

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Е.А. Ефимова (Астраханский государственный университет)

Представлен анализ экспертных систем, применяемых для оценки пропускной способности городской транспортной сети, и транспортных диаграмм. Описана имитационная модель пропускной способности городской транспортной сети, с помощью которой возможно планирование и реконструкция автомобильных дорог.

Стремительный рост автомобильного парка ведет к возникновению транспортной проблемы не только в столице России, но и во всех крупных городах страны. Темпы прироста парка легковых автомобилей в России составляет ежегодно в среднем 3,8%, по Астраханской области – 9,6%. По прогнозам специалистов число легковых автомобилей по России будет увеличиваться ежегодно на 971649,1 ед. и в 2012 г. приблизится к 29427958 ед. Между тем, финансирование строительства и реконструкций автомобильных дорог сократились в 2 раза.

Ежегодное увеличение автомобильного парка ведет и к увеличению интенсивности дорожного движения, и, как следствие, к возникновению транспортной проблемы. Городские дорожные сети, построенные в 70-х годах и рассчитанные на меньшую загруженность, перестают справляться с постоянно растущими транспортными потоками, с пропускной способностью улично-дорожной сети, что приводит в крупных и особенно крупнейших городах к "транспортному параличу" городского движения, главным образом, в центральных районах города в часы "пик". Средняя скорость движения транспорта на некоторых магистралях в час "пик" приближается к скорости пешехода.

Проблема автомобильных "пробок" охватывает все большее число улиц города, "пробки" увеличиваются по своим размерам, их труднее ликвидировать. Одной перенастройкой режима работы светофоров данную проблему решить не удастся, поэтому необходимо вносить изменения и в конфигурацию дорожных развязок, принимать решение о строительстве дополнительных автодорог, принимая во внимание особенности каждого отдельного перекрестка [1]. Помимо таких негативных последствий, как потеря времени, перерасход топлива, преждевременный износ двигателей, повышенное загрязнение воздуха "пробки" являются наиболее раздражающим фактором для участников дорожного движения.

При проектировании автодорог следует учитывать последствия, к которым может привести любое изменение на всю автомагистраль в целом. При внесении изменений на одном участке дороги, обстановка может ухудшиться на участках, где проблем с прохождением автотранспорта не наблюдалось [1].

Эффективным способом повышения пропускной способности городских дорог является внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на базе современных информационных технологий, основным назначением которых является имитационное моделирование транспортного потока на городских автомагистралях с целью оптимизации взаимораспо-

ложения объектов дорожной и городской инфраструктуры, обеспечивающей ее максимальную пропускную способность как по отдельным участкам, так и по всей автомагистрали в целом. Далее осуществляется разработка на основе модели плана кратко- и среднесрочных мероприятий по реконструкции взаиморасположения объектов дорожной инфраструктуры и прогнозирование предельного времени работы автомагистрали без предзаторовых ситуаций в пределах существующей геометрии дорожно-транспортной сети в условиях роста городского автопарка.

Анализ экспертных систем для оценки пропускной способности городской транспортной сети

В настоящий момент на рынке ПО не существует программы, отвечающей всем требованиям поставленной задачи. Известны только узконаправленные экспертные системы, которые лишь затрагивают данную область, но не решают саму суть проблемы. Приведем несколько примеров.

Экспертная система RoadExpert ориентирована на решение проблем ДТП, произошедших на определенном участке дороги, а Геограком SW предназначена для определения потребности и уровня обеспеченности населения и экономики региона транспортной сетью и решает задачи в большей степени систем класса ГИС, нежели планирования загруженности автомагистралей.

Расчетно-экспертная система "ТЕНДЕР" предназначена для автоматизации проведения подрядных торгов на дорожно-строительные, проектно-изыскательские и научно-исследовательские работы; а ГЕОГРАД 1 – для стратегического планирования городского транспорта.

ITS (Intelligence Transport Systems) – системы, обеспечивающие "зеленую волну" на трассе, автоматическое регулирование перекрестков и ликвидацию пробок, "автопилотность" наземного транспорта, диспетчеризацию транспортного процесса, в том числе с использованием GPS. Среди последних для примера можно привести железнодорожные диспетчерские системы Rail.2.0., разработанное НПО "Глобо-центр" (Беларусь) и "Перевозки" фирмы Lester. А так же IndorGIS 5.2 – универсальная геоинформационная система, IndorCAD 5.2 – универсальная система автоматизированного проектирования инженерных сетей и дорог, ранее известная как ReCAD, IndorDraw 5.2 – система подготовки чертежей, ранее известная как RoAD.

