

**М.А. Стрижко**

**МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ЗАДЕРЖКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ  
М. ДЖ. БЭКМАННА ДЛЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЕРЕКРЁСТКОВ  
В УСЛОВИЯХ МЕГАПОЛИСА**

*Проблема возрастающей интенсивности дорожного движения в мегаполисах с каждым годом становится всё более актуальной, что приводит к увеличению задержек на перекрестках, повышенному расходу топлива и неоправданному износу агрегатов транспортных средств. Одним из возможных решений данной проблемы является усовершенствование методов управления дорожным движением. Разработка новых систем управления предполагает наличие достаточно точных математических моделей описания транспортного потока с целью модельной проверки качества управления, а также прогнозирования свойств и параметров трафика. Задача исследования: изучить существующие модели описания трафика, выявить их недостатки; предложить усовершенствованную модель для описания движения не только на отдельных, но и на взаимосвязанных перекрёстках. В работе проведен анализ модели задержки транспортных средств на перекрёстке М. Дж. Бэкманна. Установлено, что данная модель является достаточно точной при описании изолированных перекрёстков с равномерной интенсивностью транспортного потока в течение цикла светофорного регулирования, однако непригодна для использования в случаях с перекрёстками, имеющими взаимосвязь по транспортному потоку с соседними светофорными объектами и ярко выраженными всплесками интенсивности движения в течение цикла светофорного регулирования. Проанализированы причины расхождения экспериментальных данных с данными, полученными при помощи модели задержки М. Дж. Бэкманна. Предложена модификация модели задержки транспортных средств М. Дж. Бэкманна, учитывающая фактор сдвига разрешающей фазы регулирования между соседними перекрёстками. Полученное дополнение модели задержки М. Дж. Бэкманна позволило повысить точность расчета задержки транспортных средств применительно к взаимосвязанным перекрёсткам.*

*Дорожное движение; перекрёсток; светофорное регулирование; математическая модель; транспортное средство; неравномерность транспортного потока; средняя задержка транспортного средства.*

**M.A. Strizhko**

**MODIFICATION OF THE M. J. BECKMAN'S VEHICLE DELAY MODEL  
FOR INTERCONNECTED INTERSECTIONS IN A MEGALOPOLIS**

*The problem of increasing traffic intensity in megacities is becoming more and more urgent every year, which leads to increased delays at intersections, increased fuel consumption and unjustified wear of vehicle units. One of the possible solutions to this problem is the improvement of traffic control methods. The development of new control systems presupposes the availability of sufficiently accurate mathematical models for describing the traffic flow in order to evaluate control quality, as well as to forecast the properties and parameters of traffic flow. Research objective is to study existing traffic description models, to identify their shortcomings; to improve these models in describing traffic flow not only at individual intersections, but also within a cluster of several intersections. The paper analyzes the model of vehicle delays at the intersection by M.J. Beckmann. It is established that this model is quite accurate in describing isolated intersections with a uniform intensity of traffic flow, but it is unsuitable in cases with intersections that have a traffic flow relationship with interconnected traffic light objects and bursts of traffic intensity during the traffic light control cycle. The reasons for the discrepancy between the experimental data and the data obtained using the M. J. Beckmann delay model are analyzed. A modifi-*

*cation of the M. J. Beckmann delay model is proposed, which takes into account the factor of the shift of the resolving phase of regulation between interconnected intersections. The resulting addition of the M. J. Beckmann delay model has significantly improved the accuracy of calculating the delay of vehicles in relation to interconnected intersections.*

*Traffic; intersection; traffic light regulation; mathematical model; vehicle; uneven traffic flow; average vehicle delay.*

**Введение.** Для моделирования процессов движения автотранспортных потоков обычно используются три уровня их описания: макроскопический, мезоскопический и микроскопический [1]. Макроскопический уровень предназначен для описания потоков автомобилей на уровне города, области (края) или целой страны [2], для этого разрабатываются математические модели потоков транспортных средств, в основном, с применением законов гидродинамики. Микроскопический уровень используется для моделирования движения отдельных ТС – автомобилей различного типоразмера [3], при этом создаются модели конкретных перекрёстков и развязок районов населённого пункта. Мезоскопический уровень занимает промежуточное место между макроскопическим и микроскопическим [4], поочередно объединяет в общее взаимодействие математическое описание отдельных перекрёстков, оперирует также отдельными очередями или группами ТС.

