



**Орден Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В. Келдыша  
Российской академии наук**

**В.В. СЕМЕНОВ**

**СМЕНА ПАРАДИГМЫ В ТЕОРИИ  
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

**Препринт № 46**

**Москва 2006**

## АННОТАЦИЯ

Анализ теоретических подходов к построению моделей транспортных потоков с точки зрения *теории развития научных представлений* (ТРНП) и проблем, связанных с несоответствием результатов моделирования и результатов эмпирических исследований, позволил выявить недостатки существующих подходов и предложить новую парадигму, в рамках которой возможно построение в большей мере соответствующих реальности математических моделей для изучения поведения транспортных потоков в современных условиях. Приведен пример математической модели, построенной в рамках вновь выдвинутой парадигмы.

## ABSTRACT

The analysis of theoretical approaches to construction of traffic flow models from the point of view of *the theory of development of scientific representations* (TRNP) and problems connected with discrepancy of modeling and empirical researches results, has allowed to reveal lacks of existing approaches and to offer a new paradigm within the limits of which construction in a greater measure of mathematical models corresponding a reality for studying behavior of traffic flows in modern conditions is possible. The example of the mathematical model constructed within the limits of again put forward paradigm is resulted.

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание .....	2
Системный взгляд на транспортные проблемы .....	3
Моделирование транспортного потока .....	6
Минимальная модель транспортного потока .....	9
О закономерностях смены моделей .....	15
«Портрет» старой парадигмы теории транспортных потоков.....	17
Новая парадигма теории транспортных потоков.....	18
Модель сужения на дороге .....	22
Заключение .....	23
Приложение .....	25
Литература .....	31

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №04-01-00510 и №05-01-00852.

*Данная работа является результатом анализа теории транспортных потоков в переписке с Юлием Самойловичем Мурашковским (Мастер ТРИЗ, исследователь) в рамках разрабатываемой им теории развития научных представлений (ТРНП).*

## СИСТЕМНЫЙ ВЗГЛЯД НА ТРАНСПОРТНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Ежегодно на российских дорогах гибнут 35 000 человек, 200 000 получают увечья. По масштабу потерь это больше, чем локальный вооруженный конфликт средней интенсивности [1]. Из сотни с лишним стран, публикующих статистику смертности на дорогах, Россия находится на третьем месте с конца – 248 погибших на 1 млн. жителей, незначительно уступая лишь Малайзии (267) и ЮАР (279) [1]. При этом Россия многократно превосходит по смертности на дорогах все страны с развитой автомобилизацией [1]:

Страны	Число погибших в ДТП на 1 млн. человек		Динамика за 10 лет
	1993 год	2003 год	
Япония	106	70	-34%
Австралия	100	82	-18%
Канада	125	86	-32%
Страны Евросоюза (суммарно по странам ЕС-15)	135	110	-19%
США	156	147	-6%
<b>Россия</b>	<b>198</b>	<b>248</b>	<b>+25%</b>
Малайзия	—	268	—
ЮАР	—	279	—

Причин такой ситуации много – транспортная проблема является системной. Эта проблема представляет собой клубок тесно переплетенных между собой трудноразрешимых вопросов, связанных, к примеру:

- с состоянием автомобильных дорог, их проектированием и строительством;
- с введением и расположением развязок и светофоров;
- с ограничениями скоростного режима;
- с соблюдением установленных правил дорожного движения;

- со страхованием и правовым регулированием, с разрешением дорожных происшествий;
- с экологией и т.д.

Если этой сложностью пренебречь в процессе решения, она напомнит о себе в виде сложности реализации предложенного решения этой проблемы. Ведь успех решения проблемы зависит и от того системного уровня, на котором она возникла и от того уровня, на котором ее можно решить.

Например, французская компания Renault предлагает свой вариант решения проблемы городских пробок и дефицита парковочных мест. Идея конструкторов проста - средство передвижения должно быть трехколесным. Такова концепция мотороллера Renault Ublo. Для европейских городов, где скорость ограничена 50 км/ч, Ublo вполне хватает четырехтактного двухцилиндрового двигателя объемом 124 куб. см. А компактные размеры мотороллера (длина 2,03 м при ширине 0,77 м) превращают проблему парковки в предельно легкую задачу. Конструкторы позаботились о водителе и пассажире, укрыв их от дождя и ветра прозрачной крышей. Правда, тепло и сухо там лишь при температуре плюс 25 по Цельсию. Несколько багажных отсеков общей емкостью 120 литров размещены под рулем и сиденьем, а также в задней части мотороллера. Безопасность водителя обеспечивает фронтальная воздушная подушка.

Аналогичный вариант решения проблемы заторов предложили английские ученые из университета в городе Бат. Новый автомобиль называется Clever (сокращенно от Compact Low Emission Vehicle for Urban Transport - Компактное средство городского транспорта с низким уровнем выхлопа). При создании этого принципиально нового типа автомобиля разработчики пытались сочетать безопасность традиционных машин с маневренностью мотоциклов. Clever развивает скорость до 80 км в час. Автомобиль состоит из металлического корпуса примерно такой же высоты, что и обычные машины. Место для пассажира находится за креслом водителя. Как заверяют разработчики, расходы на новую машину примерно на 20%, ее двигатель работает тише, а выхлопов — меньше, чем у обычного автомобиля, поскольку она работает на сжатом газе.

Недавно мэр Москвы Ю.М. Лужков [2] предложил стимулировать приобретение жителями больших городов компактных автомобилей взамен полноразмерных, на которых сейчас ездят москвичи. Наиболее важными преимуществами малолитражек мэр считает низкий уровень выхлопа, удобные размеры, которые должны помочь решить проблему с парковками в центре города и пробками на дорогах.

В основе этого предложения, очевидно, лежит опыт Европы, где компактные автомобили размером с нашу «Оку» весьма популярны. Однако в Европе компактный автомобиль зачастую является вторым или третьим в семье. В будни, когда маршрут движения пролегает через городские пробки, семейство предпочитает пользоваться малолитражкой, а по выходным, выезжая за город, европейцы используют более просторную и габаритную машину.

Кроме того, все больше и больше автомобилистов задумывается о безопасности – а по этому параметру микролитражки явно уступают большим машинам. На московских дорогах действительно дорогих крупных машин намного больше чем в Европе. Но это совершенно не говорит о том, что у нас выше уровень жизни. Все дело в налоговой политике государства. Поэтому успех идеи Ю. Лужкова зависит от мер стимулирования – если владельцы компактных машин получают льготы, а собственники крупногабаритных машин будут обложены высокими налогами, то рано или поздно им придется пересесть на малолитражки.

Однако корни транспортных проблем в России, возможно, лежат еще глубже. Еще в конце 1920-х годов на классика советской транспортной мысли Абрама Зильбертала произвело сильное впечатление не технические средства и методы управления в Германии, Австрии и Швейцарии, а общий взгляд европейцев на проблему. «Покажите мне транспортную систему своего города – говорил немецкий профессор, обращаясь к зарубежным стажерам, – и я немедленно вычислю, в какие деньги вы цените жизнь, время и удобство своих сограждан» [1]. Приведенные далее факты взяты из работы [1].

Любопытный исторический пример: в 1654 году Блез Паскаль обратился в мэрию Парижа с предложением организовать «регулярное движение общедоступных пассажирских карет по заранее объявленным маршрутам и расписаниям с единым тарифом 5 су» [1]. Величину тарифа он вычислил на основе субъективной оценки «ценности времени» среднего горожанина. Блез Паскаль впервые употребил в транспортном контексте термин «ценность времени». В последующие 150 – 200 лет этот фундаментальный подход утвердился в качестве базы для разработки западных транспортных систем.

Вместе с этим подходом сформировалась и еще более основополагающая идея: в обществе гражданских свобод для всех граждан, платящих налоги на содержание общественной улично-дорожной сети, нужно признать *равенство ценности времени* (value of time – используется сокращенный термин VT). В результате, в 1789 году Великая французская революция отменила право приоритетного проезда по сословному признаку. А в 20 веке в западноевропейских странах введены выделенные полосы для общественного транспорта – Bus&Taxi. В России же перекрытие магистралей для проезда привилегированных персон является обычной ежедневной рутинной – «феодалный принцип» приоритетного проезда не отменен, а приоритет общественного транспорта не введен.

В послевоенное время экономического подъема на Западе была введена *минимальная общественно-признанная ценность времени гражданина*, платящего налоги, которая заложена в базовых характеристиках транспортной системы.

К 1960-м годам на западе широкое применение поучил и термин «ценность жизни» (value of life – VL). Это понятие использовалось для расчетов различных элементов инженерного обустройства автомобильных дорог. Попытка со-

ветских инженеров ввести эту категорию в проектную практику успеха не имела.

Понятия VL и VT состоят из двух компонент. Это *минимальная общественно-признанная ценность жизни* – этот показатель используется при выборе средств и систем безопасности движения общего пользования (подземные переходы, ограждения и светофоры, технологии чистки дорог и улиц в зимнее время и т.п.). Кроме того, это ценность жизни, заложенная при выборе страховой программы, оснащении автомобиля системами безопасности, выборе маршрутов следования, стилю поведения на дороге и прочего.

