

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАЛИБРОВКА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА АВТОМАГИСТРАЛИ УЛИЦАХ ГОРОДА ТАШКЕНТА

*Садуллаева Мавжуда Зиядуллаевна*

*Доцент Ташкентский Государственный Транспортный Университет*

*Юлдашев Санжар Атабекович*

*Старший преподаватель, Ташкентский университет прикладных наук*

**Аннотация:** В статье описаны методы моделирования и калибровки транспортных потоков на автомагистралях и улицах города Ташкента.

**Ключевые слова.** Микроскопические модели, шоссе, транспорт, моделирование.

## TOSHKENT SHAHRI AVTOMAGISTRALI VA KO‘CHALARIDA TRANSPORT OQIMINI MODELLASHTIRISH VA KALIBRLASH

**Annotatsiya:** Maqola Toshkent shahri avtomagistrali va ko‘chalarida transport oqimini modellashtirish va kalibrlash usullarining mazmuni ochib berilgan.

**Kalit so‘zlar.** Mikroskopik modellar, avtomagistral, transport, modellashtirish.

## MODELING AND CALIBRATION OF TRAFFIC FLOW ON THE HIGHWAY AND STREETS OF THE CITY OF TASHKENT

**Abstract:** The article describes the methods of modeling and calibrating the traffic flow on highways and streets of Tashkent city.

**Keywords.** Microscopic models, highway, transport, modeling.

Изучение транспортного потока проводится, чтобы помочь предотвратить и устранить проблемы с пробками на дорогах. Первые попытки разработать математическую теорию транспортных потоков относятся к 1930-м годам. Например, те годы во Франкфурте были сформулированы следующие соображения по поводу транспортных пересечений: «перпендикулярные пересечения создают большую неразрешимую проблему. Эта проблема возникает в связи с необходимостью формирования сети автобанов. Эта транспортная сеть приводит к появлению перпендикулярных пересечений двух дорог. Подобное пересечение позволяет реализовать 12 направлений - по прямому направлению, а также поворачивающие. То есть обычное пересечение подразумевают под собой 8 точек слияния потоков (в конце правых и левых поворотов), 4 точки пересечения под прямым углом (на пересечении прямолинейных направлений) и 12 точек пересечения под тупым углом (на пересечении левых поворотов друг с другом

и с прямолинейным направлением). То есть в сумме 8 точек повышенного внимания и 16 точек повышенной аварийности. Необходимо найти способ избежать появления этих конфликтных точек пересечения потоков».

Однако, несмотря на интенсивные исследования по вопросу транспортного потока, до сих пор не существует удовлетворительной математической теории для описания реальных условий транспортного потока. Это связано с тем, что дорожные события являются сложными и нелинейными из-за взаимодействия нескольких транспортных средств. Более того, транспортные средства взаимодействуют только подчиняясь законам физики. Они встречаются не только у людей, на них также влияют психологические реакции водителей. В результате мы наблюдаем хаотические события, такие как формирование кластеров и обратное распространение ударных волн, связанных со скоростью и плотностью транспортных средств, которые очень трудно смоделировать математически. Согласно отчету Совета по транспортным исследованиям, математические модели транспортных потоков можно классифицировать следующим образом:

- Модели характеристик транспортных потоков,
- Модели человеческого фактора,
- Модели отслеживания транспортных средств,
- Модели непрерывного потока,
- Макроскопические модели потока,
- Модели воздействия трафика,
- Модели перекрестков без сигнализации,
- Модели перекрестков с сигнализацией,
- Модели имитации дорожного движения.

Теория характеристик транспортных потоков включает в себя несколько математических моделей, разработанных для описания взаимосвязей между переменными транспортных потоков, такими как скорость, поток и концентрация или плотность. Моделирование человеческого фактора имеет дело с важными аспектами производительности человеческого фактора в контексте человеко-машинных интерактивных систем. Примерами этого являются время восприятия-реакции, время управления движением и реакция на устройства управления дорожным движением, движение других транспортных средств и опасности на дороге. Кроме того, теория человеческого фактора имеет дело с эффективностью управления, которая лежит в основе рулевого управления, торможения и контроля скорости. Теория человеческого фактора лежит в основе разработки моделей слежения за транспортными средствами.

