



Методы определения потока насыщения автотрассы



Алексей БОРОВСКОЙ
Alexey E. BOROVSKOY

Анастасия ШЕВЦОВА
Anastasia G. SHEVTSOVA



Боровской Алексей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия.

Шевцова Анастасия Геннадьевна – аспирант кафедры «Организация и безопасность движения» Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия.

Рассмотрены используемые в стране методы определения потока насыщения при расчете режима работы светофорного регулирования на автомобильных трассах города. Предложен новый способ математической оценки искомой величины с целью улучшения качества дорожной сигнализации. Осуществлена проверка инновационной модели на реально существующем уличном пересечении и организовано внедрение полученного результата в рамках взаимодействия с муниципальными структурами Белгорода.

Ключевые слова: автомобильное движение, поток насыщения, светофорный объект, режим работы, базовая величина, эффективность использования.

Автомобилизация в Российской Федерации проходила в последнее время рекордными темпами – всего за пять лет обеспеченность транспортной техникой выросла со 169 до 228 машин на тысячу жителей (+34,9%) [1], а в Белгородской области – со 160 до 213 автомобилей (+33,1%). Если же учесть тот факт, что достигнутый уровень еще далек от европейского (более 400 машин), то станет понятно, какой при этом сохраняется немалый и вполне реальный потенциал роста.

Что касается такого показателя, как протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием, то хотя он за последние пять лет в Белгородской области незначительно возрос – с 2287,2 до 2359,4 км (+3,1%) [2], повышение уровня автомобилизации намного опережает рост обеспеченности автомобильными дорогами.

1.

Увеличение интенсивности движения в условиях исторически сложившейся застройки городов приводит к возникновению все новых транспортных проблем. Особенно они заметны в центральных частях больших городов, в частности Белго-

рода. Здесь происходит значительный рост транспортных задержек, образуются очереди и заторы, что приводит к снижению скорости сообщения, повышенному расходу топлива из-за постоянной череды «троганий» и «торможений», изнашиванию узлов и агрегатов транспортных средств.

Помимо этого очень остро стоит проблема организации и безопасности движения, которая должна рассматриваться в системе «водитель – автомобиль – дорога – среда» (ВАДС). Совершенствование автомобиля идет по линии предотвращения дорожно-транспортных происшествий (использование регулируемых тормозов, диафрагирующих неслепящих фар, устройств бортового контроля режима движения и др.) и уменьшения последствий аварий (подушки безопасности, травмобезопасные стекла, ремни безопасности и др.).

Глобальной задачей при решении проблемы безопасности движения следует считать создание новой транспортной системы с изоляцией пешеходов от транспортных средств (планировка дороги в разных уровнях, строительство альтернативных проездов, пешеходных тоннелей, увеличивающих скорость транспортного потока на 30–40%, снятие движения в отдельных частях города и т. п.), но такая задача почти невозможна для давно сложившихся городов с устоявшейся архитектурно-планировочной средой.

Другим направлением решения рассматриваемой проблемы является полная автоматизация управления движением, при которой автомобили снабжаются радарными и бортовыми компьютерами, а дороги имеют устройства, передающие информацию о состоянии и режимах городских маршрутов перемещения граждан. Организационные мероприятия способствуют улучшению качества движения и повышению уровня комфорта на уже существующей улично-дорожной сети (УДС). И особая роль здесь принадлежит внедрению технических средств: дорожных знаков и дорожной разметки, приборов и аппаратуры светофорного регулирования, уличных ограждений и направляющих устройств. При этом светофорное регулирование остается одним из основных средств обеспечения безопасности движения на перекрестках.

2.

При установке светофорного объекта (СО) встает вопрос о способе использования его в управлении (регулировании), то есть об обеспечении воздействия на тот или иной объект с целью улучшения его функционирования. На сегодня известно два таких способа:

1. Адаптивное управление подразумевает под собой обратную связь между средством управления (светофор) и объектом управления (транспортный поток), в основном оно осуществляется специальными устройствами сбора информации – детекторами транспорта (ДТ).