Оба показателя – VL и VT – вычисляются по сложным математическим моделям, которые учитывают такие параметры, как средняя заработная плата, стоимость рабочего времени, уровень жизни жителей разных районов, страховая премия и т.д. [1]. Во многих транспортных методиках используется «обобщенная цена поездки», включающая прямые денежные затраты пассажиров и затраты времени, умноженные на расчетное значение VT. В зарубежной практике понятие VL применяется во множестве стандартных расчетов при инженерном проектировании дорог и улиц, а понятие VT – в расчетах маршрутов и расписания движения общественного транспорта.

В России сегодня нижняя граница минимальной общественно-признанной ценности жизни на дороге находится около нуля, верхняя – не более \$3500. Тогда как нижняя граница выплат в любой развитой стране – \$100 000.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Изучение транспортных систем с помощью математического моделирования ведется уже почти 100 лет. Однако до сих пор в этой области остается много пробелов. Более того, в течение последних лет стало очевидно, что теория ТП переживает некоторый кризис. Это видно и в целом по публикуемым в последнее время статьям, и по проблемам, с которыми работают специалисты-исследователи и отраслевые специалисты в области автотранспорта в городе Москве.

Вот любопытный пример. Специалисты по городскому транспорту давно удивлялись, каким образом семимиллионная Богота<sup>1</sup>, с похожей на московскую радиально-кольцевой структурой улиц с более миллиона частных автомобилей обходится без постоянных пробок. По всем расчетам они неизбежны. Математики Колумбийского университета предположили, что стандартные модели городского движения не учитывают темперамент водителей. Колумбийские шоферы гораздо быстрее разгоняются и резче тормозят, чем их коллеги в Лондоне или Нью-Йорке. Измерив типичные ускорения автомобилей на улицах Боготы и заложив их в компьютерную модель, ученые выяснили, что при такой опасной

---

<sup>1</sup> Санта-Фе-де-Богота́ (Богота́) — столица Республики Колумбия, административный центр департамента Кундинамарка и самый крупный город страны. Площадь города — 600 км<sup>2</sup>.

езде пропускная способность транспортных магистралей увеличивается и совпадает с наблюдаемой [3].

Однако ученые не до конца уверены в своих выводах, так как до улучшения дорог и структуры общественного транспорта Богота страдала от пробок, так же как и другие столицы [3].

Можно привести несколько фактов в подтверждение мысли о необходимости коренной смены подхода к изучению транспортных потоков. Это касается так называемой *фундаментальной диаграммы транспортного потока*, описывающей зависимость плотности потока от его интенсивности на определенном участке дороги (см. [5]).

Факт 1, [12]: ...при малых и очень высоких плотностях наблюдается корреляция между потоком и плотностью, а для промежуточных плотностей определенной ветви на фундаментальной диаграмме не существует из-за сильной зависимости от специфики конкретной дорожной сети. Предпринималось множество попыток объяснить эти особенности. Работы об «обращении  $\lambda$ -формы фундаментальной диаграммы» (Коши и др., 1983), «гистерезиса» (Ртейтерее и Майерс, 1974), «теории катастроф» (Пирсод и Холл, 1989), «падения пропускной способности» (Холл и Агиманг-Дуа, 1991) и т.п., указывают на возможность существования суперкритических потоков [5]. Другие исследования (Hall et. al., 1992; Windover и Cassidy, 2001) показывают, что такие измерения вызваны геометрическим строением дороги (например, наличием сужения).

**Примечание.** Первая модель Лайтхилла-Уизема – 1955 год. А попытки «исправить» фундаментальную диаграмму начались с 1974 года и продолжаются до сих пор (последняя работа – 2001 г.).

Факт 2, [13]: Фундаментальная гипотеза Б. Кернера утверждает, что не существует (!) фундаментальной диаграммы для гипотетических устойчивых скоростей в синхронизированной фазе движения потока.

Термин «синхронизированный поток» отражает следующие свойства этой фазы:

- это непрерывный поток;
- имеется тенденция к синхронизации скоростей автомобилей вдоль полос движения.

В результате анализа эмпирических данных были получены следующие сценарии возникновения заторов в потоке:

- Движущиеся заторы не возникают в свободном потоке при постепенном росте величины потока. Скорее пробки возникают при фазовом переходе от свободного потока к синхронизированному.

- При достаточно малой величине транспортного потока скорость автомобилей в синхронизированной фазе, выше по движению транспортного потока, сравнительно высока. Движущиеся пробки в таком потоке не возникают. Если начальная величина потока велика, то скорость автомобилей низка и тогда в синхронизированном потоке, как правило, возникают заторы (пробки).
- Чем ниже скорость движения в синхронизированном потоке, тем чаще в нем возникают пробки. Это означает, что частота появления движущихся пробок возрастает до максимально возможных значений входного потока: состояния потока с большой плотностью и низкой скоростью движения, в которых движущиеся пробки не возникают, в синхронизированном потоке не наблюдаются.

Факт 3 [5]: Карлос Ф. Даганзо утверждает, что ни в Германии, ни в Северной Америке данные не подтверждают заключение (вывод) [12]: что свободно текущий поток самопроизвольно случайно разрушается (breakdown), без очевидных причин, а затем остается в том состоянии вследствие стремления ТП поддерживать перегруженность (затор – congestion). Скорее все признаки показывают что ТП «разрушается» (т.е. формируется очередь) на участках неоднородностей шоссе – сужений (bottlenecks) вследствие воспроизводимости внешних причин, и тем самым, с последующим распадом, поведение потока в сужении предсказуемо. Более того, нет доказательств того, что очереди самоподдерживаются вдали от (away from) сужения.

Условия свободного потока (или потока без очереди) относятся к тому состоянию, где малое возмущение (disturbance) может распространяться только вперед в пространстве (например, как в сверхзвуковом потоке газа). Плотный поток на дороге принято называть потоком с очередью, который чаще всего возникает на неоднородных участках дороги, например в сужениях. В потоке с очередью, возмущение вызывает поток вверх по течению (upstream). На основе этих соображений Б. Кернер строит модель клеточного автомата, которая должна воспроизводить отвергнутую им ранее фундаментальную диаграмму [14].

К. Даганзо более радикален – он вообще не хочет рассматривать фундаментальную диаграмму. Но его теория все равно строится на «правильности» свободного потока и «неустойчивостях» всех других режимов. У К. Даганзо переполненные дороги все равно считаются «не правильными» состоянием, только называются такие состояния не «фазой движения» ТП, а «очередью».

И все-таки, в этих подходах можно увидеть попытки что-то радикально поменять. Найти какой-то выход из тупика.



Очевидно, назрела необходимость сменить парадигму<sup>2</sup>. Но для того, чтобы создать новую парадигму, нужно, прежде всего, выяснить фундаментальные для любой теории вопросы.

## **МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА**

По гипотезе Ю.С. Мурашковского, выдвинутой на основе анализа широкого массива накопленные в его картотеке данных и примеров из различных областей науки и техники, **нет смысла математизировать модель до того, как найдена минимальная модель (ММ).**

Ярким примером в пользу этой гипотезы в теории транспортных потоков является гидродинамическая аналогия – модель Лайтхилла-Уизема.

До появления гидродинамической модели на транспортные потоки как на объект исследования впервые в России в 1912 году систематически обратил внимание русский профессор Г.Д. Дубелир. Он начал изучение пропускной способности магистралей и их пересечений. Модель Лайтхилла-Уизема совершила шаг от статических функциональных зависимостей параметров транспортного потока к описанию их динамической связи по времени и координате. Этот переход был достигнут фактически формальным применением представлений гидродинамики. Поэтому, основная гипотеза модели Гриншилдса Лайтхиллом и Уиземом просто была «пересажена» на почву физики жидкостей [5]. Так в 1955 году в своей классической работе [11] писали: «...Основная гипотеза теории состоит в том, что в любой точке дороги расход (автомобили в час) есть функция плотности (автомобили на милю)...». На основе этого и еще ряда допущений и последующего обобщения удастся получить уравнение Бюргерса, которое можно рассматривать как скалярное одномерное уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости с единичной плотностью. Однако сравнение результатов, полученных на этой модели с реальными характеристиками транспортного потока показало, что эта математическая формула ничему реальному не соответствует (более детальное описание модели см. [7], [5] и Приложение).

Еще один пример проблем, возникающих в отсутствие парадигмы и минимальных моделей: в психологии используется множество математических моделей, хотя ни один психолог так и не смог пока дать определение объекта изучения психологии.

### ***Определение минимальной модели транспортного потока***

Попробуем приблизиться к пониманию ММ для ТП. Для этого сформулируем некоторые вопросы.

---

<sup>2</sup> Под парадигмой Т. Кун (философ и историк науки, использовавший этот термин в своей работе «Структура научных революций») понимает общепризнанную совокупность понятий, теории и методов исследования, которая дает научному сообществу модель постановки проблем и их решений.

В эпоху гужевого транспорта на трактах понятие ТП было ненужным, не исходило из эмпирических наблюдений. Однако, на улицах больших городов проблемы, сходные с современными, уже появлялись – недостаточная ширина улиц, пробки и т.п.

