

УДК 656.13

Д. Н. Самисько, канд. техн. наук**Автомобильно-дорожный институт****ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ НАСЫЩЕНИЯ НА
ОСНОВАНИИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**

Усовершенствована методика определения потоков насыщения на основании моделирования движения транспорта на подходах к территории пересечения.

Ключевые слова: автомобиль, геометрические параметры, компьютерное моделирование, поток насыщения, светофор, траектория движения

Введение

Светофорное регулирование является одним из основных средств обеспечения безопасности дорожного движения. В современных городах постоянно увеличивается количество светофорных объектов и выдвигаются все более серьезные требования к качеству их проектирования.

Поток насыщения является одним из параметров транспортного потока, используемых при проектировании регулируемых пересечений. При этом существующие методики по определению значений потоков насыщения не лишены недостатков (большая трудоемкость, ограниченность применения для вновь проектируемых светофорных объектов, отсутствие учета изменяющихся дорожных условий). В связи с этим возникает потребность в усовершенствовании существующих, либо разработке новых методик определения потоков насыщения. Одним из направлений усовершенствования существующих методик определения потоков насыщения является применение компьютерного моделирования движения транспорта на подходах к территории пересечения.

Анализ публикаций

Методика расчета режимов работы светофорных объектов была разработана английским исследователем Ф. Вебстером (F. J. Webster) [1]. Данная методика основывается на определении соотношения между интенсивностью движения транспортных средств на перекрестке и величиной потока насыщения. Исследуемым параметром при таком методе становится интенсивность движения (N , ед/ч), расчетным параметром – поток насыщения (M_H , ед/ч).

Наиболее точно величину потока насыщения можно измерить непосредственно на местности. Для этого разные современные руководства [2–4] предлагают отличающиеся друг от друга методики его определения в полевых условиях. Анализ этих методик позволяет выявить ряд присущих им недостатков:

- 1) во всех методиках указано, что потоки насыщения нужно определять в периоды, когда на подходе к перекрестку формируются достаточно большие пачки транспортных средств. Конкретное количество автомобилей в пачке не отмечается;
- 2) процесс определения потока насыщения является достаточно трудоемким, т. к. замеры необходимо повторять на протяжении 10–15 светофорных циклов для каждого характерного часа суток и периода года, для которых рассчитывается программа регулирования;
- 3) данные методики не могут быть использованы для перекрестков, которые проектируются заново.

Кроме методик, основанных на измерениях непосредственно на местности, существуют также те, которые используют упрощенные формулы для расчета потоков насыще-

ния. Данные методики и применяемые в них формулы являются универсальными и могут применяться для любых пересечений. В то же время на каждом пересечении наблюдаются определенные дорожные условия (продольные уклоны, радиусы кривых в плане, коэффициенты продольного и поперечного сцепления, коэффициенты сопротивления качению), которые изменяются не только от пересечения к пересечению, а даже на территории одного пересечения могут иметь разные значения. Анализ существующих расчетных методик определения потоков насыщения позволяет выявить их основной недостаток – расчетные значения потоков насыщения не учитывают дорожных условий (например, изменение коэффициента сцепления, коэффициента сопротивления качения и т. д.).

Из всего вышесказанного следует, что существует потребность в новой методике определения потоков насыщения. Одним из вариантов ее реализации может стать определение потоков насыщения на основании компьютерного моделирования движения транспортного потока.

Цель работы

Усовершенствование методики определения потоков насыщения с использованием результатов компьютерного моделирования движения транспортного потока.

Основная часть

Учитывая тот факт, что наиболее точно величину потока насыщения можно определить непосредственно на местности, в качестве базовой для усовершенствования выберем методику определения потока насыщения, изложенную в [5] и основанную на фиксации времени проезда через стоп-линию группы автомобилей, которые накопились перед ней за время горения запрещающего сигнала светофора.

