

Возможные режимы и оптимизация работы светофора на двухполосном перекрестке города

В. Ч. Кудяев, А. К. Буздов

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. Одной из актуальных задач оптимизации транспортной системы города является задача о режиме работы светофора на перекрестках города. В работе представлено решение задачи о светофоре, работающем в двухфазном режиме, когда по одной из трасс горит зеленый цвет, по другой – красный. В основе представленного метода лежит известное условие Лайтхилла–Уизема. Рассмотрение именно двухполосных по каждой из двух трасс перекрестков связано с тем, что такие перекрестки составляют значительную часть в системе перекрестков города, задача может быть решена после измерения основных параметров движения автотранспортных средств через перекресток в период наибольшей нагрузки.

Ключевые слова: двухполосный перекресток, оптимизация работы светофора, двухфазный режим

Поступила 30.10.2023, одобрена после рецензирования 07.11.2023, принята к публикации 13.11.2023

Для цитирования. Кудяев В. Ч., Буздов А. К. Возможные режимы и оптимизация работы светофора на двухполосном перекрестке города // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 65–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-65-73

MSC: 93-10

Original article

Possible modes and optimization of traffic light operation at a two-lane city intersection

V.Ch. Kudaev, A.K. Buzdov

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

Abstract. One of the urgent problems of optimizing the city's transport system is the problem of the operating mode of traffic lights at city intersections. The paper presents a solution to the problem of a traffic light operating in a two-phase mode – when one of the lanes is green and the other is red. The presented method is based on the well-known Lighthill–Whitham condition. The consideration of two-lane intersections along each of the two lanes is due to the fact that such intersections make up a significant part of the city's intersection system; the problem can be solved after measuring the main parameters of vehicle movement through the intersection during the period of greatest load.

Keywords: two-lane intersection, optimization of traffic light operation, two-phase mode

Submitted 30.10.2023, approved after reviewing 07.11.2023, accepted for publication 13.11.2023

For citation. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. Possible modes and optimization of traffic light operation at a two-lane city intersection. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 65–73. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-65-73

ВВЕДЕНИЕ

В известной монографии [1] отмечено, что задача о светофорном управлении движением автотранспортных средств (АТС) через перекресток является одной из главных задач математического моделирования движения транспортных потоков в городе:

- эволюция затора,
- задача о светофоре,
- задача о выборе оптимальной топологии транспортной сети,
- расчет матрицы корреспонденций и распределения потоков,
- задача о надежности графа транспортной сети.

Задача светофорного управления движением АТС через перекресток состоит в построении такого периодического режима работы светофора, который при условии ненакопления АТС перед перекрестком от цикла к циклу его работы обеспечивает наименьшее суммарное время прохода перекрестка всеми АТС, вошедшими в перекресток.

Целью представляемого исследования является получение основных параметров и характеристик перекрестка с двухфазным светофорным управлением и оптимального режима его работы.

В основе представленного метода лежит доказанное М. Лайтхиллом и Дж. Уиземом [2–4] условие ненакопления АТС перед светофором по трассе перекрестка с течением времени.

В настоящее время в основе подходов к решению задач моделирования транспортных потоков лежит рассмотрение усредненных показателей транспортной системы на перекрестках городских дорог. При этом для оценки работы светофора используются индивидуальный подход, имитационное и компьютерное моделирование потоков на перекрестке [6–13].

1. УСЛОВИЕ ЛАЙТХИЛЛА–УИЗЕМА И ЕГО ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НЕНАКОПЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (АТС) ПЕРЕД ПЕРЕКРЕСТКОМ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ

В работах [2–4] была предложена гидродинамическая модель однополосного транспортного потока, названная впоследствии моделью Лайтхилла–Уизема–Ричардса (LWR), в которой поток АТС рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости. В работах [2, 3] М. Лайтхиллом и Дж. Уиземом была поставлена на основе LWR следующая

Задача. Найти такое число $k > 0$, что перед светофором (работающим в двух режимах – зеленый, красный) не будет скапливаться очередь с течением времени, если

$$\frac{T_{\text{зел}}}{T_{\text{кр}}} \geq k.$$

Считать, что транспортный поток вдали от светофора имеет плотность $\bar{\rho} < \rho_m$, где $\bar{\rho}$ – плотность потока \bar{q} , ρ_m – плотность, при которой значение потока максимально, – q_m .