Чем отличалась «гужевая» улица от «гужевого» тракта? По мнению Ю.С. Мурашковского, это отличие лежит в расстоянии между транспортными единицами. Если это так, то первый вопрос: *с какого расстояния между транспортными единицами начинается ТП?* То есть, собственно говоря, в другой формулировке вопрос - начиная с какого-то расстояния, между транспортными единицами начинается взаимодействие? Если расстояние от моего до ближайшего автомобиля километр, «измеримое» взаимодействие отсутствует. Если же два метра – взаимодействие неизбежно. То есть, можно говорить о некоем «поле», действующем на определенных расстояниях.

Это поле имеет сходство с привычными полями, но есть и отличие. На расстоянии в два метра взаимодействие заключается во взаимном маневрировании. На расстоянии 1 см – это режим столкновения.

Эти рассуждения происходят на ранге двух транспортных единиц (ТЕ). Очевидно, что одна ТЕ вообще не представляет интереса.

Вывод: теория ТП *не имеет дела* с одной ТЕ.

Однако и две ТЕ – тоже не поток. Отсюда вопрос, *с какого количества ТЕ начинается поток?* Этот вопрос не является чисто умозрительным. Например, в теории самоорганизованной критичности, в которой куча песка как раз является ММ, этот вопрос - самый насущный и теория умеет на него отвечать. Поэтому, скорее всего, ответ на него приведет к интересной классификации. Например, рассмотрим такую аналогию: реклама не занимается людьми. Она занимается группами. Но понятие «группа» в рекламном смысле неоднородно. Допустим, фирма производит миллион единиц товара в сутки. Является ли для нее рекламной группой город Рига, в котором намного меньше миллиона населения? Очевидно, что нет. Но в случае, если фирма производит десять единиц товара в день, Рига – серьезная группа. *Какие параметры определяют, является ли данное множество автомобилей на дороге транспортным потоком, или нет?*

Итак, вопросы сформулированы. Попробуем ответить на них.

## **Что представляет собой транспортный поток?**

Термин «транспортный поток» (в англоязычной литературе используется термин Traffic Flow) используется западными учеными и исследователями по аналогии с «потоками» в сплошных средах (а позднее и дискретных – т.н. Granular Flow). Термин «Теория транспортных потоков» в англоязычной литературе – Traffic Flow Theory. Отправной точкой исследований в ТП на западе считается гидродинамическая модель Лайтхилла-Уизема. Сам по себе ТП всегда характеризуется (и сам термин уже как бы «узаконивает» такой подход) ис-

ключительно средними (т.е. макроскопическими) параметрами: средняя скорость, плотность (число автомобилей на единицу длины), интенсивность (число автомобилей, проходящих через любую данную точку дороги в единицу времени). Два параметра (интенсивность и скорость или плотность и скорость) изображаются в виде графика и называются *фундаментальной диаграммой* (Fundamental Diagram) (подробнее см. в [5]). Уже из этого названия понятно, что ей придается исключительное значение. Фундаментальная диаграмма (ФД) – «камень преткновения» всей теории ТП. Все крутится вокруг того, что в модели Лайтхилла-Уизема (и ей подобным моделям) ФД взята гладкой (дифференцируемой), а если ее строить по показаниям датчиков – на ней в области средних значений плотностей образуется «облако», никакой кривой не аппроксимируемое. Т.е., реально принятой в гидро- газодинамических моделях зависимости не существует. Это привело к тому, что, с одной стороны, в ряде работ с помощью клеточных автоматов была воспроизведена эмпирическая ФД (пример такого автомата для двуполостного шоссе со съездами-въездами дан в работе [38]). С другой стороны, Карлос Ф. Даганзо (США) предлагает вообще отказаться от рассмотрения ФД, а ввести другие параметры – длина очереди, время проезда и проч. [5].

У нас в стране официально используется термин «дорожное движение» (закон РФ «О безопасности дорожного движения» – совокупность общественных отношений...). Термин «транспортный поток» тоже используется в «Организации дорожного движения» (ОДД), но не определяется. Определяются только «необходимые данные, характеризующие транспортный поток»[4].

Модели, в которых объектом выступает ТП в целом, называются макроскопическими.

### ***О расстоянии между транспортными единицами***

В отечественной теории ОДД используется характеристика «состав ТП» [4]: соотношение в нем разных типов ТЕ. Это т.н. статический габарит автомобиля. «Динамический габарит автомобиля» [4] – участок дороги, необходимый для безопасного движения в потоке с определенной скоростью. Он равен «длина ТЕ» плюс «безопасная дистанция». На этом понятии было построены и исследованы модели «следования-за-лидером» (car-following или follow-the-leader - в англоязычной литературе встречаются оба варианта). Модели такого типа называются микроскопическими. Существуют также мезоскопические модели, в которых рассматриваются небольшие группы (кластеры) автомобилей на дороге [39], [40], [41].

### ***Классификации состояний транспортного потока***

Существует несколько подобных классификаций.

Министерство транспорта США использует следующую классификацию по степени заполненности полосы движения ТЕ по отношению суммарной зани-

маемой автомобилями площади полосы к общей ее площади на произвольном участке дороги:

- 35 % и более – так называемое старт-стоп движение («stop-and-go»);
- 22 % - 35 % – затрудненное движение;
- 15 % - 22 % – умеренное движение;
- 0 – 15 % – свободное движение.

Любопытно отметить, что 0 % – это тоже «движение».

Ученые Национального исследовательского центра Лос-Аламоса (Los Alamos National Lab. – LANL) выделяют следующие паттерны ТП:

Стадия 1. Пока дорога не загружена, автомобилисты движутся на удобной им скорости, свободно переходя на соседние полосы движения. На этой стадии автомобили сопоставимы с потоком частиц, имеющих большую свободу в своем перемещении.

Стадия 2. Как только дорога становится переполненной, автомобилисты внезапно теряют большую часть свободы перемещения и вынуждены двигаться уже как часть всеобщего транспортного потока, согласовывая с ним свою скорость. При этом они уже не имеют возможности свободно менять полосу движения. Эта стадия, подобная потоку воды, называется «синхронизированным» потоком.

Стадия 3. При очень большом числе автомобилей в потоке движение приобретает прерывистый характер (т. н. режим «stop-and-go»). На этой стадии транспортный поток можно уподобить потоку замерзающей воды, автомобили становятся на какой-то промежуток времени как бы «приклеенными» к одному месту дороги.

Карлос Ф. Доганзо [5] предлагает другое определение свободного движения ТП: «Будем говорить, что ТП не образует очередей (является незаторным, «свободным»), если случайно возникшую локальную помеху (disturbance) в движении ТП нельзя обнаружить выше по течению потока. И наоборот, «если локально индуцированные изменения скорости обнаруживаются выше по течению потока, мы говорим, что ТП является перегруженным (образует очереди)».

### ***Фазовые переходы в транспортном потоке***

В теории ТП транспортный поток принято рассматривать аналогично потоку жидкости или газа. Поэтому понятие «фазового перехода» в транспортном потоке введено по аналогии с фазовыми переходами в жидкостях – превращение пара в воду или воды в лед. Объяснение же момента и динамики смены фазы в транспортном потоке, по аналогии с тем как это происходит в природе, стало настоящим вызовом для физиков [10] – понимания этого вопроса на сегодняшний день пока нет.

Иными словами, фазовые переходы – это качественные скачкообразные изменения в скорости и плотности ТЕ в потоке. Эти изменения возникают локально и распространяются волнообразно по потоку. В результате поток превращается в «желе». Такое состояние может сохранять достаточно долго, час или два. Возникает чаще у въездов-съездов на автострадах. Эти явления не описываются ни одной из существующих математических моделей, а только лишь реалистично воспроизводится на имитационных моделях клеточных автоматов. Поэтому механизм фазовых переходов, если они существуют в реальности, а не просто являются красивой классификацией, до сих пор не понятен.

На эту тему есть любопытный факт [9]:

В Дьюисберге (Германия) физик Майкл Шреккенберг (Michael Schreckenberg) получивший прозвище «Профессор Пробок» и 15 его коллег проводили эксперименты, преднамеренно создавая заторы. В результате они пришли к выводу, что переход от свободного потока к синхронизированному может случаться почти спонтанно – намного быстрее, чем это предполагалось раньше. Часто, это случается около наклонных въездов на автомагистраль, когда происходит внезапное (взрывное) увеличение числа автомобилей на дороге, что может превращать поток в «движущееся желе». Такое инертное состояние распространяется вверх и вниз по дороге, сохраняясь, возможно несколько часов, даже после того как наклонный въезд опустеет.

На основании этого наблюдения понятно, что причина «фазового перехода» – это увеличение числа автомобилей, уменьшение среднего расстояния между ТЕ и, как следствие, резкое падение средней скорости ТЕ.

### ***Встречные параметры***

До сих пор рассматривался только один параметр. Это не совсем верно. Попробуем разобраться в том, что может представлять собой фазовый переход в ТП.