В соответствии с этой методикой поток насыщения определяется по формуле:

$$M_{n_{ij}} = \frac{3600}{n} \cdot \left(\frac{m_1}{t_1} + \frac{m_2}{t_2} + \dots + \frac{m_n}{t_n} \right), \text{ ед/ч}, \quad (1)$$

где n – количество замеров;

m – количество транспортных средств, которые проехали через стоп-линию, ед.;

t – время, которое понадобилось для пропуска транспортных средств, стоявших у перекрестка в ожидании зеленого сигнала, с.

Кроме натуральных наблюдений, время проезда может быть получено на основании компьютерного моделирования движения транспортных средств на подходах к перекрестку. Изложим основные теоретические положения компьютерного моделирования движения транспортных средств на подходах к регулируемому перекрестку.

Предположим, что перед перекрестком на каждом из его подходов на каждой полосе движения стоит бесконечная очередь легковых транспортных средств (в формулу (1) необходимо подставлять количество транспортных средств, приведенных к легковому автомобилю). Целесообразно предположить, что очередь состоит из среднестатистических для региона, где находится перекресток, транспортных средств. Расстояния между транспортными средствами, которые стоят в очереди один за другим, должны быть такими, чтобы обеспечивать возможность объезда одним транспортным средством другого (рисунок 1).

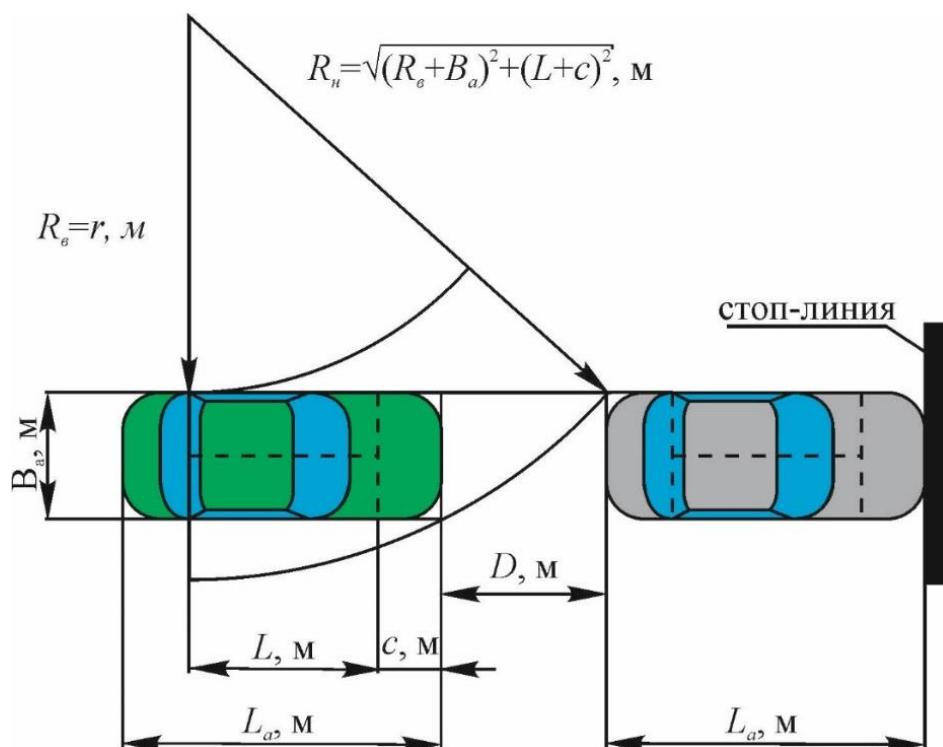


Рисунок 1 – Схема определения дистанции безопасности между автомобилями, которые остановились возле стоп-линии

Исходя из данных рисунка 1, расчетная формула для определения дистанции безопасности имеет следующий вид:

$$D = \sqrt{(r + B_a)^2 + (L + c)^2} - r^2 - L - c, \text{ м}, \quad (2)$$

где r – внутренний радиус поворота автомобиля, м;

B_a – габаритная ширина автомобиля, м;

L – база автомобиля, м;

c – расстояние от переднего бампера до передней оси автомобиля, м.

r , B_a , L , c (задаются в технической характеристике автомобиля).

За время горения запрещающего сигнала светофора перед стоп-линией накапливается очередь транспортных средств.