Модели микроскопического уровня, которые учитывают поведение каждого отдельного ТС, как участника дорожного движения, обеспечивают наиболее достоверные результаты моделирования конкретных перекрёстков. Модели этого уровня с наибольшим эффектом используются в режиме реального времени для реализации адаптивного управления потоками ТС на городских перекрёстках [5].

Математические модели, которые предназначены для описания временной задержки ТС на пересечении дорог при регулировании движения посредством светофоров, делятся на две категории. Так называемые «точные» модели в реальном времени описывают динамическую ситуацию на подъездных дорогах перекрёстка в данный момент времени. Они представлены моделями М. Дж. Бэкманна [6], В.Р. МакНейла [7], Дж. Н. Дарроча [8–9] и др. Так называемые «приближённые» модели учитывают стационарные, сложившиеся условия движения и аппроксимируются к действительной ситуации на дороге. Характерными моделями этой группы являются модели Ф. В. Вебстера [10], А. Дж. Миллера [11], Дж. Ф. Ньюелла [12] и др. Исследования адекватности моделей проводились в работах [13–17].

**Постановка проблемы.** Среди математических моделей движения транспортных потоков из класса «точных» для описания средней задержки транспортного средства (ТС) на перекрёстке получила широкое распространение модель М. Дж. Бэкманна (1). Она относится к классу «точных» моделей, учитывает поведение каждого отдельного ТС как участника дорожного движения и обеспечивает наиболее достоверные результаты моделирования отдельных перекрёстков. Данная модель использует биномиальный закон прибытия автотранспорта на перекрёсток, позволяет делать оценки средней задержки одного ТС за цикл  $d$ , с, в ходе светофорного регулирования при «жёстком» переключении его сигналов. В ней принят детерминированный закон изменения сигналов светофора [18].

$$d = \frac{c - g}{c \left(1 - \frac{q}{s}\right)} \left( \frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right), \quad (1)$$

где  $d$  – среднее время ожидания одного ТС за цикл, с;  
 $c$  – длительность цикла регулирования, с;  
 $g$  – время горения зеленого сигнала светофора, с;

$q$  – интенсивность прибытия ТС, авт./с;  
 $s$  – интенсивность разъезда ТС, авт./с;  
 $q_0$  – величина оставшейся очереди, авт.

В ходе исследования адекватности результатов моделирования реальным данным на светофорных объектах был поставлен эксперимент, охвативший 20 перекрёстков с различными характеристиками транспортного потока. Исследование показало, что модель М. Дж. Бэкманна достаточно точно описывает задержку ТС на изолированном перекрёстке при равномерном транспортном потоке (с погрешностью 6,68%). Однако, на перекрёстках с ярко выраженной связью по транспортному потоку с соседними светофорными объектами исследуемая модель оказалась неработоспособной. Графики зависимости средней задержки ТС на изолированном и на неизолированном перекрёстках представлены на рис. 1, 2.

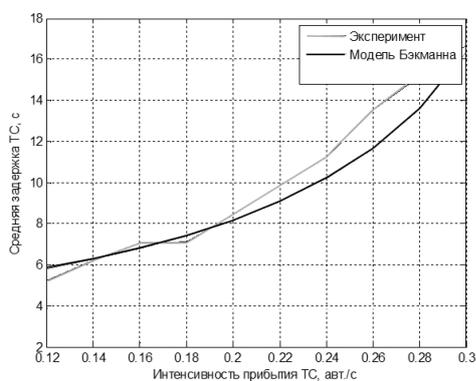


Рис. 1. График зависимости средней задержки ТС от интенсивности прибытия на изолированном перекрёстке

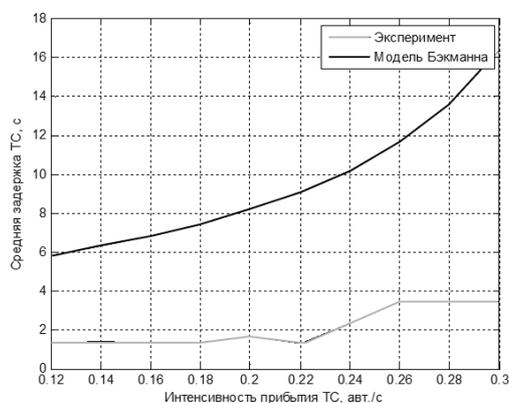


Рис. 2. График зависимости средней задержки ТС от интенсивности движения на неизолированном перекрёстке

