

МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Михеева Т.И., Михеев С.В., Богданова И.Г.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», Самара, Россия (443086, Самара, Московское шоссе, 34), e-mail: mikheevati@mail.ru

Статья посвящена обзору моделей транспортных потоков в рамках функционирования интеллектуальных транспортных систем. Рассмотрен эффект внедрения интеллектуальных транспортных систем в управление транспортными потоками. Исследован опыт внедрения интеллектуальных транспортных систем за рубежом. Определены закономерности поведения транспортных потоков на улично-дорожной сети. Рассмотрены следующие существующие типы зависимостей между основными характеристиками транспортных потоков (интенсивностью, скоростью и плотностью): линейный тип, логарифмический тип, экспоненциальный тип, степенной тип, регрессионный тип, разрывной тип и вероятностный на основе распределения скорости. Предложен новый тип зависимости, основанный на введении дополнительных параметров. Данный тип позволяет получить дополнительную информацию о характере транспортного потока в критических точках насыщения транспортного потока и в случае транспортного затора.

Ключевые слова: транспортный поток, интеллектуальная транспортная система (ИТС), интенсивность, скорость, плотность.

MODELS OF TRAFFIC FLOW IN INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS

Mikheeva T.I., Mikheev S.V., Bogdanova I.G.

Samara State Aerospace University, Samara, Russia (443086, Samara, Moskovskoe shosse, 34), e-mail: mikheevati@mail.ru

Article reviews the models of traffic flow in the framework of intelligent transportation systems. Considered effect of introduction intelligent transportation systems into traffic flow management. Studied the experience of implementation of intelligent transport systems abroad. Defined the regularities of traffic flow behavior on the road network. The dependences between the main characteristics of traffic flow (intensity, velocity and density) of following types: linear type, logarithmic type, exponential type, power function type, regression type, and probabilistic on the basis of the velocity distribution. Dependence a new type, based on the introduction of additional parameters. This type allows you to get more information about the nature of the traffic flow at critical points of saturation of traffic flow in the case of traffic congestion.

Keywords: traffic flow, intelligent transportation system (ITS), intensity, velocity, density.

Системный подход к решению задач управления транспортной инфраструктурой большого города обеспечивается разработкой и использованием интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Анализ российского и зарубежного опыта проектирования и развития ИТС, принципов их интеграции, использования при осуществлении грузовых и пассажирских перевозок, при управлении транспортными потоками (ТрП) в различных транспортных ситуациях позволяет сделать вывод о целесообразности использования ИТС на автомобильном транспорте.

Термин «*Интеллектуальные транспортные системы*» характеризует комплекс интегрированных средств управления транспортной инфраструктурой (улично-дорожной сетью, техническими средствами организации дорожного движения, транспортными потоками), применяемых для решения задач организации дорожного движения, на основе современных

информационных технологий, организации информационных потоков о функционировании транспортной инфраструктуры в реальном режиме времени [1].

Цели создания и внедрения ИТС приведены на рисунке 1.



Рисунок 1. Основные цели интеллектуальных транспортных систем

Эффекты от внедрения ИТС

Преимущества и плюсы внедрения ИТС:

- для водителей
 - более высокая безопасность – значительно меньший риск ДТП;
 - уменьшение времени и стоимости проезда;
 - более высокий уровень комфортности управления транспортными средствами и информированности, улучшение прогнозируемости времени проезда.
- для окружающей среды
 - уменьшение шума и выбросов в атмосферу за счет более плавного изменения скорости транспортного потока и движения с постоянной скоростью.
- для национальной экономики
 - уменьшение потерь из-за ДТП;
 - снижение потерь, связанных с загрязнением окружающей среды;
 - уменьшение потерь, связанных с пробками;
 - улучшение использования существующей дорожной сети.
- для организаций, обслуживающих дорогу,
 - улучшение планирования ресурсов, особенно обслуживания в период зимы, а также для обоснованного прогноза дорожных работ.

