

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА Т-ОБРАЗНОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

COMPUTER SIMULATION AND ANALYSIS OF TRAFFIC FLOWS AT THE T-ROAD CROSSINGS

A. Kolomeets

Population's transport mobility is a key factor of any modern megapolis. Statistics confirm an annual growth of vehicles per capita. Consequently, the traffic flow increased significantly on particular road sections. A software simulation will optimize and reduce the density of traffic flows. Purpose: to develop and justify methods to improve a traffic capacity at the T-road crossings using a simulation of traffic flows. Methods: The study tested a simulation and an analysis of traffic and pedestrian flows with AnyLogic. Results: The researchers implemented a software model which imitated traffic and pedestrian flows at the T-road crossings on Zaleskogo Street and Dusi Kovalchuk Street, Novosibirsk City, as an example. The analysis of traffic flows identified a particular section (on Dusi Kovalchuk Street) with an increasing traffic density. The researchers offered technical and organizational measures to optimize traffic and pedestrian flows at the test crossing. As a result, a pedestrian flow on Zaleskogo Street was transferred to another level; a pedestrian overpass was modelled. A pedestrian traffic transfer from Zaleskogo Street made it possible to optimize signal phases of traffic lights at the crossing. The experiments verified effectiveness of suggested methods. With an optimized scheme, traffic flow analysis indicated an increasing traffic capacity on particular road sections and a decreasing traffic density on earlier busy sections of Dusi Kovalchuk Street. Practical relevance: The researchers developed a simulation model; suggested technical and organizational measures are to be used to analyze and to optimize traffic flows at the similar (standard) crossings in the megapolises.

Keywords: Simulation, Traffic Flows, Traffic Capacity, Signal Phases of Traffic Lights.

Коломеец Андрей Олегович

*К.т.н., доцент, Сибирский государственный
университет путей сообщения (СГУПС)
andreykolomeec@yandex.ru*

Аннотация. в современных мегаполисах одним из ключевых факторов качественной жизни является транспортная мобильность населения. Статистические данные подтверждают ежегодное увеличение количества автомобилей на душу населения. Трафик автомобилей на отдельных участках дорожной сети крупных мегаполисов существенно увеличился. Для поиска вариантов оптимизации и снижения плотности транспортных потоков используют имитационное моделирование в современных программных средствах. Цель исследования: разработать и обосновать методы повышения пропускной способности на Т-образном пересечении автомобильных дорог с помощью имитационного моделирования транспортных потоков. Методы: имитационное моделирование и анализ транспортных и пешеходных потоков в среде AnyLogic. Результаты: реализована программная модель, имитирующая транспортные и пешеходные потоки Т-образного пересечения автомобильных дорог на примере пересечения улиц Залеского и Дуси Ковальчук города Новосибирска. В ходе анализа транспортных потоков выявлен участок улицы Дуси Ковальчук с повышенной плотностью движения. Предложены технические и организационные меры по оптимизации транспортных и пешеходных потоков на исследуемом пересечении. На улице Залеского поток пешеходов перенесен в другой уровень — смоделирован надземный пешеходный переход. Перенос пешеходного трафика с улицы Залеского позволил оптимизировать фазы работы светофоров на пересечении. Экспериментально доказана эффективность предложенных методов. В ходе анализа транспортных потоков по оптимизированной схеме установлено увеличение пропускной способности отдельных участков дорожной сети и уменьшение плотности движения на ранее загруженных участках улицы Дуси Ковальчук. Практическая значимость: разработана модель; технические и организационные меры могут использоваться для анализа и оптимизации транспортных потоков на аналогичных (типовых) пересечениях улиц в крупных мегаполисах.

Ключевые слова: имитационное моделирование, транспортные потоки, пропускная способность, фазы светофоров.

