

Владимирский государственный университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

Учебное пособие

Владимир 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2025

ISBN 978-5-9984-1751-1

© ВлГУ, 2025

© Кокурина Ю. К., 2025

УДК 51:656
ББК 39+22.1

Автор-составитель Ю. К. Кокурина

Рецензенты:

Кандидат физико-математических наук
доцент кафедры функционального анализа и приложений
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Т. В. Прохорова

Кандидат экономических наук, доцент
доцент кафедры менеджмента и бизнес-информатики
Финансового университета при правительстве Российской Федерации
(Владимирский филиал)
С. В. Никифорова

Исследование математических методов описания транспортных потоков [Электронный ресурс] : учеб. пособие / авт.-сост. Ю. К. Кокурина ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2025. – 82 с. – ISBN 978-5-9984-1751-1. – Электрон. дан. (2,34 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Содержит основные понятия описания транспортных потоков, математических методов, интенсивности движения и пропускной способности, которые обучающиеся могут применить на практике при решении практико-ориентированных задач.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения с элементами дистанционных образовательных технологий направлений подготовки 23.03.01 – Технология транспортных процессов.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 8. Ил. 17. Библиогр.: 14 назв.

ISBN 978-5-9984-1751-1

© ВлГУ, 2025
© Кокурина Ю. К., 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ	7
1.1. Транспортный поток и дорожные заторы.....	7
1.2. Математическое описание пропускной способности.....	18
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИТУАЦИИ	22
2.1. Модели транспортных систем	22
2.2. Плотности потоков транспортных систем	24
2.3. Обзор математических методов, описывающих движения транспортных потоков	26
2.3.1. Общие положения	26
2.3.2. Макроскопические модели	27
2.3.3. Микроскопические модели	30
2.3.4. Мезомодели	31
2.3.5. Клеточные автоматы.....	33
2.4. Стохастический подход к моделированию транспортного потока. Вероятностные распределения	36
2.4.1. Сущность вероятностного подхода	36
2.4.2. Биномиальное распределение в моделировании транспортных потоков	37
2.4.3. Дискретное распределение в моделировании транспортных потоков	38
2.4.4. Пуассоновское распределение в моделировании транспортных потоков	39

Глава 3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА	42
Глава 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ	55
Глава 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	62
5.1. Составляющие социально-экономического эффекта.....	62
5.2. Снижение потерь от загрязнения окружающей среды и шума при возникновении заторов	64
ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	80

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью развития современного общества является бурный рост количества транспортных средств на улично-дорожной сети, особенно в крупных городах.

Высокая плотность транспортных потоков приводит к росту издержек за счет увеличения времени выполнения транспортной работы, увеличения затрат на горюче-смазочные материалы (ГСМ), ухудшению экологической обстановки и т. д. Все это отражается на: увеличении себестоимости автоперевозок, невозможности реализации технологии «точно в срок» в условиях неопределенности времени доставки грузов, увеличение неэффективной доли времени в наряде, за счет простоев в заторовых ситуациях, потере времени водителей и пассажиров, снижение безопасности дорожного движения, увеличение вреда, наносимого окружающей среде за счет увеличения выбросов вредных веществ и шумового воздействия, увеличение количества ДТП из-за перегруженности УДС и т. д.

Резкое возрастание количества грузовых и пассажирских автомобилей на дорогах приводит к снижению эффективного и безопасного использования этих автомобилей, а также к проблеме управления дорожным движением и экологической ситуацией на УДС.

Особую актуальность это приобретает в городах с плотной застройкой и разветвленной улично-дорожной сетью.

Сегодня в России зарегистрировано около 57 млн. транспортных средств. Ежегодный прирост транспортных средств составляет 3,8 %.

При значительном ежегодном росте количества транспортных средств, пропускная способность существующих дорог не меняется. Это приводит к возникновению транспортных заторов и пристраиванию автомобилей в пробках.

Экономические потери, связанные с задержками пассажиров и водителей составляют около 20 млрд руб. в год.

Анализ загрязнения автотранспортом в крупных городах страны показывает, что в местах образования заторов количество вредных

выбросов от автомобильного транспорта превышает предельно допустимую концентрацию в несколько раз.

Доля загрязнения автотранспортом в крупных городах страны составляет 70 – 80 % от совокупного количества выбросов веществ в атмосферу. В местах образования заторов количество автомобильных выбросов зашкаливает, поскольку при режимах холостого хода и набора скорости в атмосферу выделяются максимальные объёмы выхлопных газов.

В данном учебном пособии представлены основные этапы моделирования транспортных потоков в условиях мегаполиса, математические методы моделирования транспортных потоков. В нем излагается математический аппарат, который может пригодиться для создания или модернизации интеллектуальной транспортной системы.

Изучив материал данного учебного пособия, студент сможет просчитывать транспортные потоки и сможет усовершенствовать транспортные процессы.

Глава 1. ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

1.1. Транспортный поток и дорожные заторы

Моделирование транспортных потоков – хороший пример междисциплинарного исследования. Основные вопросы для исследования звучат довольно просто. Как и почему образуются пробки (заторы)? Как формируется картина загрузки улиц? Что такое равновесное распределение водителей по маршрутам (путям)? Как определить, сколько водителей хотят проехать из одного района в другой?