Применим более абстрактные рассуждения. Любые переходы определяются двумя встречными параметрами. Температуру вещества можно поднимать долго, но перехода не будет. Ей противостоит энергия связей между атомами, молекулами или другими частицами. Только если мы приложим при помощи нагревания энергию, большую, чем энергия связей, произойдет фазовый переход. Теперь можно скорректировать модель. Определяющим параметром будет не температура, а прилагаемая извне энергия, а встречным параметром – энергия связи. Следствие: приложить энергию можно и не температурой. И в самом деле, фазовые переходы первого рода можно вызывать, например, давлением. То же относится к гидродинамике – нам важна не скорость, а сила, перемещающая поток. Если она становится большей, чем сила трения между слоями потока, то

поток из ламинарного становится турбулентным. *А какие встречные параметры могут определять «фазовые переходы» в транспортных потоках?*

В ТП ситуация скорее противоположная тому, что происходит в жидкостях. Фазовый переход в ТП (т.е. – затор, пробка) легко произойдет и при «хороших» для движения условиях. Для этого достаточно остановиться какой-нибудь ТЕ – на дороге образуется сужение и возникает пробка (причем, на, казалось бы, свободной дороге). А вот рассосаться пробке будет не так-то просто. Так что для ТП характерно сопротивление «обратному» фазовому переходу – от заторного движения к свободному. Причину, вероятно, можно объяснить «плохой подвижностью» ТЕ на дороге, в отличие, например от молекул (здесь становится обоснованность образа «кусочков льда», взятый для классификации фаз ТП в Лос-Аламосской Национальной лабораторией (LANL)). А «прямой» переход («замерзание» ТП) – от свободного к заторному движению – происходит быстро и без видимых на то причин. Но здесь важно отметить, что исследователей интересует как раз то, как предотвратить образование заторов. Очевидно, что эти усилия направлены не в то сторону.

Выдержки из статьи об исследованиях LANL [9]:

- О внезапном переходе от режима свободного движения к неустойчивому режиму «stop-and-go»: Х.С. Махмасани, профессор университета Штата Техас и, наверное, ведущий американский эксперт в теории движения автомобильных потоков, говорит, что «причина внезапного перехода от режима свободного движения к режиму «stop-and-go» остается одной из тайн нашего времени».
- Состояние дела в этой области на сегодня таково, что, несмотря на значительный прогресс, полное понимание природы автомобильных пробок еще не достигнуто. Ученые говорят, что они пока находятся ближе к пониманию процессов зарождения Вселенной, чем образования автомобильных заторов.

### ***Выводы***

На основании приведенных фактов можно сделать следующие выводы.

1. Одна ТЕ не является потоком, а две – вероятно, являются (модели car-following рассматривают две ТЕ).
2. Расстояние между ТЕ рассматривается только с точки зрения безопасности. Это расстояние является функцией скорости (или времени) ТЕ.
3. Введение понятия «поле взаимодействия» между ТЕ представляется интересной идеей. К этому понятию до сих пор никто из исследователей не обращался. Известные модели ТП построены только с использованием таких параметров как координаты и скорости для микроскопических моделей или плотности (потока) для макроскопических.

4. Вопрос, с какого количества ТЕ начинается поток, никогда не задавался исследователями теории ТП. Принято считать, что плотность ТП может изменяться от 0 до 100% (при 100% когда поток находится в состоянии покоя). 0% - дорога свободна от транспортных средств. При плотности  $> 0\%$  на дороге находятся автомобили. Модель Лайтхилла-Уизема хорошо описывает свойства ТП при средних величинах плотностей, тогда как эмпирические измерения показывают, что средние значения плотностей никакой гладкой функцией не аппроксимируются.

### ***Область применимости модели***

Модель «жидкости на дороге» (модель Лайтхилла-Уизема) имеет границы до определенных скоростей и плотностей. Затем происходит «фазовый переход», и эта модель перестает работать. Приходится вводить еще две модели – свободный поток и перемещающиеся пробки. Возникает вопрос: **«Какие параметры определяют эти фазовые переходы?»**. Например, для понятия «агрегатное состояние вещества» определяющим параметром является температура. Для гидродинамических переходов – скорость потока и т.п. Для транспортных потоков этот вопрос остается открытым.

## **О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СМЕНЫ МОДЕЛЕЙ**

Если рассмотреть характер смены моделей (при этом достаточно рассмотреть просто смену, не обязательно отслеживать линию их улучшения - усложнения), можно отметить одну интересную повторяющуюся особенность. В любой модели есть некое «правильное» состояние моделируемого объекта. Остальные состояния – отклонения от этого «правильного» состояния.

Это важное наблюдение легко проиллюстрировать на примере перехода от геоцентрической системы мира к гелиоцентрической системе.

Первоначально «правильным» состоянием Земли была неподвижность, правильной траекторией движения – круг. Любая другая замкнутая кривая есть искажение круга. Поэтому первой моделью Солнечной системы стала модель неподвижной Земли в центре и круговых орбит всего остального вокруг нее («система мира» Птолемея). Некруговое движение пяти планет – отклонение, его можно объяснить (хотя и со сложностями) вариантами кругового движения. Так Евдокс предложил модель, по которой сфера каждой планеты «вставлена» в другую сферу, вращающуюся вокруг другой оси. Два вращения вместе дают нужную траекторию планеты. Правда, оказалось, что придется вводить четыре такие сферы – двух не хватает. Аполлоний вынужден был сместить центры сфер от центра Земли. Это тоже не помогло. Тогда он предположил, что на большой сфере (дифференте) закреплены дополнительно маленькие сферы – эпициклы. А планеты закреплены уже на эпициклах. Таким образом Птолемей довел число эпициклов до 79.

В чем состояла революция Коперника? Он «правильное», неподвижное положение Земли объявил «неправильным». А бывшее «неправильное», незакрепленное объявил «правильным». В результате ему удалось снизить число эпициклов до 34. Но это была половинчатая мера. Окончательный шаг сделал Кеплер. Бывшие «правильные» орбиты – круговые, он объявил «неправильными». А «неправильные» – эллиптические, сделал «правильными». Таким образом, эпициклы вообще оказались не нужны.

В рамках новой модели сразу, как из рога изобилия, повалили открытия. В частности, открыли эллиптическое движение Луны вокруг Земли. А когда Галилей открыл спутники Юпитера, они тоже задвигались по эллипсам.

Другой пример. По модели деятелей Просвещения существовал некий «изначальный» человек. Он был «правильным». Любые цивилизации искажали его, отклоняли от истинного положения. Открытие цивилизаций Америки, Австралии и т.п. вынудило отказаться от этой модели. Что пришло взамен? Человек многообразен, именно это есть его «правильное» свойство. А «изначальный» – это не более чем приятная абстракция, аналогичная неподвижной Земле в рассмотренном выше примере.

В наши дни И. Пригожин поступил аналогичным образом. Все системы равновесны – это «правильно». Отклонение от равновесия – это отклонение. И. Пригожин постулировал «правильность» неравновесных состояний, а равновесие стало некоей абстракцией [6].

Рассмотрим теперь разработанные и исследованные к настоящему времени модели транспортных потоков (см. Приложение). Во всех моделях «правильным» является поток, при котором все транспортные единицы едут ровно, равномерно, без столкновений и пробок. Столкновения, пробки, старт-стоп движение («stop-and-go») – отклонения от нормального движения потока.

Но возможна и противоположная модель. Нормальное состояние транспортного потока – это неравномерное движение транспортных единиц. В самом деле, кому нужен транспортный поток, в котором машина не имеет права приехать на место назначения, остановиться, свернуть, сломаться или попытаться сменить полосу и т.п.?

Согласно представлениям группы исследователей из Национальной Лос-Аламосу (LANL) [9] *arXiv* исходит из аксиомы о правильном «нулевом» заполнении дороги. Чем больше заполнение, тем «хуже» ТП. К.Ф. Даганзо также рассматривает «случайно возникшую локальную помеху» [5]. Хотя эта «случайная помеха» – куда более обычное явление, чем ровный идиллический поток.

Причина появления геоцентрической модели понятна – Земля в опыте человечества никогда не двигалась. Понятна и причина возникновения модели «свободного потока» – дороги всегда были пустыми. Но они больше никогда пустыми не будут. Поэтому модель пора менять.



Приведенные ранее и в Приложении примеры подтверждают эту, пока еще не построенную новую картину. Фундаментальная диаграмма основана на идее «правильного» равномерного потока. И то, что по реальным замерам такая диаграмма не строится, не имеет для нее значения. Логично предположить, что ее будут спасать «эпициклами», что и происходило на самом деле (см. Приложение).

Возможно, что «динамический габарит» ТЕ является неким «прототипом» «поля» взаимодействия ТЕ. Тем более что он является вычисляемой величиной. Подходы к поиску его формулы могут быть следующими. Представляется важным ответить сначала на такой вопрос: какие воздействия могут изменить динамический габарит? Например, изменить скорость. Как скорость реально влияет на динамический габарит? Важно, чтобы это влияние было не «желательным», а реальным. Так например, «желательно», чтобы при увеличении скорости динамический габарит увеличивался [4]. Но возможно, что в реальном ТП этот габарит как раз наоборот уменьшается? Отсюда может быть построена формула поля взаимодействия ТЕ в потоке, похожая на формулы электростатического или гравитационного поля.

