УДК 656.13

Д.А.ПРУНЕНКО, канд. техн. наук, А.Н.КАПУСТИНА
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКРОПОДХОДА

Проанализированы существующие закономерности формирования транспортных потоков при макромоделировании. Установлено, что такой поход основан на том, что взаимосвязь между характеристиками транспортного потока может устанавливаться на основе экспериментальных данных, при анализе граничних условий и на физических аналогиях. Приведенные закономерности могут получить дальнейшее применение при моделировании основных характеристик транспортних потоков.

Проаналізовано існуючі закономірності формування транспортних потоків при макромоделюванні. Встановлено, що такий підхід заснований на тому, що взаємозв'язок між характеристиками транспортного потоку може встановлюватися на основі експериментальних даних, при аналізі граничних умов і на фізичних аналогіях. Наведені закономірності можуть отримати подальше застосування при моделюванні основних характеристик транспортних потоків.

The obtaining rules of forming of traffic steams in macromodeling were analysed. It is determined that such an approach is based on fact that the interaction between characteristics of traffic steam can be based on the basis of experimental data, with the analysis of boundary conditions and on physical analogies. The given rules can have further use in modeling of the main characteristics of traffic steams.

Ключевые слова: транспортный поток, интенсивность движения, «ударная волна», волновая скорость, скорость движения, плотность потока.

Процесс формирования транспортных потоков является результатом функционирования транспортных систем крупнейших городов [1]. Транспортный поток состоит из совокупности корреспонденций транспортных средств, реализованныхпо одному и тому же пути, закономерности формирования которых подчиняются определённым правилам и могут быть формализованными.

Необходимость понимания закономерностей формирования транспортных потоков вызвана применением математических моделей при моделировании транспортных потоков. В практике моделирования транспортных потоков существует несколько различных подходов по описанию закономерностей их формирования.

Закономерности формирования транспортных потоков, основанные на макроскопическом подходе, нашли отражение в работах [2-7]. Данный подход основан на том, что взаимосвязь между характеристиками транспортного потока может устанавливаться на основе экспериментальных данных, при анализе граничных условий и на физических аналогиях.

На основе экспериментальных данных В. Гриншилдсом зависимость между скоростью и плотностью для однорядного транспортного потока представляется в виде линейной зависимости следующего вида:

$$v(q) = v_{\max}\left(1 - \frac{q}{q_{\max}}\right), \quad (1)$$

где $v_{\max}$ – максимальная скорость движения (скорость свободного движения), км/ч; q – плотность, авт./км; $q_{\max}$ – максимальная плотность, авт./км.

Частный случай уравнения (1) указывает на существование области неустойчивости на кривых $q(v)$. Область неустойчивости на основной диаграмме транспортного потока предполагает его движение в режиме «старт-стоп». При данном режиме движения возникают так называемые «ударные волны», характеризующиеся изменениями интенсивности и скоростью распространения этих изменений вдоль потока. Применение метода движущегося наблюдателя [3], позволило Лайтхиллу и Уизему [4] получить соотношение между интенсивностью и плотностью транспортного потока, выражаемое следующим соотношением:

$$v = \frac{N_2 - N_1}{q_2 - q_1}, \quad (2)$$

где N_1, N_2 – соответственно интенсивность движения в зоне первого и второго наблюдателей, авт./ч; q_1, q_2 – соответственно плотность транспортного потока в зоне первого и второго наблюдателей, авт./км.

Скорость в уравнении (2) принято называть волновой скоростью или скоростью «ударной волны». Вектор ударной волны направлен противоположно вектору скорости транспортного потока. В случае, когда $v > 0$, ударная волна движется вниз относительно перегона улично-дорожной сети, если $v < 0$ – вверх [2].

Особый интерес представляет изучение образования ударных волн при наличии узкого участка дороги. В этих условиях могут быть рассмотрены два случая: интенсивность движения по основной дороге ниже пропускной способности узкого участка дороги; интенсивность движения по основной дороге значительно больше пропускной способности рассматриваемого участка.

Используя аналогию с классической сжимаемой жидкостью и уравнение Эйлера [4], Х. Гринберг получил зависимость, описывающую соотношение между скоростью, плотностью и интенсивностью движения транспортного потока [5]:

$$v(q) = c \ln \frac{q_{\max}}{q}, \tag{3}$$

где c – неотрицательная константа с размерностью скорости.

