

М. Я. БЛИНКИН

КАЧЕСТВО ПЛАНИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

В ЗЕРКАЛЕ КЛАССИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Urban Studies and Practices Pilot Issue, 2015, 56-67
<https://doi.org/10.17323/usp00201556-67>

Urban Network Design Quality in the Classical Models of the Traffic Flow Theory

Автор: Михаил Яковлевич Блинкин, PhD (технические науки), директор Института экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ, профессор Высшей школы урбанистики им. А. А. Высоковского НИУ ВШЭ

Author: Mikhail Blinkin, PhD in Technical Sciences, Institute for Transport Economics and Transport Policy Studies (ITE&TPS) at National Research University Higher School of Economics: Director, professor of Graduate School of Urbanism NRU HSE

E-mail: mblinkin@hse.ru

Abstract: This article investigates the application of the classical models of the traffic flow theory to the analysis of the modern transport and urban planning problems in the world. As a typical case study author refers to the "Two-Fluid Model of Urban Traffic",

proposed by the American physicist Robert Herman and Nobel laureate Ilya Prigogine in the 1970s. The choice of this case was based not only on the model's "noble scientific origin", but on its modern appeal due to emergence of large arrays of the full-scale data (eg, GPS-tracks), that was unavailable before. "Herman-Prigogine" model allows for HP-indicator (η) calculation, which characterizes the elasticity of speeds to street-road network load factor increase. It is based on a comparison of synchronous time series data of running time and travel time. The indicator determines the quality of planning decisions on street and road design. The article presents the results of the HP-indicator calculations made for a number of cities around the world in 1980–2000, and the main objects of the Moscow road network

Keywords: Traffic flow models, road network, Herman-Prigogine Indicator, elasticity of speeds to load factor increase, street-road network design

Введение

Математическая теория транспортного потока — почтенная естественнонаучная дисциплина с 80-летней историей. На этом поле потрудились многие первоклассные ученые, известные своими достижениями в области физики, прикладной математики, математической статистики, computer science.

Результаты трудов всех этих замечательных людей нашли вполне конкретное отражение в градостроительной и инженерной практике продвинутых городов мира: в стандартном софте, применяемом в планировочных расчетах; в алгоритмах мониторинга и управления трафиком, «запаянных» в лучшие образцы современных ITS; в нормах проектирования дорог и улиц; в правилах застройки и землепользования...

К сожалению, однако, даже в профессиональной среде российских урбанистов нет отчетливых представлений о том, какое отношение имеют достижения классиков к реальным транспортным проблемам, с которыми ежедневно сталкиваются российские горожане.

По этой причине было бы небесполезным предоставить читателю конкретный пример классической модели, верифицированной по реальным данным городов мира, а также опыт содержательной интерпретации получаемых результатов.

«Двухжидкостная» модель Хермана-Пригожина

Имя американского астрофизика Роберта Хермана (Robert Herman, 1914–1997) ассоциируется скорее с теорией «Большого взрыва» и оценкой температуры реликтового излучения, нежели с дорожным движением. Между тем, более четверти века Р. Херман руководил научной группой, а затем и Департаментом теоретической физики в General Motors Research Laboratory; целью деятельности этих подразделений было создание теории транспортного потока как самостоятельной научной дисциплины (sic!).

Нобелевского лауреата по химии Илью Пригожина (Ilya Prigogine, 1917–2003) — при всем многообразии его научных интересов — было бы еще затруднительнее отнести к числу транспортных исследователей. Тем не менее, этот выдающийся ученый много лет работал под началом Роберта Хермана в упомянутом департаменте General Motors. Их основная и самая знаменитая монография по кинетической теории транспортного потока [Prigogine, 1971] представляет собой интереснейший исторический документ и замечательное пособие для специального курса прикладной математики. Трудно переоценить ее влияние на все дальнейшее развитие traffic flow theory. Однако вряд ли кто-либо из специалистов, работающих на этой ниве сегодня, стал бы использовать модели, описанные в этой книге.