Действительно, формула гравитационного воздействия возникла (как и все остальные), из предыдущих «правильных» представлений. Поле образует ту самую «правильную» древнегреческую сферу. Площадь сферы увеличивается пропорционально квадрату расстояния от центра. Аналогия была напрямую перенесена на гравитационное поле. А модель гравитационного поля Кулон использовал в качестве шаблона для модели электростатического. Он даже не пытался проверять другие модели.

«Автомобильное» поле может иметь совсем другие свойства.

## «ПОРТРЕТ» СТАРОЙ ПАРАДИГМЫ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Теория ТП пришла в своем развитии к следующему заключению - образование транспортных пробок можно объяснить:

1. Исходя из **свойств самого ТП** (кульминацией этой идеи является классификации фазовых переходов Б. Кернера и его соавторов, а также классификации, предложенные учеными LANL).
2. Исходя из **внешних причин** – влияния разнообразных «сужений» (идея этого подхода принадлежит К.Ф. Даганзо, Институт Беркли [5]).

К. Даганзо в своих работах развивает целую теорию сужений [см. например, 5]. При этом примечательно, что его теория начинается с построения классификации сужений (см. Приложение).

Итак, в основе существующей парадигмы ТП лежат следующие представления:

1. Исходное («первородное», «правильное») состояние ТП – *свободное движение ТЕ* по дороге. При таком режиме ТЕ могут свободно двигаться с «удобной» скоростью и менять полосу движения.
2. *Свободный* ТП абсолютно *устойчив*, в нем нет пробок.
3. Отсутствие ТЕ на дороге также считается «поток» в свободном режиме – его крайней формой – предельной устойчивостью.
4. Другая крайняя форма ТП – максимальная заполненность дороги ТЕ – когда они стоят впитык друг к другу – здесь поток тоже абсолютно устойчив.
5. Между крайними формами ТП становится *неустойчивым*, «разрушается», в нем *образуются пробки*. Сам термин «разрушается» (breakdown) вносит в представление какой-то негативный оттенок. Заставляет смотреть на естественную ситуацию на современных дорогах как на что-то «неправильное».
6. Важным, проблемным, наиболее интересным для исследователей считается переход от свободного потока к заторному (т.е. прямой фазовый переход по аналогии с жидкостью).
7. С какого количества ТЕ на дороге начинается ТП? Этот вопрос не рассматривается, он подобен спору о том, с какого количества песчинок начинается куча. Хотя, похоже, что все-таки с нуля – это некий *идеальный устойчивый поток*. То, что в модели следования за лидером рассматривается две ТЕ (хотя вероятнее всего это просто является особенностью данного типа моделей).

Этой модели присущи два существенных, с современной точки зрения, несоответствия теоретических допущений с эмпирически наблюдаемыми параметрами и характеристиками потока:

1. Постулирование свободного потока, как «естественного» (в пределе – нулевого потока). Вероятно, это представление – рудимент от тех времен, когда дорожное движение только начиналось.
2. Изучается прямой фазовый переход – от «правильного» свободного ТП к «плохому» заторному. Тогда как для ТП характерна обратная проблема – пробка возникает легко, а рассасывается с большим трудом. Это опять-таки, аналогичное наследие прошлого (см. предыдущий пункт). Важно изучать «обратный фазовый переход» в ТП.

Вероятнее всего, эти «теоретические несуразности» – признак необходимости в смене парадигмы.

## **НОВАЯ ПАРАДИГМА ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

Теперь предположение о том, что

«Нормальное состояние ТП – это *неравномерное* движение ТЕ» (1)

очевидно, на интуитивном уровне полностью подтверждается тем, что, никому не нужен «ТП, в котором машина не имеет права остановиться, свернуть, сломаться» и т.п.

### *Построение новой модели*

#### *Итерация 1: С чего начать?*

Как стоит модель, основанную на совершенно новом, прямо противоположном принципе?

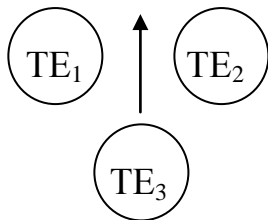
Попробуем рассуждать следующим образом.

Пустая дорога (или, к примеру, одна ТЕ на км<sup>2</sup>) – это устойчивый ТП. Когда все ТЕ в поток расположены «впритык» – ТП также устойчив. Эти два варианта мы не рассматриваем, они нас не интересуют. Нас интересует «среднее» состояние ТП.

Посмотрим на реальную дорогу. Почему образуются заторы? Известны две причины:

- сужение (поворот, изгиб) самой дороги, или
- одна из ТЕ, которая выбилась из синхронно движущегося потока мешает движению остальных ТЕ.

Структурно оба варианта одинаковы. Они сводятся к тому, что динамические габариты ТЕ<sub>1</sub> и ТЕ<sub>2</sub> в сумме меньше динамического габарита некоей ТЕ<sub>3</sub>, которая не может проехать между ними (или между ТЕ<sub>1</sub> и краем дороги):



Теперь надо рассмотреть, что представляют собой динамические габариты с такой позиции. Они явно не зависят от характеристик водителя. Поэтому водителя из модели можно исключить. Тормозные качества тоже следует исключить, поскольку они все больше унифицируются. Флуктуации, например, неисправные тормоза, «лысая» резина и т.п. также в данном случае будут только отвлекать от сути, поскольку нашей целью является поиск интегральных показателей.

На сегодняшний день о свойствах динамических габаритов от инженеров-дорожников известно только то, что при увеличении скорости динамический габарит увеличивается. Но что происходит в реальности? Какова ситуация на

автостраде, по которой ТЕ несутся с большой скоростью, находясь весьма близко одна от другой? Какие параметры реально существуют в ТП, если исключить водителей и флуктуации?

### ***Итерация 2: Поле в транспортном потоке***

Попробуем теперь определить понятие «поля».

Итерация 1. Если, начиная с какого-то расстояния, между ТЕ начинается взаимодействие, мы можем говорить о некоем «поле», действующем на определенных расстояниях.

Итерация 2. Взаимодействие между ТЕ может быть двух видов (с пороговым переключением):

- взаимодействия нет;
- взаимное маневрирование;
- столкновение.

Итерация 3. Поле взаимодействия между ТЕ в потоке является трех пороговой (отсутствие взаимодействия, маневрирование, столкновение) функцией расстояния между ТЕ.

Теперь определимся, с чего начать. Очевидно, что ни столкновение, ни отсутствие взаимодействия материала для дальнейших выводов не дадут. Останемся на «взаимном маневрировании».

С какого момента оно начинается? Вероятно с того момента, когда одна ТЕ «увидит» вторую. Увидит глазами водителя или какого-нибудь технического устройства. Однако возможна ситуация, когда  $TE_1$  находится рядом с  $TE_2$ , но она ее не «видит». Можно ли в данном случае говорить о поле?

С какого момента заканчивается «взаимное маневрирование»? Очевидно, при столкновении или остановке под угрозой столкновения. Что происходит между этими двумя позициями? Какие вообще параметры в этом интервале «участвуют», если исключить человека?

Возможно такое, слишком формализованное определение пока преждевременно. Тем более что не совсем понятно, нужно ли тут рассматривать скорость, т.е. расстояние – как функцию скорости, времени и т.п.

### ***Итерация 3: «Обратный фазовый переход» в транспортном потоке***

Для ТП характерно сопротивление «обратному» фазовому переходу – от заторного движения к свободному. Разумно предположить, что именно эта линия – от заторного к свободному – является более «правильной». А то, что исследователей интересует как раз то, как предотвратить образование заторов, указывает на правильность такого пути.

Можно рассмотреть другой вариант: как от заторного состояния (как единственно правильного) перейти к случайным «неправильным» вариантам свободного движения?

Исходя из принципа Ле Шателье, такому переходу должны препятствовать какие-то факторы, образующиеся в самом транспортном потоке, может быть даже в самих заторах. Что это за факторы? Ведь именно они и есть ресурс для удержания нестабильного свободного состояния от возврата к стабильному заторному.

### ***Итерация 4: Динамические габариты***

Предыдущие рассуждения наталкивают на следующую гипотезу:

**Понятие «динамический габарит» принадлежит старой парадигме (именно в ней оно возникло и используется).**

Вообще говоря, часто гипотезы возникают из самых элементарных соображений. Общеизвестно, что начинающий водитель - пока он еще не приобрел хороших навыков вождения на переполненной дороге, - испытывает очень сильное беспокойство по поводу несформировавшегося «чувства» габаритов машины. Причем, именно физических габаритов. Таким образом, в условиях переполненной дороги динамический габарит сводится к чисто физическим габаритам автомобиля.

Вот более веские доводы в пользу этого предположения.