Все вышеперечисленные системы, как правило, используют для моделирования потоков модифицированные методы (особенно из теории графов), поскольку до

Информацию о пробке всегда слышим по радио, когда в ней уже стоим.

Закон Мерфи

сих пор прогноз потоков является главной составляющей инвестиционных транспортных проектов.

Существуют и другие программные продукты, которые включают элементы искусственного интеллекта, мощные СУБД, такие как HDM-4 и TRIPS, они широко используются в комплексных транспортных системах городов.

Предпринимаются попытки компьютеризировать стратегическое планирование (в современном понимании) транспортных потоков. Одной из самых удачных таких попыток является виртуальный коллоквиум "Computer-aided policymaking", где представлены три системы поддержки принятия решений в области политической стратегии.

Таким образом, анализ существующих программных продуктов показывает необходимость разработки инструментария, позволяющего моделировать транспортные потоки на городских автомагистралях. Входными данными нового программного инструментария являются результаты поэлементного анализа автомагистрали, на основе транспортной диаграммы каждого участка дороги, значения пропускной способности автомагистрали и их пересечений.

В настоящее время пропускная способность дороги является важнейшим критерием, характеризующим качество ее функционирование. Под пропускной способностью понимают максимально возможное число автомобилей, которое может пройти через данный участок дороги за единицу времени.

Теория транспортных потоков рассматривает движение дискретных объектов по двумерным транспортным сетям, а с учетом многоярусных развязок и по трехмерным транспортным сетям. Она имеет много общего с теорией систем массового обслуживания и с теорией телетрафика.

Известны три основных свойства транспортного потока, характеризующие его как самостоятельную систему:

- время обслуживания и пребывания машины на дороге как функция скорости движения автомобиля,
- интенсивность движения, характеризующая входной поток, имеет нелинейную зависимость от плотности машин на дороге и скорости движения, таким образом, поток обслуженных машин нелинейно связан с входным потоком,
- физические размеры транспортных средств и сетей – соизмеримые величины, поэтому в отдельных местах возможно возникновение помех движению и скопление транспорта.

Обобщение математических исследований транспортных потоков были предложены Ф. Хейтом [2].

Анализ транспортных диаграмм

Рассматривая транспортные диаграммы можно составить обширную библиографию, где в качестве примеров назовем работы Крейттона, Уордропа, Форбеса и Гриншилдса (таблица).

Здесь случай 2 удовлетворяет условию для потока большой плотности. Каметани и Сасаки рассматривают довольно сложную систему, в которой учитывают характер движения автомобиля. Они ввели уравнение, которое содержит ускорение головного и ведомого автомобилей, а также допускается изменение скорости головного автомобиля. Данное уравнение используется для выведения "показателя безопасности".

В случае 3 выполняется условие для потока малой плотности. В результате Эдай показывает, что уравнения (2) и (3) можно рассматривать совместно. Однако в уравнениях нарушается непрерывность, что соответствует разрыву между свободным движением