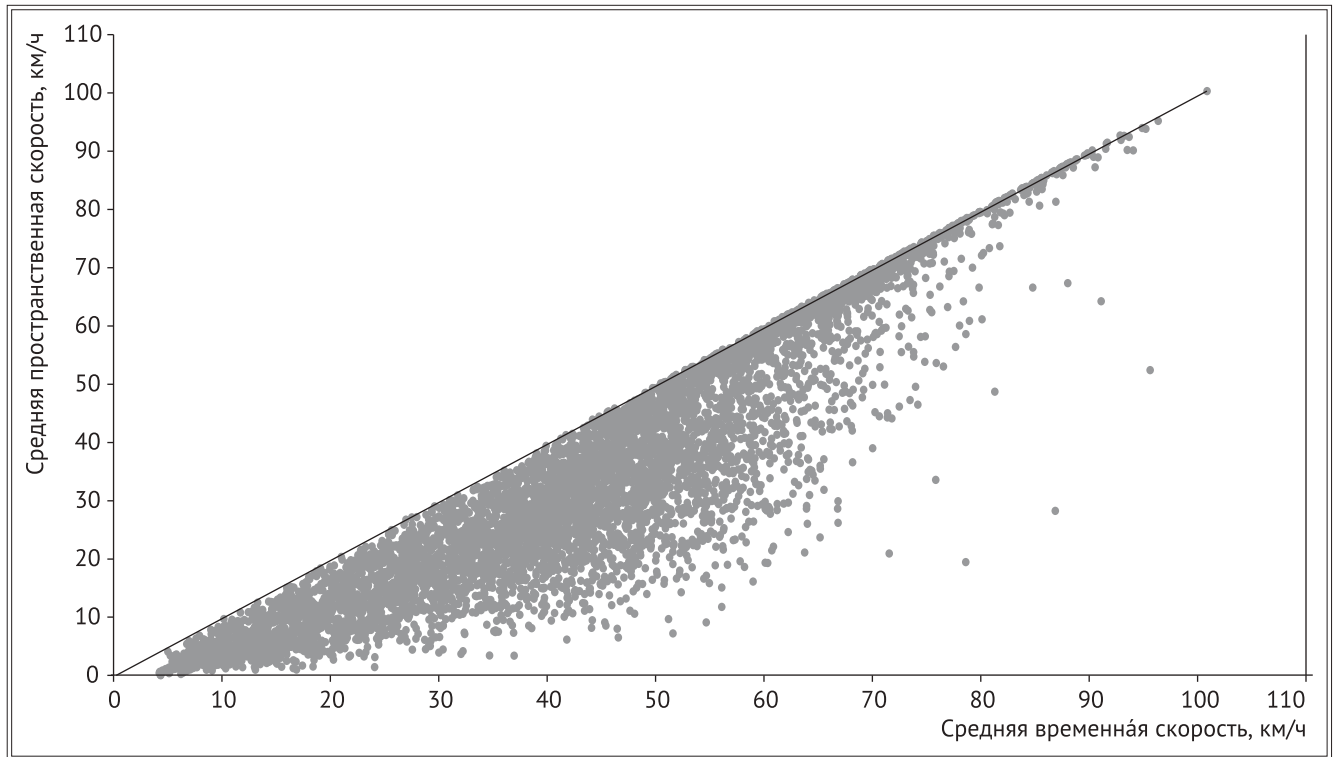
Совсем иную судьбу имела «Two-Fluid Model of Urban Traffic», предложенная теми же авторами в конце 1970-х годов, на завершающем этапе их совместной работы в General Motors [Herman, 1979]. Конструкция этой модели была по-своему удивительной: будучи чрезвычайно простой в техническом плане, она — прямо или косвенно — включала в себя обширный круг идей, занимавших в то время центральное место в теории транспортного потока. Бесспорным подтверждением чрезвычайных достоинств модели является то обстоятельство, что ее по сей день используют на практике специалисты из многих стран и городов мира.

В рамках «двухжидкостной» модели трафик рассматривался как смесь стоящих и движущихся транспортных средств в долевом соотношении f_s к f_r с нормировкой $f_s + f_r = 1$. При этом принималась так называемая эргодическая гипотеза, согласно которой доля стоящих автомобилей на некотором фрагменте улично-дорожной сети равна удельному весу простоев в суммарном времени поездки, то есть

$$f_s = ST/TT \quad (1)$$

где ST (standing time) — время простоя, RT (running time) — время в движении, TT (travel time) — суммарное время поездки, $RT + ST = TT$.

При верификации и калибровке модели приходится решать вопрос о «рубеже отсечения», то есть о скорости, по которой следует отделять стоящие автомобили от движущихся. В оригинальной публикации [Herman, 1979] стоящими считались те, и только те автомобили, которые стоят у стоп-линии на регулируемых перекрестках. В дальнейшем, в ходе многочисленных попыток практического использования этой модели, рубез отсечения отодвигался от нулевой отметки к некоторой небольшой, но заведомо ненулевой скорости. К примеру, есть все основания полагать стоящими те автомобили, которые с минимальной скоростью продвигаются в очереди, зависшей на съезде с ТТК на Волгоградский проспект. К счастью, модель



Здесь и далее используются данные наблюдений Б. А. Ткаченко на улично-дорожной сети г. Москвы за 2008 г.

Рис. 1. Статистика пространственных и временных скоростей транспортного потока

Хермана-Пригожина оказалась наделенной хорошими робастными свойствами, которые позволяют принимать рубеж отсечения на любом разумно низком уровне; например, по скорости пешехода — порядка 5 км в час.

Переменные TT и RT обратно пропорциональны средней скорости, взятой, соответственно, по пространственной (\bar{v}_s) и временной (\bar{v}_t) совокупности наблюдений (рис. 1):

$$TT = 1/\bar{v}_s, \quad RT = 1/\bar{v}_t.$$

В духе стандартных моделей «скорость-плотность», которые Р. Херман исследовал ранее совместно с Деносом Газисом¹ и другими авторами (*Gazis et al., 1959; Gazis et al., 1961*) принималась гипотеза степенного убывания скорости с ростом уровня загрузки дороги, в данном конкретном случае — с ростом удельного веса компоненты стоящих автомобилей:

$$\bar{v}_t = v_{max} \times (1-f_s)^\eta \tag{2}$$

и, соответственно, с учетом формулы (1):

$$\bar{v}_s = v_{max} \times (1-f_s)^{\eta+1} \tag{3}$$

1 Денос Газис (Denos C. Gazis, 1930–2004) — выдающийся американский ученый, специалист в области ИТ, прикладной математики, исследования операций, истории философии. В течение длительного времени руководил транспортными проектами в IBM Research Center; автор концепции и термина Intelligent Transportation System (ITS).