Решение М. Лайтхилла и Дж. Уизема таково: перед светофором не будет скапливаться очередь, если

$$(q_m - \bar{q})T_{\text{зел}} \geq \bar{q}T_{\text{кр}}, \text{ т.е. } \frac{T_{\text{зел}}}{T_{\text{кр}}} \geq \frac{\bar{q}}{q_m - \bar{q}}.$$

На рис. 1 представлена схема двухполосного перекрестка.

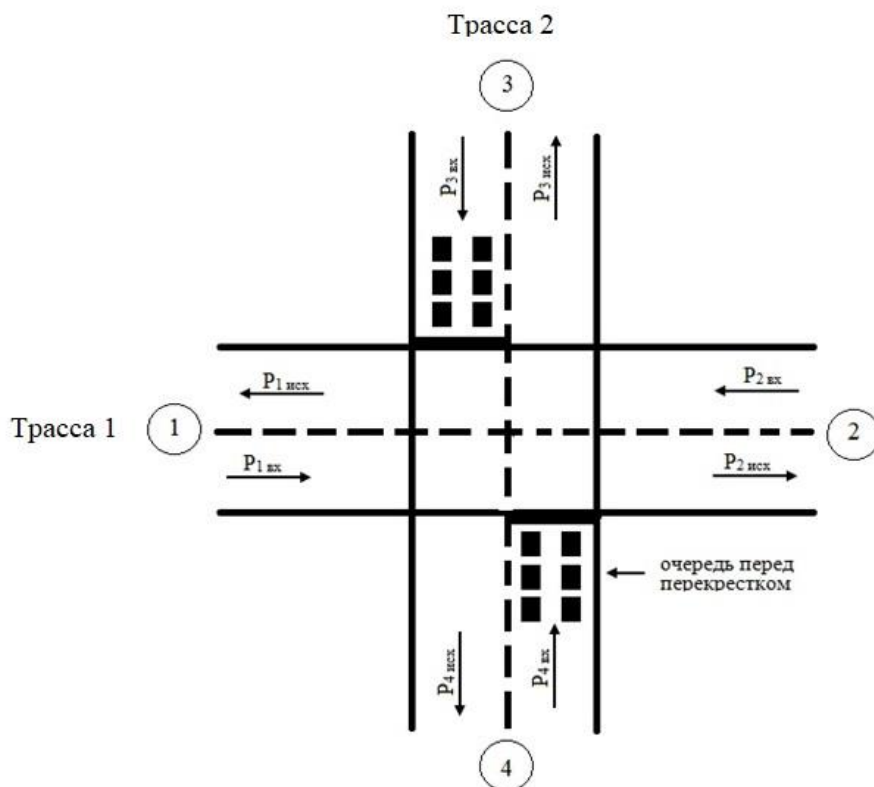


Рис. 1. По трассам 1 (1–2) и 2 (3–4) горят соответственно зеленый и красный цвета светофора
Fig. 1. On lanes 1 (1–2) and 2 (3–4), the traffic lights are green and red, respectively

2. ВОЗМОЖНЫЙ ИНТЕРВАЛ ОТНОШЕНИЯ ВРЕМЕНИ ГОРЕНИЯ ЗЕЛЕННОГО ЦВЕТА ПО КАЖДОЙ ИЗ ТРАСС И УСЛОВИЕ НЕБЛОКИРОВКИ ПЕРЕКРЕСТКА

Оценка Лайтхилла–Уизема $\frac{T_{зел}}{T_{кр}} \geq \frac{\bar{q}}{q_m - \bar{q}}$ при рассмотрении обеих трасс, т.е. перекрестка в целом (рис. 1), приводит к следующим неравенствам:

$$\frac{T_{зел}^1}{T_{кр}^1} = \frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \tag{1}$$

$$\frac{T_{зел}^2}{T_{кр}^2} = \frac{T_{зел}^2}{T_{зел}^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \tag{2}$$

где верхними индексами обозначены номера трасс.