Введение

По данным Федеральной службы государственной статистики, за последние десять лет в России парк легковых автомобилей, находящихся в собственности у населения, вырос на 28% [1]. Количественная оценка показывает, что каждый третий житель нашей страны имеет в собственности один автомобиль. В большинстве городов России строительство транспортной инфраструктуры проводилось еще в советское время.

В настоящий момент возникает необходимость увеличения пропускной способности автомобильных дорог и магистралей, но в сложившихся условиях это практически невозможно [2]. Поэтому встает задача по оптимизации транспортных потоков, но при этом существует ограниченное количество оптимизационных решений. Наиболее предпочтительные из них — это разделение транспортных и пешеходных потоков на разных уровнях: строительство подземных или надземных пешеходных переходов. Практика показывает, что любое проект-

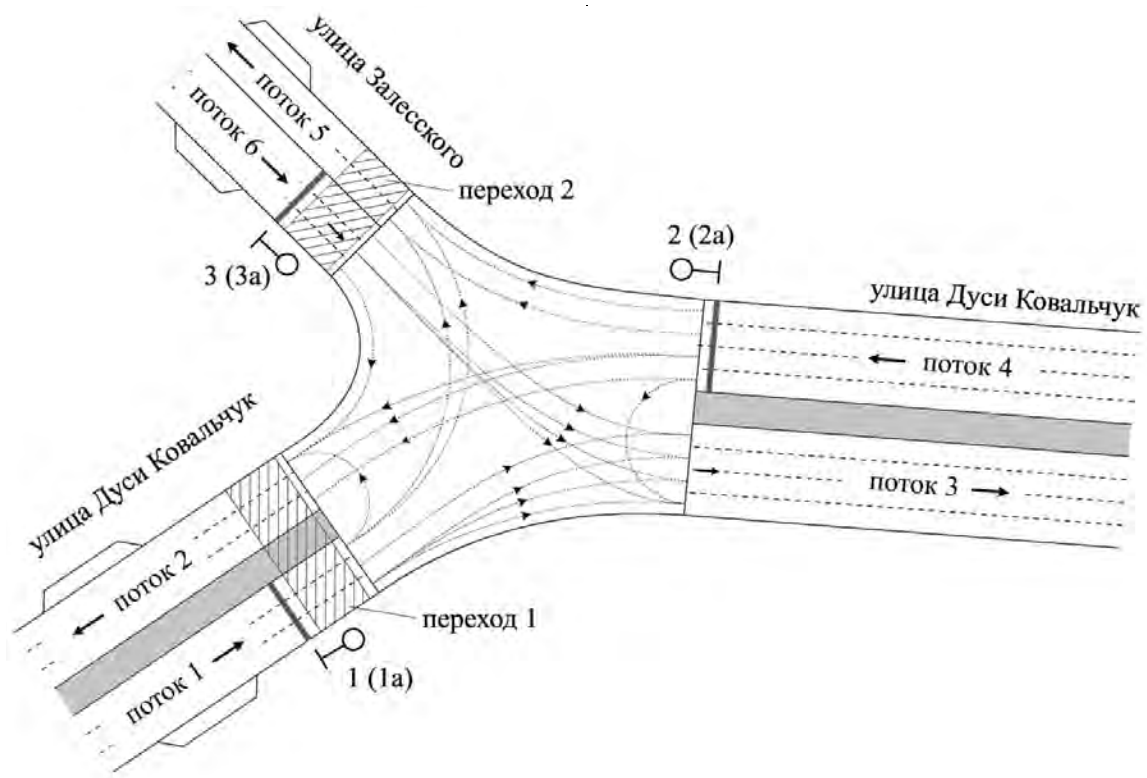


Рис. 1. Схема пересечения улиц Залесского и Дуси Ковальчук

ное решение требует тщательной проработки и анализа ситуации «до» и «после». Ввиду того что транспортные и пешеходные потоки являются сложными техническими и социальными системами, на помощь приходит имитационное моделирование этих систем.