2. Жесткое управление, которое не подразумевает под собой связи между средством и объектом управления. При таком виде регулирования необходимо разработать несколько программ светофорной сигнализации на базе расчетных значений интенсивностей движения в различные периоды времени в течение дня.

Многие города (Москва, Санкт-Петербург, Омск, Воронеж и др.), производя постоянный мониторинг транспортной сети, используют адаптивное управление. В Белгороде, несмотря на большое количество дорожных пересечений, оборудованных СО, применяется жесткое управление, при этом разработан не просто один набор программ регулирования (ПР), который действует на протяжении всего года, а целая группа подобных наборов программ для различных месяцев года, дней недели. Каждая ПР включает несколько режимов работы, их количество определяется технической характеристикой дорожного контроллера (ДК). Расчет режима производится по классической методике, разработанной Ф. Вебстером (F. J. Webster), которая основывается на определении соотношения между интенсивностью движения транспортных средств на перекрестке и величиной потока насыщения [4]. Исследуемым параметром при таком методе становится интенсивность движения (N), расчетным параметром – поток насыщения (M_n), чье значение будет меняться в зависимости от ряда факторов:

1. *Ширины полосы проезжей части ($B_{пч}$)*, м. Расчет будет производиться по формуле 1, математический смысл которой заключается в том, что при увеличении ширины





проезжей части будет увеличиваться и поток насыщения. Так, при расширении на 1 м величина вырастет на 525 ед./ч:

$$M_{\text{нпрям}} = 525 \cdot B_{\text{пч}} \quad (1)$$

2. *Продольного уклона, %о.* В зависимости от него изменяется расчетное значение потока насыщения, каждый процент уклона на подъеме снижает значение, а на спуске увеличивает на 3%.

3. *Доли прямо (а), лево- (b) и правоповоротных (с) ТС, осуществляющих движение с одной полосы, %.* Расчет будет производиться по формуле 2, если соблюдается условие того, что доля поворотного потока составляет более 10%:

$$M_n = M_{\text{нпрям}} \cdot \frac{100}{a + 1,72b + 1,25c} \quad (2)$$

4. *Радиуса поворота (R), м.* Расчет осуществляют по формуле 3, математический смысл которой заключается в том, что в зависимости от увеличения радиуса поворота значение потока насыщения будет соответственно расти в среднем на каждый метр закругления на 3–5%:

$$M_{\text{итов}} = \frac{1800}{1 + \frac{5,25}{R}} \quad (3)$$

3.

Исследования, проведенные Национальной академией наук в Вашингтоне и фигурирующие в оценках магистральной производительности (НСМ 200), предлагают использовать в расчете единую формулу (4), которая учитывает при расчете M_n следующие показатели и характеристики:

1. Базовый поток насыщения ($M_{\text{баз}}$), ед./ч. В расчет берется постоянное число, равное 1900 ед./час.

2. Количество полос (n). Принимается за количество полос в каждом рассматриваемом направлении.

3. Ширина полосы проезжей части ($B_{\text{пч}}$), м. Минимальное значение 2,5 м, при котором коэффициент (F_w) равен 0,87; 3,0 м $\rightarrow F_w = 0,93$; 3,5 м $\rightarrow F_w = 0,99$; 4,0 м. $\rightarrow F_w = 1,04$.

4. Доля грузового транспорта, %. При увеличении процента грузового транспорта значение коэффициента (F_{hv}) снижается на 0,01. Так, 1% грузового транспорта $\rightarrow F_{hv} = 0,99$; 2% $\rightarrow F_{hv} = 0,98$; ... 5% $\rightarrow F_{hv} = 0,95$.

5. Продольного уклона, %о. Каждые 2% уклона снижают коэффициент (F_g) на 0,01. Так, 1% уклона $\rightarrow F_g = 1,00$; 3% уклона $\rightarrow F_g = 0,99$; 5% уклона $\rightarrow F_g = 0,98$.

