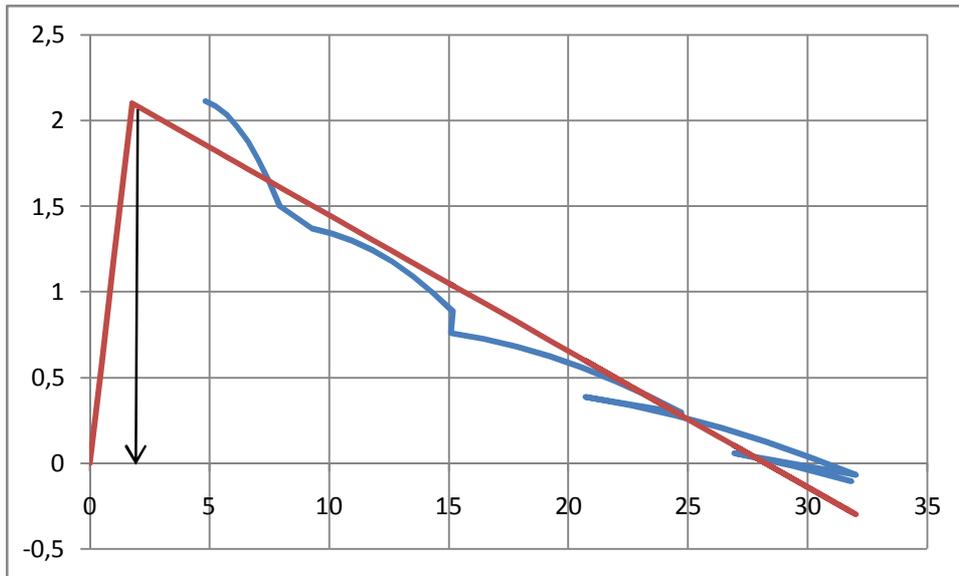


Рис.3. График зависимости максимально реализуемого ускорения от скорости автомобиля ($a=2,2415(-0,0793V)$) Скорость, при которой происходит перехода на основную характеристику $V_p=1,77$. Угловой коэффициент начального участка 1,19, Коэффициент корреляции 0,96)

Результаты расчетов по разработанной модели приведены на рис. 3 - 4.

- торможение со скорости 16 м/с до полной остановки составит 14,2 с;
- стоянка перед переходом в течении 12 с;
- разгон до скорости 17 м/с составит 13,8 с.

Суммарное время для реализации этих режимов составит 40 с.

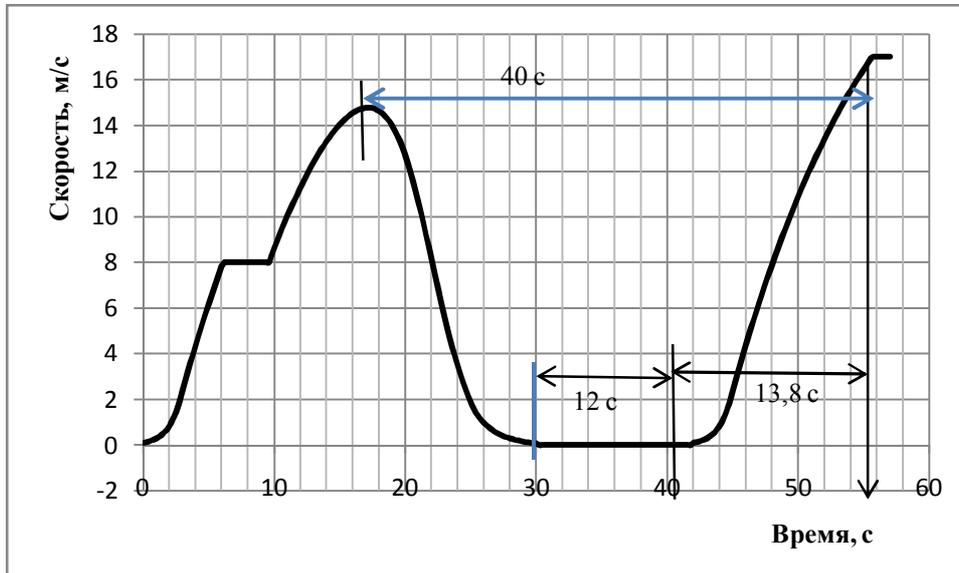


Рис. 4. График скорости автомобиля при остановке на рассматриваемом переходе

Сопоставление графиков пройденных путей автомобилем при остановке перед переходом и без остановки (рис. 5) позволяет определить потери времени одним автомобилем при пересечении пешеходного перехода с остановкой. Они составят 28,4 с.