**Основная часть.** При построении математической модели сети перекрёстков следует учитывать их взаимосвязь по транспортному потоку. Интенсивность прибытия ТС на перекрёсток, расположенный внутри участка сети, имеет характер уже не случайный, а определяемый ситуацией на вышестоящих светофорных объектах [19]. Таким образом, при движении через взаимосвязанные перекрёстки только в прямом направлении интенсивность прибытия ТС к нижестоящему перекрёстку будет равняться интенсивности разъезда с вышестоящего перекрёстка:  $q_2 = s_1$  (рис. 3).

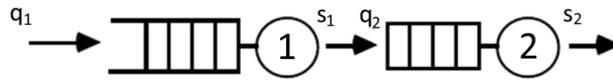


Рис. 3. Связь перекрёстков по транспортному потоку

Транспортные средства, покидающие вышестоящий перекрёсток, формируются в группы, ограниченные началом и концом разрешающей фазы регулирования [20]. Это явление вносит существенный вклад в качество управления, однако последнее также сильно зависит величины сдвига разрешающей фазы регулирования на текущем перекрёстке по отношению к вышестоящему перекрёстку. Данная величина определяет, пройдёт ли сформированная группа перекрёсток на зеленый свет без остановки или попадёт на запрещающую фазу регулирования.

Справедливым будет утверждение о том, что величина сдвига разрешающей фазы на следующем по ходу движения перекрёстке должна равняться отношению расстояния между перекрёстками к средней скорости потока на данном участке. Так при достижении первыми автомобилями группы следующего светофорного объекта загорится зеленый сигнал, который позволит проехать без остановки большинству транспортных средств группы. В таком случае может быть достигнуто существенно меньшее значение задержки, чем при равномерном потоке, что имело место при проведении эксперимента на взаимосвязанных перекрёстках.

Напротив, если группа ТС достигнет следующего по ходу движения перекрёстка во время начала запрещающей фазы регулирования, большинство водителей будет вынуждено остановиться в очереди, что увеличит значение задержки по сравнению с равномерным потоком, где количество ТС, проехавших перекрёсток с остановкой и без неё, примерно равно.

Для установления зависимости средней задержки ТС от величины сдвига разрешающей фазы регулирования на соседних перекрёстках был проведён эксперимент. Величина сдвига на перекрёстках рассматриваемого участка варьируется в диапазоне от 0 до 66 с. На основе этих данных может быть получена соответствующая зависимость задержки ТС. Так как эксперимент проводился на нескольких перекрёстках, а помимо сдвига фаз на величину задержки ТС влияет ряд других факторов, различных для каждого светофорного объекта, полученные данные рассматриваются в относительных единицах по отношению к расчетным данным модели Бэкманна, принимая их достоверными для равномерного потока. График полученной зависимости представлен на рис. 4.

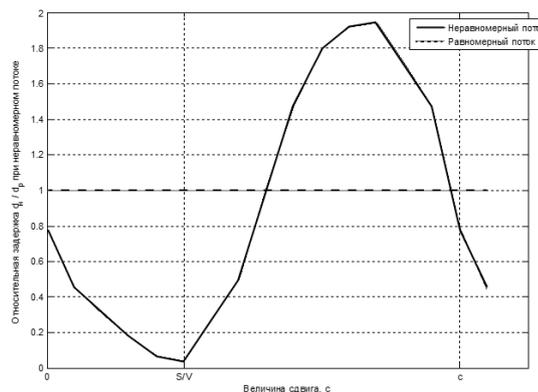


Рис. 4. Зависимость отношения задержки ТС при неравномерном потоке к задержке ТС при равномерном потоке от величины сдвига разрешающей фазы регулирования на нижестоящем перекрёстке

Из графика видно, что полученная зависимость имеет ярко выраженную косинусоидальную форму. Период косинусоиды равен длительности цикла регулирования  $c$  на нижестоящем перекрёстке, так как значения задержки  $\Delta t > c$  фактически равны значениям  $\Delta t - c$  за счет цикличности переключения сигналов светофора.