Тогда уравнение (3) запишется в виде [4]:

$$v(q) = v_{\max} \ln \frac{q_{\max}}{q}. \tag{4}$$

Использование дедуктивного способа построения моделей при анализе граничных условий, таких что $v = v_{\max}$ и $q = 0$, позволило получить следующее соотношение между основными характеристиками транспортного потока [3]:

$$N = v \frac{q_{\max}}{2} \ln \frac{v_{\max}}{v}, \tag{5}$$

где N – интенсивность движения, авт./ч.

Согласно [3] уравнение (5) уточняет макросоотношение между интенсивностью, скоростью и плотностью при плотностях потока, меньших оптимальной. При плотностях, больших оптимальной, предлагается использовать обычные зависимости, что приводит к «разрывной» форме поверхности основной диаграммы транспортного потока для установившегося состояния. Эта теория, видоизмененная для ненапряженных потоков, позволяет количественно описать внезапные изменения состояния транспортного потока, представляющие собой переход от относительно свободного движения к замедленному движению с частыми остановками и обратно [2].

В работе [3] предложено использовать экспоненциальную зависимость скорости транспортного потока от его плотности:

$$v = v_{\max} e^{-2q/q_{\max}}. \tag{6}$$

Математическая модель, приведенная в работах Д. Дрейка, А. Мэя, Д. Шофера [3], также позволяет получить удовлетворительные результаты при измерениях зависимости скорости от плотности и может быть представлена в следующем виде:

$$v = v_{\max} e^{-0,5(2q/q_{\max})^2} . \qquad (7)$$

Рассмотренные выше закономерности имеют ряд ограничений применительно соотношения скорости-плотности потока, поэтому при описании закономерностей формирования потоков имеют место гидродинамические модели второго порядка, основанные на физических аналогиях. Данные модели-аналоги характерны для сжимаемой жидкости с единичной плотностью, а также для уравнений теплопроводности. Они позволяют описывать изменение плотности в транспортном потоке при изменении её градиента, а также процессы образования «пробок» при формировании транспортных потоков [4].

Описанные закономерности формирования транспортных потоков просты в использовании и позволяют определить их основные характеристики. При этом полученные в идеальных условиях результаты следует считать усреднёнными и приемлемыми для моделирования характеристик функционирования крупномасштабных транспортных сетей. Однако транспортный поток, по своей природе, состоит из совокупности автомобилей, которые в процессе движения взаимодействуют между собой. Закономерности формирования транспортных потоков в таких условиях, описываются микромоделями.

Простейшей математической моделью, описывающей взаимодействие двух следующих друг за другом автомобилей, является так называемая упрощенная динамическая модель. Ее применяют для определения максимально возможной интенсивности движения по одной полосе дороги [5]:

$$N_{a\max} = A\frac{v_a}{L_\partial}, \qquad (8)$$

где A – коэффициент размерности; v_a – скорость автомобиля; L_∂ – динамический габарит транспортного средства, м.

Данная математическая модель составлена на основании двух упрощающих допущений: скорость всех транспортных единиц в потоке одинакова; транспортные средства однотипны, т.е. имеют равные динамические габариты. Динамический габарит транспортного средства определяют как сумму длины транспортного средства l_a, дистанции безопасности d и зазора l_0 до остановившегося впереди автомобиля. Зазор для легковых автомобилей колеблется в пределах 1-3 м [5].

Развитие этой модели привело к более сложной динамической теории следования за лидером, которая описывает процесс движения группы автомобилей при изменении скорости движения головного автомобиля, т. е. лидера группы. В общем виде закономерности этого процесса заключаются в том, что изменения скорости и положения лидера, называемые «стимулами», вызывают определенную реакцию, выражающуюся в изменении ускорения ведомого автомобиля и зависящую от чувствительности его водителя [4].

Попытки моделирования взаимодействия транспортных средств при движении в потоке привели исследователей к выводу, что в каждый момент времени состояние всех автомобилей в потоке может согласовываться со следующими правилами: ускорение, торможение, случайные возмущения, движение [2].

Дальнейшим направлением исследования может стать применение приведенных выше макромоделей формирования транспортных потоков при моделировании их основных характеристик.

1. Васильева Е.М. Нелинейные транспортные задачи на сетях. – М. Финансы и статистика, 1981. – 104 с.

2. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: Справочник. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.

3. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.

4. Семёнов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса // Препринт № 34 Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2004 г. – 44 с.

5. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков – М.: Мир, 1966. – 286 с.

6. Швецов В.И., Алиев А.С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей.– Едиториал УРСС,2003.–64 с.

7. Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.

Получено 03.06.2013