- 1. Эмпирические наблюдения.** В переполненном потоке машины едут очень близко друг от друга, «подрезают» и «встречают» в любой промежуток соседней полосы, даже если он меньше чем длина автомобиля (тогда задняя машина вынуждена притормозить, чтобы избежать столкновения).
- 2. Теоретические соображения.** В само понятие кроме физических габаритов автомобиля заложена некая дистанция впереди автомобиля, свободное пространство на дороге, тормозной путь и т.п. Т.е. это понятие исходит из наличия на дороге свободного потока как нормы. В переполненном потоке машины едут практически бампер к бамперу – *динамические габариты вырождаются в чисто физические габариты*.

Теперь можно уточнить формулировку нашей гипотезы:

**В переполненном потоке динамические габариты вырождаются в физические габариты автомобиля.**

Таким образом, получается, что в новой парадигме «динамический габарит» – частный случай физического габарита автомобиля для частного случая – свободного движения при малой плотности ТП.

Отсюда можно далее предположить, что и автомобильное поле является совершенно самостоятельным: оно не является ни информационным, ни гравита-

ционным, ни полем сильных взаимодействий. Оно является именно «автомобильным полем» и проявляется, как взаимодействие между автомобилями в потоке. За пределами большого динамического габарита оно не действует. Эти свойства автомобильного поля скорее напоминают поле сильных взаимодействий, которое за пределами частиц просто перестает действовать. Как оно меняется при уменьшении расстояния между автомобилями? – этот вопрос требует исследования.

## МОДЕЛЬ СУЖЕНИЯ НА ДОРОГЕ

Автомобили движутся по двухполосной дороге (полосы 1 и 2). В месте сужения остается только одна полоса, т.е. автомобили вынуждены после сужения ехать по одной полосе – 1' (см. рис. 1).

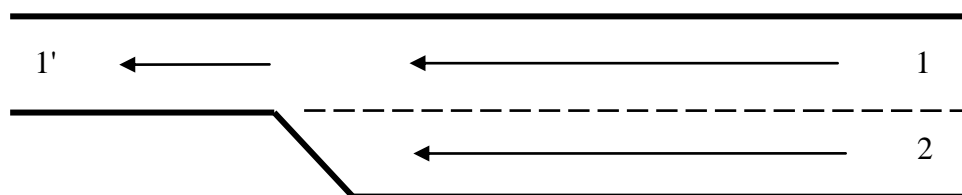


Рис. 1. Схема движения ТП в сужении

При этом полоса 1 является приоритетной для проезда через сужение. Автомобили из полосы 2 могут проезжать только при наличии промежутков в потоке полосы 1. Так же, при слишком долгом отсутствии «просветов» в полосе 1 и скоплении большой очереди на полосе 2, автомобили с полосы 2 начинают проезжать через сужение, «втискиваясь» в поток полосы 1 и на какое-то время прерывающие проезд автомобилей из приоритетной полосы 1 в сужение.

В данной модели мы исходим из того, что затор уже создан. При каких флуктуациях возможны выходы из этого затора? Теперь, очевидно, эта модель совершенно однозначно относится к новой, еще не созданной, парадигме.

Более того, в этой модели пространство является дискретным, а дорога поделена на ячейки (т.е., представляет собой буфер - как патроны в магазине автомата). Ячейки, в которых в отдельные моменты времени располагается автомобиль, расположены «впритык» друг к другу. Плотность потока такова, что на участке около сужения большую часть времени ячейки сплошь заполнены. Свободные ячейки при этом иногда возникают как разрывы в реальном сплошном ТП, в которые могут «проскочить» автомобили из соседней полосы.

Такая трактовка не оставляет ни малейших сомнений о принадлежности этой модели к новой парадигме. Затор на полосе 2 может «рассосаться» только в случае флуктуационных разрывов в потоке полосы 1. То есть, обобщенно, затор может уменьшиться при освобождении фрагментов надсистемы или внешней среды. Возможны ли в данном случае какие-либо другие варианты? Воз-

можно, какие-либо события внутри затора – законность этих вопросов и ответы на них требуют детального исследования модели.

Приведенной модели присуща следующая особенность. Затор по факту есть только на полосе 2. При сплошном неразрывном потоке на полосе 1 затор на полосе 2 растет и стремится создать затор и на полосе 1. Стоит появиться минимальному разрыву, как туда втискивается автомобиль А из полосы 2 - он может успеть это сделать (что является крайне случайным вариантом). Но чаще всего он не будет успевать.

В дальнейшем возможны 3 следующих варианта.

1. Оба автомобиля – А и первый после него из полосы 1 (автомобиль Б), маневрируют и выходят из затора без особых последствий для ТП.
2. Автомобиль Б старается пропустить автомобиль А, в результате тормозит весь поток 1 и возникает пробка.
3. Оба автомобиля останавливаются и перекрывают движение всей полосы 1.

Очевидно, что затор 2 поглощает свободный поток 1 и превращает его в затор. То есть возвращает в «правильное» с новых позиций состояние. В терминах аналогии, предложенной специалистами LANL - на полосе 2 поток замерз и замораживает поток на полосе 1.

Еще одно рассуждение. Допустим, на полосе 2 скопилось два автомобиля. Вероятность замораживания потока на полосе 1 невелика. По варианту 1 затора вообще не будет, по варианту 2 автомобили из полосы 1 могут на время перейти в полосу 2 и тем самым дать возможность А и Б разъехаться. Только третий вариант даст «замораживание».

Однако в том случае, если на полосе 2 скопилось сто автомобилей, то опасным становится даже вариант 1. А уж вариант 2 тем более приведет к замораживанию потока.

Таким образом, предложена модель, параметры которой (например, длина очереди по каждой полосе, где переполненный поток принимается как нормальное состояние дороги) качественно отличны от параметров моделей рассматриваемых до сих пор.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе предпринята попытка выдвинуть и обосновать новую фундаментальную концепцию – парадигму – теории транспортных потоков.

В настоящее время стало очевидным, что результаты модельных экспериментов часто не согласуются с результатами эмпирических исследований. Попытка исправить это положение привела к возникновению новых подходов, выражающихся в двух течениях, принадлежащих немецкой и американской на-

учным направлениям в теории ТП, яркими представителями которых являются Борис Кернер и Карлос Даганзо.

На наш взгляд, эти попытки не могут разрешить это противоречие. Они осуществляют исправление моделей, и как следствие, их усложнение. В сущности – это попытки спасти существующие модели, подобно эпициклам в птолемеевской модели. Предложенная в данной работе новая концепция предлагает возможный вариант устранения этого противоречия.

\* \* \* \* \*

Выражаю искреннюю благодарность Юлию Самойловичу Мурашковскому за детальное обсуждение темы, в результате которого удалось сформулировать ключевые идеи данной работы. В публикации использованы многие идеи, примеры и соображения Юлия Самойловича.

Также выражаю огромную благодарность своему научному руководителю профессору Георгию Геннадиевичу Малинецкому за поддержку, обсуждение и ценные замечания по улучшению данной работы.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ***Анализ математических моделей транспортного потока с точки зрения стадий развития научных представлений***

Наши представления об окружающем мире и его явлениях (модели) проходят ряд стадий. Эти стадии обычно следуют одна за другой в определенном порядке. Каждая стадия имеет свои структуру и свойства [15].

#### ***Первая стадия: Отдельные, не связанные между собой явления***

Построение любой модели, как правило, начинается с обнаружения некоего явления (факта). В какой-то момент было замечено, что дороги и пересечения обладают неким свойством - пропускной способностью. Так с 1912 года русским ученым, профессором Г.Д. Дубелиром были заложены ***основы изучения закономерностей дорожного движения***. Изучение и оценка пропускной способности магистралей и их пересечений, вот с чего началось изучения транспортной системы.

#### ***Вторая стадия: Модели-аналоги***

Р. Кюне [16] аналогию между потоком автомобилей и текущей жидкостью образно описывает так: «Если вы выгляните в иллюминатор самолета, едущие по дороге автомобили предстанут перед вами в виде сплошного потока жидкости».

В 1934 году появилась первая ***модель Гриншилдса*** [17]). Она выражает зависимость между скоростью и плотностью транспортного потока. Лежащая в ее основе ***гипотеза 1*** гласит: когда плотность  $\rho$  (степень насыщения дороги автомобилями) растет, водители снижают скорость  $v$  для обеспечения безопасной дистанции, что математически записывается выражением:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_j}\right), \quad (1)$$

где  $v_0$  - скорость свободного движения,  $\rho_j$  - максимальная плотность потока, при которой все автомобили останавливаются.

Эта модель предполагает линейную зависимость между скоростью и плотностью потока. Экспериментальные наблюдения показали, что эта зависимость нелинейна. ***Модель Гринберга*** [18] лучше воспроизводит экспериментальную зависимость между скоростью и плотностью:

$$v = C \ln \frac{\rho_j}{\rho}. \quad (2)$$

Таким образом, метапредставлением гидродинамического класса моделей транспортного потока является наличие зависимости между плотностью и скоростью:

$$q = \rho(v) . \quad (3)$$

Эта зависимость была названа *фундаментальной диаграммой*. Фундаментальная диаграмма является формализованным выражением идеи о том, что «движение транспортного потока подобно течению жидкости». Все дальнейшие исследования лежат в рамках данного метапредставления.

