

УДК 539

к.т.н., профессор Човнюк Ю.В.,  
ychovnyuk@ukr.net, orcid/ 0000-0002-0608-0203,  
доцент Чередниченко П.П., petro\_che@ukr.net, orcid / 0000-0001-7161-661x,  
к.т.н., доцент Диктерук М.Г., dicteruk@ukr.net, orcid/ 0000-0003-1889-0876,  
к.т.н., доцент Остапущенко О.П.,  
olga\_ost\_17@ukr.net, orcid/ 0000-0001-8114-349x,  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКАХ МЕГАПОЛИСОВ

*Предложена математическая модель, позволяющая моделировать возникающие волновые процессы в транспортных потоках машин крупных городов и мегаполисов. Определены основные характеристики транспортных волн. Установлены условия их возникновения.*

*Ключевые слова: концепта, модель, волны, транспортный поток, мегаполисы.*

**Постановка проблемы.** Волны в потоках транспорта можно отнести к разряду “необычных”. Какой же смысл здесь вкладывается в понятие необычных волн? По сути, эти волны еще не стали обычными даже для самих физиков, изучающих волновые процессы в различных средах и телах. Следует заметить, что математически такие волны описываются стандартными уравнениями, только, разумеется, входящие в них величины имеют свой специфический смысл. Само наличие сходства математических моделей говорит о существовании немногих глубоких общих принципов, пригодных, видимо, “на все случаи жизни”. Естественно, что эти принципы имеют столь же широкую общность, как, скажем, закон сохранения энергии [1]. Ниже представлено описание этих принципов.

Первый принцип – это возможность представить моделируемую систему, в которой наблюдаются волновые явления, в виде сплошной среды. При этом вводится понятие об элементах среды, которые считаются совершенно одинаковыми.

Любой элемент среды, как всякий вещественный объект, состоит из атомов и молекул. Не желая рассматривать явление на этом уровне, мы приходим к естественному требованию: элемент среды должен насчитывать в своем составе очень много атомов или молекул, так что его размеры должны значительно превосходить атомные масштабы. Тогда все элементы окажутся статистически одинаковыми. Если размеры каждого элемента, в свою очередь, будут намного

меньше размеров всей среды, то в ней окажется очень много элементов. И теперь опять же можно будет не следить за движением какого-либо одного элемента, а давать описание коллективному их движению, например, волновому движению или другим процессам в среде.

Если изучаются волны в среде, то лучше говорить не о размерах среды, а о характерных размерах волн, скажем, их длине.

Следующий общий принцип: в среде должно передаваться движение от одних частиц к смежным частицам. Этот принцип очень важен.

В среде может передаваться не только движение, но и информация о положении или состоянии смежных частиц. Для “неживой” природы эта информация заключена в энергиях и импульсах частиц: именно поток энергии обеспечивает распространение волн в различных “неживых” средах, будучи, так сказать, автоматическим условием существования. В “живых” системах, однако, лучше говорить об информации, а не об энергии. Например, транспортный поток можно рассматривать как движение сплошной среды, где отдельными элементами служат экипажи. Обмен информацией о положении элементов осуществляется с помощью сигналов, воспринимаемых зрением и слухом водителей. Конечно, энергия, заключенная в сигналах, слишком мала, чтобы непосредственно воздействовать на положение и движение экипажей. Но эта энергия, пройдя целую цепочку превращений, “запускает” гораздо более мощные источники энергии и в конце концов регулирует движение экипажа.

Если условно сесть в вертолет и достаточно высоко подняться над шоссе-сейной дорогой мегаполиса, вдоль которой осуществляется напряженное движение, то, в принципе, не очень четко различаются отдельные автомобили. С такой “точки зрения” слабо ощутимы отдельные нерегулярности движения – то, что транспортный поток состоит из различных экипажей: легковых автомашин, грузовиков, мотоциклов и т.п.; что они движутся со слегка различными скоростями; что между ними существуют разрывы разной протяженности. Игнорируя эти различия, мы как раз и вводим средний элемент транспортной среды. Это не такая уж большая идеализация, т.е. отступление от действительности. Вспомним, что линейные волны мы часто изображаем в виде синусоид, хотя даже мелкие волны ряби на водной поверхности никогда идеально не повторяют друг друга. Если суммировать результаты наших “вертолетных наблюдений” за какой-то промежуток времени, то вполне отчетливо выявятся общие закономерности. Естественно, что само наблюдение должно одновременно охватывать достаточное число машин. По условию размеры каждого элемента должны быть намного меньше размеров среды.