6. Количество парковок в час (F_p). Данная величина понимается как коэффициент, значение которого уменьшается с увеличением величины парковок, 1 парковка/ч $\rightarrow F_p = 0,89$; 10 парковок/ч $\rightarrow F_p = 0,85$.

7. Количество остановившихся автомобилей (АО). На каждые два автомобиля, совершивших остановку, происходит снижение коэффициента F_{bb} на 0,01, 1АО $\rightarrow F_{bb} = 0,99$; 3 АО $\rightarrow F_{bb} = 0,98$; 5АО $\rightarrow F_{bb} = 0,97$.

8. Тип зоны, в котором расположен перекресток, коэффициент F_a : центральная зона $\rightarrow F_a = 0,9$; другая зона $\rightarrow F_a = 1,0$.

9. Использование полос, коэффициент F_{lu} . Предполагается равномерное использование полос, коэффициент не меняет своего значения и остается всегда равным 1.

10. Направление движения, коэффициент F_{lt} , F_{rt} . Прямое движение $\rightarrow F_{lt} = 1,00$; левоповоротное движение $\rightarrow F_{lt} = 0,95$; правоповоротное движение $\rightarrow F_{rt} = 0,85$.

11. Влияние пешеходного движения на левоповоротные маневры, коэффициент F_{lpb} , и правоповоротные маневры – коэффициент F_{rpb} . Влияние пешеходного движения отсутствует $\rightarrow F_{lpb} = 1,00$, $F_{rpb} = 1,00$; незначительное $\rightarrow F_{lpb} = 0,95$, $F_{rpb} = 0,95$; среднее $\rightarrow F_{lpb} = 0,90$, $F_{rpb} = 0,90$, значительное $\rightarrow F_{lpb} = 0,85$, $F_{rpb} = 0,85$.

$$M_n = M_{\text{баз}} \cdot n \cdot F_w \cdot F_{hv} \cdot F_g \cdot F_p \cdot F_{bb} \cdot F_a \cdot F_{lu} \cdot F_{lt} \cdot F_{rt} \cdot F_{lpb} \cdot F_{rpb} \quad (4)$$

Показатели и характеристики, указанные ранее, используются в программах моделирования систем регулирования дорожного движения при формировании и оптимизации планов управления сигналов светофора, таких, как Transyt-7FR [5].

В опубликованных статьях [3] было подробно рассмотрено понятие потока насыщения и предложено учитывать при расчете следующие показатели:

1. Состав потока автомобилей (L –легковые, G –грузовые, P –пассажирские), %.

2. Класс легкового автомобиля в зависимости от габаритной длины (A , B , C , D , E , F), м.

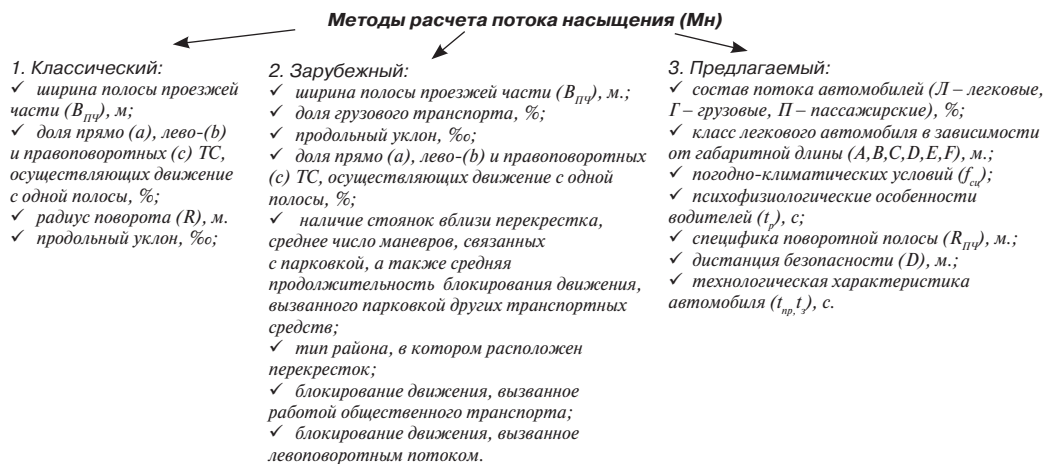


Рис. 1. Классификация методов расчета потока насыщения.