Таблица

№ случая	Формула интенсивности потока	Автор	Данные	
			Входные	Выходные
1	$\rho = C \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda'}\right)$	Пайпс	λ – плотность потока C – оптимальная скорость λ' – величина, обратная длине автомобиля	Зависимость между интенсивностью и плотностью потока при плотном потоке
2	$\rho = C\lambda \log \frac{\lambda'}{\lambda}$	Гейзис/ Каметани и Сасаки	C – оптимальная скорость λ – плотность потока	
3	$\rho = m_0 \lambda e^{-C\lambda}$	Эдай	C – оптимальная длительность промежутка времени между последовательными автомобилями m_0 – скорость группы автомобилей	Зависимость между интенсивностью и плотностью потока при редком потоке
4	$\rho = \frac{m_0 \lambda \alpha \log \frac{\lambda'}{\lambda}}{\beta \log \frac{\lambda'}{\lambda} + \alpha}$	Гейзис	λ – плотность потока α и β постоянные величины m_0 – средняя скорость автомобиля λ' – величина, обратная длине автомобиля	Средняя скорость бесконечно быстрого автомобиля
5	$\rho = \frac{A\lambda(\lambda' - \lambda)}{B\lambda' + C\lambda}$	Гейзис, Герман, Ротери	A, B, C – постоянные величины λ – плотность потока λ' – величина, обратная длине автомобиля	
6	$\rho = \lambda m_0 \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda'}\right)$	Гриншилдс	λ – плотность потока m_0 – средняя скорость автомобиля λ' – величина, обратная длине автомобиля	Линейное соотношение между средней скоростью и плотностью потока (теоретически)
7	$\rho = \frac{\lambda m_0 \sqrt{(\lambda' - \lambda)}}{A m_0 + \sqrt{(\lambda' - \lambda)}}$	Герин и Пальмер	λ – плотность потока m_0 – средняя скорость автомобиля A – постоянная величина λ' – величина, обратная длине автомобиля	Линейное соотношение между средней скоростью и плотностью потока (опытным путем)

транспорта и затором. В случаях 4 и 5 рассматривается движение нескольких параллельных транспортных потоков в одном направлении. Линейная зависимость скорости группы автомобилей от плотности впервые предложена Гриншилдом (случай 6). Вариант 7 базируется на применении экспериментальных данных [2].

Интенсивность потока должна удовлетворять простым граничным условиям: [2]

1) $\rho = 0$ для $\lambda = 0$ – автомобиль может иметь скорость свободного движения лишь при отсутствии транспортного потока;

2) $\rho = 0$ для $\lambda = \lambda'$ – в случае затора автомобиль останавливается;

3) $m = 0$ при $\lambda = \lambda'$ – возможность при желании остановить автомобиль;

4) $m = m_0$ при $\lambda = 0$ – скорость автомобиля равна скорости группы автомобилей при отсутствии транспортного потока;

5) $\lambda = 0$ абсолютно свободная дорога, где средняя скорость выражается в виде предела

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} m(\lambda) = m_0.$$

Из таблицы следует, что случаи 1, 2, 4, 6 не содержат понятия пропускной способности, случай 3 может соответствовать понятию пропускной способности, а случаи 5 и 7 соответствуют определению пропускной способности. Также по данной таблице можно определить выполнение граничных условий: в случае 1, 2 не происходит выполнение ни одного граничного условия. Рассматривая случай 3 можно сказать, что 1-4 условия не выполняются, а 5 – частично, в 4 случае происходит выполнение условий 1-4, а 5 граничное условие не выполняется. Более наглядно выполняет все граничные условия 7 случаев, а в 5 и 6 случаях происходит выполнение 1-4 условия, но зато 5 выполняется частично. [2]

Математическая модель развития автомобильного затора с использованием основной транспортной диаграммы

Для достижения максимальной точности получаемого результата при прогнозировании ситуаций на автомагистралях генерируемый трафик должен адекватно описывать взаимодействия интенсивности и плотности автомобильного потока, времени восстановления движения как функции средней скорости движения по отдельным участкам и по всей автомагистрали в целом. С этой целью проводится поэлементный анализ автомагистрали, используя основную транспортную диаграмму каждого участка доро-

ги, на основе которого выделяются дорожные участки с минимальной пропускной способностью. Теоретически устанавливается их максимально возможная величина пропускной способности, и по критерию min-max (по минимальному значению максимально возможной величины пропускной способности из всего множества всех элементов дороги) проводится оптимизация взаиморасположения объектов дорожной и городской инфраструктуры, обеспечивающей согласованную пропускную способность по всей автомагистрали в целом.

В связи с этим имитационная модель содержит:

- модуль существующей геометрии автомагистрали и обслуживающей инфраструктуры, включающий: длину дороги и ее рядность; взаимное расстояние между перекрестками и остановками общественного транспорта; дорожные знаки и разметку дороги; кольцевые развязки и сужения дорожного полотна; участки дороги с неудовлетворительным дорожным покрытием; наличие крутых поворотов и нерегулируемых перекрестков; взаиморасположение производственных, административных и торговых центров;

- модуль, описывающий параметры движения как машин, так и пешеходов, который, во-первых, должен учитывать, что максимальная скорость движения по городу ограничена 60 км/ч, и включать: интенсивность потока автомашин как по рядам, так и по всей автомагистрали в целом; интенсивность движения общественного и грузового транспорта; изменения интенсивности потока машин на перекрестках, следующих прямо, направо и налево; временную (суточную) динамику интенсивности потока машин и пешеходов.