Исследование проведено по данным, полученных при анализе автомобильного и пешеходного трафика на пересечении улиц Залесского и Дуси Ковальчук города Новосибирска.

Характеристика пересечения улиц Залесского и Дуси Ковальчук

Пересечение улиц Залесского и Дуси Ковальчук города Новосибирска является типовым для крупных мегаполисов (рис. 1). Оно представляет Т-образный перекресток с исторически сложившейся схемой организации движения. Около пересечения находится два крупных высших учебных заведения и несколько торговых центров. Ввиду этого на данном пересечении в так называемые «часы пик» имеется повышенный уровень пешеходного трафика. На пересечении курсирует общественный транспорт и проходит трамвайная линия. На обеих улицах расположены остановки общественного транспорта.

Улицы Залесского и Дуси Ковальчук являются многополосными. На рис. 1 представлена схема организации движения транспортных потоков по всем полосам

на моделируемом пересечении. Улица Залесского в направлении движения потока 5 содержит две полосы движения и в направлении потока 6 — три. Крайняя правая полоса улицы Залесского в направлении потока 6 предназначена для поворота на улицу Дуси Ковальчук, по двум остальным полосам осуществляется движение в направлении потока 3 на улицу Дуси Ковальчук. Поворот направо с улицы Залесского на улицу Дуси Ковальчук регулируется дополнительной секцией (светофор 3a), поворот налево — сигналами основного светофора 3 (рис. 1).

Улица Дуси Ковальчук в направлении потоков 3 и 4 содержит по четыре полосы движения. Две правых полосы улицы Дуси Ковальчук в направлении движения потока 4 предназначены для поворота направо на улицу Залесского, две левые — для поворота налево на улицу Дуси Ковальчук в направлении движения потока 2. Крайняя левая полоса потока 4 предназначена также для разворота на улице Дуси Ковальчук. Поворот направо с улицы Дуси Ковальчук на улицу Залесского регулируется дополнительной секцией (светофор 2a), поворот налево — сигналами основного светофора 2 (рис. 1).

В направлении движения потоков 1 и 2 улица Дуси Ковальчук содержит по три полосы движения. Две правых полосы движения улицы Дуси Ковальчук в направлении потока 1 предназначены для движения в направлении потока 3. Такое движение регулируется основным сиг-

Таблица 1. Интенсивность транспортных потоков на пересечении

| Начальный поток | Интенсивность, шт./ч | Конечный поток | Интенсивность, | |
|-----------------|----------------------|----------------|----------------|------|
| | | | шт./ч | % |
| 1 | 2 224 | 3 | 1 928 | 86,7 |
| | | 5 | 273 | 12,3 |
| | | 2 (разворот) | 23 | 1,0 |
| 4 | 1 898 | 5 | 596 | 31,4 |
| | | 2 | 1 200 | 63,2 |
| | | 3 (разворот) | 102 | 5,4 |
| 6 | 774 | 3 | 520 | 67,2 |
| | | 2 | 254 | 32,8 |