Модели слежения за транспортными средствами исследуют, как отдельные транспортные средства (и их водители) следуют друг за другом. Как правило, эти модели строятся на отношениях стимул-реакция. Модели слежения за транспортными средствами, трафик из дискретных частиц (единицы «водитель-транспортное средство») признает это. Взаимодействие между этими единицами определяет поведение водителя в отношении моделей скорость-плотность потока. Модели непрерывного потока больше связаны с общим статистическим поведением транспортного потока, чем с взаимодействиями между частицами.

Подобно парадигме модели непрерывности, модели макроскопического потока используют макроскопическое представление трафика в сети, а не исследуют отдельные транспортные средства или отдельные компоненты системы (такие как ссылки или перекрестки). Макроскопические модели потока учитывают такие переменные, как скорость потока, плотность, и игнорируют индивидуальные реакции транспортных средств. Модели воздействия на движение связаны с моделями безопасности дорожного движения, расхода топлива и качества воздуха. Модели безопасности дорожного движения описывают взаимосвязь между транспортным потоком и частотой аварий. Теория моделей не сигнализированных соединений имеет дело с теорией принятия зазора и основными распределениями, используемыми в расчетах допуска зазора. Модели сигнальных перекрестков используют статистическую теорию транспортного потока для оценки задержек и очередей на изолированных перекрестках, включая влияние других светофоров в потоке.

И последнее, имитационное моделирование трафика связано с моделями трафика, встроенными в пакеты моделирования, и процедурами, используемыми для проведения экспериментов по моделированию. Математически задача моделирования транспортного потока может быть решена в двух основных масштабах наблюдения. Эти шкалы представляют собой микроскопический и макроскопический уровни. На микроскопическом уровне каждый инструмент рассматривается отдельно, поэтому для каждого инструмента обычно существует невязанное дифференциальное уравнение. На макроскопическом уровне это парциал, включающий такие переменные, как плотность, скорость и расход транспортного потока во времени и пространстве. Используется аналогия гидродинамических моделей с системами дифференциальных уравнений.

### **1. Микроскопические модели.**

Микроскопическая модель содержит дискретные единицы с такими характеристиками, как скорость, ускорение и индивидуальное взаимодействие

водителя и транспортного средства. Микроскопические модели можно разделить на различные типы в зависимости от подхода к модели слежения за транспортными средствами. В этих моделях положение транспортного средства рассматривается как непрерывная функция, и каждое транспортное средство управляется простым дифференциальным уравнением, которое зависит от скорости и расстояния до впереди идущего автомобиля. Другой тип микроскопических моделей разработан как полностью дискретные модели времени, которые отличаются от подхода модели слежения за транспортными средствами. Они видят дорогу как ряд ячеек, которые либо пусты, либо заняты транспортным средством. Одной из таких моделей являются стохастические транспортные клеточные автоматы.

## **2. Макроскопические модели.**

В процессе моделирования изучаются усредненные характеристики потока, такие как плотность, средняя скорость, интенсивность, но отдельные транспортные средства не рассматриваются. Макроскопические модели могут быть непрерывными, описываемыми дифференциальными уравнениями в частных производных, или дискретными. Гидродинамические модели могут учитывать или не учитывать инерцию. Модели, не учитывающие инерцию, нередко получают из уравнения неразрывности и рассматривают скорость как функцию плотности. Данное обстоятельство позволяет описывать движение локально равновесного потока. Модели, представленные уравнениями Навье – Стокса, учитывают эффект инерции и описывают тенденцию автомобилистов ехать с желаемой скоростью. В результате применения макроскопических моделей обычно определяются время движения, средняя скорость, уровень загрузки сети, интенсивность движения. Моделирование на макроуровне имеет определенные достоинства: невысокие требования к компьютерным технологиям, высокая скорость расчетов. Однако обладает и недостатками: полученные результаты являются статичными и недостаточно точными; для решения задач сложно определять исходные данные ([1]-[5]).