- 3. Погодно-климатические условия (f_{cl}).
- 4. Психофизиологические особенности водителей (t_p), с.
- 5. Специфику поворотной полосы ($R_{пч}$), м.
- 6. Дистанцию безопасности при выполнении маневра (D), м.
- 7. Технологическую характеристику автомобиля ($t_{пр}, t_3$), с.

4.

С учетом отмеченного при движении прямо и использовании описанных показателей расчет потока насыщения может быть сведен к формулам 5–10.

- Определение динамического габарита, м:

$$L_{\theta} = L_a + D, \tag{5}$$

где L_a – габаритная длина легкового автомобиля определенного класса, м.;

D – дистанция безопасности до впереди идущего автомобиля, м.

- Определение дистанции безопасности до впереди идущего автомобиля, м.:

$$D = T * g + (g^2 / 2 * j_3), \tag{6}$$

где T – время торможения, с;

g – скорость движения автомобиля, м/с;

j_3 – величина установившегося замедления, м/с².

- Определение времени торможения:

$$T = T_1 + T_2 + 0,5 * T_3, \tag{7}$$

где T_1 – время реакции водителя, с ($T_1 = 0,75$ с);

T_2 – время срабатывания тормозного привода, с ($T_2 = 0,35$ с);

T_3 – время нарастания замедления, с ($T_3 = 0,15$ с).

- Определение времени прохождения сечения дороги, с:

$$t_{nc} = L_{\theta} / g. \tag{8}$$

- Определение потока насыщения, ед/ч:

$$M_n = 3600 / t_{nc}. \tag{9}$$

Для поворотного движения значение потока насыщения будет определено по формулам 5–9 – с учетом поворотной специфики и используя формулы 10–11.

- Определение динамического габарита при повороте автомобиля:

$$L_{\theta пов} = R_{пов} * \angle пов, \tag{10}$$

где $R_{пов}$ – радиус поворота транспортных средств, м; $\angle пов$ – угол поворота, рад.

- Определение угла поворота:

$$\angle пов = \arcsin \left(\frac{L_{\theta}}{R_{пов}} \right), \tag{11}$$

где L_{θ} – динамический габарит, м.

5.

Условно методы расчета потока насыщения можно разделить на три (см. рис. 1), которые включают в себя схожие и различные параметры транспортного потока и характеристики рассматриваемого пересечения:

1. Классический.
2. Зарубежный.
3. Предлагаемый.