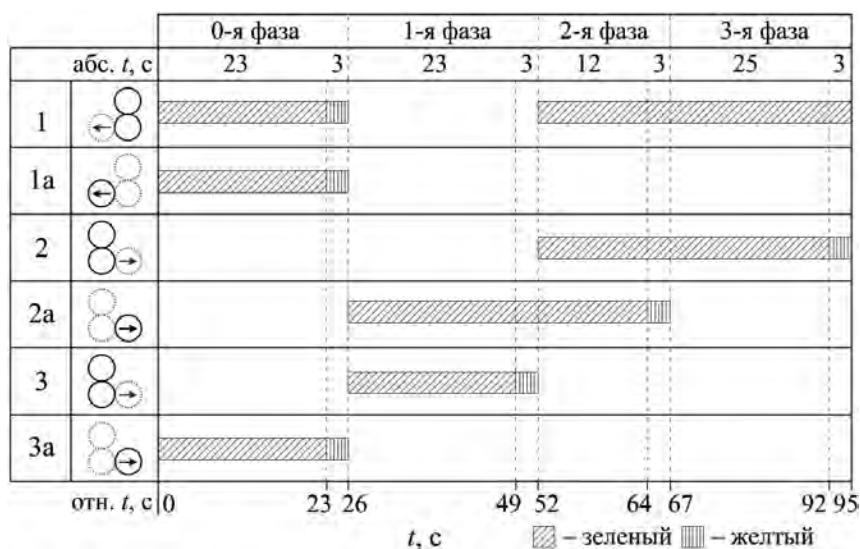


Рис. 2. Диаграмма цикла работы светофоров на пересечении улиц Залесского и Дуся Ковальчук

налом светофора 1 (рис. 1). Крайняя левая полоса движения улицы Дуся Ковальчук в направлении движения потока 1 предназначена для поворота налево на улицу Залесского и разворота. Такое движение регулируется дополнительной секцией (светофор 1a).

Методы моделирования

Моделирование проводилось в специализированном программном обеспечении AnyLogic версии 8.3.3 [3, 4]. Данные по трафику автомобилей получены в ходе записи видеоданных с последующим оцениванием (подсчетом) количества единиц транспорта [5]. Длительность фаз светофоров определялась также визуально с использованием видеоданных. Исследование транспортных потоков проводилось в течение одного часа с 8:00 до 9:00. В это время на пересечении наблюдается наибольшее количество транспортных средств. В ходе мониторинга транспортных потоков были определены показатели интенсивности и представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наиболее интенсивными являются потоки 1 и 4. Они делятся на три направления, поток 6 — на два. Очевидно, что наиболее затруднительными маневрами на моделируемом пересечении являются развороты [6]. Несмотря на малый процент автомобилей, выполняющих такой маневр, они существенно замедляют скорость проезда на пересечении.

В соответствии с действующей схемой организации движения цикл работы светофоров составляет 95 с. Каждый цикл светофоров содержит четыре фазы. На рис. 2 представлена диаграмма фаз работы светофоров в виде длительности разрешающего сигнала (зеленый) и дополнительного (желтый, зеленый мигающий). Запрещающий сигнал (красный) на диаграмме не показан.

В модели принята нумерация фаз работы светофоров от нуля до трех. Длительность желтой фазы (дополнительной) включена в предшествующую ей основную

Таблица 2. Вероятности распределения потоков

| Наименование блока | Номер выходного порта | | | | |
|--------------------|-----------------------|-------|-------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| selectПоток1 | 0,010 | 0,867 | 0,123 | 0 | 0 |
| selectПоток4 | 0,632 | 0,054 | 0,314 | 0 | 0 |
| selectПоток6 | 0,328 | 0,672 | – | | |

фазу. Моделирование работы пешеходных светофоров в исследовании не проводилось.

Наиболее длительная фаза у светофора *1*: она составляет 69 с. Минимальной по продолжительности являются фазы работы дополнительных секций *1а* и *3а*, а также основного светофора *3*: длительность каждой составляет 26 с. Дополнительные секции *1а* и *3а* работают синхронно.

Моделирование дорожной сети в AnyLogic проводилось с помощью нескольких блоков визуальной разметки пространства *Библиотеки дорожного движения* [7]. Дорожное полотно моделировалось объектом *Дорога*, пересечение — *Перекресток*. Кроме этого, в *Библиотеке дорожного движения* имеются объекты *Стоп-линия*, *Автобусная остановка* и *Парковка*.

Попутное направление движения по улице Дуси Ковальчук совпадает с направлением потоков *1* и *3*, а встречное — с направлением потоков *2* и *4*. Попутное направление движения по улице Залесского совпадает с направлением потока *б*, а встречное — с направлением потока *5*. На участках дороги улицы Дуси Ковальчук для потоков *1* и *2* в каждом направлении установлено три полосы движения, а для потоков *3* и *4* — четыре.