Аналитически полученную зависимость можно описать следующим образом (2).

$$\frac{d_n}{d_p} = -\cos\left(\frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V}\right) + 1, \quad (2)$$

где  $d_n$  – средняя задержка ТС на перекрёстке при неравномерном потоке, с;

$d_p$  – средняя задержка ТС на перекрёстке при равномерном потоке, с;

$\Delta t$  – величина сдвига разрешающей фазы регулирования на нижестоящем перекрёстке, с;

$c$  – длительность цикла регулирования, с;

$S$  – расстояние до нижестоящего перекрёстка, м;

$V$  – средняя скорость потока, м/с.

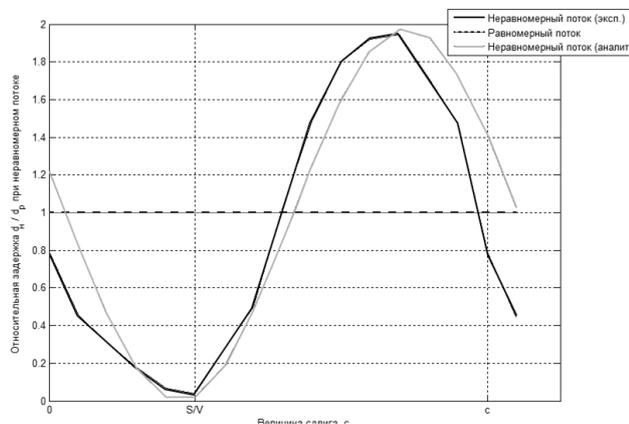


Рис. 5. Сравнение экспериментальной и аналитической зависимостей задержки ТС от величины сдвига разрешающей фазы регулирования на нижестоящем перекрёстке

Применительно к абсолютным значениям задержки ТС при неравномерном транспортном потоке в прямом направлении усовершенствованная формула Бэкманна, исходя из (2), примет вид:

$$d = \left(-\cos\left(\frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V}\right) + 1\right) \cdot \frac{c-g}{c\left(1-\frac{q}{s}\right)} \left(\frac{q_0}{q} + \frac{c-g+1}{2}\right). \quad (3)$$

Однако, в большинстве случаев при выезде с перекрёстка имеют место повороты части ТС, поэтому значение интенсивности уменьшается на процент повернувших ТС из главного потока и увеличивается за счет интенсивности движения ТС, повернувших в направлении нижестоящего перекрёстка из конфликтующего потока. Данный процесс проиллюстрирован на рис. 6 и описан в (4).

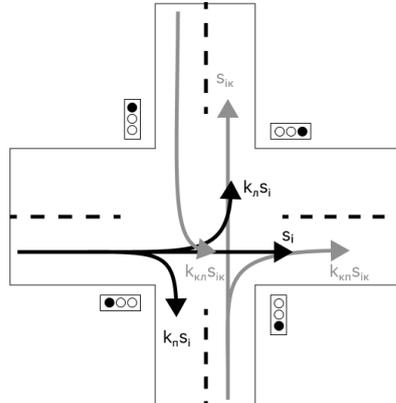


Рис. 6. Перераспределение интенсивности транспортного потока на перекрёстке

$$q_{i+1} = s_i - (k_l s_i + k_n s_i) + (k_{kl} s_{ik} + k_{kn} s_{ik}), \quad (4)$$

где  $q_{i+1}$  – интенсивность прибытия ТС на нижестоящий перекрёсток, авт./с;

$s_i$  – интенсивность разъезда ТС с вышестоящего перекрёстка, авт./с;

$k_l$  и  $k_n$  – доли ТС, совершающих левый и правый поворот на данном участке перекрёстка;

$s_{ik}$  – интенсивность разъезда ТС конфликтующего потока с вышестоящего перекрёстка, авт./с.

$k_{kl}$  и  $k_{kn}$  – доли ТС конфликтующего потока, совершающих левый и правый поворот в направлении нижестоящего перекрёстка.