Показательными являются эффекты, полученные для кольцевой автомагистрали в рай-

оне Мюнхена. После ввода ИТС на этом автобана получены данные, которые при сравнении предшествующего и последующего 3-летних периодов показали:

- уменьшение длины заторов на 67 %;
- снижение числа ДТП на 35 %;
- снижение числа ДТП с пострадавшими на 31 %;
- снижение числа пострадавших при ДТП на 30 %.

Проект в Хессене:

- уменьшение числа серьезных инцидентов на 30 %;
- уменьшение времени в пути на 20 %;
- увеличение пропускной способности на 25 %.

В таблице 1 приведены данные по результатам внедрения ИТС на примере SCOOT. В результате исследований по сравнению SCOOT с обычными системами он показал уменьшение задержек транспортных средств на 12 % в Глазго и 27 % в Ковентри. Сравнение проводилось через день на различных участках, включая плотную городскую сеть в центре Глазго и радиальную дорожную сеть в Ковентри. В Торонто SCOOT продемонстрировал уменьшение задержек транспорта на 14 % над системами с календарной автоматикой. В вечернее время и в субботу задержки уменьшились до 21 % и 34 %, соответственно. При проведении массовых мероприятий задержки уменьшились до 61 %, что демонстрировало устойчивость SCOOT к необычным событиям. Было также оценено, что внедрение ИТС сократило затраты на обновление программ координации в 30 человеко-лет.

Таблица 1. Результаты внедрения SCOOT

Период времени	Время в пути				Средняя скорость	
	SCOOT		без SCOOT		SCOOT	без SCOOT
	Среднее время, мин.	Кол-во ТС, шт.	Среднее время, мин.	Кол-во ТС, шт.		
7.00-9.00	0:10:15	1274	0:24:41	2370	14,6	6,91
13.00-15.00	0:14:31	1089	0:23:32	756	9,68	8,75
16.00-18.00	0:11:28	1707	0:14:53	1310	12,66	14,53

Модели транспортных потоков

Разработка и исследование эффективности различных методов управления транспортными потоками в рамках ИТС требует знания закономерностей их поведения на улично-дорожной сети (УДС) города – интенсивности движения, плотности, распределения интервалов между транспортными средствами (ТрС) в потоке в заданном сечении, времени проезда по некоторому участку УДС, транспортных задержек и др.

Одним из главных направлений теоретических и экспериментальных исследований в теории транспортных потоков в течение многих лет является изучение зависимостей между основными характеристиками ТрП. Несмотря на это, до настоящего времени не устранены некоторые противоречия между реальными данными и теоретическими предпосылками в основных моделях транспортного потока:

- рассеивание фактических данных параметров дорожного движения и детерминированные соотношения в макромоделях;
- постоянное значение отношения критической k_C и максимальной k_J плотности ТрП k_C / k_J для каждой из моделей и переменное значение отношения k_C / k_J в реальном ТрП;
- однотипность формы зависимости между параметрами транспортных потоков для каждой из моделей и изменение функциональной формы для реальных соотношений интенсивность – плотность, скорость – плотность;
- возможность разрывов между значениями характеристик ТрП при переходе от стабильного состояния к заторовому и гладкими соотношениями для теоретических макромоделей.

Характеристики транспортного потока

В рамках макроскопического подхода транспортный поток $\tilde{S} = \{\tilde{s}_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, движущийся по улично-дорожной сети – дугам $\tilde{e}_i \in \tilde{E}$ орграфа G , характеризуется общей средней скоростью v , плотностью потока k и интенсивностью движения I в определенный момент времени в определенной точке УДС.

На основе исследований дорожного движения и практики его организации выработаны многочисленные измерители и критерии. К наиболее часто применяемым показателям относятся:

- интенсивность движения I , авт./ч; авт./сут.;
- плотность транспортного потока k , авт./м, авт./км;
- скорость движения v , км/ч; м/с;
- продолжительность задержки движения D , с;
- состав транспортного потока $type^S$.