По улице Дуси Ковальчук проходит трамвайная линия, по которой курсирует один трамвай с интервалом движения около 25 мин, что составляет менее одного процента в исследуемых транспортных потоках, поэтому в модели принято решение не имитировать движение трамваев. Трамвайные пути смоделированы в виде разделительной полосы шириной 8 м.

Автомобильные потоки в AnyLogic имитируются блоками диаграммы процессов *Car Source*, *Car Move To* и *Car Dispose* из *Библиотеки дорожного движения*. Блок *Car Source* предназначен для появления в модели агента типа *Автомобиль*. Блок *Car Move To* осуществляет передвижение указанного агента до цели движения (дорога, автобусная остановка, парковка) или по определенному объекту (дорога). Блок *Car Dispose*

удаляет агентов из модели [7]. Для организации движения автомобилей по разработанной ранее дорожной сети в модель добавлено три блока типа *Car Move To*. Блок с именем «ТоЗалесского» предназначен для направления движения транспортных потоков, в том числе общественного транспорта, на улицу Залесского в соответствии с направлением потока *5*, блок с именем «ТоДусиКовальчук1» — потока *2*, блок с именем «ТоДусиКовальчук2» — потока *3*.

Для разделения агентов транспортных потоков в AnyLogic в *Библиотеке моделирования процессов* существует два блока: *Select Output* и *Select Output5*. Оба блока распределяют агентов, поступивших на входной порт, на выходные порты с заданной вероятностью. Главным отличием этих блоков является количество выходных портов. Для разделения транспортных потоков в модель добавлены блоки *Select Output* с именами «selectПоток1», «selectПоток4» и «selectПоток6».

Блок «carSourceПоток6» создает поток автомобилей на дороге «Залесского» и помещает их на полосу попутного движения. Блок «carSourceПоток1» создает поток автомобилей на дороге «ДусиКовальчук1» и помещает их на полосу попутного движения. Блок «carSourceПоток2» создает поток автомобилей на дороге «ДусиКовальчук2» и помещает их на полосу встречного движения. Для блока «carSourceПоток6» установлена интенсивность прибытия 774 агента в час, для блока «carSourceПоток1» — 2 224 агента в час и для блока «carSourceПоток2» — 1 898 агентов в час.

После создания агенты по диаграмме процессов направляются на соответствующие входные порты блоков *Select Output* и *Select Output5*. В соответствии с табл. 1 для выходных портов блоков «selectПоток6», «selectПоток1» и «selectПоток4» установлены вероятности, указанные в табл. 2.

После распределения потоки агентов направляются в соответствующие блоки *Car Move To*, то есть следуют по указанной в этих блоках дороге. Автомобили удаляются из модели с помощью блока «carDispose» по достижении конца полосы движения.