Следует учитывать, что ТС, выполняющие поворот с конфликтующих направлений, вливаются в основной поток во время запрещающей фазы регулирования в прямом направлении его движения. Таким образом, они движутся отдельно от групп ТС, сформированных на вышестоящем перекрёстке, заполняя промежутки между ними. Исходя из этого, если интенсивность разъезда с перекрёстка ТС, движущихся в прямом направлении, равна интенсивности разъезда с перекрёстка ТС, вливающих слева или справа в рассматриваемый поток, такой поток можно считать равномерным. Отношение интенсивности разъезда ТС, движущихся в прямом направлении, и интенсивности разъезда ТС, выполнивших поворот, предлагается учитывать в качестве показателя неравномерности транспортного потока. Формулу (3) можно дополнить следующим образом:

$$d = \left( - \left( 1 - \frac{q_{kl} + q_{kn}}{q} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V} \right) + 1 \right) \cdot \frac{c - g}{c \left( 1 - \frac{q}{s} \right)} \left( \frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right). \quad (5)$$

По формуле (5) при отношении интенсивностей разъезда ТС, движущихся в прямом направлении, и ТС, выполнивших поворот, равном единице, неравномерная составляющая модели умножается на ноль, и задержка ТС рассчитывается для условий равномерного потока. При значении показателя неравномерности от 0 до 1 в расчете задержки ТС присутствует как равномерная составляющая, так и неравномерная в соответствующей пропорции.

Однако, в случае, если интенсивность разъезда ТС, выполнивших поворот, окажется выше интенсивности разъезда ТС, движущихся в прямом направлении, формулу (5) следует изменить:

$$d = \left( \left( 1 - \frac{q}{q_{кл} + q_{кп}} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi\Delta t}{c} + \frac{S}{V} \right) + 1 \right) \cdot \frac{c - g}{c \left( 1 - \frac{q}{s} \right)} \left( \frac{q_0}{q} + \frac{c - g + 1}{2} \right). \quad (6)$$

Таким образом, в числителе показателя неравномерности должна находиться меньшая интенсивность разезда ТС. А так как ТС, выполнившие поворот, отправляются с вышестоящего перекрёстка в период действия запрещающей фазы регулирования, в случае их преобладания в потоке значение задержки на нижестоящем перекрёстке будет находиться в противофазе по отношению к зависимости, представленной на рис. 4. Знак при косинусе изменится (6).

С учетом дополнений модели задержки Бэкманна, отражающих взаимосвязь по транспортному потоку соседних перекрёстков, получена новая зависимость задержки ТС от интенсивности движения на неизолированном перекрёстке, которая представлена на рис. 7.

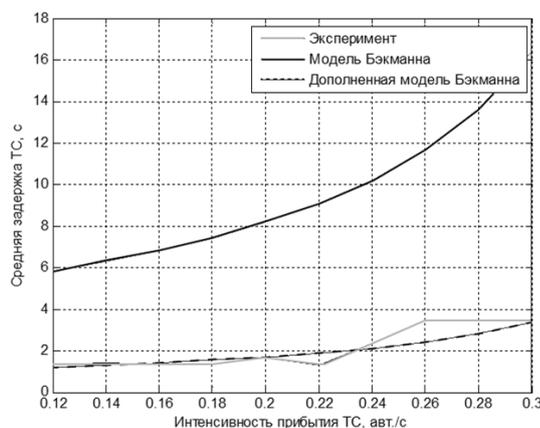


Рис. 7. График задержки ТС на неизолированном перекрёстке

Расхождение между данными, полученными при помощи усовершенствованной модели Бэкманна и в результате проведения эксперимента составляет 7,24 %, что гораздо точнее, чем при использовании исходной модели.

**Выводы.** В статье проведен анализ модели задержки транспортных средств на перекрёстке М.Дж. Бэкманна. Установлено, что данная модель является достаточно точной при описании изолированных перекрёстков, однако непригодна в случаях с перекрёстками, имеющими взаимосвязь по транспортному потоку с соседними светофорными объектами. Проанализированы причины данного явления, описано влияние светофорного регулирования на характер движения ТС. Предложена модификация модели Бэкманна, учитывающая факторы неравномерности транспортного потока и сдвига разрешающей фазы регулирования между соседними перекрёстками. Полученное дополнение модели Бэкманна позволило значительно повысить точность расчета задержки ТС применительно к взаимосвязанным перекрёсткам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wachs M. et al.* Highway Capacity Manual 2000, USA: National Academy of Sciences, 2000. – 1200 p.
2. *Карамзин Ю.Н., Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г.* Двумерная модель автомобильных потоков // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 6. – С. 85-95.