На рисунке 2 представлена схема размещения перед стоп-линией очереди, состоящей из m автомобилей. При этом последний автомобиль в очереди до пересечения стоп-линии должен проехать расстояние l_m , м.

Следует отметить, что расстояние l_m может состоять из неоднородных по дорожным условиям отдельных участков. Время движения по этим участкам и, соответственно, время проезда расстояния l_m может быть определено с помощью компьютерного моделирования разъезда очереди автомобилей, накопившейся перед стоп-линией.

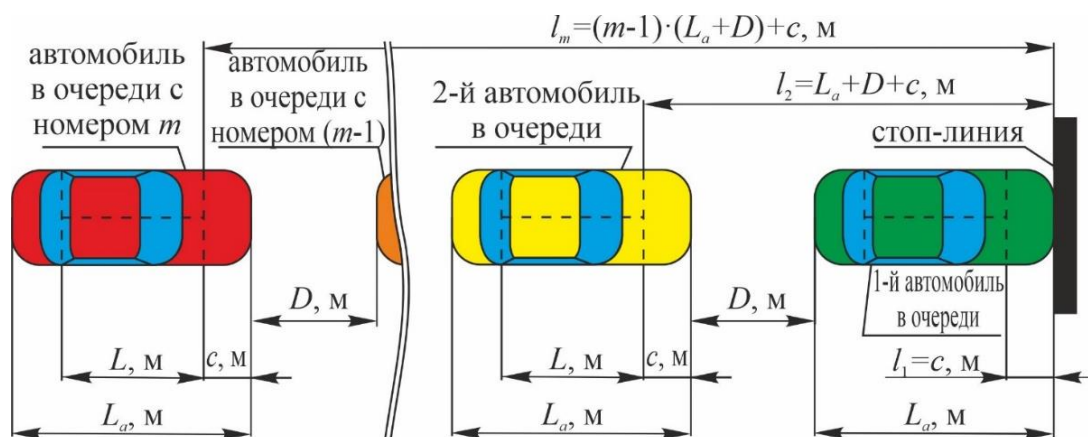


Рисунок 2 – Схема определения расстояния, которое проезжает автомобиль с номером в очереди m

С учетом изложенного существующая зависимость для определения потока насыщения (1) может быть преобразована следующим образом:

$$M_{n_{ij}} = \frac{3600 \cdot m}{(m \cdot t_p + t_{l_m})}, \text{ ед/ч,} \quad (3)$$

где t_p – время реакции водителя на появление разрешающего движение сигнала светофора или время, которое проходит между началом движения предыдущего и следующего за ним автомобилей, c (согласно современным исследованиям это время принимается от 0,3 до 2,5 с [6]);

t_{l_m} – время, которое тратится непосредственно на проезд расстояния l_m (рисунок 2) автомобилем, который имеет номер в очереди m .

В [7, 8] отражены разработанные автором аналитические зависимости и алгоритмы для моделирования движения одиночного автомобиля по характерным однородным участкам. В данной работе эти зависимости и алгоритмы применены для усовершенствования методики определения потоков насыщения. С целью учета особенностей движения автомобилей по улично-дорожной сети в разработанный в [9] алгоритм моделирования максимально возможных скоростей движения дополнительно внесены условия, связанные с определением максимально допустимой скорости из условий отсутствия выезда за границы полосы движения [10] и максимально допустимой скорости по правилам дорожного движения. Схема усовершенствованного алгоритма определения максимально возможных скоростей движения на подходах к стоп-линии представлена на рисунке 3.

В первом блоке алгоритма вводятся исходные данные, необходимые для определения максимально возможных скоростей движения среднестатистического для транспортного потока автомобиля на подходах к стоп-линии.

Во втором блоке алгоритма осуществляется переход от одного характерного однородного участка к другому.