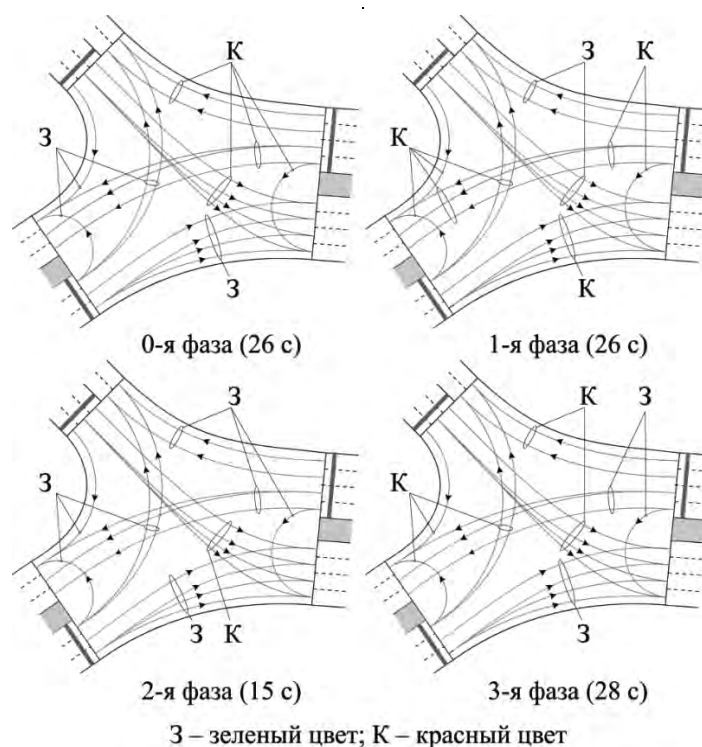


Рис. 3. Состояния соединительных полос пересечения в каждой фазе работы светофоров

Моделирование работы светофоров

На пересечении установлено три основных светофора для регулирования движения автомобильного транспорта. Кроме этого, имеются дублирующие светофоры. Основные светофоры имеют три сигнала: зеленый, желтый и красный. На каждом из них находится дополнительная секция, разрешающая (запрещающая) движение направо, налево и/или развороты. Регулирование движения моделируется блоком *Traffic Light*. Он позволяет управлять всеми стоп-линиями, соединительными полосами или отдельными стоп-линиями выбранного пересечения. Управление стоп-линиями производится в ситуации, когда движение по всем полосам каждой дороги осуществляется в определенную фазу. На исследуемом пересечении, как видно из рис. 3, движение по отдельным соединительным полосам осуществляется в разные фазы светофоров (дополнительных секций). Поэтому блок *Traffic Light* в модели управляет соединительными полосами пересечения.

В соответствии с диаграммой работы светофоров (рис. 2) объекту *Traffic Light* добавлено четыре фазы длительностью 26, 26, 15 и 28 с. Время промежуточных (желтых) фаз включено в длительность основных. Соединительные полосы пересечения имеют два состояния: запрещающее и разрешающее движение. Во время запрещающего состояния соединительные полосы за-

крашиваются в красный цвет (К), во время разрешающего — в зеленый (З). На рис. 3 представлены состояния соединительных полос пересечения в каждой фазе работы светофоров.

После запуска модели наблюдались регулируемые транспортные потоки. Их движение регулировалось в соответствии с фазами светофора. Наиболее опасным маневром, замедляющим скорость движения потока 4 (рис. 1) по двум левым полосам, в модели является разворот автомобилей из крайней левой полосы потока. После моделирования в течение 15 мин наблюдалось скопление транспорта в двух левых полосах.

Движение пешеходов необходимо осуществлять в момент, когда все соединительные полосы на улице Залеского или улицы Дуси Ковальчук находятся в запрещающем состоянии. В соответствии с рис. 3 по улице Залесского движение пешеходов осуществляется в третью фазу, а по улице Дуси Ковальчук — в первую фазу.

Результаты имитационного моделирования транспортных потоков при действующей схеме организации движения

Плотность транспортных потоков оценивалась по количеству агентов, находящихся на каждом сегменте до-