- модуль, характеризующий временные зависимости и включающий: длительности фаз работы светофоров и их синхронизацию; начало парковок автомобилей и их среднее время стоянок около производственных, административных и торговых центров; среднее время нахождения общественного транспорта на остановках; интервал безопасности между машинами – среднее время реакции водителя.

В основу имитационной модели положена математическая модель развития автомобильной "пробки" на автомагистралях города, составляющая базу второго модуля.

Автором предложена математическая модель, описывающая основную транспортную диаграмму и время восстановления движения как функции средней скорости, так и ее изменений.

Таким образом, первоначально задаем геометрию дороги, чтобы учесть конечные размеры машины и связать их со временем обслуживания автомобиля дорогой, введен δ участок дороги, который представляет собой прямую линию перпендикулярную движению транспорта (рис. 1) [3].

Автомобиль длиной l , двигаясь со скоростью v , будет занимать δ участок дороги в течение времени:

$$\Theta = l/v. \quad (1)$$

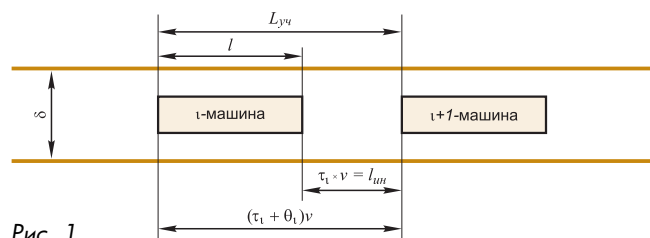


Рис. 1

Таким образом, длительность промежутка времени Θ будет представлять собой время обслуживания автомобиля δ участком дороги или в более общей форме соотношение (1) можно записать через интеграл свертки в виде:

$$\Theta = \frac{\int_0^{\infty} \delta(x-l)L(x)dx}{v}, \quad (2)$$

где $L(x)$ – функция, описывающая длину автомобиля, например, имеющая прямоугольную форму: $L(x) = 1$, если $0 < x < l$ и $L(x) = 0$ для остальных x . Если автомобиль движется с постоянной скоростью по участку дороги длиной $L_{yч}$, то время нахождения машины на указанном участке или время обслуживания автомобиля данным участком дороги будет определяться формулой:

$$\Theta_{L_{yч}} = \frac{\int_0^{\infty} \delta(x-u) \int_0^{\infty} L_{yч}(z-u)L(z)dzdx}{v}, \quad (3)$$

для $L_{yч}(x) = 1$, если $0 < x < L_{yч}$, соотношением:

$$\Theta_{L_{yч}} = \frac{L_{yч} + 2l}{v} \quad (4)$$

для $L(x) = 0$ и остальных x .

Полученное выражение показывает, что обслуживание машины дорогой начинается с момента въезда переднего бампера на указанный участок и заканчивается, как только задний бампер машины покинет его.

Введем следующие характеристики потока машин: τ_i длительность промежутка времени между последовательными автомобилями, который характеризует интервал – $\tau_i \cdot v$ – между задним бампером i машины и передним бампером $i + 1$ машины (рис. 1). Тогда величина $T_i = \tau_i + \Theta_i$ будет характеризовать мгновенное значение периода следования машин, а произведение $T_i \cdot v = l_{ин}$ расстояние между последовательными автомобилями. Согласно определения, приведенным в [1] при синхронном счете, интенсивность потока – λ и ρ – плотность автомобилей на дороге записывается в следующей форме:

$$\lambda = \frac{\Delta N}{\Delta t}, \quad \rho = \frac{\Delta N}{\Delta x}, \quad (5)$$