где v_{\max} — средняя максимальная скорость, наблюдаемая при $f_s \approx 0$, а η — подгоночный параметр модели. Позднее его назовут НР-индикатором, или «индикатором качества обслуживания транспортного потока на сети» (“Indicator of the Quality of Traffic Service in the Network”).

Херман и Пригожин обращали внимание читателя, что вводимая в данной модели характеристика загрузки дороги f_s функционально связана с плотностью потока ρ (авт./км):

$$f_s \sim 0 \left(\rho / \rho_{\max} \right)^\eta \quad (4)$$

где ρ_{\max} — максимальная (заторовая) плотность, ρ — дополнительный подгоночный параметр модели, зависящий от особенностей конфигурации сети. С учетом этой эквивалентности «двухжидкостная модель» представляла собой еще одно — вслед за конструкцией Газиса-Хермана-Ротери [Gazis, 1961] — макроскопическое обобщение старинной модели «следования за лидером».

По физическому смыслу НР-индикатор измеряет эластичность скорости сообщения (и, соответственно, времени поездки) к увеличению загрузки улично-дорожной сети. Из уравнений (1) и (2) следует соотношение, которое, собственно, и называют моделью Хермана-Пригожина:

$$RT = T_{\min}^{1/\eta+1} \times TT^{\eta/\eta+1} \quad (5)$$

где $T_{\min} = 1/v_{\max}$ — среднее минимальное время поездки.

При $\eta = 0$ время в движении (RT) сохраняется на уровне T_{\min} , соответственно, суммарное время поездки (TT) будет возрастать ровно по мере возрастания времени простоя (ST).

При $\eta > 0$ суммарное время поездки (TT) увеличивается за счет обеих компонент: как времени простоя (ST), так и времени в движении (RT). Чем больше значение параметра η , тем быстрее ухудшаются условия движения с ростом загрузки.

Существенное практическое преимущество модели (5) состояло еще и в том, что она в принципе не требовала измерять текущую плотность потока (ρ): эластичность условий движения к росту загрузки улично-дорожной сети оценивается здесь исключительно по статистике временных и пространственных скоростей.

Несмотря на это, казалось бы, выигрышное обстоятельство, интерес к указанной модели был невелик вплоть до 1990-х годов: в рамках технологических возможностей того времени получение больших синхронных выборок пространственных и временных скоростей было не многим менее трудоемким делом, нежели непосредственные измерения плотности потока. В частности, в оригинальной работе [Herman, 1979] авторы называли аэрофотосъемку в качестве единственного реального способа сбора данных для калибровки их модели. Обследования условий движения сводились тогда, в основном, к сбору и обработке данных, получаемых от детекторов прохода (к примеру, индуктивных или пневматических), базированных в выборочных сечениях сети.

Ситуация коренным образом изменилась к концу 1990-х, когда в распоряжении транспортных исследователей оказались новые технологии, связанные с GPS-позиционированием автомобилей и GIS-картами городов.

Программы обследований, опирающиеся на указанные технологии, условно можно разделить на два типа. Активное наблюдение предполагает сбор данных по траекториям движения одной или нескольких мобильных лабораторий, перемещающихся по дорожной сети в режиме подвижного наблюдателя по заранее заданному плану эксперимента.

Пассивное наблюдение становится возможным, когда значительная часть автомобилей обзаводится бортовым GPS-оборудованием. В этих условиях дело сводится к формированию репрезентативной совокупности случайных траекторий таких автомобилей, а затем обработке этих траекторий с адресной привязкой к GIS-карте.

В обоих случаях в распоряжении исследователя находятся значительные по объему ряды данных в координатах « $\vec{v}_s \leftrightarrow \vec{v}_t$ » или, в эквивалентной форме, « $TT \leftrightarrow RT$ », сгруппированные по характерным фрагментам УДС и периодам суток.

Современные измерения и практические выводы

Судя по публикациям последних лет (*Nelson 1998; ALGadhi, 2001; Jones, 2002; Jones, 2004; Hong, 2005; Lee, 2005; Crowe, 2009; Dixit, 2010*), модель Хермана-Пригожина становится весьма популярной в практике интерпретации результатов транспортных обследований.

Базовое уравнение (5) трактуется как «исходник» для построения линейной регрессии между переменными RT и TT , которую строят по данным натурных наблюдений. При этом η и T_{min} считаются функциями от подгоночных параметров модели (k) и (b):

$$\ln(RT) = k \times \ln(TT) + b \quad (6)$$

Располагая значениями (k) и (b), имеем:

$$\eta = k / (1 - k), \quad T_{min} = e^{b(\eta+1)}.$$

Расчеты такого типа были сделаны нами по данным обследования, спланированного и проведенного Б. А. Ткаченко².