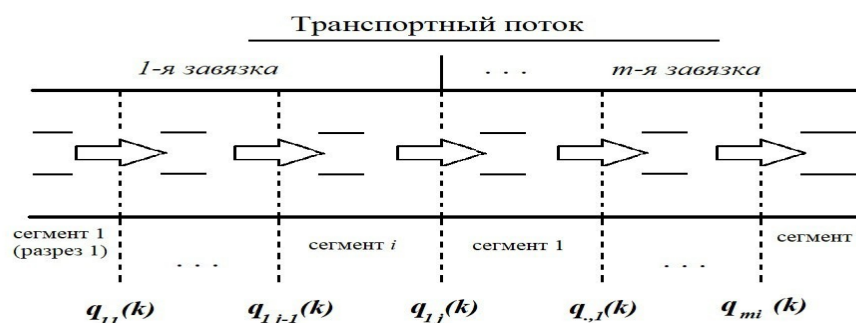
Рассмотрим модель METANET, которая представляет собой детерминированную макроскопическую модель транспортного потока второго порядка. Эта модель возникла путем добавления дополнительных членов к уравнению средней скорости, которое является вторым уравнением модели Папагеоргиу и Пейна, в разработанных процессах моделирования транспортных потоков. Основные причины выбора модели METANET:

- Прогнозирование влияния посещаемости участков дорог и сокращения полосы движения на транспортный поток;
- Прогнозирование влияния управляющих действий, таких как контроль посещаемости и DHS, на транспортный поток;

- В случаях, когда изменения плотности в горлышках бутылок велики, влияние ударной волны;
- Влияние изменений спроса на переменные трафика в районе исследования и прогнозирование очередей.

Чтобы модель METANET могла прогнозировать транспортный поток в изучаемой области, необходимо оценить параметры модели. Для этого необходимо определить геометрические особенности рабочей области и подготовить соответствующие матрицы данных для калибровки METANET. Калибровка-это измерение модели METANET, измеренное в полевых условиях. Он завершается нахождением параметров, которые создают матрицу с принятой частотой ошибок. Когда для калибровочных параметров определены предельные значения, задача превращается в задачу оптимизации граничных значений. В исследовании для процесса оптимизации использовалась встроенная в MATLAB функция **fmincon**. Эта функция оптимизируется с использованием алгоритма последовательного квадратичного программирования. С помощью этой программы оценивались параметры METANET.

В применение модели METANET переменные дорожной ситуации определены для временного шага  $k$  и сегментов дороги  $i$ . METANET вычисляет три матрицы переменных дорожной ситуации, соответствующие дискретным векторам пути и времени. Это средняя скорость  $v$ , плотность  $p$  и текущая  $q$ , матрица, полученная из этих двух переменных. В этом модели рабочий участок состоит из связей и узлов их соединения. Тем не менее, завязки  $m$  разделены на более мелкие части, сегменты  $i$  образуют завязки (рис. 1).



Например, на рисунке 1 текущее значение для завязки 1 сегмента 1 обозначено как  $q_{11}$ . При расчете переменных состояния завязки, одного и того же сегмента используются калиброванные параметры завязки. По этой причине, определяются по местам возникновения характерных изменений

сегментных потоков. Изменения количества полос, вкраплений – это точки, где разрез отличается, и здесь размещаются узловые точки.

METANET может моделировать транспортный поток на участке (зоны) дороги на основе прибытия, если водители учитывают поведение при выборе дороги. В этом типе моделирования трафик, проходящий через сегмент, распределяется по разным связям от узла в конечной точке сегмента. Это распределение зависит от спроса на трафик, поступающий в сегмент в разных пунктах назначения. Поскольку в этом исследовании не используется эта модель, основанная на пунктах назначения, эта деталь не будет вводиться. Отсюда получим следующие уравнения модели METANET, для расчета плотности  $\rho$ , за  $k$  временных шагов, со средней скоростью  $v$  и с потоком  $q$ , в  $i$ -м сегменте завязки  $m$ .

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T_{sim}}{\lambda_m L_{m,i}} [q_{in}(k) - q_{out}(k)] \quad (1)$$

$$q_{in}(k) = q_{m,i-1}(k)$$

$$q_{out}(k) = q_{m,i}(k)$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{T_{sim}}{\tau_m} \cdot (V_d [\rho_{m,i}(k)] - v_{m,i}(k)) \\ & + \frac{T_{sim}}{L_m} \cdot v_{m,i}(k)(v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) \\ & - \frac{\eta_m \cdot T_{sim}}{\tau_m \cdot L_{m,i}} \cdot \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + k_m} \\ & - \left( \frac{\delta_m \cdot T_{sim}}{L_{m,i} \cdot \lambda_m} \right) \frac{q_{on,m,1}(k) \cdot v_{m,1}(k)}{\rho_{m,i}(k) + k_m} \end{aligned}$$

$$q_{m,i}(k+1) = \lambda_m \cdot \rho_{m,i}(k+1) \cdot v_{m,i}(k+1) \quad (3)$$

Здесь символы означают:

$\rho_{m,i}(k+1)$  – плотность на  $i$ -м сегменте, завязки  $m$  на  $(k+1)$ -м временном шаге [автомобиль/км/полоса];

$q_{m,(i-1)}(k)$  – поток, выходящий из  $(i-1)$ -го сегмента, завязки  $m$  на  $k$ -м временном шаге [автомобиль/час];

$v_{m,i}(k)$  – средняя скорость на  $i$ -м сегменте (отрезке), завязки  $m$  на  $k$ -м временном шаге [км/час];

$T_{sim}$  – время между  $k$  и  $(k+1)$  временными шагами [ч];

$\lambda_m$  – число полос  $m$ -го завязки;

$\tau_m$  – постоянная время условие равновесия в  $m$ -м завязки [ч];

$V_d$  – значение скорости в состоянии равновесия – функция плотности [км/ч].

$L_{m,i}$  – длина  $i$ -го сегмента  $m$ -го завязки [км];

$\eta_m$  – параметр условие прогноза шаге [км<sup>2</sup>/ч];

$K_m$  – параметр условие прогноза шаге [автом/км];

$\delta_m$  – фактор, показывающий влияние на скорость въезда/выезда на трассу.

Параметры  $\tau_m$ ,  $\eta_m$ ,  $K_m$  могут быть оценены как для каждой завязки в отдельности так и для всех завязок приняв их одинаковыми как ( $\tau$ ,  $\eta$ ,  $K$ ). Последнее условие уравнения (2) показывает влияние потоков участия на среднюю скорость основного потока.

Для связи между средней скоростью в равновесии и потоком используется следующее уравнение скорости, использованное Коциалосом и Папагеоргиу [2] и Хедьи [3].

$$v_d [\rho_{m,i}(k)] = v_{f,m} \exp \left[ - \frac{1}{a} \left( \frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}} \right)^a \right] \quad (4)$$

Число  $a$  – параметр модели,  $v_f$  – свободная скорость в  $m$ -м завязки,  $\rho_{cr,m}(m)$  – значение критической плотности, относящейся  $m$ -й завязки (автомобиль/км/полоса). Если калиброванная модель METANET будет использовано в контрольных проблемах, то вместо уравнения (4) используется следующая функция, содержащая ограничения скорости.

$$v_d [\rho_{m,i}(k)] = \min \left\{ (1; +\infty) v_{ctr,m,i}(k), v_{f,m} \cdot e^{\frac{1}{a} \left( \frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}} \right)^a} \right\} \quad a \in [-1; 1] \quad (5)$$

Здесь  $v_{ctr,m,i}(k)$  – мгновенное ограничение скорости (км/ч),  $a$  – значение, которое представляет водителей, соблюдающих ограничение скорости.

Если скорость водителя отличается при переходе от участка дороги, на котором он находится, к следующему, он регулирует свою текущую скорость в соответствии со скоростью на участке дороги, на котором он находится. Однако, поскольку это произойдет не сразу, это повлияет на среднюю скорость текущего сегмента. Влияние скорости на предыдущем участке на следующий участок отражается третьим членом, конвекцией, в уравнении (2). Когда водитель собирается покинуть участок дороги, на котором он находится, он осознает плотность на следующем участке и хочет адаптировать свою скорость к следующей ситуации, не покидая участка. Это требование вызывает изменение средней скорости на расчетном участке, и это изменение отражается на средней скорости с опережением срока. Однако параметр  $\eta_{m,i}$  модели, используемый при вычислении значения члена предсказания в уравнении (2), является условным параметром. Когда очередь возникает из-за ударной волны, поведение водителя различается в зависимости от разницы в

плотности между секциями. В этом случае выбор параметра определяется в соответствии со следующим условием.

$$\eta_m = \begin{cases} \eta_{m,high}, & \rho_{m,j+1}(k) \geq \rho_{m,i} \\ \eta_{m,low}, & \rho_{m,j+1}(k) < \rho_{m,i} \end{cases} \quad (6)$$

Влияние изменений геометрии дороги на среднюю скорость добавляется параметрами слияния и сужения полосы движения в уравнении (2). Уравнения (1), (2) и (3) создают матрицу плотности, средней скорости и потока для выбранной рабочей области. Количество строк матрицы указывает  $k$ -й временной шаг, а количество столбцов указывает на  $i$ -й сегмент пути. Для расчета плотности и средней скорости в первой и последней секциях используются уравнения, называемые граничными условиями METANET.