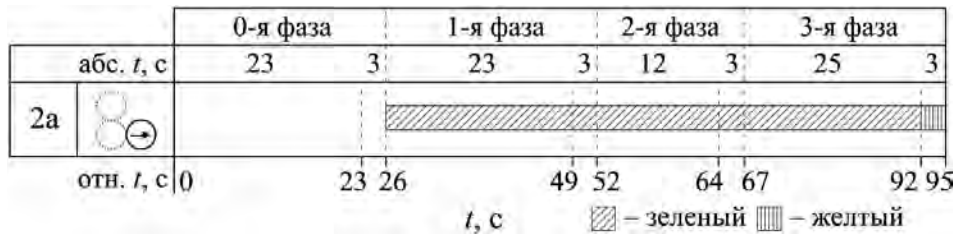


Рис. 4. Оптимизированная диаграмма цикла работы светофора 2а

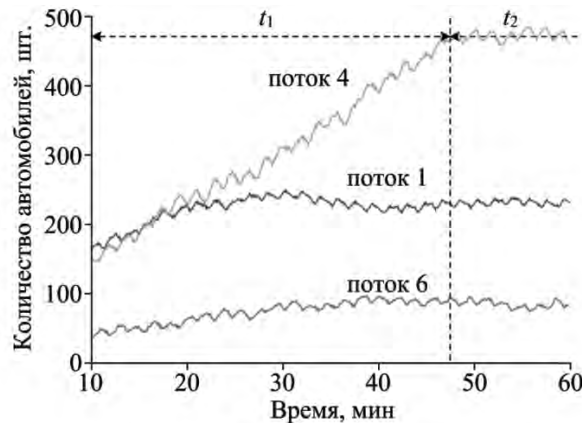


Рис. 5. Графики зависимостей количества автомобилей в потоках от времени до пересечения после изменения схемы организации движения

рожной сети. Таких сегментов в модели шесть. В модель добавлены шесть параметров (счетчиков) для определения количества автомобилей, для каждого потока свой счетчик [8]. Инкрементация счетчиков (на один) выполнялась в момент заезда, а декрементация — в момент выезда автомобиля с соответствующего сегмента дороги. В модели установлено виртуальное время, измеряемое в секундах. Один прогон модели проводился в течение 60 мин [9]. По результатам имитационного моделирования при действующей схеме организации движения построены зависимости количества автомобилей от времени на каждом сегменте дороги. Некоторое время t_1 модель выходит в рабочий режим (процесс накопления агентов). Процесс накопления связан с тем, что в начальный момент времени в модели не содержится ни одного агента и необходимо время для ее наполнения. Поэтому анализ среднестатистических показателей оценивался после периода накопления (интервал времени t_2). В разных экспериментах продолжительность периода накопления различалась и составляла от 20 до 40 мин [9]. Выход на рабочий режим на графиках отображается возрастающим трендом с начала работы модели.

Транспортные потоки до и после пересечения находятся в разных условиях, поэтому в работе они анализировались как две разные группы. После выхода моде-

ли в рабочий режим (момент времени t_1) наблюдалось скопление существенного количества автомобилей в направлении потока 4 непосредственно перед пересечением. Анализ плотности потоков проводился в промежутке моделирования t_2 . Среднее количество транспортных единиц в потоке 4 составляет 608 автомобилей.

В результате визуального наблюдения за моделью установлено, что скопление связано с разворотом автомобилей на улице Дуси Ковальчук. Данный разворот по действующей схеме движения разрешен непосредственно на пересечении и через 100 м при движении далее по улице Дуси Ковальчук. Поэтому при имитационном моделировании предложено изменить схему организации движения на пересечении и запретить разворот потоку 4 на улице Дуси Ковальчук. В результате имитационного моделирования предложенной схемы организации движения выявлено, что среднее количество транспортных единиц в потоке 4 в промежутке времени t_2 составляет 542 автомобиля. Наблюдается снижение плотности потока 4 на 10,8% относительно первоначальной плотности.

В соответствии с табл. 1 из потока 4 поворачивают направо на улицу Залесского только 31,4% автомобилей, но по действующей схеме движения для этого пред-

назначены две из четырех полос движения. Поэтому в исследовании предложено изменить схему движения по соединительным полосам (см. рис. 1 и 3) и установить только одну правую полосу для движения с последующим поворотом направо на улицу Залесского. В результате имитационного моделирования предложенной схемы организации движения выявлено, что среднее количество транспортных единиц в потоке 4 в промежутке времени t_2 составляет 502 автомобиля. Наблюдается снижение плотности потока 4 на 17,4% относительно первоначальной плотности.