В блоках 3, 5, 7, 9, 11, 14 для каждого характерного однородного участка подхода к стоп-линии осуществляется расчет: максимально допустимой скорости при условии отсутствия бокового скольжения [10], максимально допустимой скорости при условии отсутствия угрозы опрокидывания, [10], максимально допустимой скорости при условии отсутствия заноса передней оси автомобиля [11], максимально допустимой скорости при условии отсутствия заноса задней оси автомобиля [11], максимально допустимой скорости из баланса мощностей автомобиля [7], максимально допустимой скорости из условия отсутствия выезда за границы полосы движения [10].

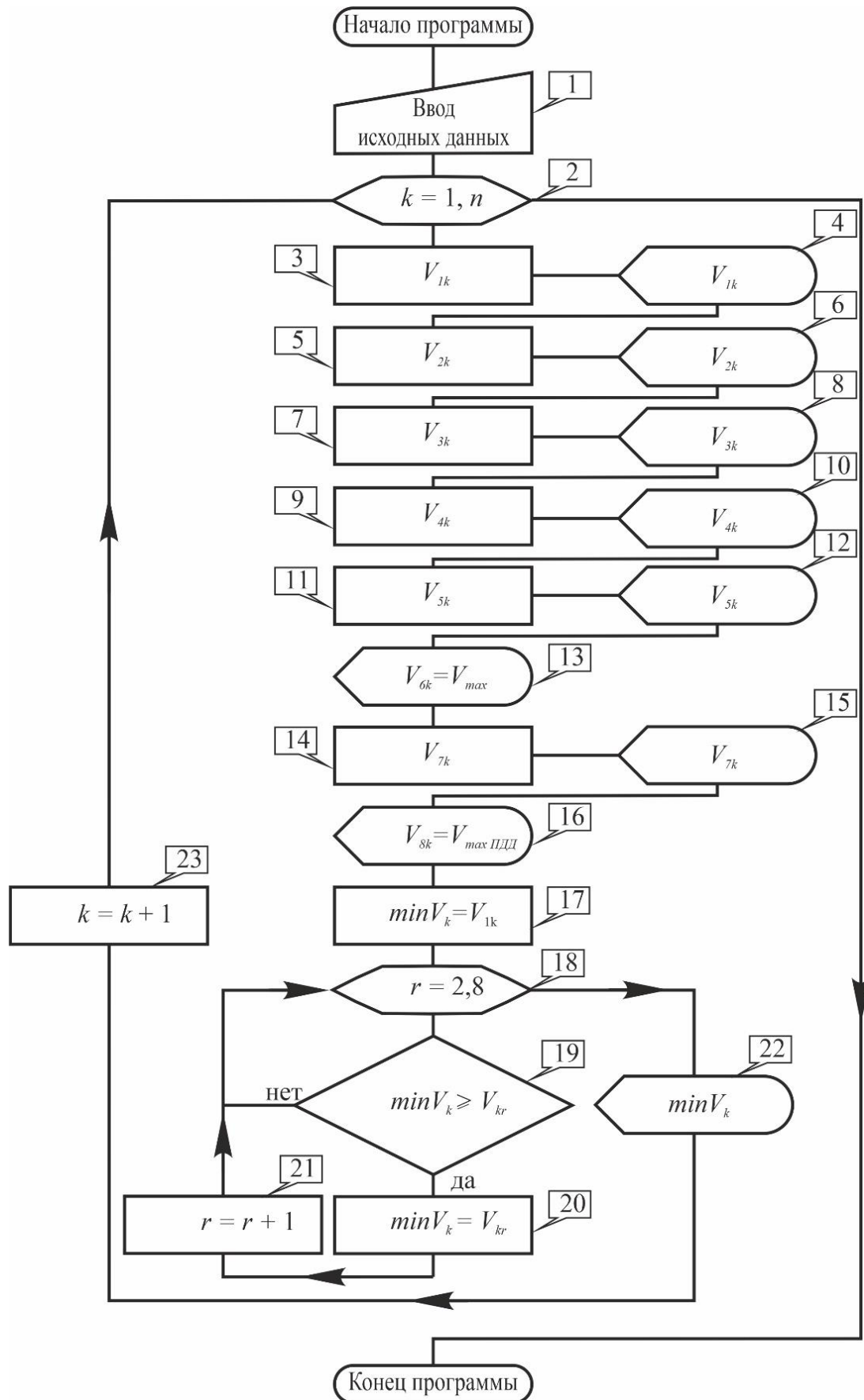


Рисунок 3 – Алгоритм определения максимально возможных скоростей движения автомобиля на подходах к стоп-линии

В блоке 13 задается значение максимальной скорости для среднестатистического автомобиля.