3. Nagel K. High-speed microsimulations of traffic flow. Thesis, University Cologne, Germany, 1995. – 202 p.
4. Helbing D. Structure and instability of high-density equations for traffic flow // *Phys. Rev.* – 1998, – E 57, No. 6176. – P. 212-224.
5. Евдокимов А.О., Горохов А.В., Лугов Д.Я. Имитационная модель перекрестка с системой интеллектуального управления // *Международный научно-исследовательский журнал.* – 2015. – С. 55-59.
6. Beckmann M.J., McGuire C.B. and Winsten C.B. *Studies in the Economics of Transportation.* – Yale University Press, 1956. – P. 68-87.
7. McNeil D.R. A Solution to the Fixed-Cycle Traffic Light Problem for Compound Poisson Arrivals // *J. Appl. Prob.* – 1968. – 5. – P. 624-635.
8. Darroch J.N. On the Traffic-Light Queue // *Ann. Math. Statist.* – 1964. – 35. – P. 122-128.
9. Darroch J.N., Newell G.F., and Morris R.W.J. Queues for a Vehicle - Actuated Traffic Light // *Operational Research.* – 1964. – 12. – P. 288-293.
10. Webster F.V. *Traffic Signal Settings* // Road Research Laboratory Technical Paper No. 39. – HMSO, London, 1958. – P. 9-15.
11. Miller A.J. Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals // *Operational Research Quarterly.* – 1963. – Vol. 14. – P. 373-386.
12. Newell G.F. Queues for a Fixed-Cycle Traffic Light // *The Annals of Mathematical Statistics.* – 1960. – Vol. 31, No. 3. – P. 589-597.
13. Антониади Г.Д., Архипов В.О., Цуприков А.А. Анализ модели задержки автотранспорта М.Дж. Бэкманна // *НТС Транспорт: наука, техника, управление.* – 2019. – № 2. – С. 61-64.
14. Антониади Г.Д., Архипов В.О., Цуприков А.А. Анализ модели задержки Вебстера // *Ежемесячный научный журнал «Евразийский союз учёных».* – 2018. – № 11 (56), 9 часть. – С. 6-12.
15. Чикалин Е.Н. Анализ задержек транспортных средств на нерегулируемых пешеходных переходах // *Вестник ИрГТУ.* – 2012. – № 9 (68). – С. 168-174.
16. Обидина Т.С. Исследование задержек, возникающих при пересечении перекрестка, с точки зрения теории массового обслуживания // *Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Ч. VII. Управление и прикладная математика: Тр. 56-й научной конференции МФТИ.* – М. – Долгопрудный, 2013. – С. 56-62.
17. Дорогуш Е.Г. Математический анализ модели транспортных потоков на автостраде и управления ее состоянием. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. – 90 с.
18. Бабичева Т.С. Обобщение модели равновесного распределения транспортных потоков Бэкманна на случай учета затрат не преодоление перекрестков // *Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Ч. VII. Управление и прикладная математика: Тр. 57-й научной конференции МФТИ.* – М. – Долгопрудный, 2014. – С. 124-132.
19. Hardy J. *Smart City: A Traffic Signal Control System for Reducing the Effects of Traffic Congestion in Urban Environments.* – University of Derby, 2019. – 52 p.
20. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях. – М., 2017. – 4 с.

#### REFERENCES

1. Wachs M. et al. *Highway Capacity Manual 2000*, USA: National Academy of Sciences, 2000, 1200 p.
2. Karamzin Yu.N., Trapeznikova M.A., Chetverushkin B.N., Churbanova N.G. Dvumernaya model' avtomobil'nykh potokov [Two-dimensional model of traffic flows], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 2006, Vol. 18, No. 6, pp. 85-95.
3. Nagel K. High-speed microsimulations of traffic flow. Thesis, University Cologne, Germany, 1995, 202 p.
4. Helbing D. Structure and instability of high-density equations for traffic flow, *Phys. Rev.*, 1998, E 57, No. 6176, pp. 212-224.
5. Evdokimov A.O., Gorokhov A.V., Lugov D.Ya. Imitatsionnaya model' perekrestka s sistemoy intellektual'nogo upravleniya [Simulation model of an intersection with an intelligent control system], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2015, pp. 55-59.