При использовании каждого из трех методов для расчета светофорного цикла



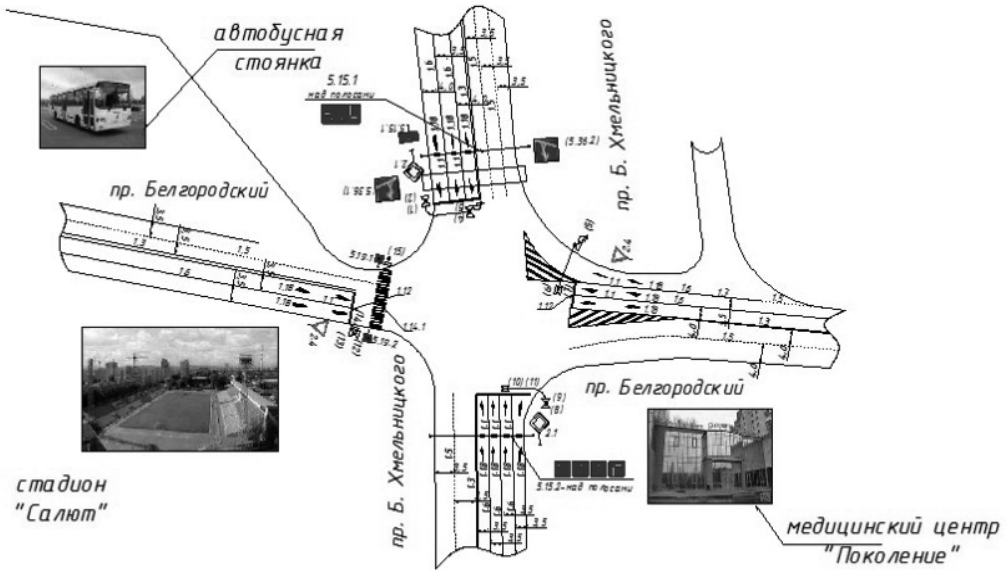


Рис. 2. Геометрическая схема пересечения пр. Б. Хмельницкого и пр. Белгородского.

встает вопрос о длительности разрешающего такта, а именно — какова будет его временная характеристика и как она повлияет на движение транспортного потока. Произведем расчет для СО наиболее нагруженного пересечения в Белгороде: проспект Б. Хмельницкого — проспект Белгородский (см. рис. 2).

Взятое пересечение является классическим, поскольку имеет четыре въезда и четыре выезда. Для дальнейшего упрощения описываемых действий каждому въездному пути присвоен свой порядковый номер, каждой въездной полосе присвоен порядковый подномер (см. рис. 2).

1ВН — первое въездное направление, здесь осуществляется движение в сторону пр-та Б. Хмельницкого, поток ТС идет по основной магистрали города от «Аэропорта» в центр города по трем полосам.

2ВН — второе въездное направление — в сторону пр-та Белгородского, основной поток ТС движется из зоны «Центрального рынка» к пр-ту Б. Хмельницкого. Тоже по трем полосам.

3ВН — третье въездное направление — в зону пр-та Б. Хмельницкого, поток ТС идет по основной магистрали города со стороны его центра к «Аэропорту». Движение организовано по четырем полосам.

4ВН — четвертое въездное направление — это движение по двум полосам в рай-

он пр-та Белгородского с преобладанием потока со стороны «Стадиона» в сторону пр-та Б. Хмельницкого и «Центрального рынка».

Натурное исследование пересечения проводилось с 5 по 25 мая 2012 года по заказу МБУ «Управление Белгорблагоустройства» администрации Белгорода. В ходе него были получены геометрические характеристики пересечения и данные по интенсивности и составу транспортного потока. Расчет производился для дневного «пикового» времени, которое на этом участке наблюдается с 12.00 до 13.00. Поток насыщения был определен по каждому въездному направлению в отдельности методом суммирования значений каждой полосы.

1. Определение длительности цикла при использовании классического метода расчета M_n . Значение потока насыщения для каждого въездного направления: 1ВН → $M_n = 5573$ ед./ч; 2ВН → $M_n = 5481$ ед./ч; 3ВН → $M_n = 6955$ ед./ч; 4ВН → $M_n = 3675$ ед./ч.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 88 с; длительность фазы 1 $T_{ф1} = 48$ с; фазы 2 $T_{ф2} = 20$ с; фазы 3 $T_{ф3} = 20$ с.

2. Определение длительности цикла при использовании зарубежного метода расчета M_n . Значение потока насыщения для каждого въездного направления: 1ВН → $M_n = 5606$ ед./ч; 2ВН → $M_n = 5511$ ед./ч; 3ВН → $M_n = 7167$ ед./ч; 4ВН → $M_n = 2947$ ед./ч.