Однако сравнение двух последних организационных мероприятий свидетельствует о том, что разница в снижении незначительная [10]. Поэтому в исследовании предложено перенести пешеходный трафик через улицу Залесского на другой уровень. Это позволит оптимизировать фазы работы светофоров за счет исключения фазы для перемещения пешеходов через улицу Залесского. Такое перемещение смоделировано при помощи надземного перехода. В результате удастся продлить длительность разрешающего сигнала светофора $2a$ на 43 с (рис. 4).

В результате имитационного моделирования такой схемы организации движения выявлено, что среднее количество транспортных единиц в потоке 4 в промежутке

времени t_2 составляет 476 автомобилей (рис. 5). Наблюдается снижение плотности потока 4 на 21,7% относительно первоначальной плотности.

Несмотря на продолжительный период накопления, в данном эксперименте для потока 4 он составлял 48 мин, модель адекватно работает в интервале времени t_2 . Это свидетельствует о возможности применения организационно-технических мероприятий и их обоснованности на пересечении улиц Залесского и Дуси Ковальчук города Новосибирска.

Заключение

Разработанная модель позволяет проводить имитационное моделирование, анализ и поиск вариантов по оптимизации транспортных потоков на Т-образных пересечениях автомобильных дорог. Разработанные организационные и технические меры позволили снизить плотность трафика автомобилей наиболее загруженного участка пересечения улиц Залесского и Дуси Ковальчук города Новосибирска на 21,7%. Дальнейшее развитие имитационной модели возможно в направлении поиска организационно-технических решений по изменению пешеходного трафика на других участках исследуемого Т-образного пересечения автомобильных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Транспорт в России. 2018: Стат. сб./Росстат. — М., 2018. — 101 с.
2. Использование информационных технологий для совершенствования организации дорожного движения на участке улично-дорожной сети муниципального образования / Е. Р. Нургалиев, С. С. Попова, М. С. Турпищева, С. Б. Джахьяева // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. — 2016. — Т. 10, № 5. — С. 41–48.
3. Таратун, В. Е. Анализ средств имитационного моделирования для оптимизации транспортных потоков / В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. — 2016. — № 2 (13). — С. 52–59.
4. Изюмский, А. А. Применение имитационного моделирования в сфере моделирования транспортных потоков / А. А. Изюмский, С. Л. Надирян, И. С. Сенин // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). — 2016. — № 1. — С. 52–54.
5. Прошкина, Е. Н. Исследование моделей обнаружения закономерностей в потоке движущихся объектов / Е. Н. Прошкина, И. Ю. Балашова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2018. — Т. 6, № 2 (21). — С. 198–207.
6. Бурдин, И. О. Имитационное компьютерное моделирование критических перекрестков на примере развязки улицы Цимлянкой и восточного обхода в городе Перми / И. О. Бурдин, А. А. Минзуренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2016. — № 3. — С. 32–49.
7. Зув, В. А. Имитационное моделирование дорожного движения на перекрестке в системе AnyLogic / В. А. Зув, Р. А. Демянченко // Современные прикладные исследования: материалы второй национальной научно-практической конференции. — Шахты. 21–25 мая 2018. — С. 307–312.
8. Бабичева, Т. С. Транспортные потоки: математическое и имитационное моделирование / Т. С. Бабичева // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2015. — Т. 11, № 2. — С. 290–296.
9. Шамлицкий, Я. И. Моделирование транспортных потоков в среде AnyLogic / Я. И. Шамлицкий, А. С. Охота, С. Н. Мироненко // Программные продукты и системы. — 2018. — № 3. — С. 632–635.
10. Скворцова, Т. В. Модель распределения транспортных потоков автомобилей / Т. В. Скворцова, С. В. Дорохин, Е. В. Кондрашова // Моделирование систем и процессов. — 2014. — № 3. — С. 28–32.