Проезд перехода с остановкой приводит к дополнительному расходу топлива, необходимого автомобилю для реализации разгона после остановки. Приблизленную оценку этого расхода можно получить следующим способом.

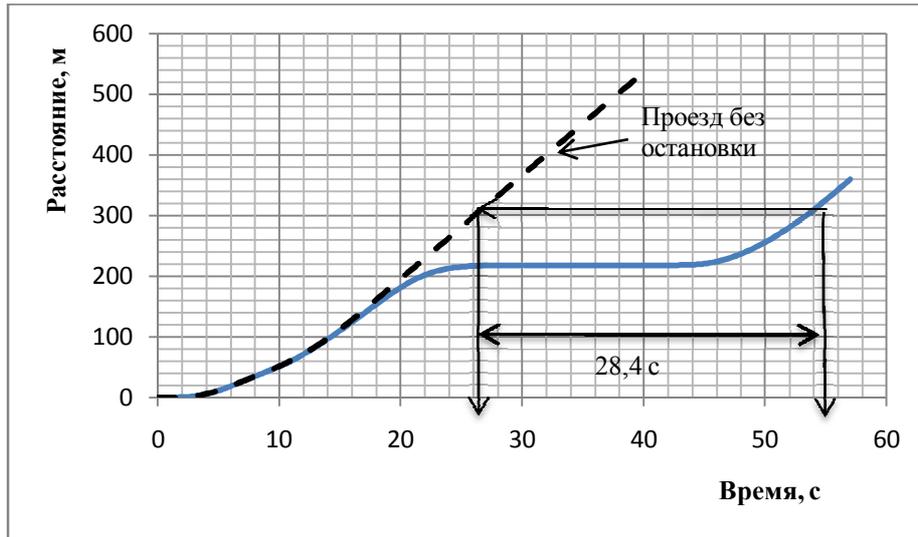


Рис.5. График пройденного пути автомобилем при остановке перед переходом и без остановки

Расход топлива определяется приблизительно по формуле

$$Q_{разг} = \frac{N_{разг} q_{уд} t_{разг}}{3600 \gamma_{дт}}$$

где $N_{разг}$ - мощность двигателя, используемая для разгона, кВт;

$q_{уд}$ - данным удельный минимальный расход топлива, г/ (квт ч);

$t_{разг}$ - время разгона до заданной скорости, с;

$\gamma_{дт}$ - удельный вес для дизельного топлива, кг/м³.

Для определения количества пешеходов, ожидающих возможности выполнить переход через проезжую часть, и величины их суммарной задержки за интервал моделирования разработана программа моделирования одноканальной системы массового обслуживания с фиксированным временем обслуживания (временем горения зеленого сигнала пешеходного светофора). Дополнительный блок этой программы позволяет зафиксировать число задержанных автомобилей и суммарное время задержки.

Режим работы светофорных объектов перехода приведен на рис. 6.

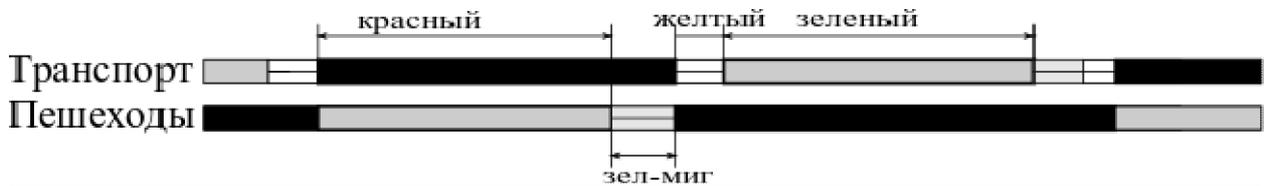


Рис.6. Режим работы светофорного регулирования для переходов с вызывной кнопкой

В качестве примера выполнены расчеты по программе моделирования одноканальной СМО. Результаты принимались как средние значения по 30 прогонам модели. В качестве исходных использовались следующие данные:

- интенсивность движения автомобилей – 1155 авт/час; для моделирования величин интервалов между автомобилями использовалось гамма распределение вероятности с параметрами: масштаба 0,34; формы 0,998; сдвига 0,165;
- интенсивность движения пешеходов – 320 чел/час; для моделирования величин

интервалов между автомобилями использовалось гамма распределение вероятности с параметрами: масштаба 0,0779; формы 0,740; сдвига 0,74.