В блоках 4, 6, 8, 10, 12 и 15 выводятся на экран значения скоростей, определенных в блоках 3, 5, 7, 9, 11 и 14.

В блоке 16 задается значение максимально допустимой скорости по правилам дорожного движения.

В блоках 17–22 из всех рассчитанных и принятых для каждого характерного однородного участка скоростей определяется минимальная.

В блоке 23 осуществляется переход к следующему характерному однородному участку подхода к перекрестку.

Основываясь на алгоритмах определения максимально возможных скоростей движения автомобиля на подходах к стоп-линии (рисунок 3), а также алгоритмах моделирования процесса дорожного движения автомобиля по характерным однородным участкам маршрута [7, 8], в среде программирования Delphi с помощью языка программирования Object Pascal была разработана компьютерная программа «Расчеты скоростей и времени движения».

Целью создания этого программного продукта являлось моделирование движения автомобилей на подходах к территории перекрестка и определение времени их движения.

Программный продукт разработан с учетом таких ограничений:

- подход к перекрестку и его территория разбиты на характерные участки в зависимости от условий движения по ним (наличие продольных и поперечных уклонов, кривых в плане, коэффициентов продольного и поперечного сцепления колеса с дорогой);

- определение времени движения автомобилей осуществляется с учетом изменения скоростей их движения на отдельных характерных участках [11], к тому же скорости на каждом характерном участке определяются путем их моделирования, учитывая технические характеристики автомобилей, условия дорожного движения, длину k -го характерного однородного участка, максимально возможные ускорения и замедления автомобилей и значения их скоростей на предыдущих и следующих характерных однородных участках;

- ускорения автомобилей j , m/c^2 , моделируются для каждого характерного однородного участка подхода к территории перекрестка. Ускорения автомобиля на k -м характерном однородном участке равняется расчетному ускорению на этом участке $a_{расч.k}$, которое определяется во время моделирования скоростей движения на отдельных характерных однородных участках.

В программе предусмотрена возможность представления результатов моделирования как в табличном, так и в графическом виде.

Все исходные данные и результаты моделирования могут быть сохранены в виде электронной таблицы Microsoft Office Excel для дальнейшего практического анализа.

Принимая во внимание результаты моделирования движения среднестатистического автомобиля на подходах к стоп-линии, становится возможным усовершенствование методики определения потоков насыщения.

Изложим основные этапы усовершенствованной методики определения потоков насыщения:

1. Выбор среднестатистического для транспортного потока автомобиля и сбор исходных данных о его технических характеристиках в соответствии с перечнем, приведенным на рисунке 4.

2. Сбор исходных данных о дорожных условиях, сложившихся на территории пересечения и каждом из подходов к нему.