Источником транспортных волн обычно служит какое-либо препятствие на дороге, например, неисправная машина, или, что обычно для городских

условий, светофор. Вот где-то в конце правого поля нашего “обзора” зажегся красный светофор. Автомобили, до той поры следовавшие друг за другом с равными интервалами, начали тормозить, останавливаясь ближе друг к другу, чем во время движения. Мы не видим, как они тормозят, мы улавливаем лишь, что вдоль потока транспорта влево побежала волна сжатия, сближения автомобилей. Через некоторое время светофор на правом конце переключился на зеленый свет, машины начали трогаться, и по их ряду влево побежала волна разрежения.

Эти качественные наблюдения можно превратить в несложные и вместе с тем практически важные количественные заключения. Ведь мы наблюдаем ни что иное как гидравлический удар в транспортном потоке, и возникающая волна сжатия есть ударная волна, ничем в принципе не отличающаяся от той, что бежит по водопроводной трубе при резком закрытии крана.

#### **Анализ публикаций по теме исследования.**

По-видимому, впервые анализом транспортных волн, возникающих в среде мегаполисов, занялись авторы [1]. В настоящем исследовании результаты цитируемой выше работы частично использованы.

**Цель работы.** Целью работы состоит в обосновании модели волновых процессов в транспортных потоках мегаполисов.

#### **Изложение основного содержания исследования.**

##### *Математическая модель транспортного потока и ее анализ.*

В полной аналогии с гидродинамикой можно ввести плотность транспортного потока  $\rho$  (число машин на единицу длины ряда движения) и расход  $Q(\rho)$  (число машин, проходящих через некоторое сечение дороги в единицу времени). Обе величины связаны очевидным соотношением:

$$v = \frac{Q(\rho)}{\rho}, \quad (1)$$

где  $v$  - скорость движения машин. Сам расход зависит от плотности: он, разумеется, равен нулю, когда машин на дороге нет ( $\rho = 0$ ), но он равен нулю также, когда машины стоят “впритирку” одна за другой ( $\rho = \rho^*$  – ситуация дорожной “пробки”). Где-то между двумя этими значениями плотности  $\rho$  расход  $Q$  достигает максимального значения ( $Q_{\max}$ ).

Наблюдения за автомобильным движением в США показывают, что для однородного движения характерны следующие средние показатели:  $\rho^* \approx 140$  машин на 1 км дороги,  $Q_{\max} \approx 1500$  машин в час и средняя плотность (отвечающая значению  $Q_{\max}$ )  $\rho_{\max} \approx 50$  машин на 1 км дороги. Отсюда получается оптимальная (но не наибольшая!) скорость движения  $v_{\max} \approx 30$  км/час. Тем, кто пользуется автомобилем на загруженных магистралях, такая оптимальная скорость не покажется слишком низкой!

Определим фазовую скорость распространения волны сжатия в транспортном потоке (о групповой скорости, как и относительно т.н. “песчаных” волн, здесь говорить не приходится). Очевидно, для наблюдаемой “волны плотности” автомашин она равна:

$$C_{\phi} = \frac{\Delta Q}{\Delta \rho} = v + \rho \frac{\Delta v}{\Delta \rho} \quad (2)$$

(второе равенство (2) получается, если использовать формулу (1)).

Если ничто не вызывает необходимости изменить плотность потока, то не меняется и скорость его движения,  $\Delta v = 0$  и  $C_{\phi} = v$ , т.е. волны сжатия нет. Но нас больше интересует положение, когда зажигается красный светофор и непосредственно перед ним становится  $\rho = \rho^*$ .

Обозначим длину автомашины  $l$ , а расстояние между передними бамперами следующих друг за другом машин -  $h$ , тогда “расстояние столкновения” будет равно  $(h - l)$ . Если среднее время реакции водителя (и автомашины на его действия, что всегда учитывает опытный водитель) равно  $t_p$ , то он выбирает

безопасную скорость движения  $v = \frac{(h - l)}{t_p}$ . Но поскольку  $h = 1/\rho$  и  $l = 1/\rho^*$ , то

отсюда получаем:

$$v(\rho) = \frac{l}{t_p} \left\{ \left( \frac{\rho}{\rho^*} \right)^{-1} - 1 \right\}, \quad Q(\rho) = \frac{l}{t_p} (\rho^* - \rho) \quad (3)$$

и по формуле (2) находим интересующую нас фазовую скорость:

$$C_{\phi} = -\frac{l}{t_p}. \quad (4)$$

Следует обратить внимание на следующее: эта скорость не зависит ни от каких внешних условий и определяется только свойствами самой транспортной среды, а именно средней длиной автомашины и средним временем реакции водителя. Таким образом, волнам, генерируемым транспортным потоком, присуща “автономность”, т.е. независимость их от порождающих условий.