В качестве объекта для расчета затрат топлива при разгоне после остановки принят микроавтобус FIAT Ducato с дизельным двигателем мощностью 81 квт. Разгон до скорости 17 м/с составляет 13,8 с. Примем, что для разгона используется 75 % мощности двигателя. Стоимость 1 литра топлива 45 руб. По литературным данным удельный минимальный расход топлива составляет для дизелей 195...230 г/(кВт·ч) (примем 210 г/(кВт·ч)).

Удельный вес для дизельного топлива при расчетах можно принимать 860 кг/м³.

$$Q_{разг} = \frac{0,75 \cdot 81 \cdot 210 \cdot 13,8}{3600 \cdot 860} = 0,057 \text{ л.}$$

Стоимость расхода топлива на один разгон составит 2,56 руб.

Стоимость простоя пешехода в течение одной секунды при месячной зарплате 20000руб. составит 20000/25/8/3600=2,78 коп.

Стоимость простоя водителя в течение одной секунды при месячной зарплате 30000 руб. составит 0,0417 руб.

Результаты расчетов приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4. Результаты модельных экспериментов по определению задержек автомобилей и пешеходов на переходе

Вариант	Задержано автомобилей	Задержано пешеходов	Время задержки автомобилей	Время задержки пешеходов	Время полной задержки автомобилей
1+12 с	378	12	2248	3820	12983
1+17 с	348	12	2950	3801	12833
3+17 с	300	69	2577	3983	11097
10+17 с	170	182	1456	4881	6284
20+17 с	71	263	681	7091	2697,4
30+17 с	34	294	294	9921	1259,6
35+17 с	22	303	192	11421	816,8
40+17 с	17	309	154	12950	636,8
50+17 с	7	314	65	16076	263,8

Таблица 5. Результаты расчета совокупных финансовых затрат, вызванных задержками на переходе

Вариант	Стоимость задержки пешеходов, руб/час	Стоимость задержки водителей, руб/час	Суммарная стоимость дополнительного топлива, руб/час	Суммарные затраты, руб/час
1+12 с	106,20	541,40	967,68	1615,28
1+17 с	105,67	535,14	890,88	1531,69
3+17 с	110,73	462,74	768,00	1341,47
10+17 с	135,69	262,04	435,20	832,93
20+17 с	197,13	112,48	181,76	491,37
30+17 с	275,80	52,53	87,04	415,37
35+17 с	317,50	34,06	56,32	407,88
40+17 с	360,01	26,55	43,52	430,08
50+17 с	446,91	11,00	17,92	475,83

На рис. 7 приведены итоговые результаты оценочных расчетов для вариантов алгоритма управления пешеходными и транспортными потоками на рассматриваемом переходе.

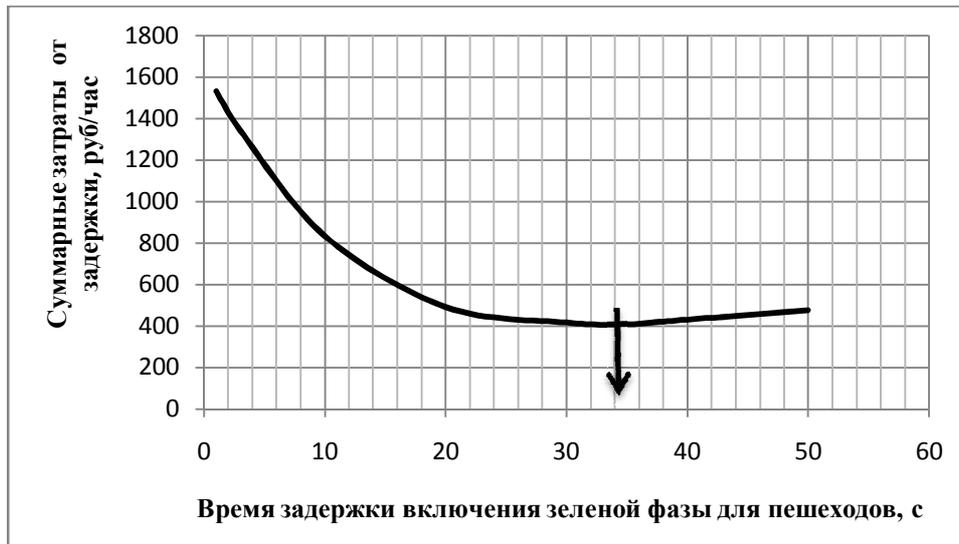


Рис.7. График совокупных потерь водителей и пешеходов в зависимости от величины задержки включения зеленой фазы пешеходного светофора

Таким образом, для заданных в примере исходных данных оптимальное значение величина задержки включения составляет 34 с. Такая величина создает более комфортные условия перехода, чем на ближайшем перекрестке (96 с.).