Для математического ответа на эти и многие другие вопросы привлекаются различные разделы современной теории игр – в частности, популяционные игры загрузки и теории макросистем, рассматривающие эргодические марковские процессы и явление концентрации меры. В своей работе я постараюсь ответить на эти вопросы и объяснить основные механизмы формирования равновесных конфигураций в транспортных сетях, привлекая внимание к более естественным, на мой взгляд, подходам, чем те, которые в настоящее время широко используются на практике.

Транспортный поток состоит из отдельных автомобилей, обладающих различными динамическими характеристиками и управляемых разными по квалификации водителями, т. е. он не является однородным.

В условиях малоинтенсивного движения, когда по дороге движутся отдельные транспортные средства с большими интервалами, водителя в выборе режима движения ограничивают Правила движения, состояние автомобиля и дороги. В плотном транспортном потоке водитель не свободен в выборе скорости движения, он не всегда может сделать обгон и его поведение в значительной степени определяется общим ритмом движения на дороге. Следовательно, интенсивный транспортный поток нивелирует различия в характеристике отдельных водителей и машин.

Наиболее необходимыми и часто применяемыми характеристиками транспортного потока являются интенсивность транспортного потока, его состав по типам транспортных средств, плотность потока, скорость движения, задержки движения. Интенсивность транспортно-

го потока определяется как число транспортных средств, проезжающих через сечение дороги за единицу времени. В качестве расчетного периода времени для определения интенсивности движения принимают год, месяц, сутки, час и более короткие промежутки времени в зависимости от поставленной задачи наблюдения и средств измерения.

На улично-дорожной сети можно выделить отдельные участки и зоны, где движение достигает максимальных размеров, в то время как на других участках оно в несколько раз меньше. Такая пространственная неравномерность отражает, прежде всего, неравномерность размещения грузообразующих и пассажирообразующих пунктов и мест их притяжения. Неравномерность может быть выражена как доля интенсивности движения, приходящейся на данный отрезок времени, либо как отношение наблюдаемой интенсивности к средней за одинаковые промежутки времени.

Эффективность автомобильных перевозок и безопасность дорожного движения в значительной мере определяются характером взаимосвязей в потоке движущихся транспортных средств и основными характеристиками этого потока. Незнание природы таких взаимосвязей ограничивает возможности управления транспортным потоком.

Транспортный поток – это совокупность транспортных средств, движущихся по проезжей части дороги.

В зависимости от числа полос и разрешенных направлений движения транспортный поток подразделяют на следующие виды:

- однополосный односторонний;
- двухполосный односторонний или двусторонний;
- трехполосный односторонний или двусторонний;
- четырехполосный (и более) односторонний или двусторонний.

В зависимости от вида транспортного потока будут различаться возможности для маневрирования, условия движения транспортных средств и другие параметры.

Наиболее востребованными и часто применяемыми характеристиками транспортного потока являются интенсивность, скорость движения, плотность потока, его состав по типам транспортных средств.

Интенсивность движения N_a определяется числом транспортных средств (автомобилей), движущихся в определенном направлении или направлениях по данной полосе или дороге и проходящих через пункт наблюдения за фиксированный промежуток времени. Определение интенсивности движения составляет основу оценки состояния транспортного потока.

Интенсивность движения является главным показателем при определении уровня загруженности различных дорог.

При изучении интенсивности движения определяют такой параметр, как неравномерность транспортного потока – его распределение по времени и направлениям.

Интенсивность движения меняется по времени суток (рис. 1), дням недели и месяцам года (рис. 2).

