

УДК 656.13 : 65.012.123

## **ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ УЧАСТНИКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

**В.М. Курганов**

Тверской государственный университет, Тверь

Целью исследования является анализ факторов, определяющих поведение водителей в транспортном потоке – состояние дорожного покрытия, наличие пересечений с железнодорожными или трамвайными переездами, остановки маршрутного пассажирского транспорта. В проводимых в настоящее время исследованиях слабо учитывается психология поведения водителей и мотивация принимаемых решений. Сделан вывод об ограниченности применения принципов Вардропа для оптимизации поведения участников дорожного движения.

**Ключевые слова:** *транспортный поток, заторы в движении автомобилей, принципы Вардропа.*

В транспортном потоке преобладают легковые автомобили, что отражает структуру автомобильного парка экономически развитых стран [1, с. 34; 2, с. 57]. Если государство не ограничивает возможность приобретения транспортных средств, как, например, в Сингапуре, то наличие у населения легковых автомобилей в определенной степени характеризует уровень его благосостояния.

В 2014 г. в России на 1000 жителей приходилось 317 автомобилей. В Приморском крае этот показатель составил 572 авт./1000 чел., в Камчатском крае – 458, в Москве – 311, а в «глубинке» России, например, в Тверской области – 290 [3].

По этому показателю Россия и ее отдельные регионы приближаются к уровню ряда европейских стран. Во Франции, например, автомобилизация населения составляет 575 авт./1000 чел., в Германии – 534, в Великобритании – 525, то есть примерно столько же, сколько в Приморском крае Российской Федерации. Насыщенность легковым транспортом Камчатского края примерно соответствует Польше (493 авт./1000 чел.), Чехии (485 авт./1000 чел.) и Греции (451 авт./1000 чел.). Если рассматривать значение показателя в среднем по России, то он близок к таким европейским странам, как Словакия (336 авт./1000 чел.) и Венгрия (301 авт./1000 чел.) [4].

Однако насыщение легковыми автомобилями приводит не только к повышению комфорта для жителей страны, но и к появлению целого ряда тяжелых проблем. Страны с высоким уровнем автомобилизации в большинстве своем уже пережили «болезни роста», России только предстоит найти действенные методы разрешения возникающих

вопросов. Одним из них является возникновение заторов транспортных средств из-за достижения пределов пропускной способности дорог и перегрузки дорожной сети в населенных пунктах (и, нередко, за их пределами, например, на участках федеральных трасс).

Очевидным кажется, что необходимо приводить дорожную сеть в соответствие уровню автомобилизации. Такой путь и был выбран в начале 2000-х годов в Москве, где развернулось беспрецедентное строительство дорожных сооружений и выполнен колоссальный объем работ, не имеющий мировых аналогов. Была проведена реконструкция МКАД, построено Третье транспортное кольцо, а потом развернулось строительство Четвертого кольца. Введены в строй новые мосты, тоннели, путепроводы, эстакады.

Оказалось, что затраты гигантских средств мало повлияли на улучшение дорожного движения. Новые дороги магическим образом «притягивали» к себе автомобили и вновь возникали заторы.

Это явление имеет математическое обоснование и известно, как «парадокс Браеса». Дитрих Браес (Dietrich Braess), приват-доцент Института вычислительной и инструментальной математики г. Мюнстер (Германия) в своей статье, опубликованной в 1969 г., показал, что строительство дополнительных дорог при самостоятельном выборе водителями маршрута движения может привести к снижению общей производительности дорожной сети [5].

Имеются примеры, иллюстрирующие проявление этого феномена, в том числе и применительно к России [6].

Развитие автомобилизации и опыт нейтрализации ее негативных последствий в настоящее время привели к изменению в постановке задачи. Вместо того, чтобы построить больше дорог и стремиться обеспечить пропуск возможно большего количества транспортных средств, ставится задача максимально использовать пропускную способность имеющихся дорог внутри населенного пункта и сбалансировать общий спрос на движение по дорожной сети с ее пропускной способностью [7, с. 7].