Заключение

В заключении следует отметить, что предлагаемая методика расчета величины задержки включения зеленой фазы пешеходного светофора позволяет создать в районе перехода благоприятную по безопасности и оптимальную по экономическим условиям дорожную обстановку.

Несомненно, что в систему управления светофорами на пешеходном объекте необходимо включить временной фактор, учитывающий изменения интенсивностей транспортного и пешеходного потоков в течении суток (4-5 разных по величине задержек в сутки).

Дальнейшее развитие системы управления пешеходными и транспортными потоками должно быть направлено на создание координированной системы, которая учитывает влияние светофорных объектов всех видов и назначений, интенсивности движения всех потоков в конкретной геометрической структуре рассматриваемого района улично-дорожной сети города.

Список литературы:

1. Слободчикова, Н. А. Совершенствование организации дорожного движения на основе применения пешеходных вызывных устройств: спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: дис. канд. техн. наук / Слободчикова Надежда Анатольевна; Иркутский государственный технический университет. – Иркутск, 2010. – 174 с.
2. Скульбеденко, Н. А. Методы расчета задержек пешеходов на регулируемых пешеходных переходах / Н.А. Скульбеденко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009 – №3 – С. 76–79
3. Горбачов, П. Ф. Дослідження затримок учасників руху під час перетинання пішоходами вулиць і доріг

References:

1. Slobodchikova, N. A. Sovershenstvovaniye organizatsii dorozhnogo dvizheniya na osnove primeneniya peshekhodnykh vyzivnykh ustroystv: spets. 05.22.10 «Ekspluatatsiya avtomobil'nogo transporta»: dis. kand. tekhn. nauk/ Slobodchikova Nadezhda Anatol'yevna; Irkutskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. – Irkutsk, 2010. – 174 s.
2. Skul'bedenko, N. A. Metody rascheta zaderzhek peshekhodov na reguliruyemykh peshekhodnykh perekhodakh / N.A. Skul'bedenko // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2009 – №3 – S. 76–79
3. Gorbachev, P.F. Doslidzhennya kolebletsya s uchastnikami v ruke na chas otkhodyashchikh

через регульовані пішохідні переходи / Еорбачов П. Ф., Макарічев О. В. Атаманюк Г. В. // Автомобільний транспорт – 2019 – вип. 44 – С.40-49.

4. Hunsanon, T Control Strategy for Vehicular and Pedestrian Midblock Crossing Movements /T Hunsanon, N. Kronprasert, A. Upayokin, P Songchitruksa – Текст : электронний // Transportation Research Procedia – 2017 – 25– С.1672–1689 – URL: <http://www.sciencedirect.com/> (дата обращения: 01.02.2021).

5. Архангельский, А.Н. Моделирование движения автомобиля в транспортном потоке на ЭВМ /А.Н. Архангельский // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении – 2020 – №1(7) – С.26-31.

peshekhodov na ulitsakh i dorogakh cherez regul'yarnyye perekhody / Yeorbachev P.F., Makarichev O.V., Atamanyuk G.V. // Avtomobil'nyy transport - 2019 - VIP. 44 - S.40-49.

4. Khunsanon, T Strategiya upravleniya dvizheniyem transportnykh sredstv i peshekhodov na peresechenii srednikh kvartalov / T. Khunsanon, N. Kronprasert, A. Upayokin, P. Songchitruksa - Tekst: elektronnyy // Transportnyye issledovaniya - 2017 - 25– S.1672–1689 - URL: <http://www.sciencedirect.com/> (data obrashcheniya: 01.02.2021).

5. Arkhangel'skiy, A.N. Modelirovaniye dvizheniya avtomobilya v transportnom potoke na EVM /A.N. Arkhangel'skiy// Avtomatizatsiya i modelirovaniye v proyektirovanii i upravlenii – 2020 – №1(7) – S.26-31.

Статья поступила в редколлегию 26.04.2021.

Рецензент:

канд. техн. наук, доц.,

Брянский государственный технический университет

Филиппова Л.Б.

Статья принята к публикации 13.05.2021.

Сведения об авторах

Архангельский Анатолий Николаевич
канд. техн. наук, доц. УНИТ,
доцент кафедры «Автомобильный транспорт»
Брянский государственный технический университет
Т.+79102322603
E-mail 139aan@mail.ru

Information about authors:

Arkhangel'skiy A.N.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Educational and Scientific Institute of Transport, associate
professor of the department "Automobile transport"
Bryansk State Technical University
E-mail 139aan@mail.ru