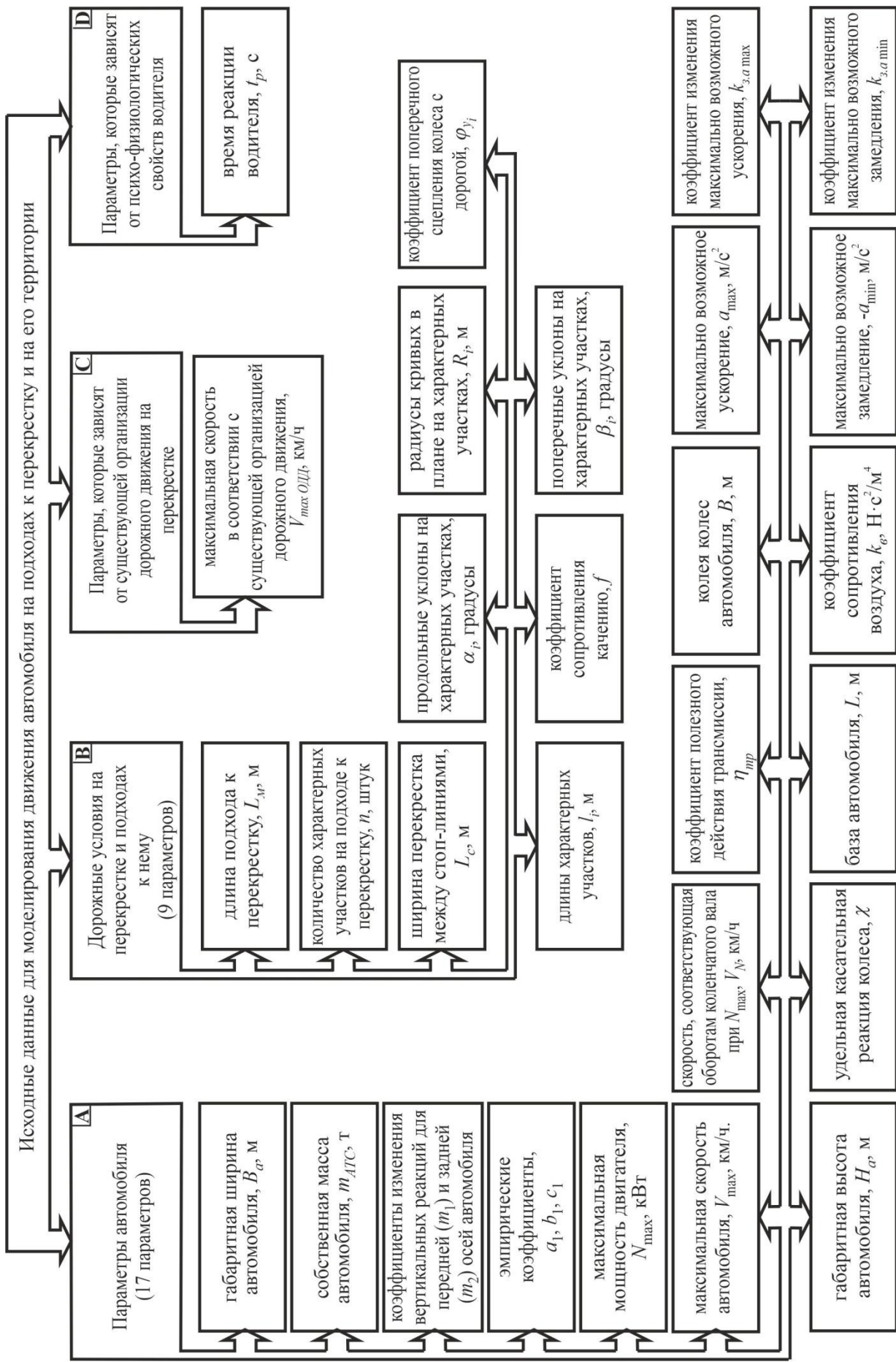


Рисунок 4 – Исходные данные для моделирования движения автомобиля

3. Исходные данные о дорожных условиях на подходе к перекрестку необходимо собирать на расстоянии, которое является достаточным для размещения очереди из 15 среднестатистических для транспортного потока автомобилей. Именно такое количество автомобилей, по мнению авторов [1], является достаточно длинной очередью для определения потока насыщения.

4. Моделирование движения среднестатистического автомобиля на подходах к перекрестку с помощью компьютерной программы «Расчет скорости и времени движения».

В результате моделирования для каждой полосы каждого подхода к территории перекрестка становится известно время, затрачиваемое на пересечение стоп-линии 15-м автомобилем, стоящим в очереди на запрещающий сигнал светофора. При моделировании учитываются дорожные условия, технические характеристики среднестатистического для транспортного потока автомобиля, существующая (или предлагаемая) организация дорожного движения на перекрестке и психофизиологические особенности водителя.

5. Расчет значений потоков насыщения для каждой полосы каждого подхода к перекрестку с использованием зависимости (3). При этом получаем смоделированное значение потока насыщения для транспортного потока, движущегося в прямом направлении $M_{H \text{ прямо}}$, ед/ч.