Пропускная способность дороги оценивается максимальной интенсивностью движения, которая связана с плотностью потока и средней скоростью основным уравнением потока, предложенным в 1933 году Брюсом Гриншилдом (Bruce Greenshields) и в настоящее время приводимым практически во всех книгах по организации дорожного движения [8, с. 75]:

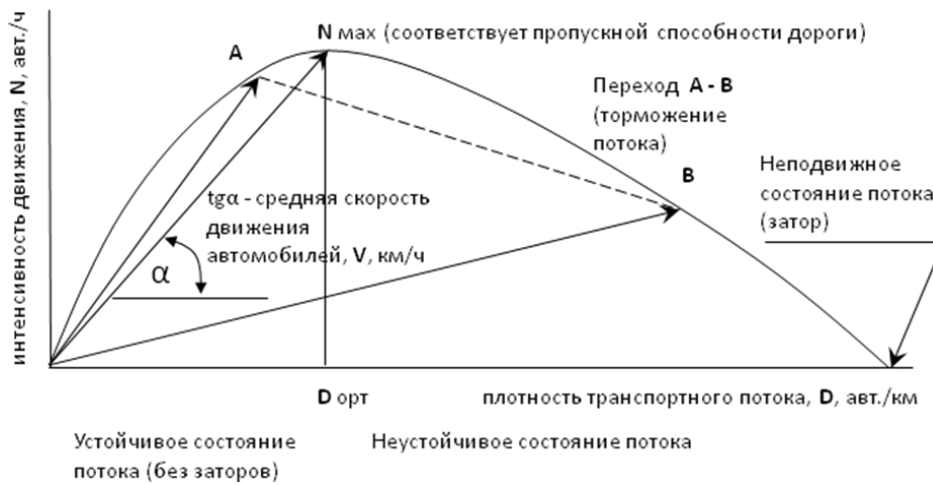
$$N = DV,$$

где  $N$  – интенсивность движения (количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги в единицу времени), авт./ч;

$D$  – плотность транспортного потока (количество транспортных средств на единицу длины дороги), авт./км;

$V$  – средняя скорость движения автомобилей, км/ч

График в координатных осях  $N$  и  $D$  называется основной (фундаментальной) диаграммой транспортного потока и имеет выраженный максимум, соответствующий определенному значению скорости.



Р и с. 1. Основная (фундаментальная) диаграмма транспортного потока

Заторы в движении возникают, если резко снижается скорость движения или увеличивается количество транспортных средств и превышает максимально возможную интенсивность движения. В случае заторов основное уравнение потока не может использоваться для определения параметров движения.

В работах научного характера для прогнозирования заторов в транспортных сетях популярным является использование двух принципов Джона Г. Вардропа (John Glen Wardrop), которые сформулированы в 1952 году [8, с. 116; 7, с. 65].

Оба принципа отвечают идее равновесия Джона Ф. Нэша (John Forbes Nash), которое было сформулировано в 1950 г. в математической теории игр независимо от Вардропа [10].

Равновесие достигается путем перераспределения транспортных потоков путем выбора участниками дорожного движения «оптимального» маршрута при проезде перекрестков с точки зрения сокращения «транспортных затрат», которые оцениваются временем движения по маршруту.

Можно высказать несколько замечаний общего характера относительно применимости принципов Вардропа.

1. Причинами заторов на дороге часто являются не только пересечения дорог или повышенная плотность транспортного потока. Нередко заторы образуются из-за снижения скорости автомобилями из-за выбоин на дороге, необходимости объезда припаркованных автомобилей или места ДТП, невозможности обогнать тихоходное транспортное средство. Уменьшается скорость и возникают заторы

также перед железнодорожными или трамвайными переездами, когда рельсы выступают над поверхностью дороги.