Транспортный поток \tilde{S} определен типом транспортных средств, составляющих его:

$type^S \in T = \{\text{'велосипед'}, \text{'мотоцикл'}, \text{'гужевая_повозка'}, \text{'легковой автомобиль'}, \text{'грузовик 1'}, \text{'грузовик 2'}, \text{'грузовик 3'}, \text{'автобус'}, \text{'троллейбус'}, \text{'автопоезд'}\}$,

т.е. тип ТС: $type^S \in T = \{1, 2, \dots, N\}$; где каждому типу поставлено в соответствие число: «велосипед» – 1, «мотоцикл» – 2, «гужевая повозка» – 3, «легковой автомобиль» – 4, «грузо-

вик 1» – 5, «грузовик 2» – 6, «грузовик 3» – 7, «автобус» – 8, «троллейбус» – 9, «автопоезд» – 10.

Для приведения неоднородного по составу потока к «однородному», состоящему только из легковых транспортных средств, для каждого типа ТрС определен коэффициент приведения $k_i^{\bar{s}}$. Для легкового автомобиля $k_4^{\bar{s}} = 1$, для мотоцикла – $k_2^{\bar{s}} = 0.5$ и т.д. Коэффициент $k_i^{\bar{s}}$ для разных типов грузовых ТрС определен их грузоподъемностью и варьируется от 1.7 для типа ТрС=«грузовик 1» до 3.5 для типа ТрС=«грузовик 3».

Движение транспортных средств на перекрестке канализируется и подразделяется на право-, левоповоротные и прямые потоки, регламентированные направлениями соответствующих дуг графа УДС и установленными дорожными знаками. Интенсивность соответствующих потоков является весовыми характеристиками дуг.

Макроскопические модели движения транспортного потока

В процессе развития макроскопических моделей транспортного потока, полученных в рамках классического подхода с использованием детерминированных зависимостей между интенсивностью, плотностью и скоростью транспортного потока, к моделям предъявлялись все новые требования в соответствии с уровнем задач организации движения и перевозок: $v = f(k, k_J, v_0, v_w, \zeta_1, \dots, \zeta_n)$, где k и k_J – плотность потока и максимальная (заторовая) плотность потока, соответственно; v_0 – скорость свободного движения, т. е. максимально возможная скорость на участке дороги; v_w – скорость кинематической волны при заторовой плотности; ζ_1, \dots, ζ_n – совокупность безразмерных параметров. В качестве дополнительного параметра может выступать эквивалентная дистанция: $\lambda = \frac{v_w}{v_0} \left(\frac{k_J}{k} - 1 \right)$. При одной и той же плотности эквивалентная дистанция уменьшается с увеличением скорости, что в полной мере согласуется с требованиями обеспечения безопасности движения, поскольку фактическая дистанция остается неизменной, а эквивалентная дистанция уменьшается, свидетельствуя об усложнении ситуации.

Рассмотрим зависимости следующих типов: линейная, логарифмическая, экспоненциальная, степенная, регрессионная, разрывная, вероятностная на основе распределения скорости.

Линейная зависимость между плотностью транспортного потока k и его скоростью v . Линейная зависимость впервые была предложена Гриншилдсом, выражается уравнением (1), впоследствии доработана Ричардсом (2):

$$v = v_0 \left(1 - \frac{k}{k_J}\right) \text{ и } I = v_0 k \left(1 - \frac{k}{k_J}\right), \quad (1)$$

$$v = \frac{4I_c}{k_J} \left(1 - \frac{k}{k_J}\right) \text{ и } I = \frac{4I_c}{k_J^2} k(k_J - k). \quad (2)$$

При высоких значениях скорости свободного движения v_0 применение модели Гриншилдса для определения пропускной способности приводит к завышенным результатам. Для однородного потока из легковых автомобилей при максимальной плотности ТП $k_J = 140 \div 160$ авт/км и скорости при уровне пропускной способности $v_C = 45$ км/час пропускная способность достигает $1800 \div 2000$ авт/час. Расчетные значения пропускной способности для этих условий по модели Гриншилдса составляют $3150 \div 3600$ авт/час. Степень соответствия расчетных и экспериментальных данных в модели Ричардса, так же, как и в модели Гриншилдса, повышается при снижении скорости свободного движения [4].