где ΔN – число машин, проехавших мимо наблюдателя за время Δt , а Δx – длина дороги, на которой, например методами точной аэрофотосъемки, зарегистрировано ΔN автомобилей. Хотя число машин – дискретная величина, однако, если наблюдается фиксированное число машин за промежутки времени Δt или на длине дороги Δx , которые могут непрерывно изменяться в зависимости от условий движения, то функциональные соотношения (5) обладают свойством непрерывности. Тогда умножив и разделив правую часть (5) на Δx , получим:

$$\lambda = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{\Delta x}{\Delta x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{\Delta N}{\Delta x} = v \frac{\Delta N}{\Delta x} = v \cdot \rho. \quad (6)$$

В общем случае, скорости машин являются функцией времени, воспользовавшись свойством непрерывности, продифференцируем соотношение (6) или, используя зависимости (5), получим:

$$\frac{d^2 N}{dt^2} = \frac{dv}{dt} \frac{dN}{dx} + v^2 \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (7)$$

со следующими граничными условиями:

$$\lambda = \frac{dN}{dt} = 0 \text{ при } v = 0, \quad \rho = \frac{dN}{dx} = \frac{1}{l} \text{ при } v = 0, \quad (8)$$

и начальными условиями $t_{нач} = 0, v = v_{нач}$ и $t = t_{кон}, v = v_{кон}$.

Обращаясь к граничным условиям, необходимо отметить, что из трех величин λ, v и ρ , теоретически только ρ имеет максимальное значение. Этим значением можно считать величину, обратную длине автомобиля, например (4,5 м)⁻¹, поскольку превышение данного значения уже описывает аварийную ситуацию, одна машина въехала в другую. В действительности можно наблюдать некоторые максимальные значения параметров λ и v , однако с теоретической точки зрения не имеет смысла устанавливать какой-либо абсолютный верхний предел интенсивности потока или скорости движения. Решение полученного уравнения (7), представляющего собой квазиволновое уравнение, составляет определенные трудности. Здесь, для решения данного уравнения, используем асимптотические методы: решим уравнение (7) в области низких и предельных значений плотности автомобильного потока, а затем, используя двухточечную аппроксимацию Паде, сравним предельные выражения для получения общего решения. В области малых значений для плотности автомобильного потока, когда расстояния между автомобилями велики $L \gg l$, если изменения плотности существенно меньше самой величины, т.е. $\rho > d\rho/dx$. Интегрируя уравнение $d\lambda/dt = (d\lambda/dt) \cdot \rho$ при граничных условиях $\lambda = 0$ при $v = 0$, получим $\lambda = v \cdot \rho$. Таким образом, для малых значений плотности транспортного потока интенсивность движения линейно связана с плотностью и образует семейство прямых, параметрически зависящих от скорости. Для другой предельной области, плотность автомобильного потока может увеличиваться и приближаться к его предельным значениям только при снижении скоростей автомобилей. Если машины начинают тормозить с постоянным ускорением a , то с течением времени расстояние между машинами начнет уменьшаться, а средняя плотность машин на дороге начнет возрастать по следующему закону

$$\rho = \frac{1}{l + \frac{a(\tau - t)^2}{2}}.$$

При втором граничном условии (8) найдем следующее выражение для интенсивности потока машин в зависимости от времени и параметров изменения скорости:

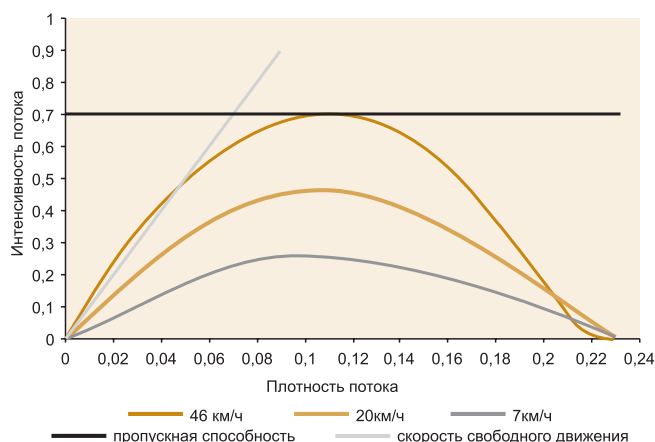


Рис. 2. Транспортная диаграмма

$$\lambda(t) = \frac{dN}{dt} = \int \frac{d^2N}{dt^2} dt =$$

$$= \int \left\{ \frac{-2a}{2l + a(\tau - t)^2} - \frac{4a^2(\tau - t)^2}{[2l + a(\tau - t)^2]^2} \right\} dt =$$

$$= -2 \frac{(\tau - t)}{2l + a(\tau - t)^2} + 2a \sqrt{\frac{2}{l \cdot a}} \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{2} a(\tau - t) \sqrt{\frac{2}{l \cdot a}} \right].$$