В сети METANET, без основы место назначения, поток трафика, в котором один узел состоит из  $n$  штук связки, распределяется на связки, выходящим из узла, следующим образом

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_n} q_{\mu} N_{\mu}(k)$$

$$q_{m,o}(k) = \beta_n^m(k) Q_n(k) \quad \forall m \in O_n$$

Здесь  $I_n$  – связка, входящая в узел  $n$ , а  $O_n$  – множество связки, выходящих из этого узла. Общий поток трафика в  $k$ -й момент времени, входящие в узел, вычисляется по первому выше написанному формулы. Поток трафика, вышедший из узла, вычисляется с использованием коэффициента  $\beta_n^m$ , для каждой связки.  $\beta_n^m$  показывает скорость поворота в  $k$  временных шагах от  $n$  узлов до  $m$  связки на пересечениях.

**Калибровка прочностной модели.** Откалиброванная модель METANET должна предсказывать матрицы плотности, скорости и течений, которые сходятся к матрицам полевых наблюдений (CORSIM). Для этого следует оценить параметры  $\kappa$ ,  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $v_f$ ,  $a$ ,  $\mathcal{V}$ ,  $\eta_{high}$ ,  $\eta_{low}$ ,  $p_{cri}$ ,  $p_{max}$  в уравнения 1)-6). С матрицами наблюдения следующая функция минимизируется, чтобы найти параметры METANET, которые минимизируют разницу матриц прогнозирования METANET.

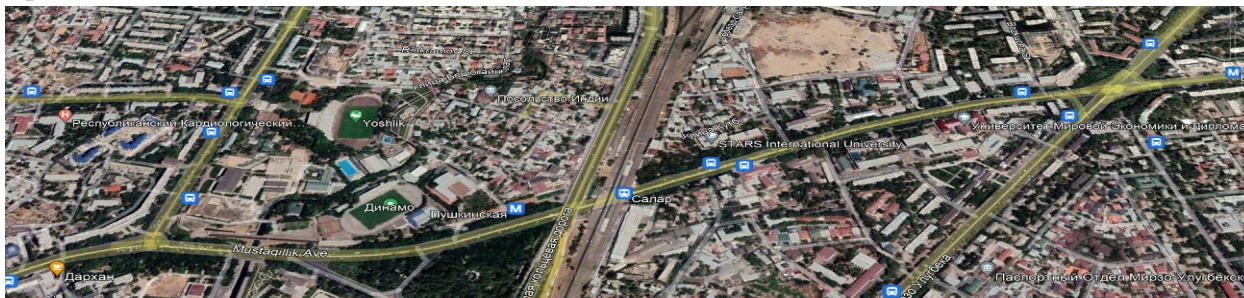
$$J = \min \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I N \sum_{k=1}^K [((\rho_{m,i}(k) - \bar{\rho}_{m,i}(\bar{x}, k))^2 + \xi(v_{m,i}(k) - \hat{v}_{m,i}(\bar{x}, k))^2] \quad (9)$$

Здесь  $M$  - число завязок,  $I$  - количество сегментов пути, а  $N$  -общий временной шаг, для которого модель METANET будет делать прогнозы. В изучаемом зоне (интервале) измеренная плотность равна  $\rho_i(k)$ , а наблюдаемая скорость  $v_i(k)$ . Вектор параметров  $\bar{x}$  содержит все вышеперечисленные параметры. При калибровке модели определяются

предельные значения для вектора параметров  $\bar{\chi}$ . Таким образом, задача калибровки превращается в задачу нелинейной краевой (граничной) оптимизации. Штрафной член (коэффициент)  $\xi$  в уравнении используется для уравнивания скалярных величин, вытекающих из масштабов скорости и плотности.