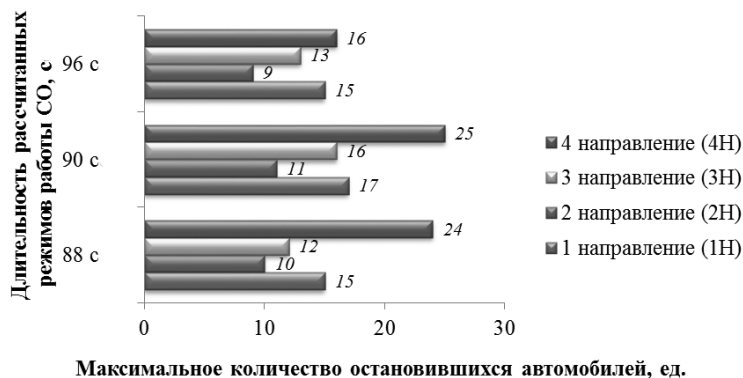


Рис. 3. Гистограмма зависимости количества остановившихся автомобилей от длительности полученных режимов работы.

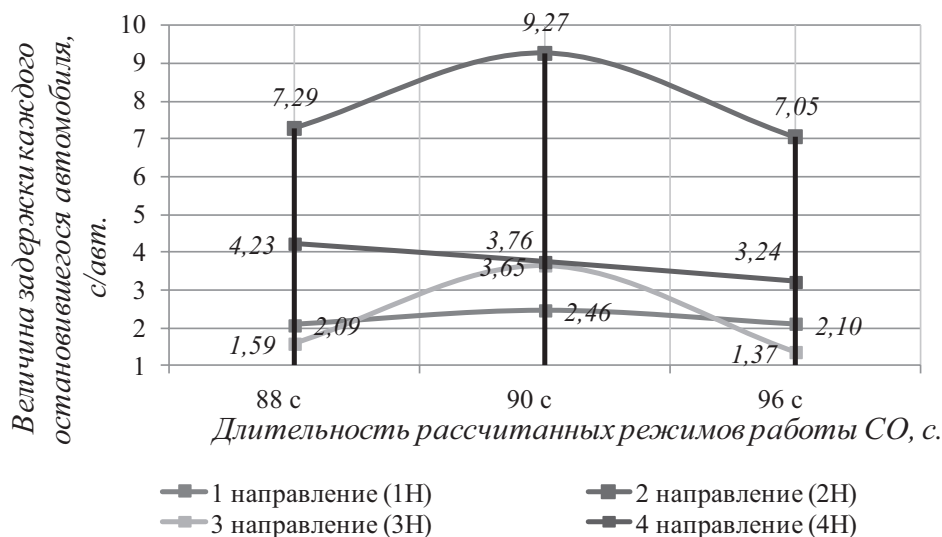


Рис. 4. График изменения величина задержки каждого остановившегося автомобиля в зависимости от длительности полученных режимов работы.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 90 с: длительность фазы 1 $T_{ф1}$ = 50 с; фазы 2 $T_{ф2}$ = 19 с; фазы 3 $T_{ф3}$ = 21 с.

3. Определение длительности цикла при использовании предлагаемого метода расчета M_n . Значение потока насыщения для каждого въездного направления: 1ВН → $M_n = 4423$ ед./ч; 2ВН → $M_n = 4252$ ед./ч; 3ВН → $M_n = 5818$ ед./ч; 4ВН → $M_n = 2900$ ед./ч.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 96 с.: длительность фазы 1 $T_{ф1}$ = 50 с; фазы 2 $T_{ф2}$ = 24 с; фазы 3 $T_{ф3}$ = 22 с.

После проведения расчетов в специализированном программном продукте имитационного моделирования AIMSUN была произведена проверка полученных режимов работы светофорного объекта, чтобы зафиксировать изменения выходных характеристик дви-

жения ТП по каждому въездному направлению.