Утверждение 1. На перекрестке в целом не будет происходить накопления АТС от цикла к циклу работы светофора только если

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1.$$

При этом возможные режимы работы светофора определяются следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} &\in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \right], \text{ если } \frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \\ \frac{T_{зел}^2}{T_{зел}^1} &\in \left[\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \frac{q_m^1 - q^1}{q^1} \right], \text{ если } \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1 - q^1}. \end{aligned} \tag{3}$$

Доказательство. Пусть $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2 - q^2}$. Из (1) и (2) следует

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \leq \frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} \leq \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}.$$

Неравенство имеет решение, только если $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \leq \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}$. Получим

$$q^1 q^2 \leq q_m^1 q_m^2 - q_m^1 q^2 - q^1 q_m^2 + q^1 q^2 \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1.$$

Причем из условия $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$. Утверждение доказано.

Отметим также, что условие

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1$$

есть условие нахождения перекрестка в зоне блокировки АТС.

3. ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СВЕТОФОРА НА ПЕРЕКРЕСТКЕ

Обычно считают, что оптимальным является следующий режим горения зеленого по трассам:

$$\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} = \frac{q^1}{q^2},$$

но в этом случае не учитываются пропускные способности трасс перекрестка q_m^1, q_m^2 .

Утверждение 2. Если перекресток не находится в зоне блокировки, то оптимальным режимом работы светофора является режим

$$\frac{T_{\text{зел}}^1}{T_{\text{зел}}^2} = \frac{q^1 / q_m^1}{q^2 / q_m^2} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \quad \text{при} \quad \frac{q^1}{q_m^1 - q^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2 - q^2}$$

$$\text{и} \quad \frac{T_{\text{зел}}^2}{T_{\text{зел}}^1} = \frac{q^2 / q_m^2}{q^1 / q_m^1} = \frac{q^2 q_m^1}{q_m^2 q^1} \quad \text{при} \quad \frac{q^2}{q_m^2 - q^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1 - q^1}$$

Доказательство.

Целью светофорного управления перекрестком является построение такого периодического режима работы светофора (времени горения красного и зеленого цветов), который обеспечивает наименьшее суммарное время прохода перекрестка всеми АТС, вошедшими в перекресток при условии ненакопления АТС перед перекрестком с течением времени [2, 3].

Это условие (см. утверждение 1) имеет вид $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1$.

Вследствие этого оптимальным является режим, соотносящий величины $\frac{q^1}{q_m^1}$ и $\frac{q^2}{q_m^2}$ при выполнении условий (3). Покажем, что

$$\frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \right].$$

Предположим

$$\frac{q^1}{q_m^1 - q^1} > \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} \Rightarrow q^1 q_m^1 q^2 > q_m^1 q^1 q_m^2 - (q^1)^2 q_m^2 \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1.$$

Но рассматривается случай неблокировки перекрестка $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1$, т.е. получено противоречие. Аналогично, если

$$\frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} > \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} > \frac{q_m^2 - q^2}{q_m^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} > 1 - \frac{q^2}{q_m^2} \Rightarrow \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1,$$

т.е. противоречие с условием утверждения. Утверждение доказано.

Запас устойчивости оптимального режима работы светофора

Пусть $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} < 1$, т.е. перекресток находится в зоне неблокировки. Определим такое $p > 1$, что $\left(\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}\right)p = 1$. Величина $p = 1/\left(\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}\right)$ показывает предельное значение потоков – $\widehat{q}^1, \widehat{q}^2$, не приводящее к блокировке перекрестка, где $\widehat{q}^1 = q^1 p, \widehat{q}^2 = q^2 p$. При этом допустимый прирост потоков по трассам перекрестка определяется равенствами

$$\Delta q^1 = \widehat{q}^1 - q^1, \quad \Delta q^2 = \widehat{q}^2 - q^2.$$

Таким образом, получены следующие основные характеристики и параметры перекрестка с двухфазным светофорным управлением:

- q_m^1, q_m^2 – пропускные способности трасс перекрестка относительно потоков по трассе 1 и по трассе 2;
- $\frac{q^1}{q_m^1}, \frac{q^2}{q_m^2}$ – нагрузки АТС на перекресток по трассе 1 и по трассе 2;
- $\left(\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}\right)$ – общая нагрузка АТС на перекресток;
- $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1$ – условие работы светофора в нормальном режиме;
- $\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} > 1$ – условие блокировки перекрестка;
- $\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2}\right]$, если $\frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$ и перекресток не блокирован – возможный интервал работы светофора;
- $\frac{T_{зел}^2}{T_{зел}^1} \in \left[\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}, \frac{q_m^1 - q^1}{q^1}\right]$, если $\frac{q^2}{q_m^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1}$ и перекресток не блокирован – возможный интервал работы светофора.

4. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕКРЕСТКА

1. Задать значения потоков по полутрассам трасс 1 и 2: $q_1^1, q_2^1; q_1^2, q_2^2$ и пропускных способностей по полутрассам каждой трассы: $q_{m,1}^1, q_{m,2}^1; q_{m,1}^2, q_{m,2}^2$.

2. Вычисляются величины $\frac{q_1^1}{q_{m,1}^1 - q_1^1}$, $\frac{q_2^1}{q_{m,2}^1 - q_2^1}$; $\frac{q_1^2}{q_{m,1}^2 - q_1^2}$, $\frac{q_2^2}{q_{m,2}^2 - q_2^2}$ и из каждой из этих пар значений выбирается наибольшее. Пусть это соответственно $\frac{q_1^1}{q_{m,1}^1 - q_1^1}$ и $\frac{q_2^2}{q_{m,2}^2 - q_2^2}$. Тогда $q^1 := q_1^1$, $q_m^1 := q_{m,1}^1$; $q^2 := q_2^2$, $q_m^2 := q_{m,2}^2$.

3. Определяется наибольшее из значений $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}$ и $\frac{q^2}{q_m^2 - q^2}$. Пусть это $\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}$.

4. Вычисляется величина нагрузки АТС на перекресток:

$$B = \frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2}.$$

5. Если $B \leq 1$, то переходим на 7).

6. Выдается значение B и фраза «Перекресток находится в зоне блокировки». Переходим на 9).

7. Определяется интервал возможных рабочих режимов работы светофора

$$\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \in \left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \right].$$

8. Определяется оптимальный режим работы светофора на перекрестке $\left(\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \right)_{opt} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2}$, если $\frac{q^1}{q_m^1} \geq \frac{q^2}{q_m^2}$ и $\left(\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \right)_{opt} = \frac{q^2 q_m^1}{q_m^2 q^1}$, если $\frac{q^2}{q_m^2} \geq \frac{q^1}{q_m^1}$.

9. Конец.

Рассмотрим поясняющий пример.

Пусть $q^1 = 20$, $q_m^1 = 40$; $q^2 = 18$, $q_m^2 = 45$

Проверим выполнение условия неблокировки перекрестка

$$\frac{q^1}{q_m^1} + \frac{q^2}{q_m^2} \leq 1 :$$

$$\frac{20}{40} + \frac{18}{45} = 0,5 + 0,4 = 0,9 < 1.$$

Определим возможный интервал рабочих режимов светофора.

Поскольку $\frac{q^1}{q_m^1} > \frac{q^2}{q_m^2}$ (т.к. $0,5 > 0,4$), то интервал $\left[\frac{q^1}{q_m^1 - q^1}, \frac{q_m^2 - q^2}{q^2} \right]$ таков:

$$\left[\frac{20}{40-20}, \frac{45-18}{18} \right] = [1; 1,5].$$

Итак, $\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \in [1; 1,5]$. Любое из $\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2}$ горения зеленого цвета по трассам, входящее в этот интервал, не будет приводить к накоплению АТС у перекрестка.