### **ПРИМЕР: ШОССЕ-1 (президентская трасса).**

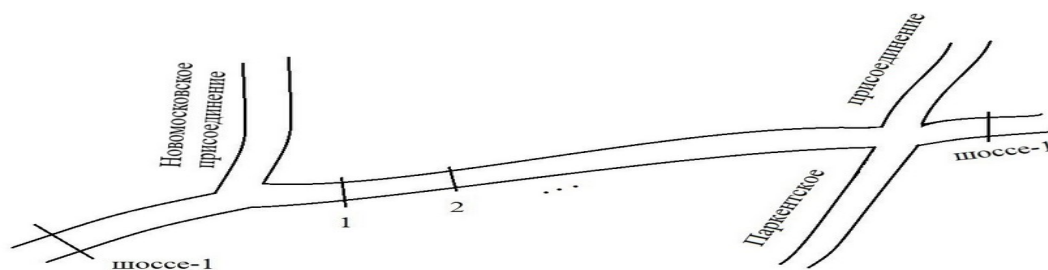
Участок исследования, где транспортный поток будет моделироваться с использованием модели METANET. Это 1,5-километровый участок Дархан-Светлана Ташкентской городской автомагистрали – проспект Мустакиллик (Mustaqillik Ave), где в вечерние часы происходят пик дорожные события, такие как заторы и ударные волны (Рисунок из спутника, с помощью Google Earth). Рассмотрим промежуток между Новомосковским и Паркентским присоединениям.



Из-за изменяющихся условий транспортного потока в изучаемой области необходима модель прогнозирования для использования модели управления, которая прогнозирует события или условия, которые возникнут в дорожном движении. Чтобы модель потока трафика METANET можно было использовать в качестве прогностической модели, модель должна быть откалибрована. По этой причине калибровка METANET является важным шагом для желаемой работы по управлению трафиком после этого исследования. Во многих исследованиях управления дорожным движением программное обеспечение для моделирования используется для оценки влияния приложений управления дорожным движением или аналогичных сценариев, которые будут применяться в исследуемой области, на транспортный поток. Используя калиброванное программное обеспечение для моделирования, данные о транспортном потоке могут быть получены из любого поперечного сечения в желаемый интервал времени. Для этого область исследования моделируется с помощью стохастической микроскопической имитационной модели CORSIM [16]. В исследовании использовался программный пакет Integrated System Traffic Software TSIS [17] (Traffic Software Integrated System). Этот пакет представляет собой интерфейс для CORSIM, который упрощает ввод сети и параметров и включает в себя сам CORSIM. CORSIM позволяет пользователям моделировать движение

транспортных средств в городе и на автомагистралях, другими словами, взаимодействие транспортных средств друг с другом, средствами управления дорожным движением и геометрией дорог. С CORSIM можно вмешиваться в процесс движения с помощью инструментов управления, таких как DHS.

Для выполнения работы по моделированию в CORSIM прежде всего необходимо ввести в программу геометрические свойства рабочей области. Для этой цели были использованы Карты столичного города Ташкент и Google Планета Земля. С этой целью геометрическая информация об исследуемой территории была введена в CORSIM с использованием карт Tashkent Metropolitan Maps и Google Earth. Данные о спросе из основных каналов и каналов участия необходимы для загрузки трафика в рабочую область. Фотографии сделаны в сентябре-ноябре 2021г., между 17:00-18:30, в вечерний час пик, когда люди выходят из работы и возвращаются домой, и многие не городские люди, через эту трассу, покидают город. Затем, изучив записи, используя карты и GPS-навигаторы, были определены три наблюдательные станции. В результате подсчета транспортных средств с этих станций были рассчитаны производные переменные транспортного потока (скорость, плотность и поток). Основной модуль моделирования CORSIM формируется путем интеграции двух моделей моделирования, FRESIM и NETSIM. Поскольку данное исследование будет проводиться на городской магистрали, использовалась имитационная модель FREESIM программы моделирования CORSIM (CORridor SIMulation).



Введем значения спроса, наблюдаемые в точках входа в модель, параметры, связанные с поведением транспорта и водителя, и после чего, откалибруем CORSIM с данными за 70 минут. Для CORSIM не установлено никакое ограничение на время, которое называется прогревом и обеспечивает насыщение сегмента (интервала) достаточным количеством транспорта, а вместо этого предпочтение отдается варианту прогрева сегмента до достижения насыщения. Наблюдения, сделанные на станциях O1 и O2, и данные о скорости и течении, полученные с тех же станций из CORSIM, сравниваются с использованием статистики Тейла (Theil). Средние значения