Далее, используем технику двухточечной аппроксимации Паде, которая описывает при заданных условиях движения основную транспортную диаграмму, получаем аппроксимирующие решения:

$$\lambda[v, a, \rho] = \frac{9,1 \cdot v \cdot \rho}{\left[2,09 \cdot a^{\frac{3}{2}} - 4,24 \sqrt{a} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - 4,5 \right)^{\frac{1}{2}} + \right.} \quad (9)$$

$$\left. + 10,61 \sqrt{a} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - 4,5 \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

В графическом виде (9) во всем диапазоне изменения аргумента ρ имеют следующие формы (рис. 2), построенные в зависимости от параметров v и a . На рис. 2 представлена основная транспортная диаграмма, построение которой происходит по заданным значениям скорости, ускорения и изменяющейся плотности потока в пределах $0 \dots 0,23$.

Анализ приведенной диаграммы показывает, что максимальная интенсивность потока машин при средней скорости их движения $v = 46$ км/ч равна $\lambda_{\max} = 84$ маш./мин, при этом среднее расстояние между машинами составляет 9,1 метра, а средний промежуток между ними (от заднего бампера ведущей машины до переднего бампера следующей машины) равен 4,6 метра. При средней скорости потока, равной 20 км/ч, максимальная интенсивность потока машин составляет 40 маш./мин, а при $v = 7$ км/ч $\lambda_{\max} = 11,6$ маш./мин соот-

ветственно. Полученные диаграммы можно использовать для анализа условий возникновения на дороге предзаторовых и заторовых ситуаций.

В предложенной математической модели, где основные характеристики транспортного потока рассматриваются как меняющиеся величины в процессе движения (интенсивность и плотности потока, средняя скорость движения в зависимости от дорожных условий и дорожной и городской инфраструктуры), появилось ускорение, так как в процессе движения происходит либо ускорение, либо торможение. Таким образом, получена транспортная диаграмма, необходимая для схемы организации движения. На основании транспортной диаграммы можно сформулировать правила для принятия управляющих и регулирующих решений к экспертной системе по повышению пропускной способности городской транспортной сети. А также появляется возможность получать точные объективные показатели загруженности той или иной магистрали, графики суточных и сезонных пиков и спадов движения транспорта. Эта информация не просто вооружит специалистов конкретными цифрами и фактами, но и поможет при разработке ИТС дорожно-транспортной сети города.

В ходе исследований транспортного потока была разработана система для автоматизированного контроля и анализа предзаторовых ситуаций транспортных потоков (№2007117188 от 07.05.07г) на каждой из полос движения и выдачи предупреждающих сигналов о возможном развитии автомобильных заторов. Система состоит из радиолокационных сенсоров, расположенных над каждой из полос движения и блока регистрации и управления, который содержит устройство определения скорости движения транспортного средства, устройство классификации объема ТС, а также устройство анализа предзаторовых ситуаций. Анализ предзаторовых ситуаций базируется на полученной математической модели транспортного потока. Экспериментальное внедрение системы для автоматизированного контроля и анализа предзаторовых ситуаций планируется произвести на отдельных, наиболее проблемных участках транспортной сети г. Астрахани. В ближайшей перспективе Управление транспорта и связи администрации города Астрахани предполагают произвести более широкое внедрение на улицах города.

Список литературы

1. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения. М.: ИКЦ "Академкнига", 2005.
2. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1966.
3. Холодов Ю.В., Ефимова Е.А. Анализ развития автомобильного затора с использованием основной транспортной диаграммы // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности: Сб. научн. статей по материалам всероссийской научной конференции 18-20 апреля 2007 г. Астрахань, 2007.

*Ефимова Евгения Аркадьевна – ассистент кафедры "Управление качеством" Астраханского государственного университета.
Контактный телефон(8512) 5-18-17. E-mail: kachestvo@aspu.ru*