Определим теперь оптимальный режим работы светофора:

$$\left(\frac{T_{зел}^1}{T_{зел}^2} \right)_{opt} = \frac{q^1 q_m^2}{q_m^1 q^2} = \frac{0,5}{0,4} = 1,25.$$

Отметим, что оптимальный режим всегда находится в средней точке интервала возможных режимов работы светофора.

Таблица 1. Таблица оптимальных режимов работы светофора при $q_m^1 = 50 \frac{\text{атс}}{\text{мин}}$, $q_m^2 = 40 \frac{\text{атс}}{\text{мин}}$.

Table 1. Table of optimal operating modes of traffic lights at $q_m^1 = 50 \frac{\text{атс}}{\text{мин}}$, $q_m^2 = 40 \frac{\text{атс}}{\text{мин}}$.

		Значения потоков по трассе 1						
		10	15	20	25	30	35	40
Значения потоков по трассе 2	10	44,4	54,6	61,6	66,7	70,6	73,7	Зона блокировки перекрестка
		55,6	45,4	38,4	33,3	29,4	26,3	
	15	34,8	44,4	51,6	57,1	61,6		
		65,2	55,6	48,4	42,9	38,4		
	20	28,6	37,5	44,4	50,0			
		71,4	62,5	55,6	50,0			
	25	24,2	32,4					
75,8		67,6						
30	21,0							
	79,0							
35								

В ячейках таблицы 1 даны доли времени горения зеленого цвета светофора по трассе 1 и трассе 2 перекрестка (в процентах) относительно общего времени горения зеленого цвета на перекрестке в целом.

В работе [5] приведена методика определения величины q_m перекрестка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате научных исследований по задаче о режиме работы светофора на двухполосном перекрестке города получены следующие результаты:

1. На основе условия Лайтхилла–Уизема о режиме работы светофора (зеленый, красный), обеспечивающем ненакопление АТС перед светофором по трассе перекрестка, доказано общее условие (необходимое и достаточное) ненакопления транспортных средств перед светофором на перекрестке в целом.

2. Выделены основные параметры и характеристики перекрестка с двухфазным светофорным управлением.

3. Представлено оптимальное решение задачи о светофоре.

4. Определен запас устойчивости оптимального режима работы светофора.

5. Представлен укрупненный алгоритм определения основных характеристик перекрестка и разработана программа для ЭВМ, реализующая алгоритм.

Рассмотрение двухполосных перекрестков связано не только с тем, что для них условие ненакопления АТС является интервальным (закрытый интервал), но и с тем, что такие перекрестки составляют значительную часть перекрестков городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасникова А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: МФТИ, 2010. С. 417.
2. Lighthill M. J., Whitham G. B. On kinematic waves: II Theory of traffic flow on long crowded roads. Proc. R. Soc. London. Ser. A. 1955. Vol. 229. Pp. 281–345.
3. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
4. Richards P. I. Shock Waves on the Highway. Oper. Res. 1956. Vol. 4. Pp. 42–51.

5. Кудяев В. Ч., Буздов А. К. Полная система условий ненакопления автотранспортных средств перед светофором на симметричном двухполосном перекрестке // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 40. № 3. С. 103–112. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-103-112
6. Шец С. П., Справцева Е. В., Калмыков А. А. Применение имитационного моделирования при совершенствовании организации дорожного движения на перекрестке города Брянска // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 3(56). С. 67–72.
7. Новиков А. Н., Еремин С. В., Шевцова А. Г. Основные принципы расчета программы светофорного регулирования на основе управляемых сетей и потока насыщения // Вестник СибАДИ. 2019. Том 16. №. 6(70). С. 680–691.
8. Новиков И. А., Шевцова А. Г., Кравченко А. А., Бурлуцкая А. Г. Разработка методики адаптации модели регулируемого пересечения // Вестник СибАДИ. 2020. Том 17. № 6(76). С. 726–735.
9. Калинин И. Н., Глухарев К. К. Исследование интегральных характеристик перекрестков при помощи микроскопических моделей транспортных потоков // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 4. С. 523–534.
10. Долгушин Д. Ю., Мызников Т. А. Имитационное моделирование автотранспортных потоков для оценки альтернативных схем организации дорожного движения в городских условиях // Вестник СибАДИ. 2011. № 2(20). С. 47–52.
11. Гаряев Н. А., Шаталина В. А. Оптимизация пропускной способности перекрестка на базе многовариантного имитационного моделирования // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 12. С. 26–29.
12. Лихачев Д. В., Дорохин С. В., Артемов А. Ю. Анализ основных методов, применяемых в зарубежных методиках расчета светофорного цикла // Материалы Национальной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки». Воронеж, 2022. С. 53–58.
13. Минина Д. Н. Моделирование в MATLAB движения автомашин на регулируемом перекрестке // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 2(67).