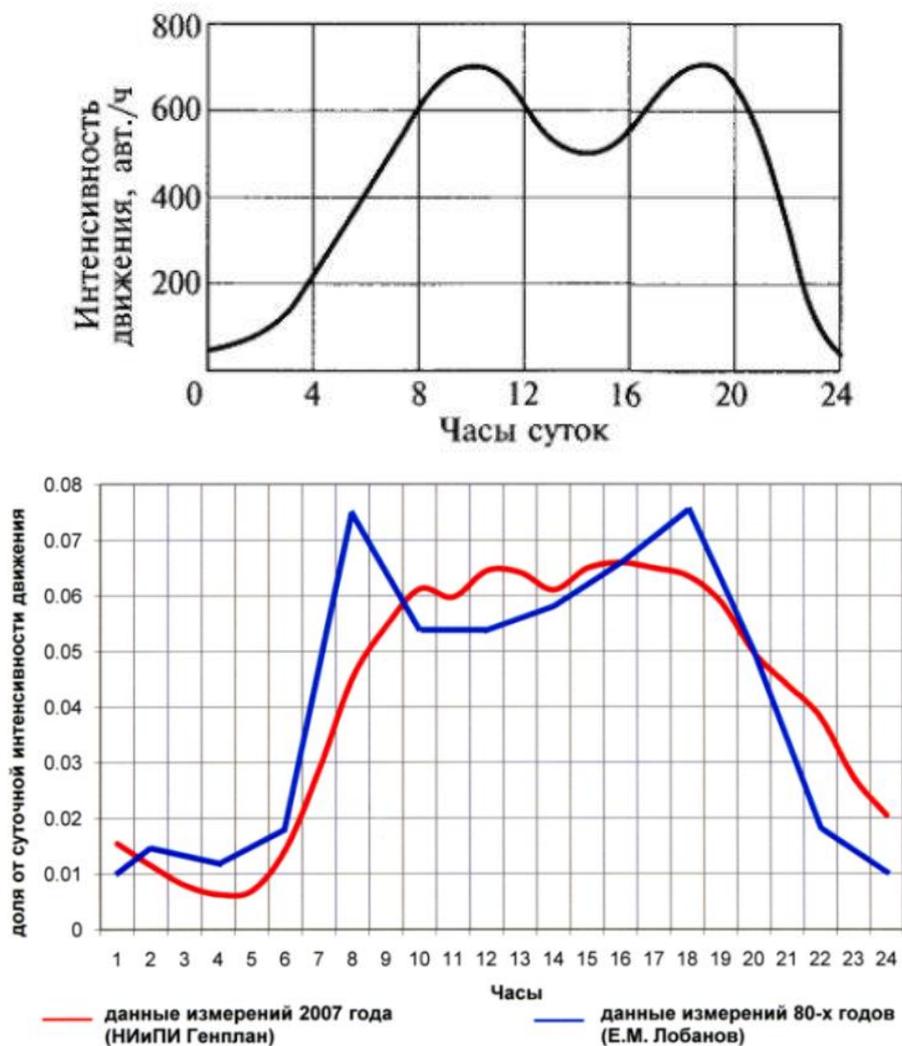


Рис. 1. Изменение интенсивности движения по времени суток

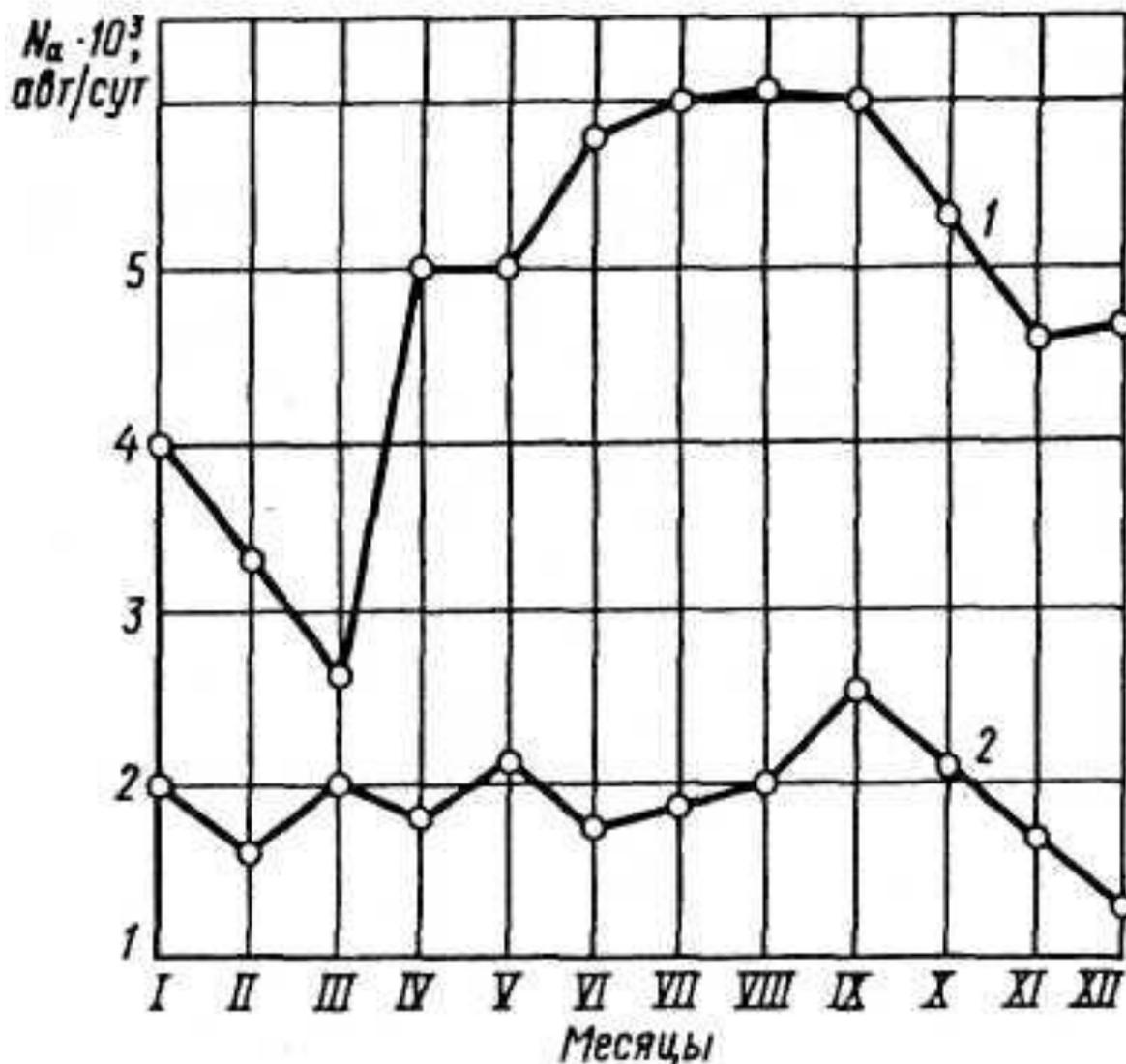


Рис. 2. Примерное изменение интенсивности транспортного потока в течение года: 1 – на дороге федерального значения; 2 – на дороге областного значения

При расчетах обычно пользуются данными об интенсивности движения в часы пик и среднесуточной интенсивности движения за год. При определении эффективности дорожной сети различают два аспекта, один из которых связан с учетом основных характеристик отдельных дорог, а другой – с оценкой эффективности дорожной сети в целом.