6. Расчет значений потока насыщения по зависимости [1]:

$$M_H = M_{H \text{ прямо}} \cdot \frac{100}{a + 1,72 \cdot b + 1,25 \cdot c}, \text{ ед/ч}, \quad (4)$$

где a , b , c – доли прямо-, лево- и правоповоротных транспортных средств, осуществляющих движение с одной полосы, %.

При этом получаем смоделированное значение потока насыщения для транспортного потока, содержащего транспортные средства движущиеся прямо, направо и налево.

7. В случае наличия на перекрестке транспортного потока, движущегося только в направлениях прямо, направо или налево, следует ограничиться расчетами по зависимости (3).

Таким образом становится возможным определять потоки насыщения без проведения большого количества наблюдений за транспортным потоком. Кроме того, данная методика применима не только для существующих, но и для вновь проектируемых перекрестков.

Апробация теоретических положений проводилась на трех перекрестках со светофорным регулированием в городе Горловке: перекресток улицы Интернациональной с улицей Минина и Пожарского, перекресток проспекта Ленина с улицей Остапенко и перекресток улицы Кузнецова-Зубарева с улицей Молодежной (результаты моделирования приведены в таблице 1).

Во время исследования для каждого перекрестка в каждом направлении и в каждой фазе регулирования определялись:

- дорожные условия на подходах к перекрестку и на его территории;
- интенсивности движения транспортных средств и состав транспортного потока;
- потоки насыщения путем натурных наблюдений по методике, изложенной в [5], и на основании моделирования движения среднестатистического для транспортного потока автомобиля на подходе к перекрестку.

Адекватность смоделированных значений потоков насыщения экспериментально установленным оценивалась при помощи t -критерия Стьюдента [12]. В результате расчетов установлено, что расчетное значение критериев Стьюдента ($t_p = 0,323$) меньше, чем табличное значение ($t_T = 2,1098$), установленное для уровня значимости 0,05.

Таким образом установлено, что усовершенствованная методика определения потоков насыщения на основании моделирования движения транспортного потока может применяться на практике.

Таблица 1 – Результаты моделирования времени разъезда очереди

№ по порядку	Схема перекрестка	Обозначение полосы	Время разъезда очереди из 15 автомобилей, ч.	Смоделированный поток насыщения для прямого направления, ед/ч.	Смоделированный поток насыщения, ед/ч.	Поток насыщения, определенный экспериментально, ед/ч.
Перекресток улицы Интернациональной с улицей Минина и Пожарского						
1		A1	0,00717	2092	1798	1742
2		A2	0,00717	2092	1872	1929
3		B1	0,00717	2092	2043	2160
4		B2	0,0073	2055	1174	1200
5		C1	0,00748	2060	1730	1688
6		D1	0,00719	2086	1669	1636
7		D2	0,0072	2092	1337	1385
Перекресток проспекта Ленина с улицей Остапенко						
8		A1	0,00717	2092	1790	1742
9		A2	0,00717	2092	2092	2077
10		B1	0,00717	2092	2092	2077
11		B2	0,00717	2092	1539	1543
12		C1	0,00717	2092	1334	1317
13		C2	0,00717	2092	1196	1125
Перекресток улицы Кузнецова-Зубарева с улицей Молодежной						
14		A1	0,00717	2092	2092	2160
15		A2	0,00717	2092	1971	1929
16		B1	0,00717	2092	1818	1862
17		B2	0,00717	2092	2092	2160
18		C1	0,0094	1594	949	931

Заклучение

Предложена усовершенствованная методика для определения потоков насыщения, основанная на компьютерном моделировании движения среднестатистического для транспортного потока автомобиля на подходе к перекрестку и его территории. Моделирование движения автомобилей осуществляется в разработанной автором компьютерной программе «Расчет скорости и времени движения». В отличие от существующих, усовершенствованная методика позволяет учитывать дорожные условия на подходах к перекресткам и на их территориях. Применение усовершенствованной методики позволит повысить качество проектирования регулируемых перекрестков.