2 Борис Александрович Ткаченко (1946–2014) – один из ведущих российских специалистов в вопросах теории транспортного потока, организации дорожного движения, методологии транспортных обследований, анализа транспортного поведения горожан. Полковник в отставке; работал в разные годы во ВНИИ БД МВД СССР, НИПИ Генплана Москвы, Центре исследований транспортной инфраструктуры (ЦИТИ). Был автором методики и организатором данного обследования, так же как и аналогичных обследований разных лет, проведенных в период его работы в ЦИТИ. Будучи физиком-экспериментатором по образованию и образу мышления, он был одним из немногих отечественных транспортных исследователей, следящих за повесткой «мировой лаборатории» transportation science.

**Таблица 1. Результаты расчета для улично-дорожной сети
Москвы в целом**

ПОКАЗАТЕЛИ	ЗНАЧЕНИЯ	
Средние скорости (v_s, v_t)	21,8	46,5
Показатели регрессии $\ln(RT) = k \times \ln(TT) + b$		
Коэффициенты линии регрессии (k, b)	0,588	1,699
Стандартные значения ошибок оценки коэффициентов линии регрессии (SE_k, SE_b)	0,005	0,030
Коэффициент детерминации r^2	0,832	
Стандартная ошибка оценки зависимой переменной	0,294	
F-статистика	11677,5	
Число степеней свободы (df)	2366	
Регрессионная сумма квадратов	1006,6	
Остаточная сумма квадратов	2366 (20,3%)	
НР-индикатор ($\eta = k/(1-k)$)	1,428	
Стандартная ошибка оценки НР-индикатора ($SE_\eta = SE_k/(1-k)^2$)	0,032 (2,24%)	
T_{\min} , сек/км	61,8	
V_{\max} , км/час	58,2	

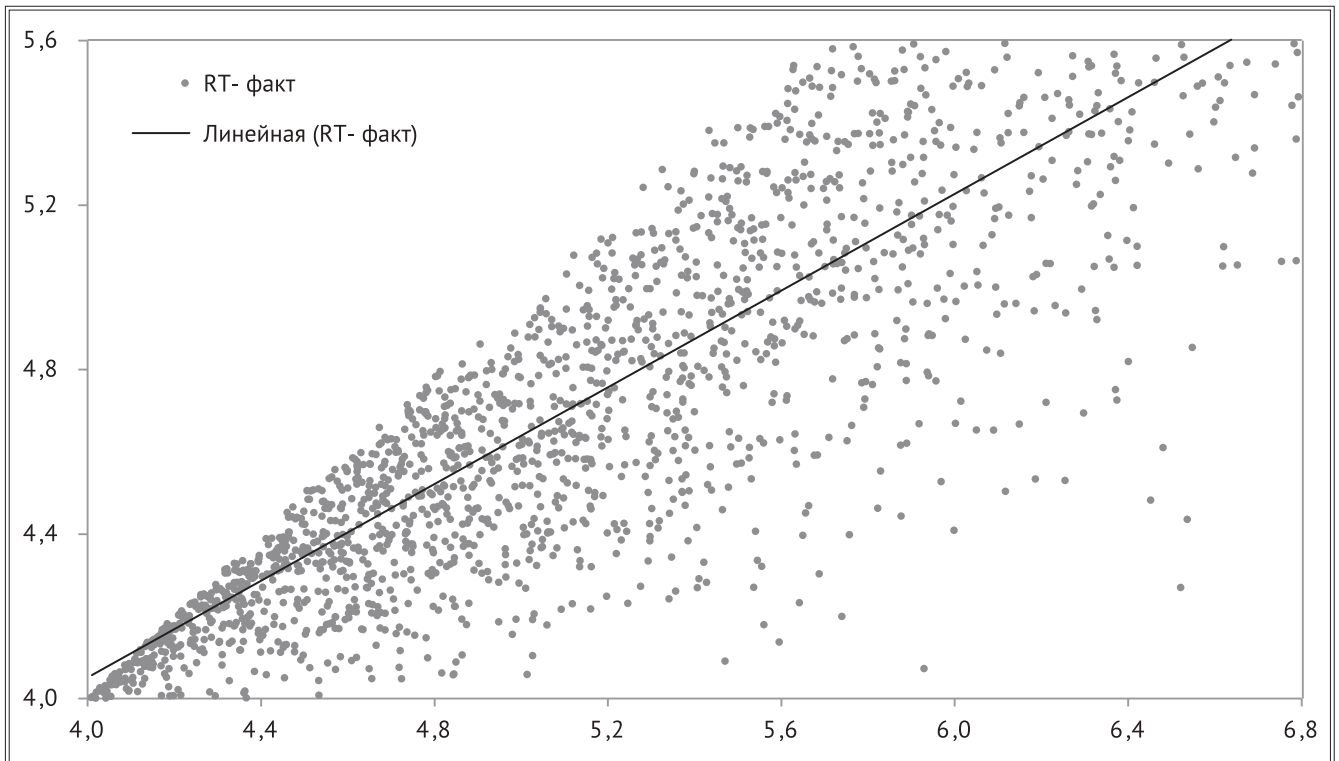


Рис. 2. Регрессия «Время в движении от времени поездки» для улично-дорожной сети Москвы (формула 6)

Результаты обработки данных по улично-дорожной сети города в целом представлены в табл. 1 (см. также рис. 2).