На рис. 3 наглядно отражено изменение такого параметра, как длина очереди, которая характеризует максимальное накопление автомобилей при наблюдении в течение часа. При внедрении цикла 96 с, полученного при использовании потока насыщения предлагаемым методом, наблюдается снижение рассматриваемого параметра в среднем на 15% по сравнению с циклами, определенными классическим и зарубежным методами.

Также наблюдается снижение величины задержки каждого остановившегося автомобиля (рис. 4). Для любого из рассматриваемых направлений характерно снижение задержек ТС на пересечении, причем при цикле в 96 с данный параметр наименьший



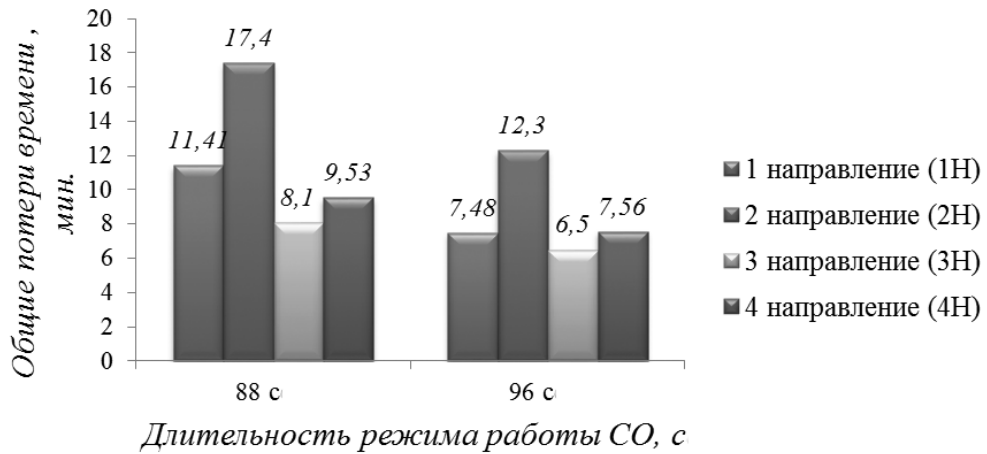


Рис. 5. Гистограмма изменения общих потерь времени при существующем и внедряемом режимах работы светофорных объектов.

по сравнению с остальными режимами работы.

6.

После проведения всех расчетов и снятия выходных характеристик было предложено внедрить дневной режим работы СО, рассчитанный предлагаемым методом на пересечении проспектов Б. Хмельницкого и Белгородского. Сотрудниками МБУ «Управление Белгородского благоустройства» с 19 по 22 июня 2012 года на период с 11.00 до 13.30 было осуществлено изменение длительности режима работы в 88 с на предлагаемый вариант в 96 с.

Оценка проведенного мероприятия сделана по изменению величины задержки при существующем и внедренном цикле регулирования. В результате получены следующие выходные данные.

• 1ВН – первое въездное направление:

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 88 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля составила 9,59 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 2,74 с; общие потери времени – 11,41 мин.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 96 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля – 7,52 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 2,51 с; общие потери времени – 7,48 мин.

• 2ВН – второе въездное направление:

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 88 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля – 11,04 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 4,35 с; общие потери времени – 17,4 мин.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 96 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля – 9,07 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 3,51 с; общие потери времени – 12,3 мин.

• 3ВН – третье въездное направление:

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 88 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля – 13,2 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 7,5 с; общие потери времени – 8,1 мин.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 96 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля – 10,1 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 5,4 с; общие потери времени – 6,5 мин.

• 4ВН – четвертое въездное направление:

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 88 с: средняя задержка одного остановившегося автомобиля – 10,45 с; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 8,16 с; общие потери времени – 9,53 мин.

Длительность цикла ($T_{ц}$) = 96 с: средняя задержка одного остановившегося автомо-

бия – 8,32 с.; условная задержка каждого автомобиля, проехавшего через перекресток – 7,02 с; общие потери времени – 7,56 мин.