К зонам влияния узких мест транспортных потоков [11, с. 36, 54 - 55] можно отнести и остановочные пункты маршрутного городского пассажирского транспорта, где осуществляется высадка и посадка пассажиров, а также торможение и разгон пассажирских транспортных средств, которые при начале движения от обозначенного места остановки имеют преимущество перед другими участниками дорожного движения согласно п. 18.3 Правил дорожного движения.

Некоторые из перечисленных причин возникновения заторов могут быть известны заранее, а некоторые не поддаются прогнозированию и не могут быть учтены водителями при выборе трассы своего движения. Важным является то обстоятельство, что эти причины заторов выпадают из сферы поиска компромисса между участниками дорожного движения на основе моделей теории игр и принципов Вардропа.

Такие причины возникновения заторов, как, например, возникновение ДТП или затруднения объезда припаркованного транспортного средства делают слабо реализуемым допущение в принципах Вардропа о ничтожно малом влиянии отдельного участника движения на условия движения остальных водителей.

2. Термин «транспортные затраты» применительно к времени движения по маршрутам не вполне корректен. Под транспортными затратами обычно понимаются денежные средства, которые необходимо потратить для транспортировки грузов или пассажиров.

Профессионалы-автотранспортники различают затраты времени и затраты денежных средств. Транспортные затраты – это не только затраты времени. Возможна ситуация, когда меньшее время будет соответствовать большему расходу топлива (движение в объезд без остановок, дорога на подъем, с большим количеством поворотов и пересечений) или потребует внесения платы за использование платной, но более быстрой, дороги. Стоимостная оценка затрат не всегда соответствует минимуму времени движения.

Поэтому термин «транспортные затраты», под которыми понимаются затраты времени, популярен у специалистов по математическому моделированию, системному проектированию и довольно редко встречается в публикациях, которые принадлежат специалистам в области автомобильного транспорта.

Расчет величины стоимостных издержек с учетом времени движения и других факторов представляет известную трудность и, по сути, является самостоятельной серьезной задачей научно-методического характера.

3. Равновесное распределение согласно принципам Вардропа предполагает наличие у каждого водителя полной и достоверной информации о времени движения (или затратах) по всем участкам дорожной сети, что значительно идеализирует реальные ситуации в транспортных потоках.

4. Участники дорожного движения оценивают затраты обычно не путем точных расчетов, а интуитивно, с большей или меньшей степенью погрешности. Ошибка в оценке затрат приводит к реализации ошибочных стратегий поведения.

Надо иметь также в виду, что за прошедшее полвека со времени формулировки принципов Вардропы во всех регионах мира значительно изменилась дорожная сеть. Достаточно сказать, что во времена Вардропы еще не были построены американские интерстэйт-хайвэй. С тех пор не только в США, но и в других странах изменились условия дорожного движения.

Принципы Вардропы не учитывают влияние такого фактора, как психология поведения водителей, который чрезвычайно важен для понимания мотивов принятия ими решений и обеспечения безопасности движения [12, с. 116; 13, с. 118].

В качестве примера изменения психологических характеристик участников дорожного движения можно привести тот факт, что с середины прошлого века (с момента формулировки принципов Вардропы) кардинально изменился гендерный состав транспортных потоков. Количество женщин за рулем практически сравнялось с количеством мужчин. Если для многих мужчин автомобиль – средство продемонстрировать свое превосходство, то женщины более функциональны. Их поведение резко отличается от поведения мужчин, они менее склонны принимать рискованные решения, ведут себя более осторожно, сдержанно и в целом создают меньше аварийных ситуаций благодаря своей аккуратности, ответственности и дисциплинированности. В то же время женщины испытывают затруднения, когда нужно быстро перестроиться или выполнить маневр. Неожиданные или непривычные обстоятельства движения могут привести к задержкам времени при принятии ими решения. Сказанное означает, что со времени формулировки принципов Вардропы изменилась психология поведения участников потоков.