Постоянный мониторинг интенсивности движения позволяет своевременно планировать работы по изменению организации дорожного движения, модернизации и реконструкции дороги. Данные

работы проводятся в соответствии с Руководством по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах которое предназначено для расчета существующей и прогнозирования ожидаемой на соответствующий перспективный период среднегодовой суточной интенсивности движения на участках сети автомобильных дорог общего пользования, дорожной сети городов и т. д.

Интенсивность движения – это непрерывно изменяющаяся величина, даже при очень низкой часовой интенсивности движения могут наблюдаться кратковременные интервалы, за которые через данный пункт будет проходить транспортные средства.

Для двухполосных дорог с движением в обоих направлениях общая интенсивность обычно характеризуется суммарным значением встречных потоков, так как условия движения и, в частности, возможность обгонов определяются загрузкой обеих полос.

Если же дорога имеет разделительную полосу и встречные потоки изолированы друг от друга, суммарная интенсивность встречных направлений не определяет условия движения, а характеризует лишь суммарную работу дороги как сооружения. Для таких дорог имеет значение интенсивность движения в каждом направлении.

При решении различных вопросов регулирования дорожного движения, особенно в городских условиях, большое значение имеет не только суммарная интенсивность потока по данному направлению, но и интенсивность движения, приходящаяся на одну полосу, – так называемая *удельная интенсивность движения M_a* .

Если известно конкретное распределение интенсивности движения по полосам и оно существенно неравномерно. В качестве расчетной интенсивности M_a можно принять интенсивность движения по наиболее загруженной полосе.

Во многих городах дорожная сеть не соответствует возросшей интенсивности движения. На перекрестках возникают заторы, жизнь пешеходов подвергается опасности, оставленные у тротуаров автомобили сильно затрудняют движение транспортных средств.

В оценку уровня загруженности дорог входят следующие взаимосвязанные факторы:

- скорость движения и время, затрачиваемое на поездку;
- непрерывность движения;
- свобода маневрирования;
- безопасность и удобство управления транспортным средством.

Интенсивность движения влияет на все эти факторы, причем с увеличением интенсивности ее отрицательное влияние усиливается. Когда фактическая интенсивность движения по дороге приближается к максимально возможной, увеличивается опасность заторов.

Затор – это качественное понятие, которое связано с количественной характеристикой, называемой *плотностью транспортного потока* q_a .

Плотность транспортного потока является пространственной характеристикой, определяющей степень стесненности движения на полосе дороги. Ее измеряют числом транспортных средств, приходящихся на 1 км протяженности дороги.

Предельная плотность транспортного потока достигается при неподвижном состоянии колонны транспортных средств, расположенных вплотную друг к другу на полосе.

Предельное значение плотности транспортного потока q_{\max} составляет 170 – 200 авт./км в зависимости от состава транспортного потока.

При разных значениях плотности движения могут складываться разные уровни эксплуатационных условий по степени стесненности. В зависимости от плотности транспортного потока движение по степени стесненности подразделяют на *свободное, частично связанное, насыщенное и колонное*.

Численные значения q_a в физических единицах (автомобилях), соответствующих этим состояниям транспортного потока, весьма существенно зависят от параметров дороги, в первую очередь от ее плана и профиля, коэффициента сцепления, а также состава транспортного потока по типам транспортных средств, что, в свою очередь, влияет на выбираемую водителями скорость движения.

Скорость движения v_a является важнейшим показателем транспортного потока, так как цель всех мероприятий по организации до-

рожного движения – обеспечение скорости транспортного потока, наиболее приближенной к максимально возможной из условий безопасности дорожного движения.

Дорожный затор – это уплотнение потока и резкое снижение пропускной способности дороги в результате превышения притока автомобилей над пропускной способностью дороги. Затор развивается лавинообразно и может привести прерывистому движению с очень низкой скоростью. Затор рассасывается очень медленно и это начинается в местах ответвления дороги.

Дорожный затор отличается от очереди автомобилей перед светофором при выезде на магистраль. Скорость продвижения очереди определяется пропускной способностью магистрали и длительностью разрешающего сигнала светофора.

Причиной заторов на дорогах является повышение плотности потока автомобилей из-за превышения притока машин над пропускной способностью дороги из-за увеличения притока или снижения пропускной способности дороги.

Увеличение притока машин может быть вызвано:

- Массовыми сезонными миграциями населения к местам отдыха и обратно.
- Ежедневными поездками на работу и обратно.
- Появлением потока машин в объезд места перекрытия дорог или места аварии. Все эти факторы имеют случайный характер по времени появления и интенсивности.

Сокращение пропускной способности может быть конструктивным или случайным.