Наглядно изменения общих потерь времени по каждому рассматриваемому направлению, полученные натурными исследованиями, отражает рис. 5.

По результатам проведенных обследований можно сделать вывод, что задержки автомобилей при оптимальном светофорном режиме количественно уменьшаются в среднем на 15–25%. В дальнейшем целесообразно опробование цикла длительностью 96 секунд на всех светофорных объектах проспекта К. Хмельницкого с соответствующей корректировкой программ координации.

Использование предлагаемого метода определения потока насыщения по сравнению с классическим и зарубежным позволяет учесть больше параметров движе-

ния автотранспорта, получить более точный результат в поиске искомых величин. Расчет режима работы светофорного объекта при жестком или координированном управлении технологическими процессами дает возможность улучшить систему регулирования в точках пересечения автомобильных потоков, предотвращая тем самым значительные риски и потери.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.gks.ru/dbscripts/cbsd/DBInet.cgi?pl=1316016>. Доступ 10.09.2013.
2. <http://83.234.171.56/pbdd/RegionReview.aspx?rnd=635154594682968750>. Доступ 10.09.2013.
3. Боровской А. Е., Шевцова А. Г. Реальный поток насыщения в зависимости от класса легкового автомобиля // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Сб. материалов VII международной науч. технической конф. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С. 244–250.
4. Кременец Ю. А., Печерский М. П. Технические средства организации дорожного движения: Учебник для вузов. – М.: Академкнига, 2005. – 279 с.
5. Highway Capacity Manual // TRB, Washington, DC, 2000. – 122 с. ●

METHODS OF DETERMINATION OF SATURATION FLOW OF A MOTOR WAY

Borovskoy, Alexey E. – Ph.D. (Tech), associate professor of V. G. Shuhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia.

Shevtsova, Anastasia G. – Ph.D. student at the department of traffic organization and safety of V. G. Shuhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia.

The article reviews the methods, used in Russia to determine saturation flow while computing regime of traffic lights regulation for city motor roads. The authors have suggested a new tool of mathematical assessment of the desired quantity in order to achieve better quality of road signal regulation. The proposed method of determination of saturation flow as compared to classical and foreign methods, allows

to take into account a larger number of parameters and to achieve a more exact result. The researchers have also tested the innovation model by using it at real street intersection and organized implementation of the study results in the framework of cooperation with municipal administration of the city of Belgorod. The study has shown that the optimum regime of traffic lights operation reduces car delays by 15–25%.

Key words: motor traffic, saturation flow, traffic lights, operation regime, basic value, operation efficiency.

REFERENCES

1. <http://www.gks.ru/dbscripts/cbsd/DBInet.cgi?pl=1316016>. Last accessed 10.09.2013.
2. <http://83.234.171.56/pbdd/RegionReview.aspx?rnd=635154594682968750>. Last accessed 10.09.2013/
3. Borovskoy A. E., Shevtsova A. G. Real saturation flow: dependence on passenger car class [*Realnyj potok nasyscheniya v zavisimosti ot klassa legkovogo avtomobilya*]. Problemy kachestva i ekspluatatsii avtotransportnyh sredstv [*Problems of quality and exploitation of transport vehicles*]. Transactions of VII international scientific and technical conference. Penza, PGUAS, 2012, pp.244–250.
4. Kremenets Yu.A., Pecherskiy M. P. Technical tools of road traffic organization. Higher school textbook [*Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya: Uchebnik dlya vuzov*]. Moscow, Akademkniga publ., 2005, 279 p.
5. Highway Capacity Manual // TRB, Washington, DC, 2000, 122 p.

Координаты авторов (contact information): Боровской А. Е. (Borovskoy A. E.) – a. e.borovskoy@gmail.com, Шевцова А. Г. (Shevtsova A. G.) – shevcova-anastasiya@mail.ru.

Статья поступила в редакцию /article received 05.02.2013
Принята к публикации / article accepted 21.03.2013