Прежде, чем пытаться использовать принципы Вардропы для оптимизации поведения участников дорожного движения, полезно отметить ряд неявных допущений, которые сделаны при формулировке каждого из принципов.

Согласно первому принципу Вардропы, участники дорожного движения выбирают маршруты движения, исходя из минимизации своих транспортных расходов. Принимается, что движение по неиспользуемым маршрутам привело бы к увеличению их затрат, для оценки которых используется время движения.

Действуя согласно второму принципу Вардропы, водители автомобилей выбирают маршруты движения, исходя из достижения минимального среднего времени движения всех участников дорожного движения. Для этого необходимо согласовать их поведение, причем в этом случае минимальными будут суммарные затраты участников дорожного движения.

Первый принцип Вардропа не всегда справедлив, так как при его формулировке игнорируются не только психология водителей и манера вождения, но и мотивация их поведения. А это также относится к числу важных факторов, определяющих действия участников дорожного движения. Понимание мотивации поведения – исходный пункт для принятия управленческих решений [14, с.73].

Целью участников дорожного движения не всегда является сокращение затрат времени. Очень часто главным мотивом поведения водителя может быть, например, не более быстрое, а более безопасное движение, которое зависит от состояния дорожного покрытия, наличия и характера пересечений, величины транспортного потока.

При этом представления водителей о том, какой маршрут менее опасен, очень сильно различаются. Есть водители, которые выбирают маршруты с минимальным количеством левых поворотов, или такие левые повороты, которые выполняются только на регулируемых перекрестках. Есть водители, которые стремятся, по возможности, вообще исключить проезд через нерегулируемые перекрестки. Некоторые водители стараются избегать участков дорог с интенсивным движением, а других водителей высокая интенсивность потока не пугает.

Водители могут выбрать более комфортное движение, которое связано не только с качеством самой дороги, но, например, с окружающим ландшафтом (например, проехать по дороге рядом с морем или парковой зоной с возможностью сделать остановку в пути в красивом месте).

Поэтому решение задачи следовало бы дополнить исследованием факторов, которыми мотивируются водители при выборе маршрута.

Надо также отметить, что есть проблемы с определением критерия оптимальности поведения. Участники не всегда в состоянии выбрать маршрут, минимизируя свои собственные затраты времени, так как эта задача имеет неопределенность объективного и субъективного характера.

Представление участника движения о том, что он выбрал для себя самый быстрый маршрут, обычно формируется интуитивно, а не на основе расчетов по объективной информации о загруженности дорожной сети, и вследствие этого, может быть неверным по объективной причине использования недостоверной и/или неполной исходной информации для принятия решения.

Кроме этого, каждый участник движения имеет свободу изменения маршрута в процессе движения, уже после того, как первоначальное решение о выборе маршрута сделано. Затраты времени каждым участником зависят не только от выбранного им маршрута, но и от выбора, сделанного другими участниками, причем их выбор заранее неизвестен и может быть изменен в процессе движения. Данное обстоятельство предопределяет объективную природу неопределенности задачи. А поскольку и сам участник дорожного движения может изменить ранее сделанный им выбор маршрута, то задача выбора имеет также неопределенность субъективного характера, связанную с самим участником движения. Неопределенность носит

динамический характер, так как выбор одних водителей может прямо повлиять на выбор других.

Если пытаться создать информационную систему оповещения водителей о состоянии потока, дополнив эту информацию рекомендациями по выбору трассы движения, то нет гарантии, что все водители будут им следовать. Наверняка найдутся такие, которые решат, что в условиях, когда большая часть водителей ориентируется на общие рекомендации, им будет выгодней использовать собственную стратегию, отличающуюся от рекомендаций, передаваемых по системе оповещения.

Следует отметить также, что конкурентное поведение водителей может привести к проявлению «парадокса Браеса», когда участки дорожной сети будут перегружены и заторы увеличатся, это подтверждено и математической моделью, разработанной А.В. Гасниковым и др. [7, с. 65].