К конструктивным относятся:

- Резкие сужения, вызывающих появление нерегулируемых пересечений траекторий автомобилей с низкой пропускной способностью.
- Перекрестки с круговым движением, являющиеся нерегулируемыми перекрестками для потока машин.
- Отсутствие дополнительных полос торможения и разгона для сворачивающих и въезжающих на дорогу.

- Отсутствие карманов для остановки маршрутного транспорта.
- Наличие нерегулируемых перекрестков и пешеходных переходов, резких изломов дороги в плане.
- Наличие светофоров с большим количеством фаз.
- Несогласованность работы светофоров, приводящая к остановкам транспорта на большинстве перекрестков и пешеходных переходах.

Конструктивные причины могут быть устранены реконструкцией дороги и изменением организации движения.

Случайные факторы, вызывающие снижение пропускной способности:

- Нарушения правил перестроения и движение с малой скоростью в левых полосах дороги.
- Перестроения через несколько полос движения; повороты из полос, предназначенных для движения прямо.
- Дорожно-транспортные происшествия. Неблагоприятные условия для движения, принуждающие водителей снижать скорость:
 - Погодные условия (туман, дождь, град, снег, гололёд). Проблемы техногенного характера (например, задымление в результате пожаров).
 - Ремонт или уборка дороги в часы пик.
 - Выезд на перекрёсток, за которым уже образовался затор, что приводит к распространению затора на пересекающую дорогу. Попытки объезда затора отдельными участниками движения по полосам, не предназначенным для движения в данном направлении, а также обочинам, тротуарам и выделенным трамвайным путям, что приводит к затору в местах их возвращения на правильную полосу движения.

Вероятность случайных факторов может быть снижена контролем за соблюдением правил дорожного движения, но полностью их устранить не удастся.

Посмотрим на зависимость пропускной способности от плотности потока автомобилей (рис.3).

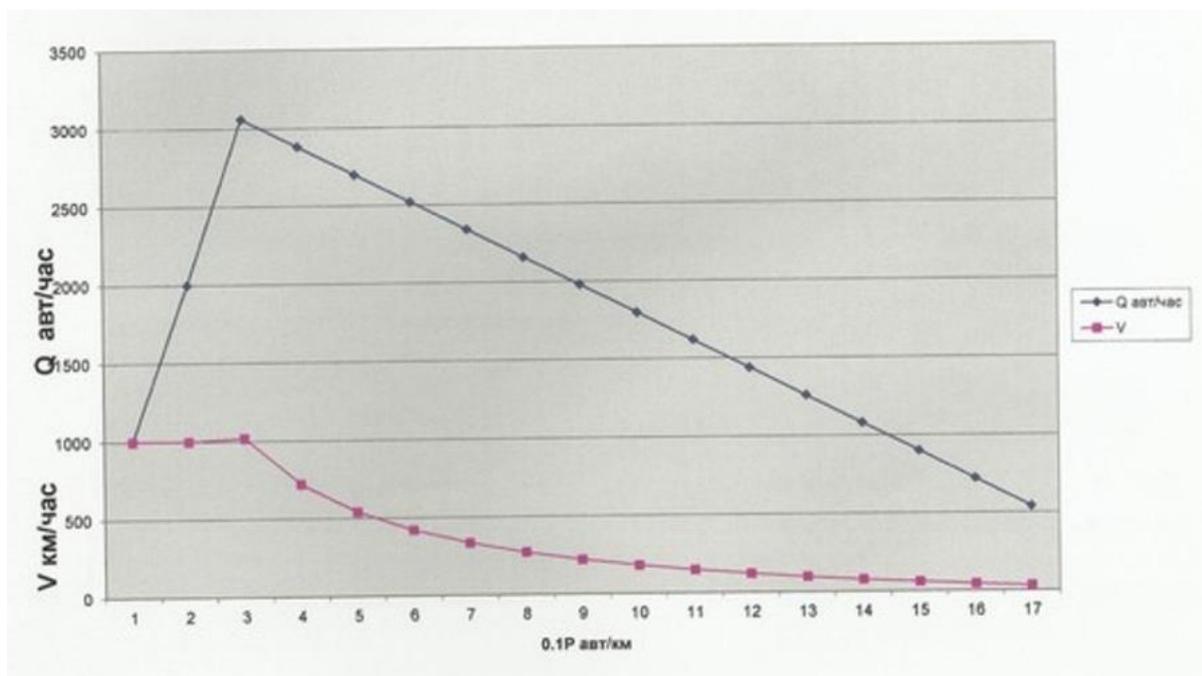


Рис. 3. Зависимость пропускной способности и скорости от плотности при $t=1$ с и $b=5$ м

При наличии ограничения скорости на магистрали по мере увеличения притока повышается плотность потока и пропорционально ей количество автомобилей, проезжающих по магистрали в единицу времени. Но когда в результате уплотнения потока дистанция между автомобилями становится меньше допустимой при допустимой скорости, приходится снижать скорость, потому пропускная способность магистрали начинает линейно снижаться. Пока приток сохраняется, плотность потока продолжает расти и пропускная способность падать до низкого значения. Если приток прекратится, то пропускная способность будет сохраняться на низком уровне, пока не начнется отток автомобилей на другую дорогу.