Из данных, представленных в табл. 1, очевидно наличие сильной регрессионной связи с вполне удовлетворительными значениями всех стандартных показателей. Вычисляемый на основе коэффициентов линии регрессии (k и b) НР-индикатор обладает свойством «хорошей определенности»: $\pm 2,24\%$ от номинального значения с 95-процентной вероятностью. Не менее надежные регрессионные зависимости и, соответственно, значения НР-индикатора были получены также для отдельных фрагментов улично-дорожной сети: центр города (рис. 3.), Садовое кольцо, Третье транспортное кольцо (рис. 4), МКАД.

В табл. 2 сведены оценки НР-индикатора, полученные в разные годы и в разных городах мира нашими зарубежными коллегами, а также наши собственные оценки для Москвы (см. также рис. 5).

Спектр значений НР-индикатора лежит (как и предполагали авторы исходной модели) в диапазоне от 0,4 до 3,6. При этом значение $\eta = 1$ условно разделяет область кривых «скорость-загрузка» с высокой и, соответственно, низкой эластичностью скоростных режимов к росту загрузки УДС.

Если сеть устроена разумным образом, а движение организовано более-менее удовлетворительно, то $\eta < 1$. В этих условиях кривая (2) выпукла вверх; соответственно, падение средней скорости движения с ростом нагрузки идет вполне щадящим образом.

В противном случае (например, при архаической конфигурации сети, при которой совмещаются функции улицы и дороги, при скверной стыковке магистральной сети с низовой уличной сетью, при неудовлетворительной координации работы светофорных объектов и т.п.) η достигает двух и более единиц. Соответственно, кривая (2) выпукла вниз, так что падение средней скорости движения с ростом нагрузки носит весьма резкий характер.

Таблица 2. НР-индикаторы для городов мира

Город, место и год наблюдения	Значение НР-индикатора (η)
Эр-Рияд – магистральные улицы (1999)	0,4
Орландо – магистральные улицы и городские фривеи, вечерний пик (2008)	0,63
Сеул – центр, утренний пик (2005)	0,718
Орландо – магистральные улицы и городские фривеи, утренний пик (2008)	0,79
Хьюстон – магистральные улицы и городские фривеи (1982)	0,8
Сеул – центр, вечерний пик (2005)	1,058
Москва – центр (2008)	1,253
Даллас – центр (2003)	1,35
Москва – улично-дорожная сеть в целом (2008)	1,428
Москва – Садовое кольцо (2008)	1,729
Москва – ТТК (2008)	2,621
Брюссель – центр (1982)	2,76
Лондон – центр (1982)	3,02
Москва – МКАД (2008)	3,619