Список литературы

1. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – Москва : Академкнига, 2005. – 279 с. – ISBN 5-94628-111-9.
2. Handbuch fuer die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS 2001) // Forshungsgesellschaft fuer Strassen und Verkehrswesen. – Koeln, Januar, 2002.
3. Highway Capacity Manual 2000 // Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA. – 2000. – 1134 p.
4. Teply, S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections / S. Teply, D. I. Allingham, D. B. Richardson [et al.] // Committee Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. – 2-e ed. – 1995. – 122 p.
5. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. – Москва : Стройиздат, 1974. – 97 с.
6. Гудков, В. А. Безопасность транспортных средств (автомобили) / В. А. Гудков, Ю. Я. Комаров, А. И. Рябчинский, В. Н. Федотов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2010. – 431 с. – ISBN 978-5-9912-0090-5.
7. Самісько, Д. М. Моделювання процесу дорожнього руху транспортного засобу *i*-ю характерною однорідною ділянкою маршруту / Д. М. Самісько // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2011. – № 3. – С. 38–46.
8. Самісько, Д. М. Алгоритм моделювання процесу дорожнього руху транспортного засобу / Д. М. Самісько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 1/4(55). – С. 43–50.
9. Куниця, А. В. Алгоритм моделювання процесу перевезень з урахуванням його багатofакторного дослідження / А. В. Куниця, Д. М. Самісько // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2010. – № 2(11). – С. 64–70.
10. Афанасьев, Л. Л. Конструктивная безопасность автомобиля / Л. Л. Афанасьев, А. Б. Дьяков, В. А. Иларионов. – Москва : Машиностроение, 1983. – 212 с.
11. Сахно, В. П. Автомобілі : Тягово-швидкісні властивості та паливна економічність / В. П. Сахно, Г. Б. Безбородова, М. М. Маяк, С. М. Шарай. – Київ : КВІЦ, 2004. – 174 с. – ISBN 966-7192-55-5.
12. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с. – ISBN 5-9221-0707-0.

Д. Н. Самісько

Автомобільно-дорожній інститут

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

Определение потоков насыщения на основании компьютерного моделирования движения транспортного потока

Предложена усовершенствованная методика для определения потоков насыщения, основанная на компьютерном моделировании движения среднестатистического для транспортного потока автомобиля на подходе к перекрестку и его территории.

Данная методика, в отличие от существующих, учитывает дорожные условия, сложившиеся на территории перекрестка и подходах к нему, а также технические характеристики среднестатистического для транспортного потока автомобиля.

Предложенное моделирование движения автомобилей осуществляется в разработанной автором компьютерной программе «Расчет скорости и времени движения».

Применение усовершенствованной методики позволит повысить качество проектирования регулируемых перекрестков.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что усовершенствованная методика может быть применена на практике.

АВТОМОБИЛЬ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПОТОК НАСЫЩЕНИЯ, СВЕТОФОР, ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ

D. N. Samisko

Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Determination of Saturation Flows Based on the Computer Simulation of the Traffic Flow

The improved technique for determining saturation flows, based on the computer simulation of the automobile average traffic flow on the way to the intersection and its territory is proposed.

This technique, unlike existing ones, takes into account the road conditions prevailing at the intersection and approaches to it, and also specifications for the automobile average traffic flow.

The proposed simulation of the vehicular traffic is carried out in the computer program «Calculation of the Movement Speed and Time» developed by the author.

The use of the enhanced technique will improve the design quality of regulated intersections.

As a result of experimental studies, it is determined that the improved technique can be applied in practice.

AUTOMOBILE, GEOMETRIC PARAMETERS, COMPUTER SIMULATION, SATURATION FLOW, TRAFFIC LIGHTS, MOTION PATH

Сведения об авторе:

Д. Н. Самисько

SPIN-код: 6088-4257

Телефон: +38 (071) 318-99-61

Эл. почта: sdn1982@yandex.ru

Статья поступила 21.04.2020

© Д. Н. Самисько, 2020

Рецензент: А. Н. Дудников, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»