При возникновении аварии на любой дороге возникнет временное сужение дороги, начнет нарастать длина пробки с плотным потоком автомобилей, которая сможет рассосаться спустя длительное время после удаления аварийных машин с проезжей части, так как скоростной поток за пробкой будет тормозиться и поддерживать плотный поток. Для ликвидации пробки необходимо дросселировать приток автомобилей по всей длине дороги, чтобы общий приток не превышал и был меньше пропускной способности в месте аварии.

Причиной образования заторов является неустойчивость процесса движения потока автомобилей.

Из теории автоматического управления известно, что неустойчивый процесс можно сделать устойчивым и работающим в оптимальном режиме в условиях множества возмущающих факторов с помощью замкнутой системы регулирования. Для движения потока автомобилей это означает, что нужно контролировать плотность потока и дросселировать приток так, чтобы плотность потока равнялась оптимальной.

Оптимальную плотность нужно поддерживать на всех магистралях города, тогда будет достигнута максимальная способность улично-дорожной сети и движение будет происходить со скоростями, близкими к допустимым.

Если на всех магистралях города поддерживать оптимальную плотность потоков то движение будет происходить со скоростями, близкими к допустимым. Очереди для выезда на магистрали исчезнут или будут небольшими.

Популярна теория, что строить дороги бесполезно, т.к. привлекательность поездок на автомобилях возрастет, число автомобилей станет больше и опять возникнут пробки.

Пробки можно предотвратить при любом количестве дорог и автомобилей! Развитие улично-дорожной сети позволит сократить время ожидания в очереди для выезда в сеть магистральных дорог.

В общественных зданиях устанавливают много лифтов, чтобы сократить очереди. Ни у кого не возникает мысль перегрузить лифт, так как знают, что лифт не поедет. К сожалению, часто происходят перегрузки дорог. Видимо, потому, что пока не существуют механизмы защиты дорог от перегрузок, приводящих к образованию пробок.

Можно существовать без пробок в городе. Такая жизнь будет удобнее и радостнее!

Объектом управления в интеллектуальной транспортной системе является транспортный поток, обладающий стохастичностью поведения, нестационарностью, временными колебаниями характеристик. Для непрерывного потока выделяются такие режимы движения:

свободный поток, групповое движение и насыщенный поток. Свободный поток имеет малую интенсивность движения. При групповом появляются взаимные помехи движению, режим движения неустойчив, небольшое увеличение групп в потоке может привести к уменьшению скорости и интенсивности движения – к насыщенному потоку. При изменении плотности до критической (плотности в условиях затора) интенсивность уменьшается от пропускной способности до нуля. В области критической плотности может существовать точка разрыва функции $V = f(k)$, что приводит к скачкообразному изменению скорости движения. Незначительное увеличение интенсивности потока может привести к ситуации, когда очередь автомобилей не умещается на перегоне и скапливается в зоне перекрестка. Неустойчивость транспортного потока в области пропускной способности и распространение возмущений в потоке приводят к разрывам в значениях его характеристик, флуктуация количества транспортных средств – к неустойчивости процесса движения в зоне пропускной способности и возникновению точки бифуркации. Выбрана теория катастроф, переход от моделей которой к моделям дорожного движения состоит в изучении потерь устойчивости, определении факторов, влияющих на скачкообразное изменение параметров, в интерпретации параметров катастрофы, построении и исследовании модели. Задача распознавания, предсказания и ликвидации предзаторной ситуации, предотвращения затора актуальна в управлении транспортными потоками.

Из истории

Началу изучения физики транспортной автомобильной системы в попытках создать приближенную к реальности математическую модель уже больше века! Кстати, не стоит думать, что Россия была в этой области на задворках науки.

Например, Георгий Дмитриевич Дубелир в своих работах по проектированию городов в бытность профессором Киевского политехнического института оценивал пропускную способность дорог и пересечений аж в 1912 году.

Множество научных работ в России по этой тематике ведется и сегодня. Но все-таки пионерами в этой области считаются ученые

США. Что неудивительно, ведь уже к 30-м годам прошлого столетия уровень автомобилизации там достиг уровня, при котором пробки превратились в регулярное явление, и остро обозначилась проблема повышения пропускной способности дорог.

1.2. Математическое описание пропускной способности

Так, первое настоящее математическое описание пропускной способности дал американский инженер-транспортник Брюс Гриншилдс в 1933 году. Им была предложена модель, в которой впервые была выведена так называемая фундаментальная диаграмма зависимости величины потока (количества машин, пересекающих за единицу времени контрольную линию на полосе дороги) от скорости (рис.4).