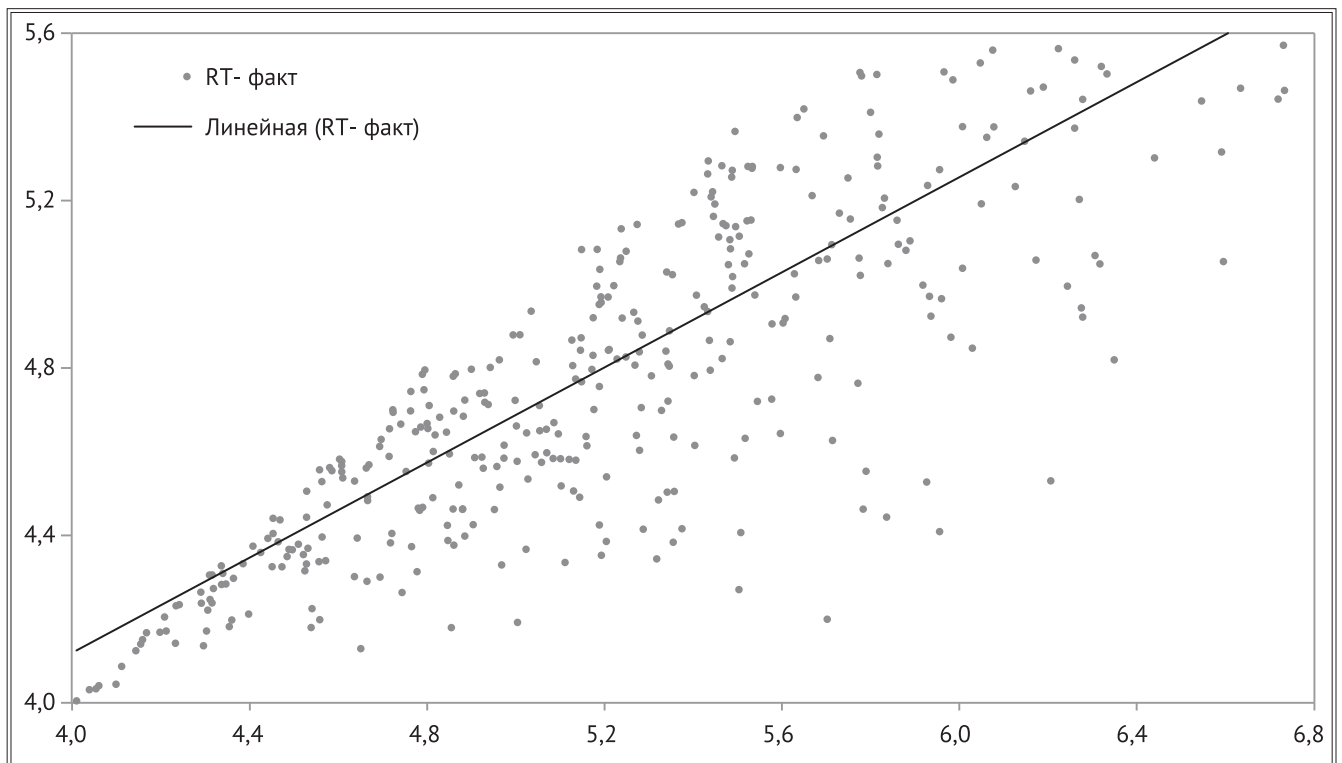


Рис. 3. Регрессия «Время в движении от времени поездки» для улично-дорожной сети центра Москвы (формула 6)

Выход на нижнюю (лучшую!) границу спектра был достигнут на «центральных улицах Эр-Рияда, не являющихся фривеями» [ALGadhi, 2001], но пользующихся явным приоритетом в светофорных циклах. Этот город, один из богатейших в мире, имеет умеренный по нынешним меркам уровень автомобилизации (порядка 300 автомобилей на 1000 жителей), располагает наилучшими современными техническими возможностями управления трафиком и отличается крайне жесткими требованиями к дисциплине участников дорожного движения.

Крупные города развитых стран мира располагают в настоящее время двумя взаимодополняющими компонентами УДС: низовой сетью улиц со светофорным регулированием (Local Streets, Collector Streets, Arterials) и системой городских фривеев (Urban Freeways, Expressways, Motorways). Организация движения во всех этих городах предусматривает планировочные и регулирующие меры для максимально гладкого сопряжения двух этих систем, включая регулирование доступа, разделение проезжей части фривея на экспрессную и коллекторную составляющую и т. п. Все эти меры предназначены, в частности, для того, чтобы окрестности съездов с фривеев на местную сеть не превращались в эпицентры возникновения «ударных волн в транспортном потоке» [Хейм, 1966].

Города США (в нашем примере — Орlando и Хьюстон) пришли к такой конфигурации сети еще полвека назад; соответственно, приличный уровень эластичности скоростей к загрузке ($\eta < 1$) был обеспечен там еще в начале 1980-х годов.

Город Сеул, где формирование современной дорожной сети и освоение продвинутой технологии организации движения прошло за три последних десятилетия, находится на границе двух отмеченных частей спектра: здесь для утреннего пика $\eta < 1$, для вечернего пика $\eta > 1$.

Худшая граница спектра достигалась в 1970–1980-х годах в центральной части крупнейших городов Западной Европы. В этот период эти города уже вышли на рубеж автомобилизации 400 и более автомобилей на 1000 жителей, но еще не при-