Модель Лайтхилла-Уизема [19] позволила перейти от статических функциональных зависимостей параметров транспортного потока к описанию их динамической связи по времени и координате. Этот переход был достигнут фактически формальным применением гидродинамического формализма. Поэтому, основная гипотеза модели Гриншилдса Лайтхиллом и Уиземом просто была «пересажена» на почву физики жидкостей [7]. Так в 1955 году в своей классической работе [20] они писали: «...Основная гипотеза теории состоит в том, что в любой точке дороги расход (автомобили в час) есть функция плотности (автомобили на милю)...». Иными словами,

- транспортный поток является непрерывным, с плотностью  $\rho(x,t)$ , равной числу машин на единицу длины и расходом  $q(x,t)$ , равным числу машин, пересекающих черту  $x$  за единицу времени;
- расход  $q$  определяется локальной плотностью<sup>3</sup>  $\rho$ :

$$q = Q(\rho) . \quad (4)$$

Тогда, скорость потока равна  $v(\rho) = \frac{Q(\rho)}{\rho}$  (т.е. средняя скорость является детерминированной (убывающей) функцией плотности  $v_e(\rho)$ ).

- на участке дороги без съездов-въездов количество машин сохраняется

$$q_x + \rho_t = 0 \quad (5)$$

Уравнение (5) можно обобщить и на участок дороги с пересечениями:

$$q_x + \rho_t = g(x,t) , \quad (6)$$

где  $g(x,t)$  - обозначает скорость притока/оттока машин.

Уравнения (4) и (5) образуют полную систему.

Произведя подстановку, получим:

$$\rho_t + c(\rho)\rho_x = 0 , \quad (7)$$

где  $c(\rho) = Q'(\rho) = v(\rho) + \rho v'(\rho)$  - скорость распространения возмущений.

---

<sup>3</sup> Подобные функциональные соотношения были установлены рядом инженеров-транспортников.

Для величины  $q$  можно дать более точное приближение.

**Гипотеза 1.1:** водители снижают скорость при увеличении плотности машин впереди. Это значит, что  $q$  зависит не только от плотности  $\rho$ , но и от ее градиента  $\rho_x$  (Дж. Уизем, 1974):

$$q = Q(\rho) - \nu \rho_x, \quad (8)$$

где  $\nu$  - некоторая положительная константа.

Дальнейшие формальные обобщения позволяют получить уравнение Бюргера, которое можно рассматривать как скалярное одномерное уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости с единичной плотностью.

### ***Третья стадия: Классификации***

Эмпирические наблюдения показали, что теоретическая фундаментальная диаграмма не описывает сложного поведения плотного транспортного потока, которое демонстрирует сложные пространственно-временные паттерны. Эти паттерны существенно неоднородны.

### **Трехфазная теория**

Основываясь на эмпирическом анализе поведения транспортных потоков в 1996-2000 г.г. Кернер выдвинул концепцию синхронизированного потока и связанную с ней теорию трехфазного транспортного потока [21].

### **Концепция «синхронизированного потока»**

Согласно концепции «синхронизированного потока» имеется две качественно различные состояния (фазы): фаза транспортного потока, называемая «синхронизированная» и фаза «широких перемещающихся пробок», которые следует различать в заторном (образующим очереди<sup>4</sup>) транспортном потоке. Это различие основывается на качественно отличных *эмпирических пространственно-временных свойствах* этих состояний (фаз).

Транспортный поток состоит из свободного и заторного (образующего очереди) потока. Заторный поток состоит из двух фаз. Таким образом, различаются три фазы движения транспортного потока<sup>5</sup>:

- Свободный поток.
- Синхронизированный поток.
- Широкие перемещающиеся пробки.

---

<sup>4</sup> В английской терминологии используется слово queues.

<sup>5</sup> В некоторых эмпирических приложениях, однако, Кернер дополнительно отличает четвертую стадию - stop-and-go.

В трехфазной теории пространственно-временные свойства паттернов потока объясняются с помощью фазовых переходов между перечисленными состояниями потока.

*Свободный поток* характеризуется средней желаемой скоростью  $V_0$  и, следовательно, сильной корреляцией и квазилинейным отношением  $Q \approx \rho V_0$  между потоком  $Q$  и локальной плотностью  $\rho$  [22].

### **Фундаментальная гипотеза трехфазной теории**

Другим утверждением концепции «синхронизированного» потока является гипотеза об устойчивых состояниях. Это утверждение является фундаментальной гипотезой трехфазной теории и формулируется следующим образом: *Гипотетическая область устойчивости синхронизированного потока покрывает двумерную область на плоскости*. Это означает, что на участках устойчивости потока, на которых все транспортные средства движутся на равных дистанциях и с равной постоянной скоростью, задана равновесная скорость транспортного средства относительно бесконечного множества плотностей в потоке и данной плотности к бесконечному множеству различных постоянных скоростей транспортных средств. Эта гипотеза означает, что не существует фундаментальной диаграммы для гипотетической стадии устойчивости скорости синхронизированного потока.

Таким образом, фундаментальная гипотеза трехфазной теории Кернера противоречит гипотезе о существовании фундаментальной диаграммы для гипотетических состояний устойчивости в математических моделях и теорий, основанных на данном подходе.

### **Объяснение терминов «синхронизированный поток» и «широкие перемещающиеся пробки»**

Термин «синхронизированный поток» отражает следующие свойства этой фазы:

- Это непрерывный транспортный поток, а не достаточно длинный тупик, как это обычно случается внутри перемещающейся пробки. Слово «поток» отражает именно это свойство непрерывности.
- Имеется *тенденция* к синхронизации (уравниванию) скоростей транспортных средств вдоль полос движения на трассе. Кроме того, имеется *тенденция* к уравниванию скоростей автомобилей на каждой полосе («связывание» автомобилей) в синхронизированном потоке благодаря относительно низкой средней вероятности пропуска этой фазы. Слово «синхронизированный» отражает этот эффект синхронизации скорости.

Термин «широкие перемещающиеся пробки» должен отражать характеристики и свойства пробки распространяться в любых иных фазах транспортного потока и через любые сужения, сохраняя скорость переднего фронта пробки. Словосочетание «перемещающаяся пробка» отражает свойство пробки *распро-*

*страняться* как единой сосредоточенной структуре на дороге. Если ширина пробки гораздо выше ширины ее фронта и, кроме того, скорость внутри пробки нулевая, то процесс перемещения пробки является характеристикой этого свойства. Слово «широкая» должно отражать характеристическое свойство распространения пробки - *сохранять* скорость ее переднего фронта.

### **Главные эмпирические свойства фазовых переходов**

Перемещающиеся пробки не возникают в свободной потоке, если синхронизированный поток не является затрудненным. Напротив, перемещающиеся пробки являются результатом фазовых переходов. Первый переход - от свободного потока к синхронизированному (F→S-переход) и только затем, и как правило в разных местах синхронизированного потока возникают перемещающиеся пробки (следующий переход называется S→J-переход, а последовательность обоих переходов F→S→J-переходы).

В частности, затор у сужения, - хорошо известный феномен т.н. «распада» потока, - связан с F→S-переходом, когда в изначально свободном потоке могут даже наблюдаться широкие перемещающиеся пробки (F→J-переход). Т.е. при одной и той же плотности в свободном потоке у сужения вероятность F→S-перехода может быть значительно выше, чем вероятность F→J-перехода.

Эмпирические исследования показывают, что имеется два основных типа заторных паттернов в изолированном сужении (эффективное сужение, находящееся достаточно далеко от других): Главный паттерн (кратко - GP): паттерн изолированного сужения, в котором синхронизированный поток возникает вверх по направлению движения и наблюдаются спонтанно сформированные широкие перемещающиеся пробки. Т.е., GP состоит из двух фаз заторного движения: «синхронизированного потока» и «широких перемещающихся пробок». Паттерн синхронизированного потока или кратко - SP: состоит только из синхронизированного потока, направленного по движению, т.е. здесь не могут наблюдаться широкие перемещающиеся пробки. Однако, в зависимости от свойств сужения и требований потока, GP и SP могут демонстрировать множество специфических особенностей. В частности, существует три основных различных типа паттернов синхронизированного потока (SP) на изолированных сужениях: локализованные SP (LSP), расширяющиеся SP (WSP) и перемещающиеся SP (MSP).

Было замечено, что перемещающиеся пробки чаще появляются в плотном (густом) синхронизированном потоке, имеющим низкую среднюю скорость. Другими словами, при средней скорости GP в синхронизированном потоке скорость перемещающихся пробок была значительно ниже, чем скорость SP синхронизированного потока. Скученность в GP синхронизированного потока возникает из-за наличия пинч-эффекта, т.е. сильного сжатия передней части синхронизированного потока в сужении. Кроме того, низкая средняя скорость с пинч-области GP синхронизированного потока выше частоты случая перемещающейся пробки в этом синхронизированном потоке. В частности, средняя

скорость переднего фронта пинч-области синхронизированного потока снижается на въезде на пандус если приток автомобилей на пандусе увеличивается. Следовательно, частота возникновения перемещающихся пробок возрастает когда поток на пандусе также возрастает по причине падения средней скорости переднего фронта синхронизированного потока на пандусе. Не наблюдалось позднего эффекта насыщения когда средняя скорость в синхронизированном потоке падает.

