



корпоративных информационных систем. – Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2013. – С. 68-72.

17. Михеева Т.И. Исследование методов локального управления транспортными потоками / Т.И. Михеева, С.В. Михеев, // Вестник СГАУ. Сер. «Актуальные проблемы радиоэлектроники» - Самара: СГАУ, - 2003. С. 24-30.

18. Михеева Т.И. Интеллектуальная транспортная система. Дислокация дорожных знаков // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки» №32. Самара: СамГТУ, 2005. С.53-63.

19. Михеева Т.И. Информационная технология автоматической дислокации геообъектов транспортной инфраструктуры на улично-дорожной сети / Т.И. Михеева, А.В. Сидоров, О.К. Головнин // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2013) //Труды межд. научно-техн. конф. – Самара: Изд-во Самарск. науч. центра РАН, 2013. – С.236-241.

Т.И. Михеева, А.Н. Тихонов, С.В. Михеев

МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ ITSGIS

(Самарский университет)

Системный анализ решения задач управления транспортной инфраструктурой обеспечивается разработкой и использованием интеллектуальных транспортных систем (ИТС) с аналитикой и визуализацией транспортных процессов и объектов на интерактивной карте геоинформационных систем (ГИС). Анализ российского и зарубежного опыта проектирования и развития ИТСГИС, 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 ИТСГИС на транспорте [1].

Качество производимой продукции, которое служит определяющим критерием безопасности и сроков эксплуатации транспортных средств (воздушного, авто, ж/д, водного транспорта), является одним из основных требований, предъявляемых к современному производству ИТСГИС. В связи с этим, задача контроля качества транспортных процессов на этапах проектирования и изготовления ИТСГИС рассматривается, как одна из приоритетных [2].

Сложная многоэтапная организация транспортных процессов, большое количество задействованных в нем ресурсов, высокая технологичность изделий и жесткие требования к соблюдению всех стандартов и норм, диктуют необходимость использования интеллектуальной транспортной геоинформационной системы «ITSGIS» управления транспортной инфраструктурой и сопровождения продукции на всех этапах ее жизненного



цикла. Для решения данной задачи используется класс CALS (Computer Aided Lifecycle Support). Данное направление в транспортной автоматизации является логическим продолжением и обобщением опыта развития CAD\CAE\CAM-систем, использовавшихся на отдельных этапах проектирования, подготовки данных к анализу. Класс CALS обеспечивает «ITSGIS» полное автоматизированное обеспечение жизненного цикла продукции: от этапа проектирования до момента утилизации. Одним из важнейших и неотъемлемых компонентов современной «ITSGIS.CALS»-системы является автоматизированный плагин контроля качества, внедрение которого является первоочередной задачей [3, 4].

Термин «*Интеллектуальная транспортная геоинформационная система*» характеризует комплекс интегрированных средств управления транспортной инфраструктурой (транспортной и улично-дорожной сетью, техническими средствами организации дорожного движения, транспортными потоками), применяемых для решения задач организации движения, на основе современных информационных технологий, организации информационных потоков о функционировании транспортной инфраструктуры в реальном режиме времени [5]. Цели создания и внедрения ITSGIS приведены на рис. 1.

Исходными данными на этапе технологической подготовки «ITSGIS» является конструкторская документация (стандарт) на комплектующие объекты транспортной инфраструктуры. На основе стандарта формируется технологическая документация на комплектующие и составляющие агрегаты геообъектов, которая для каждой детали семантики геообъектов содержит описание транспортных процессов.

На этапе разработки стандарта по технологической документации происходит изготовление комплектующих деталей, сборка агрегатов, семантики геообъектов. Требования к качеству комплектующих, точности обработки и визуализации на электронной карте геообъектов, правильности увязки деталей в комплексную сборку и к прочим аспектам транспортных процессов определяются множеством качественных критериев. Задача контроля соответствия качественных показателей продукции «ITSGIS» данным критериям возлагается на плагин обеспечения и контроля качества получаемых данных. Внешний контроль качества обеспечивается процедурами сертификации процесса функционирования «ITSGIS».