REFERENCES

1. Gasnikova A.V. *Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye transportnykh potokov* [Introduction to mathematical modeling of transport flows]. Moscow: MFTI, 2010. 417 p. (In Russian)
2. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinematic waves: II Theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. London. Ser. A.* 1955. Vol. 229. Pp. 281–345.
3. Uizem Dzh. *Lineynyye i nelineynyye volny* [Linear and nonlinear waves]. Moscow: Mir, 1977. (In Russian)
4. Richards P.I. Shock Waves on the Highway. *Oper. Res.* 1956. Vol. 4. Pp. 42–51.
5. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. Complete system of conditions for non-accumulation of vehicles in front of a traffic light at a symmetrical two-lane intersection. *Bulletin of KRAUNC. Phys.-math. Sciences.* 2022. Vol. 40. No. 3. Pp. 103–112. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-103-112. (In Russian)
6. Shets S.P., Spravtseva E.V., Kalmykov A.A. Application of simulation modeling in improving the organization of road traffic at the intersection of the city of Bryansk. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2017. No. 3(56). Pp. 67–72. (In Russian)

7. Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G. Basic principles for calculating a traffic light control program based on controlled networks and saturation flow. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2019. Vol. 16. No. 6(70). Pp. 680–691. (In Russian)
8. Novikov I.A., Shevtsova A.G., Kravchenko A.A., Burlutskaya A.G. Development of a methodology for adapting a model of controlled intersection. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2020. Vol. 17. No. 6(76). Pp. 726–735. (In Russian)
9. Kalinin I.N., Glukharev K.K. Study of the integral characteristics of intersections using microscopic models of traffic flows. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and modeling]. 2014. Vol. 6. No. 4. Pp. 523–534. (In Russian)
10. Dolgushin D.Yu., Myznikov T.A. Simulation modeling of vehicle flows for assessing alternative schemes for organizing road traffic in urban conditions. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2011. No. 2(20). Pp. 47–52. (In Russian)
11. Garyaev N.A., Shatalina V.A. Optimization of intersection capacity based on multivariate simulation modeling. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. 2022. No. 12. Pp. 26–29. (In Russian)
12. Likhachev D.V., Dorokhin S.V., Artemov A.Yu. Analysis of the main methods used in foreign methods for calculating the traffic light cycle. *Materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nyye voprosy i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki"* [Materials of the National Scientific and Practical Conference "Topical Issues and Prospects for the Development of Modern Science"]. Voronezh, 2022. Pp. 53–58. (In Russian)
13. Minina D.N. Modeling in MATLAB the movement of vehicles at a controlled intersection. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Polytechnic youth magazine]. 2022. No. 2(67). DOI: 10.18698/2541-8009-2022-2-774. (In Russian)

Информация об авторах

Кудаев Валерий Черимович, канд. ф.-м. наук, вед. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН; 360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

vchkudaev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8313-4199>

Буздов Аслан Каральбиевич, канд. ф.-м. наук, ст. науч. сотр., Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН; 360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

abuzdov@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-3348>

Information about the authors

Kudaev Valery Cherimovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

vchkudaev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8313-4199>

Buzdov Aslan Karalbievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

abuzdov@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-3348>