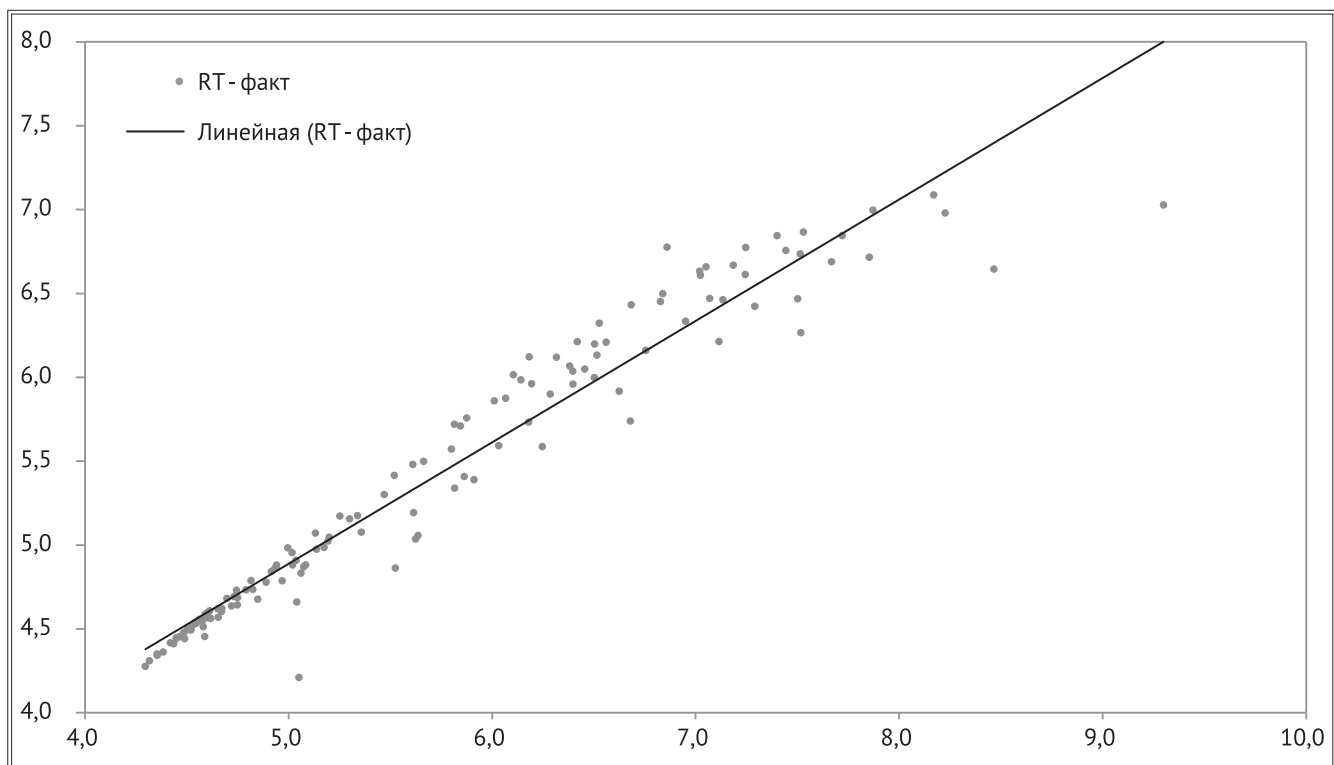


Рис. 4. Регрессия «Время в движении от времени поездки» для для Третьего транспортного кольца (формула 6)

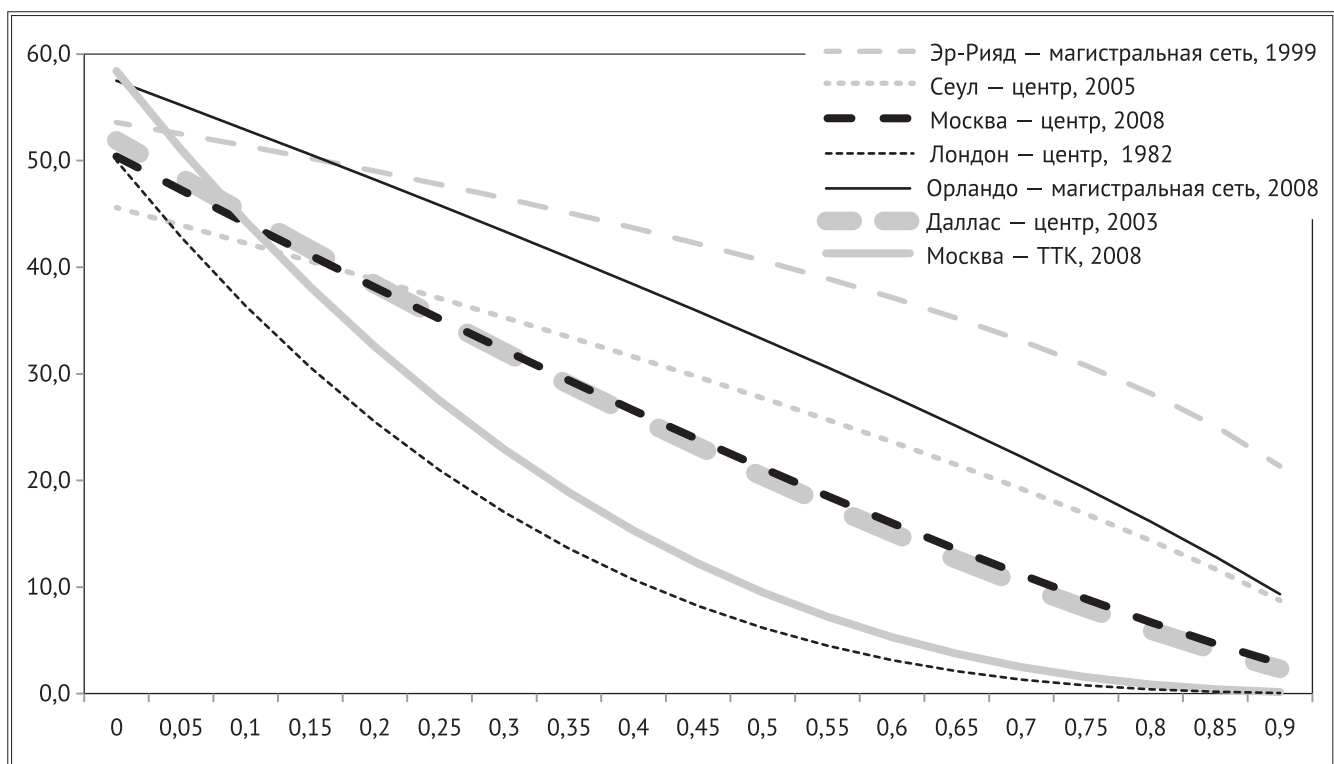


Рис. 5. Модель Хермана—Пригожина (формула 2), калиброванная по данным разных городов мира

няли широко известные ныне эффективные меры планировочного, регулировочного и фискального плана для снижения загрузки городских центров, а также для адаптации условий движения к высоким нагрузкам. Этот факт наглядным образом подтверждается крайне высокими значениями НР-индикатора для Брюсселя и Лондона начала 1980-х годов.