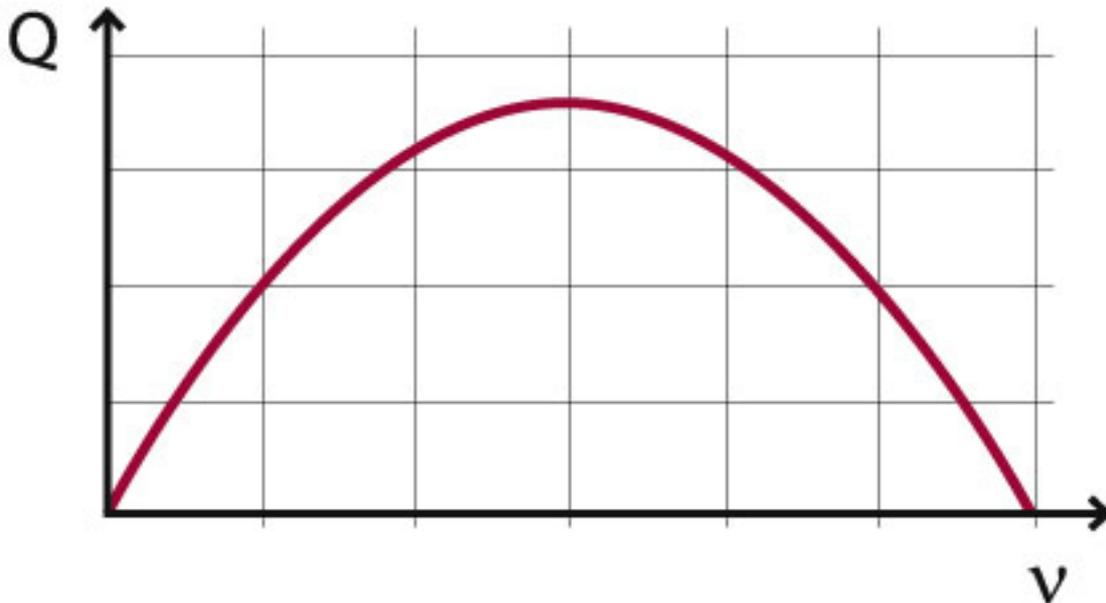


Рис. 4. Фундаментальная диаграмма зависимости величины потока от скорости (Брюс Гриншилдс)

Другая фундаментальная диаграмма (рис.5) была предложена в моделях британского и американского ученых в области прикладной математики Лайтхила и Уизема в 1955 году. В их независимых рабо-

тах поток автомобилей представлялся в виде одномерной сжимаемой жидкости, в которой существует однозначная связь между средней скоростью и плотностью (количеством автомобилей на единицу длины однополосной дороги). От плотности машин зависит и величина потока, по которой можно определить степень загруженности дороги.

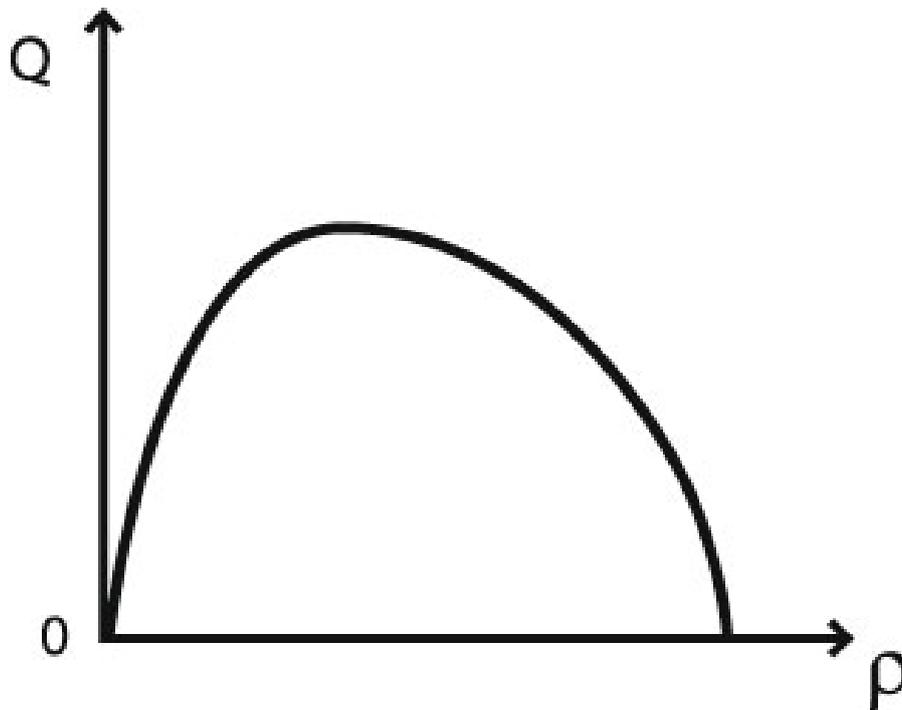


Рис. 5. Фундаментальная диаграмма зависимости величины потока от плотности машин (Лайтхил и Уизем)

Несмотря на элементарность модели Лайтхила – Уизема, она стала серьезным шагом в науке, так как рассматривала динамические связи применительно к движению транспорта и подходила лучше статических моделей для описания потоков на макроуровне. Ее производными (естественно, в последующие годы теория совершенствовалась) пользуются и сейчас. Существует и множество других теорий, позволяющих вести расчеты и на микроуровнях (разбивая дорогу на сеть координат или же вообще принимая свойства автомобилей), но большинство из них отталкиваются от базовых открытий в первой гидродинамической модели.

Из фундаментальной диаграммы Лайтхила – Уизема (рис.6), где плотность потока является определяющей для его величины, явно

следует, что одному и тому же уровню потока соответствуют два значения плотности, соответственно, и скорости.