Обобщенная математическая модель M «ITSGIS» представляется группой объектов $M = \{A, B, S, P, F, G, H\}$, где A – множество требований по сертификации и надзору над геообъектами, B – множество положений по качеству аналитики и семантики, S – организационная структура транспортной инфраструктуры и P – транспортный процесс. Отображения $F: A \rightarrow B$, $G: B \rightarrow S$, $H: S \rightarrow P$ и композиции $GF: A \rightarrow S$, $HG: B \rightarrow P$ позволят установить соответствие требований по сертификации с организационной структурой транспортной инфраструктуры и выпускаемой продукцией «ITSGIS» с учетом качества функционала [6, 7, 8, 9].



Рис. 1. Основные цели интеллектуальных транспортных систем

Разработка и исследование эффективности и качества различных методов управления транспортной инфраструктурой, процессами, потоками в рамках «ITSGIS» требует знания закономерностей их поведения на транспортной сети: 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 (ТрП) в «ITSGIS» является изучение зависимостей между основными характеристиками ТрП [10, 11, 12]. 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 [5].

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 ТрС, 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 ТрС: $type^S \in T = \{1, 2, \dots, N\}$; где каждому типу поставлено в соответствие число: «велосипед» – 1, «мотоцикл» – 2, «гужевая повозка» – 3, «легковой автомобиль» – 4, «грузовик 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 $k_i^{\tilde{S}}$. Для легкового автомобиля $k_4^{\tilde{S}} = 1$, для мотоцикла – $k_2^{\tilde{S}} = 0.5$ и т.д. Коэффициент $k_i^{\tilde{S}}$ 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 транспортной сети и установленными техническими средствами организации дорожного движения [10, 11]. 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 [13]. 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 с позиции стандартизации функционала 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 ТрП $k_J = 140 \div 160$ 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:

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

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 макромоделях, 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, приспособиваясь 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 макромоделей 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:

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

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

Основная диаграмма ТрП, построенная по модели (10) для



экспериментальных данных, полученных при моделировании в «ITSGIS», представлена на рисунке 2 [14, 15].