НР-индикаторы для центра Москвы находятся в серединной части нашего спектра, не слишком отличаясь от своих аналогов, к примеру, для городских центров Далласа или Сеула. Можно утверждать, что трафик на улично-дорожной сети центра Москвы, управляемый в рамках сложившейся схемы организации движения и более-менее отлаженной системы светофорного регулирования, имеет в целом удовлетворительную эластичность («терпимость») скоростного режима к росту загрузки.

В то же время скоростные режимы на московских магистралях проявляют аномально высокую эластичность к росту загрузки. По этому показателю ТТК и МКАД резко отличаются в худшую сторону не только от зарубежных дорог и магистральных улиц, но даже от Садового кольца, на большей части которого сохранено светофорное регулирование. Кривая «скорость-загрузка» для МКАД в диапазоне больших нагрузок ведет себя примерно так же, как для центральных лондонских улиц эпохи «больших европейских заторов».

Аномально высокая чувствительность главных московских дорог к росту загрузки связана, в первую очередь, с большой частотой въездов и съездов, обусловленной бедностью московской улично-дорожной сети в целом и, соответственно, отсутствием альтернативных выходов на сеть с большинства «пятен затройки». При этом большинство съездов с ТТК и МКАД работают в режиме «стохастического светофора», при котором очереди к выездной рампе запирают движение по основному направлению. Для радиальных магистралей главную негативную роль играют неперенные bottlenecks, возникающие ровно по месту стыка реконструированного участка со старой московской улицей, к которой этот участок приводит.

У меня есть все основания считать, что столь же аномально высокую эластичность скоростей к нагрузке будут демонстрировать московские проспекты и шоссе по завершении капиталоемких реконструкций, проводимых в настоящее время. Реконструктивные проекты такого рода основаны на незнании либо игнорировании известного предостережения Станислава Ежи Леца³: *«Ну, допустим, пробьешь ты головой стену. И что ты будешь делать в соседней камере?»*.

В завершение я хотел бы сделать вывод методического плана.

Лучшие главы из классики математической теории транспортного потока, включая описанную выше модель Хермана-Пригожина, бесспорно относятся к категории «старого, но грозного оружия». «Двухжидкостная модель», калиброванная на основе данных, получаемых с помощью современных ИТ-инструментов, предоставляет нетривиальную и весьма полезную информацию для объективного анализа успешности/неуспешности транспортной и градостроительной политики городских властей.

3 Станіслав Ёжи Лец (Stanisław Jerzy Lec, 1909–1966) – выдающийся польский поэт, философ, писатель-сатирик. Проблемами транспорта и дорог он не занимался, однако его афоризмы были и остаются крайне полезными при принятии решений в любой профессиональной области.

Список литературы

- Блинкин М. Я. Пропускная способность и нелинейное оценивание параметров диаграмм «скорость-плотность»//Труды ГИПРОДОРНИИ. 1981. № 34 С. 96–101.
- Иносе Х., Хамада Т. Управление дорожным движением. М.: Транспорт, 1983.
- Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1966.
- Al-Gadhi S. A. et al. Determination and Comparison of Quality of Traffic Service// Journal of King Saud University: Engineering sciences. University Libraries, King Saud University, 2001. Vol. 4. № 2.
- Crowe J. M. C. The calibration, validation, and comparison of VISSIM simulations using the two-fluid model. University of Central Florida, 2009.
- Breiman L. A Relationship between Space and Time Distributions in Homogeneous Traffic Flow and its Applications//Transpn. Research. 1974. Vol 8. № 1. pp. 39–44.
- Dixit V. V., Crowe J., Radwan E. The Calibration and Validation of Microscopic Simulation Using the Two-Fluid Model// Transportation Research Board 90th Annual Meeting. 2011. № 11–4006.
- Gazis D. C., Herman R., Potts R. B. Car-following theory of steady-state traffic flow// Operations research. 1959. Vol. 7. № 4. pp. 499–505.
- Gazis D. C., Herman R., Rothery R. W. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow// Operations research. 1961. Vol. 9. № 4. pp. 545–567.
- Herman R., Prigogine I. A two-fluid approach to town traffic//Science. 1979. № 4389. pp. 148–151.
- Hong S. Y. et al. Analysis of Two-Fluid Model Using GPS Data//Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005. № 6. pp. 560–572.
- Jones E., Farhat W. Validation of two-fluid model of urban traffic for arterial streets// Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2004. № 1876. pp. 132–141.
- Jones E. G., Jankowski C. A. Scalability of the Two-Fluid Model of Urban Traffic: The Other End of the Scale Signalized Intersections//Proc. 81st TRB Annual Meeting. Washington, 2002.
- Lee C. et al. Characterizing Urban Network Performance Using Two-Fluid Model// Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2005. № 6. pp. 1534–1544.
- Nelson P., Sopasakis A. The Prigogine-Herman kinetic model predicts widely scattered traffic flow data at high concentrations//Transportation Research Part B: Methodological. 1998. Vol. 32. № 8. pp. 589–604.
- Prigogine I., Herman R. Kinetic theory of vehicular traffic. N.Y.: Elsevier, 1971.