Второй принцип Вардропа, казалось бы, предусматривает централизованное управление дорожным движением, что гарантирует оптимальность решения. Однако его использование не всегда может привести к лучшей организации движения.

Время разных участников дорожного движения не равноценно: кто-то едет на концерт, кто-то везет обеды в детский сад, кто-то едет на пляж, кто-то доставляет больного в реанимацию, а кто-то управляет маршрутным автобусом. Стремление же минимизировать средние затраты времени приведет к тому, что различная социальная роль участников движения будут нивелирована в системе управления транспортным потоком.

Проведенный анализ позволяет сделать следующий вывод. Исследование принципов Вардропа может быть полезно при моделировании потоковых процессов различной природы, однако попытки их практического применения для оптимизации транспортных потоков могут не дать желаемых результатов из-за чрезмерного упрощения поведения участников дорожного движения и игнорирования всего комплекса причин возникновения заторов на дорожной сети в населенных пунктах.

### Список литературы

1. Курганов В.М. Макроэкономическая оценка транспортного потенциала. Законы логистики и статистические закономерности: монография. Тверь, Твер. гос. ун-т, 2013. 69 с.
2. Курганов В.М. Экономика России и транспортный потенциал страны / Факторы развития экономики России: Материалы V Междунар. научно-практ. конф., 17-18 апреля 2013 г., г. Тверь, Твер. гос. ун-т, 2015. С. 56-60.
3. Автомобилизация. [Электронный ресурс] URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/%C0%E2%F2%EE%EC%EE%E1%E8%EB%E8%E7%E0%F6%E8%FF> (дата обращения: 10.12.2015).

4. Список стран по количеству автомобилей на 1000 человек. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_стран\\_по\\_количеству\\_автомобилей\\_на\\_1000\\_человек](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_количеству_автомобилей_на_1000_человек)(дата обращения: 10.12.2015).
5. Braess D. Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. Unternehmensforschung 12, 258—268. [Электронный ресурс] URL <http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Dietrich.Braess/paradox.pdf> (дата обращения: 10.12.2015).
6. Парадокс Браеса. [Электронный ресурс] URL [https://ru.wikipedia.org/wiki/Парадокс\\_Браеса](https://ru.wikipedia.org/wiki/Парадокс_Браеса) (дата обращения: 10.12.2015).
7. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / Под ред. А. В. Гасникова. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 215 с.
8. Горев А.Э. Основы теории транспортных систем: учебное пособие. - СПб.: СПбГАСУ, 2010. 214 с.
9. Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1952. На основе: Гасников А. В., Кленов С. Л., Нурминский Е. А. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / Под ред. А. В. Гасникова. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 215 с.
10. Равновесие Нэша. [Электронный ресурс] URL [https://ru.wikipedia.org/wiki/Равновесие\\_Нэша](https://ru.wikipedia.org/wiki/Равновесие_Нэша). (дата обращения: 10.12.2015).
11. Богумил В.Н. Оценка основных параметров транспортных потоков на улично-дорожной сети города на основе обработки навигационных данных городского пассажирского транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. М.: Моск. Автомоб. – дор. госуд. техн. ун-т (МАДИ), 2011. 212 с.
12. Курганов В.М. Психология управления. Автотранспортная психология. Учебное пособие. М.: Приор, 2004. 76 с.
13. Курганов В.М. Психологические качества и надежность водителя // Вопросы психологии, 2004. №6. С. 118-122.
14. Курганов В.М. Современный менеджмент. Теория и практика управления. М.: Книжный мир, 2004. 182 с.

## **MODEL LIMITS OF ROAD TRAFFIC OPTIMIZATION**

**V. M. Kurganov**

Tver State University, Tver

The article analyses the factors determining drivers behavior on roads i. e. road surface, railway and tramway crossings, bus and other stops. The author indicates that contemporary research doesn't take into consideration drivers' psychology and motivation. The author concludes about the limits of Wardrop's principles implementation in road traffic optimization.