скорости и течения для обеих станций по статистике Тейла оказались равными 0,07 и 0,08, соответственно. Калибровка CORSIM прошла успешно, так как значения, близкие к нулю, указывают на то, что два сравниваемых временных ряда похожи. Для следующего шага, калибровки METANET, промежуток участка делится на 6 связей. У каждой завязки есть разрез. Данные, необходимые для калибровки, были получены с помощью CORSIM, который моделирует транспортный поток на микроскопическом уровне. Матрицы плотности, скорости размером 450x6 были получены с детекторов, размещенных в соответствии с геометрией METANET в сети CORSIM исследуемого региона, с 10-секундными интервалами, для 80-минутного периода моделирования. Для времени моделирования было выбрано 10 минут больше, чем время наблюдения, с целью увеличения степеней свободы для калибровки данных, полученных для калибровки METANET. Модель METANET закодирована как функция MATLAB, которая вычисляет матрицы плотности 450x6 и скорости по параметрам калибровки.

Поскольку минимизация, используемая для калибровки, выполняется с нелинейной целевой функцией, для решения таких задач используются такие алгоритмы решения, как последовательное квадратичное программирование и генетические алгоритмы [5]. В исследовании использовалась встроенная в MATLAB функция *fmincon*, которая использует алгоритмы оптимизации граничных значений.

Расчетные параметры METANET:

|             | $K$      | $\eta_{low}$ | $\eta_{high}$ | $\tau$   | $\Phi$    | $\gamma$ |
|-------------|----------|--------------|---------------|----------|-----------|----------|
| Все завязки | 90       | 52.491       | 68.491        | 7.582    | 0         | 2.889    |
|             | $\delta$ | $v_f$        | $P_{cri}$     | $\alpha$ | $P_{max}$ |          |
| Завязка-1   | -        | 95.19        | 47.95         | 3.03     | -         |          |
| Завязка-2   | -        | 101.1        | 45.81         | 1.7952   | -         |          |
| Завязка-3   | 0.012    | 93.6         | 48.07         | 2.47     | 93.076    |          |
| Завязка-4   | -        | 86.42        | 48.45         | 1.91     | -         |          |
| Завязка-5   | 0.012    | 110.34       | 42.778        | 1.5385   | 143.21    |          |
| Завязка-6   | -        | 105.23       | 30            | 3        | -         |          |