В противоположность этому, эмпирические исследования синхронизированного потока позволяют предположить, что в синхронизированном потоке при большой средней скорости перемещающиеся пробки не возникают. В этом случае, SP может существовать без возникновения широких перемещающихся пробок. Одним из SP является WSP, т.е. SP, в котором передний фронт синхронизированного потока непрерывно расширяется. WSP может возникать когда сужение представляет относительно малое возмущение транспортного потока, т.е. когда сужение не велико.

Хорошо известно, что *широкие перемещающиеся пробки* распространяются с неизменной формой и фазовой скоростью  $C \approx 13$  км/ч [23, 24, 25]. Кернер нашел, что это распространение не вызвано сужениями или наличием «синхронизированного потока». Более того, он показал, что выходной поток  $Q_{out}$  из широкой пробки еще и является постоянным и самоорганизованным [26, 24]. В противоположность широким перемещающимся пробкам, поток внутри «синхронизированного потока» остается ограниченным, а его задний фронт нормально упорядочен в месте некоторого сужения, например, на въезде на автостраду. Следовательно, «синхронизированный поток» в основном соответствует предыдущим замечаниям об очереди образовании или заторности транспортного потока. В своем патенте [27], Кернер применил свою собственную теорию очередей, которая обращается к гидродинамической модели Лайтхилла-Уизема [28].

Синхронизация средних скоростей вдоль соседних полос движения уже была описана Коши и др. [29]. Это справедливо также на *макроскопическом* уровне всех форм заторного движения, включая широкие перемещающиеся пробки. Моделирование показало, что это результат смены полос [30] при предположении, что сокращение скорости смены полос движения происходит только после того, как скорости на соседних полосах успешно уравниваются [31]. В *микроскопическом* масштабе маневры обгона продолжают существовать почти при любых плотностях [32]. Тем не менее, вероятность смены полосы значительно падает при возрастании плотности, когда большая часть дороги занята транспортными средствами [32]. Из-за сокращения обгонов и относительной связанности транспортных средств, также уменьшается изменение скоростей с возрастанием плотности.

Переход между свободным и заторным движением является гистерезисным по природе, т.е. обратный переход (возврат) происходит на меньших плотностях и более высоких средних скоростях. Это известно уже достаточно дав-

но [33, 34, 35]. Кернер определил, что переход обычно вызван локальными короткими возмущениями транспортного потока, которые начинаются от въезда на автостраду и распространяются вверх по потоку. Как скоро возмущение пройдет въезд, оно перекидывается вниз и распространяется вверх по потоку в течение времени. Заторное состояние тогда может сохраняться в течение нескольких часов [36].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блинкин М., Сарычев А., Монетизация вечных ценностей, Forbes, октябрь, 2005.
2. Бизнес-журнал, № 19, сентябрь-октябрь 2004.
3. Компьютерра, № 26-27 (550-551), 20 июля 2004.
4. Клиновштейн Г.И., Афанасьев М.Б., Организация дорожного движения: Учеб. для вузов. М.: Транспорт, 2001.
5. Семенов В.В., Математическое моделирование транспортных потоков мегаполиса, препринт № 34 Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2004.
6. Николис Г., Пригожин И., Самоорганизация в неравновесных системах, Издательство «Мир», Москва, 1979.
7. Уизем Дж., Линейные и нелинейные волны. / М.: Мир, 1977.
8. Daganzo C.F., Remarks on Traffic Flow Modeling and its Applications (<http://www.ce.berkeley.edu/~daganzo/publications.htm>).
9. Studying the ebb and flow of stop-and-go; Los Alamos Lab using cold war tools to scrutinize traffic patterns Alan Sipress Washington Post staff Writer, Thursday, August 5, 1999, Last updated 1/31/00 с интернет-сайта <http://www.kottke.org/plus/misc/traffic.html>.
10. Gray L. Griffeth D., The Ergodic Theory of Traffic Jams, Journal of Statistical Physics, Vol. 105, Nos. 3/4, November 2001.
11. Lighthill M.J., Whitham G.B., Proc. R. Soc. A 229, 317 (1955).
12. Nagel K., Wagner P., Woesler R., Still flowing: Approaches to traffic flow and traffic jam modeling, Operations Research, 2003, Vol. 51, No. 5, P. 681-710.
13. Kerner B.S., Three-Phase Traffic Theory and Highway Capacity, Physica A, 333 (2004), 379 – 440.
14. Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E., Cellular automata approach to three-phase traffic theory, 2002 J. Phys. A: Math. Gen. 35 9971-10013, doi:10.1088/0305-4470/35/47/303.
15. Ю.С. Мурашковский, Стадии развития научных представлений, <http://www.trizland.ru/>
16. Kühne K.R., Michalopoulos P., Continuum Flow Models, SIAM Journals Online, <http://epubs.siam.org/webintegration/>.
17. Greenshields B.D. A study of traffic capacity // Proc. (US) highway research. board, 1934, vol. 14, pp. 448-494.
18. Greenberg H. An analysis of traffic flow. // Operations. Research. 1959, vol. 7, pp. 79-85.
19. Lighthill M.J., Whitham F.R.S. On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads.// Proc. of the Royal Society Ser. A. No. 1178. Vol. 229. London, 1955. 317-345.
20. Lighthill M.J., Whitham G.B., A theory of traffic flow. Proc. R. Soc. A 229, 317 (1955).
21. Kerner B.S., Three-phase traffic theory and highway capacity.

22. Neubert L., Santen L., Schadschneider A., Schreckenberg M., Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis, *Phys. Rev. E* 60, 1999, P. 6480-6490.
23. Cassidy M.J., Mauch M., An observed traffic pattern in long freeway queues, *Transp. Res.*, 2001, Vol. A 35, P. 143-156.
24. B.S. Kerner & H. Rehborn, 1996, Experimental features and characteristics of traffic jams, *Phys. Rev. E* 53, R1297-R1300.
25. Mika H.S., Kreer J.B., Yuan L.S., Dual mode behavior of freeway traffic, *Highw. Res. Rec.*, 1969, Vol. 279, P. 1-13.
26. Kerner B.S., Klenov S.L., Konhäuser P., Asymptotic theory of traffic jams, *Phys. Rev.*, 1997, Vol. E 56, P. 4200-4216.
27. Kerner B.S., Kirschfink H., Rehborn H., *Method for the automatic monitoring of traffic including the analysis of back-up dynamics* (German Patent DE 196 47 127.3; US Patent US 5,861,820), 1999.
28. Lighthill M.J., Whitham G.B., On kinetic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proc. Roy. Soc. London*, 1955, Ser. A 229, P. 317-345.
29. Koshi M., Iwasaki M., Ohkura I., Some findings and an overview on vehicular flow characteristics, in *Proceeding of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*, edited by V.F. Hurdle, E. Hauer & G.N. Stewart (University of Toronto, Toronto, Ontario), 1983, P. 403-426.
30. Lee H.Y., Lee H.-W., Kim D., Origin of synchronized traffic flow on highways and its dynamic phase transitions, *Phys. Rev. Lett.*, 1998, Vol. 81, P. 1130-1133.
31. Shvetsov V., Helbing D., Macroscopic dynamics of multiline traffic, *Phys. Rev.*, 1999, Vol. E 59, P. 6328-6339.
32. Helbing D., Huberman B.A., Coherent moving states in highway traffic, *Nature*, 1998, Vol. 396, P. 738-740.
33. Hall F.L., An interpretation of speed-flow-concentration relationships using catastrophe theory, *Transp. Res.*, 1987, Vol. A 21, P. 191-201.
34. Payne H., Discontinuity in equilibrium traffic flow, *Transp. Res. Rec.*, 1984, Vol. 971, P. 140-146.
35. Treiterer J., Myers J.A., The hysteresis phenomenon in traffic flow, in *Proceeding of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*, edited by D. Buckley (Reed, London), 1974, P. 13-38.
36. Kerner B.S., Rehborn H., Experimental properties of phase transitions in traffic flow, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, Vol. 79, P. 4030-4033.
37. Kerner B.S., Rehborn H., Experimental properties of complexity in traffic flow, *Phys. Rev.*, 1996, Vol. E 53, P. R4275-R4278.
38. Compari E.G., Levi G., A realistic simulation for Highway Traffic by the use of Cellular Automata, *Lecture Notes In Computer Science*; 2002, Vol. 2329 Proceedings of the International Conference on Computational Science-Part I, P: 763-772.
39. Hoogendoorn S., Bovy P.H.L., Gas-kinetic model for multi-line heterogeneous traffic flow, *Transp. Res. Rec.*, 1999, Vol. 1678, P. 150-159.
40. Helbing D., *Verkehrsdynamik*. Berlin: Springer, 1997.
41. Shvetsov V.I., Helbing D., Macroscopic dynamics of multilane traffic, *Phys. Rev. E.*, 1999, Vol. 59, P. 6328-6339.