**Keywords:** *road traffic, traffic jam, Wardrop's principles*

*Об авторе:*

КУРГАНОВ Валерий Максимович – доктор технических. наук.,



профессор, Тверской государственный университет, 170100, Тверь, Желябова, 33, e-mail: glavreds@gmail.com

*About the author:*

KURGANOV Valerij Maksimovich – doctor of technical sciences, professor, Tver State University, 170100, Tver, Zhelyabova, 33, e-mail: glavreds@gmail.com

## References

1. Kurganov V.M. Makroekonomicheskaja ocenka transportnogo potenciala. Zakony logistiki i statisticheskie zakonomernosti: monografija. Tver', Tver. gos. un-t, 2013. 69 s.
2. Kurganov V.M. Jekonomika Rossii i transportnyj potencial strany / Faktory razvitija jekonomiki Rossii: Materialy V Mezhdunar. nauchno-prakt. konf., 17-18 aprelya 2013 g., g. Tver', Tver. gos. un-t, 2015. S. 56-60.
3. Avtomobilizacija. [Jelektronnyj resurs] URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/%C0%E2%F2%EE%EC%EE%E1%E8%EB%E8%E7%E0%F6%E8%FF> (data obrashhenija: 10.12.2015).
4. Spisok stran po kolichestvu avtomobilej na 1000 chelovek. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Spisok\\_stran\\_po\\_kolichestvu\\_avtomobilej\\_na\\_1000\\_chelovek](https://ru.wikipedia.org/wiki/Spisok_stran_po_kolichestvu_avtomobilej_na_1000_chelovek)(data obrashhenija: 10.12.2015).
5. Braess D. Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. Unternehmensforschung 12, 258—268. [Jelektronnyj resurs] URL <http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Dietrich.Braess/paradox.pdf> (data obrashhenija: 10.12.2015).
6. Paradoks Braesa. [Jelektronnyj resurs] URL [https://ru.wikipedia.org/wiki/Paradoks\\_Braesa](https://ru.wikipedia.org/wiki/Paradoks_Braesa) (data obrashhenija: 10.12.2015).
7. Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskij E.A. i dr. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov: Uchebnoe posobie / Pod red. A. V. Gasnikova. Izd. 2-e, ispr. i dop. M.: MCNMO, 2013. 215 s.
8. Gorev A.Je. Osnovy teorii transportnyh sistem: uchebnoe posobie. - SPb.: SPbGASU, 2010. 214 s.
9. Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1952. Na osnove: Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminskij E. A. i dr. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov: Uchebnoe posobie / Pod red. A. V. Gasnikova. Izd. 2-e, ispr. i dop. M.: MCNMO, 2013. 215 s.
10. Ravnovesie Njesha. [Jelektronnyj resurs] URL [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ravnovesie\\_Njesha](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ravnovesie_Njesha). (data obrashhenija: 10.12.2015).
11. Bogumil V.N. Ocenka osnovnyh parametrov transportnyh potokov na ulichno-dorozhnoj seti goroda na osnove obrabotki navigacionnyh dannyh gorodskogo passazhirskogo transporta: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.22.01. M.: Mosk. Avtomob. – dor. gosud. tehn. un-t (MADI), 2011. 212 s.
12. Kurganov V.M. Psihologija upravljenja. Avtotransportnaja psihologija. Uchebnoe posobie. M.: Prior, 2004. 76 s.
13. Kurganov V.M. Psihologicheskie kachestva i nadezhnost' voditelja // Voprosy psihologii, 2004. №6. S. 118-122.

14. Kurganov V.M. Sovremennyy menedzhment. Teorija i praktika upravlenija. M.: Knizhnyj mir, 2004. 182 s.
- 15.