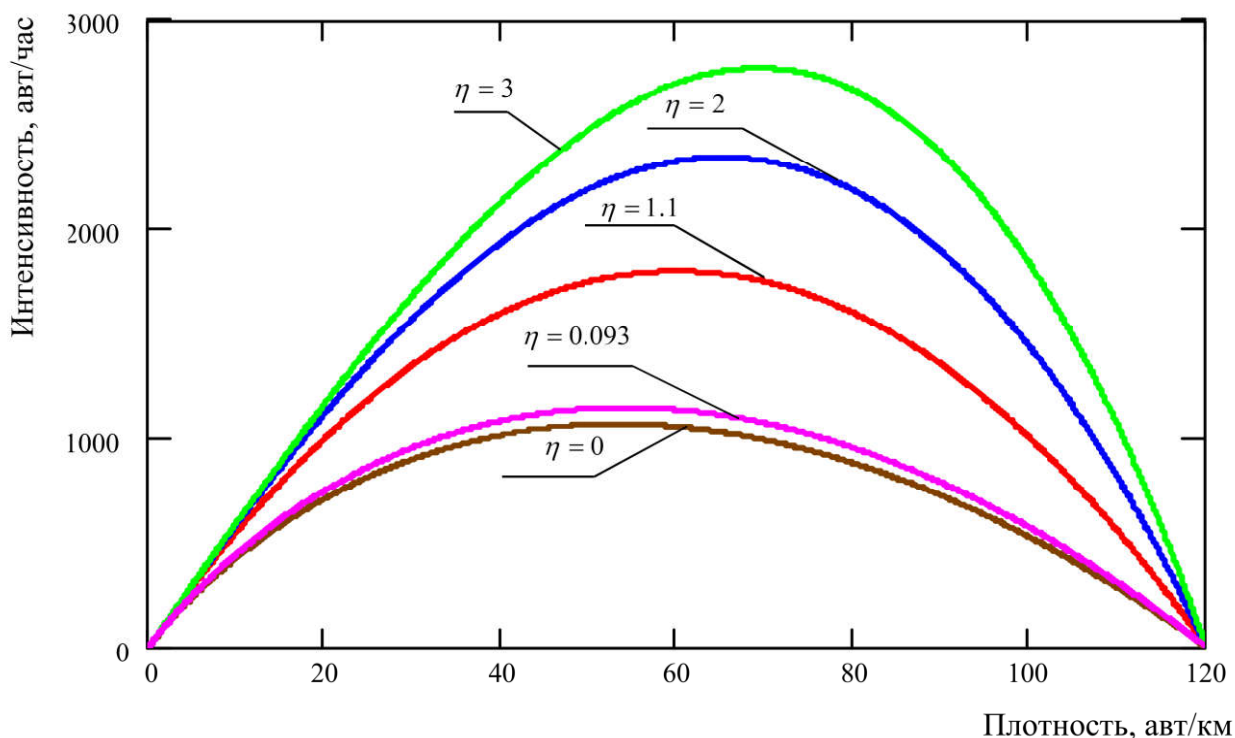


Рис. 2. Основная диаграмма транспортного потока

Литература

1. Математическое моделирование автотранспортных потоков на регулируемых дорогах / Киселев А.Б. [и др.]. // Прикл. матем. и механ. – 2004. – Т. 68, №. 6. – С. 1035-1042.
2. Руководство по сертификации и надзору за производством изделий авиационной техники. - М.: Межгосударственный авиационный комитет, Авиационный регистр, 1997. - 149 с.
3. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. Пер. с англ.- К.: Диалектика, 1998. - 784 с.
4. Брой М. Информатика. Теоретическая информатика, алгоритмы и структуры данных, логическое программирование, объектная ориентация: В 4-х ч. Ч.4. / Пер. с нем. - М.: Диалог-МИФИ, 1998. -224 с.
5. Михеева Т.И. Структурно-параметрический синтез интеллектуальных транспортных систем. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. – 380 с.
6. Михеев С.В. Технология построения графа улично-дорожной сети в геоинформационной системе / Михеев С.В., Головнин О.К., Щербаков А.Д. / Перспективные информационные технологии (ПИТ-2013) //Труды межд. научно-техн. конф. – Самара: Изд-во Самарск. науч. центра РАН , 2013. – С.227-230.



7. Михеева Т.И. Система медийного автоматизированного мониторинга автомобильных дорог / Т.И. Михеева, О.К. Головнин // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвуз. сб. науч. статей. – Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 193-198.

8. Михеев, С.В. Объектно-ориентированный подход к построению интеллектуальных систем / Михеева Т.И., Михеев С.В. // 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.

9. Михеева Т.И. Паттерны поддержки принятия решений по дислокации технических средств организации дорожного движения / Михеева Т.И., Головнин О.К. Перспективные информационные технологии (ПИТ-2013) //Труды межд. научно-техн. конф. – Самара: Изд-во Самарск. науч. центра РАН, 2013. – С.267-273.

10. 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.

11. Михеева Т.И. Исследование методов локального управления транспортными потоками / Михеева Т.И., Михеев С.В. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Сер. «Актуальные проблемы радиоэлектроники» - Самара: СГАУ, - 2003. С. 24-30.

12. Клинковштейн Г.И. Организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 1982. – 240 с.

13. Михеева Т.И. Модель пространственных данных оценки состояния объектов транспортной инфраструктуры в интеллектуальной ГИС «ITSGIS» / Т.И. Михеева, А.А. Федосеев, и др. //Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. – Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2013. – С. 68-72.

14. Интеллектуальная транспортная геоинформационная система ITSGIS. Ядро / Т.И. Михеева, С.В. Михеев, и др. – Самара : Интелтранс, 2016. – Т.1. – 171 с. – ISBN 978-5-9906857-4-1.

15. Чугунов А.И Система моделирования «Транспортная инфраструктура города» / Михеева Т.И., Рудаков И.А., Чугунов И.А. // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». 2008, №1. С. 28–38.