Логарифмический тип зависимости имеют макромоделли Гринберга (3) и Эл–Хозаини (4). Модель Гринберга описывается уравнениями:

$$v = v_0 \ln \left(\frac{k_J}{k}\right) \text{ и } I = kv_0 \ln \left(\frac{k_J}{k}\right), \quad (3)$$

и при достижении пропускной способности $k_C = \frac{1}{e} k_J$. Значение нормированной плотности k_C / k_J всегда равно 0.368 при максимальной интенсивности движения. Недостатком модели является то, что при плотности, стремящейся к нулю, расчетные значения скорости превышают скорость свободного движения:

$$v = v_0 \sqrt{2 \ln \frac{k_J}{k}} \text{ и } I = v_0 k \sqrt{2 \ln \frac{k_J}{k}}. \quad (4)$$

Максимальная интенсивность движения достигается при нормированной плотности $k_C / k_J = 0.60371$ и определяется как $I_C = e^{-0.5} v_0 k_J$. Модель Эл–Хозаини дает достоверные результаты при высокой плотности и скорости транспортного потока менее 17 км/час.

В макромоделлях, основанных на **экспоненциальной зависимости** между скоростью и плотностью и представленных моделями Андервуда (5), Дрейка (6), Зырянова (7), при высокой плотности движения ($k > 0.75k_J$) расчетные значения интенсивности превышают фактические:

$$I = v_0 k \exp \left(-\frac{k}{k_J}\right), \quad (5)$$

$$I = v_0 k \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{k}{k_J}\right)^2\right), \quad (6)$$

$$I = v_0 k \left(1 - \exp\left(\frac{k - k_J}{k}\right)\right). \quad (7)$$

Модель (4) дает достоверный результат только на участке насыщения.

Наиболее известные *степенные модели* Пайпса (8) и Д. Дрю (9) позволяют за счет коэффициента пропорциональности n трансформировать форму зависимости между плотностью и скоростью, приспосабливаясь к конкретным экспериментальным данным.

$$I = v_0 k \left(1 - \frac{k}{k_J}\right)^n, \quad (8)$$

$$I = v_0 k \left(1 - \left(\frac{k}{k_J}\right)^{\frac{n+1}{2}}\right). \quad (9)$$

При $n=1$ уравнение (1) является частным случаем (9).

Усложнение макромодели ТрП за счет введения дополнительных параметров (10) позволяет исследовать поведение транспортного потока в критических точках – насыщения ТрП и затора.

В качестве дополнительного параметра возьмем время прохождения участка УДС, равного длине автомобиля, движущегося со скоростью свободного движения: $t_v = \frac{\eta}{v_0 k}$, тогда основные характеристики ТрП при уровне пропускной способности будут определены следующим образом:

$$v_c = \frac{\sqrt{2}v_0(\sqrt{\eta^2 + 1} - \sqrt{2})}{\eta^2 - 1}, \quad k_c = \frac{\sqrt{2}k_J(\sqrt{\eta^2 + 1} - \sqrt{2})}{\eta^2 - 1},$$

$$I_c = 2v_0 k_J \left(\frac{\sqrt{\eta^2 + 1} - \sqrt{2}}{\eta^2 - 1}\right)^2. \quad (10)$$

Основная диаграмма транспортного потока, построенная по модели (10) для экспериментальных данных, полученных автором, представлена на рисунке 2.