Волна сжатия, естественно, распространяется против направления движения автомашин (знак минус в формуле (4)). Если принять длину автомашины в среднем равной 6 м, а время реакции 0,5 с, то мы получим  $C_{\phi} \approx -43$  км/час.

Этот расчет относится, конечно, к неблагоприятным условиям движения. В обычных условиях водители видят не только “затылок” идущей впереди машины, но и сигнал светофора еще издали и начинают снижать скорость заблаговременно. В результате переходной участок ударной волны от неподвижной к подвижной “среде” растягивается и даже может стать почти незаметным (слабая ударная волна). Но если движение происходит в густом тумане, когда

водитель в лучшем случае видит лишь расплывчатый силуэт идущей перед ним машины, то “вредный характер” ударной волны может проявиться в полную силу. Достаточно головной машине в длинном их ряду налететь на какое-нибудь препятствие или просто остановиться, как ударная волна сжатия потока машин приобретает буквальное значение “волны ударов” машин друг в друга. Описаны случаи автокатастроф, в которых участвовали десятки машин.

Впрочем, хорошо известно, что виновником дорожного затора может стать даже исправно работающий светофор. В сущности, сам он является источником периодически возникающих ударных волн, резко рассекая сплошной транспортный поток на отдельные порции. Пусть в некоторый момент на светофоре зажегся красный свет и по потоку побежала волна сжатия. Спустя какое-то время  $t_{кр}$  красный сигнал погас и зажегся зеленый свет, так что по потоку побежала волна разрежения, “ликвидирующая” волну сжатия. Какой же должна быть продолжительность зеленого сигнала  $t_{зел.}$ , чтобы эта “ликвидация” оказалась полной? Волновая теория транспортных потоков показывает, что оба времени связаны простым соотношением:

$$\frac{t_{кр.}}{t_{зел.}} \leq \frac{Q_{max}}{Q(\bar{\rho})} - 1, \quad (5)$$

где  $\bar{\rho}$  - среднее значение плотности потока машин. Если это условие не выполняется, то перед светофором возникает хронический затор.

Естественно, в разные времена года и даже суток значения  $\bar{Q}$  и  $Q(\bar{\rho})$  не остаются постоянными. Но это вовсе не означает, что надо вернуться к ручному управлению светофорами (да и оно не всегда спасает на напряженных перекрестках).

## ВЫВОДЫ

1. Светофоры могут работать автоматически, но для оптимальной их работы необходимо создавать специальные службы.

2. Датчики, установленные под дорожным полотном, постоянно определяют значения  $Q(\rho)$  на пересекающихся магистралях, а вычислительные машины сами принимают решения о переключении светофоров. Подобные службы сегодня созданы во многих крупных городах и мегаполисах Украины с напряженными транспортными потоками. По сути, в таких системах используются мехатронные средства управления движением транспортных потоков, обладающие искусственным интеллектом высокого уровня.

3. Сам транспортный поток можно рассматривать как среду, в которой распространяется особый тип волн. Этот тип волн называется волнами плотности и, конечно, напоминает еще звуковые волны, в которых происходят сжатие и разрежение среды и соответствующие изменения давления. Вместе с тем

транспортные волны, разумеется, не полный аналог звуковым волнам: в них, например, под давлением можно понимать разве что “давление обстоятельств”, главным из которых является четкое нежелание столкнуться с идущим впереди автомобилем.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кадомцев Б.Б. Волны вокруг нас / Б.Б. Кадомцев, В.И. Рыдник. – М.: Знание, 1981. – 152 с.

к.т.н., професор Човнюк Ю.В., доцент Чередніченко П.П.,  
к.т.н., доцент Діктерук М.Г., к.т.н., доцент Остапуценко О.П.,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

### **КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ В ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКАХ МЕГАПОЛІСІВ**

Запропонована математична модель, яка дозволяє моделювати виникаючі хвильові процеси у транспортних потоках машин великих міст та мегаполісів. Визначені основні характеристики транспортних хвиль. Встановлені умови їх виникнення.

Ключові слова: концепта, модель, хвилі, транспортний потік, мегаполіси.

Ph.D., Professor Chovnyuk Yu. V.,  
associate Professor Cherednichenko P. P.,  
Ph.D., associate Professor Dikteruk M. G., Ph.D.,  
associate Professor Ostapuchenko J. P.,  
Kyiv National University of Construction and Architecture

### **CONCEPTUAL BASES FOR WAVE'S PROCESSES MODELING IN A TRAFFIC FLOWS OF MEGACITIES**

The mathematical model for modeling of the wave's processes in the transport flows of machines in cities and megapolicies is proposed. The main characteristics of the transport waves are determined. The conditions of their generations are discussed as well.

Keywords: concept, model, waves, transport flow, megacities