6. Beckmann M.J., McGuire C.B. and Winsten C.B. Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press, 1956, pp. 68-87.
7. McNeil D.R. A Solution to the Fixed-Cycle Traffic Light Problem for Compound Poisson Arrivals, *J. Appl. Prob.*, 1968, 5, pp. 624-635.
8. Darroch J.N. On the Traffic-Light Queue, *Ann. Math. Statist*, 1964, 35, pp. 122-128.
9. Darroch J.N., Newell G.F., and Morris R.W.J. Queues for a Vehicle - Actuated Traffic Light, *Operational Research*, 1964, 12, pp. 288-293.
10. Webster F.V. Traffic Signal Settings // Road Research Laboratory Technical Paper No. 39. HMSO, London, 1958, pp. 9-15.
11. Miller A.J. Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals, *Operational Research Quarterly*, 1963, Vol. 14, pp. 373-386.
12. Newell G.F. Queues for a Fixed-Cycle Traffic Light, *The Annals of Mathematical Statistics*, 1960, Vol. 31, No. 3, pp. 589-597.
13. Antoniadu G.D., Arkhipov V.O., Tsuprikov A.A. Analiz modeli zaderzhki avtotransporta M.Dzh. Bekmanna [Analysis of the vehicle delay model M.J. Backmann], *NTS Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [NTS Transport: science, technology, management], 2019, No. 2, pp. 61-64.
14. Antoniadu G.D., Arkhipov V.O., Tsuprikov A.A. Analiz modeli zaderzhki Vebstera [Analysis of Webster's delay model], *Ezhemesyachnyy nauchnyy zhurnal «Evraziyskiy soyuz uchenykh»* [Monthly scientific journal "Eurasian Union of Scientists"], 2018, No. 11 (56), 9 chast', pp. 6-12.
15. Chikalina E.N. Analiz zaderzhkek transportnykh sredstv na nereguliruemyykh peshkhodnykh perekhodakh [Analysis of vehicle delays at uncontrolled pedestrian crossings], *Vestnik IrGTU* [Bulletin of ISTU], 2012, No. 9 (68), pp. 168-174.
16. Obidina T.S. Issledovanie zaderzhkek, voznikayushchikh pri peresechenii perekrestka, s tochki zreniya teorii massovogo obsluzhivaniya [Study of delays arising when crossing an intersection from the point of view of queuing theory], *Sovremennye problemy fundamental'nykh i prikladnykh nauk. Ch. VII. Upravlenie i prikladnaya matematika: Tr. 56-y nauchnoy konferentsii MFTI* [Modern problems of fundamental and applied sciences. Part VII. Management and applied mathematics: Tr. 56th scientific conference of MIPT]. Moscow – Dolgoprudnyy, 2013, pp. 56-62.
17. Dorogush E.G. Matematicheskiy analiz modeli transportnykh potokov na avtostrade i upravleniya ee sostoyaniem [Mathematical analysis of the model of traffic flows on the highway and management of its condition]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2014, 90 p.
18. Babicheva T.S. Obobshchenie modeli ravnovesnogo raspredeleniya transportnykh potokov Bekmanna na sluchay ucheta zatrat ne preodolenie perekrestkov [Generalization of Beckmann's model of equilibrium distribution of traffic flows in the case of taking into account the costs of not crossing intersections], *Sovremennye problemy fundamental'nykh i prikladnykh nauk. Ch. VII. Upravlenie i prikladnaya matematika: Tr. 57-y nauchnoy konferentsii MFTI* [Modern problems of fundamental and applied sciences. Part VII. Management and applied mathematics: Tr. 57th scientific conference of MIPT]. Moscow – Dolgoprudnyy, 2014, pp. 124-132.
19. Hardy J. Smart City: A Traffic Signal Control System for Reducing the Effects of Traffic Congestion in Urban Environments. University of Derby, 2019, 52 p.
20. Metodicheskie rekomendatsii po razrabotke i realizatsii meropriyatiy po organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya na reguliruemyykh peresecheniyakh [Methodological recommendations for the development and implementation of traffic management measures. Organization of traffic at controlled intersections]. Moscow, 2017, 4 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

**Стрижко Михаил Александрович** – Донецкий национальный технический университет; e-mail: strizhko.mihail@yandex.ru; г. Донецк, ДНР; тел.: +7949464-2776; кафедра автоматизации и телекоммуникаций; аспирант.

**Strizhko Mikhail Aleksandrovich** – Donetsk National Technical University; e-mail: strizhko.mihail@yandex.ru; Donetsk, DPR; phone: +79494642776; the department of automation and telecommunications; graduate student.