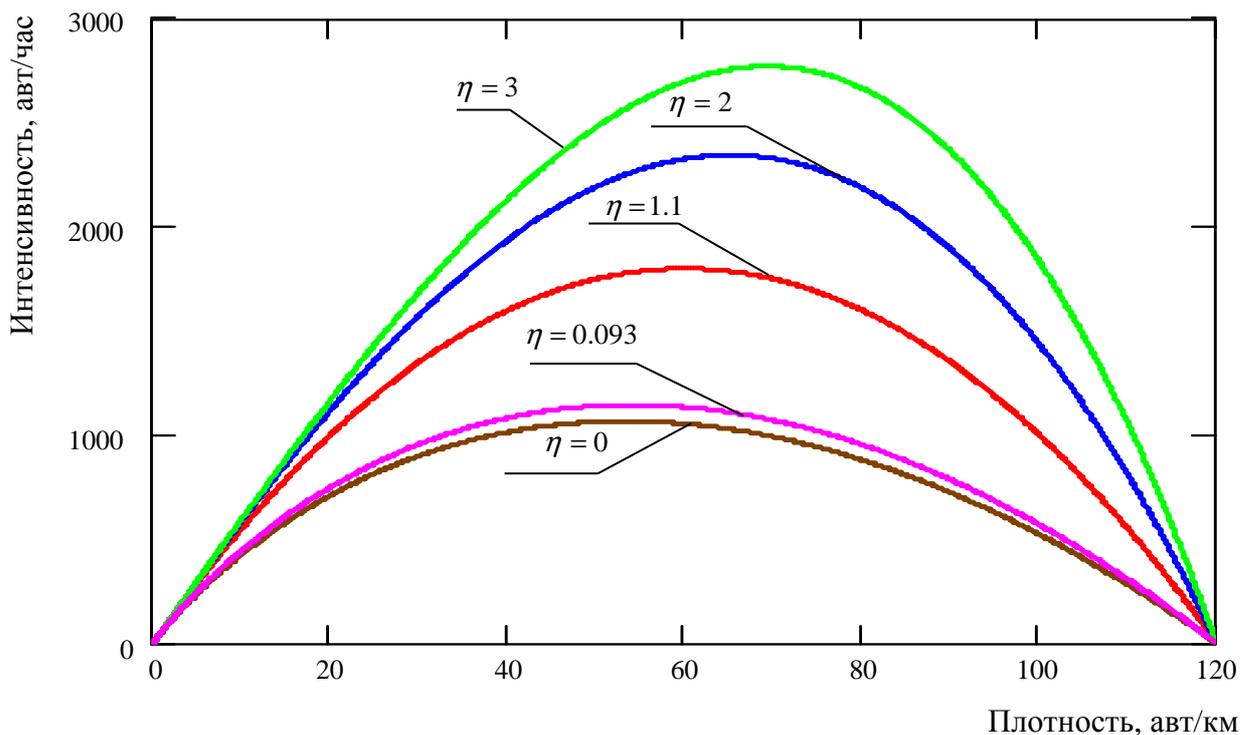


Рисунок 2. Основная диаграмма транспортного потока

Список литературы

1. Зырянов В.В., Кочерга В.Г. Моделирование транспортных потоков на городской сети // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах. – СПб.: СПб ГАСУ, 2006. – С.193-197.
2. Клишковштейн Г.И. Организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 1982. – 240 с.
3. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах / А.Б. Киселев [и др.] // Прикл. матем. и механ. – 2004. – Т.68, №.6. – С. 1035-1042.
4. Михеева Т.И. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных транспортных систем. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. – 380 с.
5. Михеева, Богданова, Сапрыкина – Интеллектуальное управление Транспортными потоками на локальном уровне / Синергетика в естественных науках // Труды международной междисциплинарной научной конференции. – Тверь, 2010. – С. 273-276.
6. Михеева Т.И., Михеев С.В. Объектно-ориентированный подход к построению интеллектуальных систем // Математич. моделирование информ. процессов и систем в науке, технике и образовании: Межвузовский сборник научных трудов. – Самара: Самарск. гос. арх.-строит. ун-т., 2010. – С.36-42.

Рецензенты:

Титов Б.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой организации и управления перевозками на транспорте, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара.

Хайтбаев В.А., д.э.н., профессор кафедры организации и управления перевозками на транспорте, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)», г. Самара.