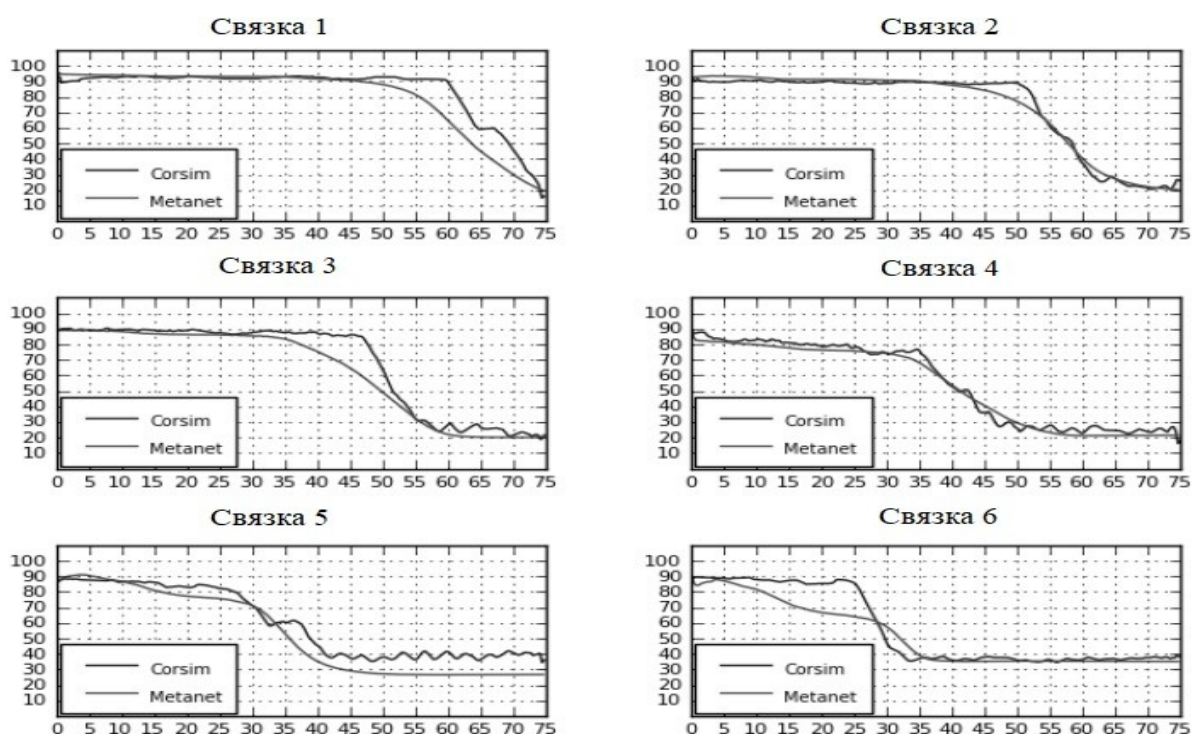
Таблица-1. Расчетные параметры METANET

Значения параметров, оцененные в результате калибровки, приведены в таблице 1. Сравнение параметров в таблице 1 с оценками плотности, скорости и течения на завязках в наблюдаемой области METANET и значениями, полученными из CORSIM, показано в ниже рисунках. Из кривых видно, что модель METANET дает прогнозы, очень близкие к CORSIM. Сравнение U1-статистики Тейла (Theil) прогнозов моделей CORSIM и METANET для каждой ссылки показано в таблице 2.

|                  | Завязка-1 | Завязка-2 | Завязка-3 | Завязка-4 | Завязка-5 | Завязка-6 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Средняя скорость | 0.0533    | 0.0229    | 0.0609    | 0.0442    | 0.0717    | 0.0742    |
| Плотность        | 0.0465    | 0.1102    | 0.0597    | 0.0864    | 0.0827    | 0.0605    |
| Течение          | 0.0319    | 0.0313    | 0.0484    | 0.0457    | 0.0250    | 0.0218    |

Таблица-2. Выходные данные U1-статистики Тейла моделей CORSIM и METANET.

Сравнение параметров с оценками плотности, скорости и течения на завязках в наблюдаемой области METANET и значениями, полученными из CORSIM:



Здесь, по вертикали – скорость (км./час); а горизонтали – время (минут).

В графиках дана оценка калиброванной средней скорости METANET на завязках. Получены аналогичные графики для оценки плотности калиброванного METANET на завязках и текущий прогноз калиброванного METANET на завязках, которые мы здесь не приведем.

Программное обеспечение для микро моделирования дает более подробные результаты, но требует больше вычислительной мощности и времени. Напротив, макроскопические модели дают менее подробные результаты с меньшим временем вычислений. Существует компромисс между двумя моделями, поэтому, хотя результаты обоих модельных подходов не должны точно совпадать, они должны пройти статистическую проверку.

**ИТОГ.** После завершения калибровки METANET была получена математическая модель переменных состояния в исследуемом сечении. Модель METANET может отражать нестабильность транспортного потока,

ударные волны и эффекты узких мест. Однако наиболее полезным аспектом модели METANET является то, что DHS можно добавить в модель в качестве переменной. Прогнозируя транспортный поток с помощью откалиброванной модели METANET, можно будет выполнять приложения управления, такие как DHS и контроль посещаемости на шоссе, с помощью метода управления на основе модели. Например, предсказывая затор (пробок), происходящий или приближающийся на участке вниз по течению, можно предотвратить или уменьшить эффект ударной волны, которая произойдет, путем ограничения трафика, въезжающего в область на участке вверх по течению. Ожидаются улучшения с точки зрения управления транспортным потоком и безопасности с DHS на основе модели прогнозирования. Калибровка модели METANET является обнадеживающим исследованием с точки зрения поиска и применения динамического наилучшего значения контроля скорости в числовом виде с помощью DHS на шоссе.

### **Литература**

1. Kotsialos A., Papageorgiou M., Motorway Network Traffic Control Systems, European Journal of Operational Research , 152, 321-333, 2004.
2. Papageorgiou M., Blosseville J. M., Hadj-Salem H., Modelling and real time control of traffic flow on the southern part of boulevard peripherique in Paris, Modelling Transportation Research A, 5, 25, 345-359, 1990.
3. Hegyi, A., Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures, Доктора, Delft University of Technology, 2004
4. Burger, M., Hegyi, A., Schutter, B., De, Suitability of different mean speeds for model-based traffic control, Proceedings of the 87th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, 2010.
5. Pardalos P., Resende M., Handbook of Applied Optimization, Oxford, Oxford University Press, 2002.