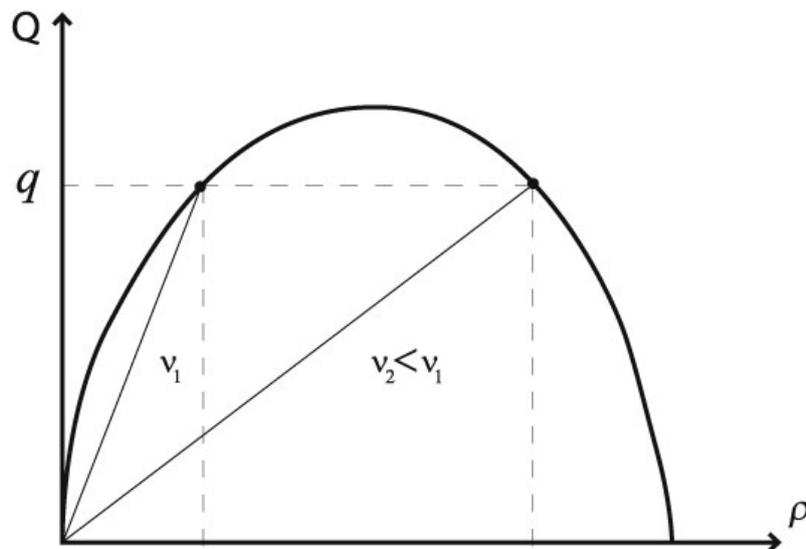


Рис. 6. Фундаментальная диаграмма Лайтхилла-Уизема

Причем режим при меньшей плотности будет выгоднее, так как при равнозначности потоков скорость в нем выше, а значит, и время в пути меньше. Дальнейшее совершенствование теории в совокупности с наблюдением за реальными дорогами (а в некоторых случаях – моделированием ситуаций на опытных участках) позволило выделить состояния транспортного потока.



Рис. 7. Диаграмма состояния транспортного потока

Макроподход в принципе позволяет просчитывать не только однополосные (в каждом направлении) трассы, но и многорядные, агрегируя расчеты и измерения так, будто все машины движутся по одной полосе. Правда, здесь начинают возникать расхождения с действительностью, разрушается непрерывность зависимости пропускной способности от плотности потока, причем теоретический максимум величины потока фактически недостижим.

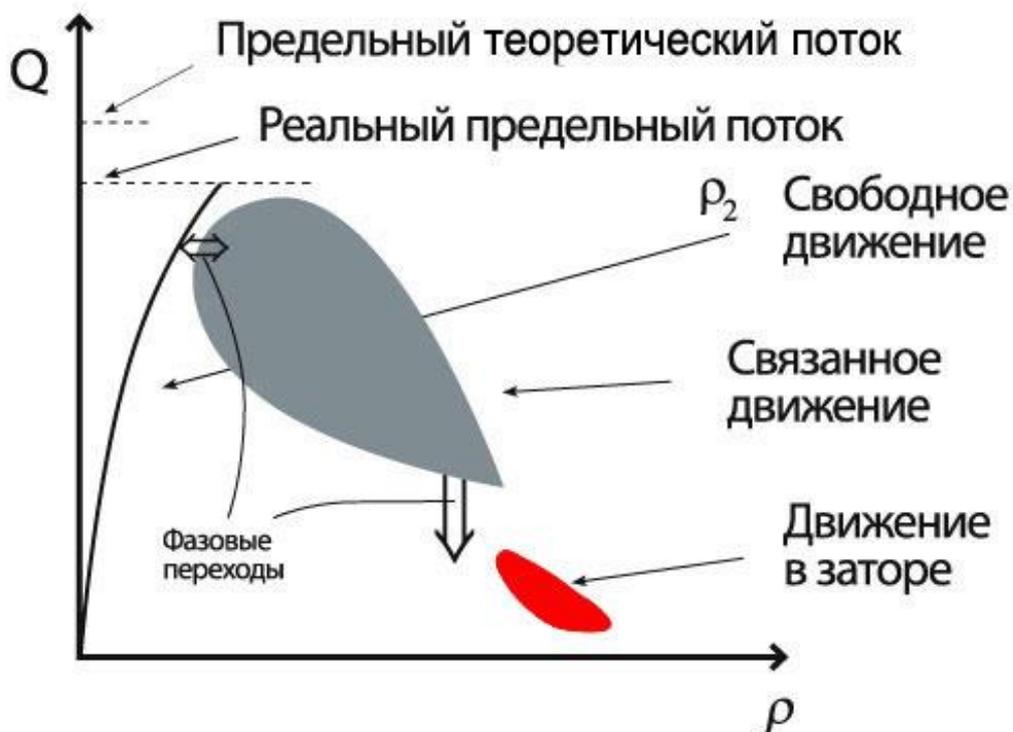


Рис. 8. Диаграмма прогнозируемого состояния транспортного потока

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИТУАЦИИ

2.1. Модели транспортных систем

В подавляющем большинстве пакетов транспортного моделирования используется модель, предложенная в 1956 году Beckmann, McGuire, Winsten, которую в литературе называют модель BMW, или модель Бекмана (см., например, Гасников А. В. и др.). В основе лежит тот же принцип поиска равновесия Нэша – Вардропа: каждый водитель выбирает для себя маршрут с наименьшими затратами, и равновесная конфигурация определяется таким распределением водителей по маршрутам, при котором никому не выгодно отклоняться от своего маршрута. Поиск равновесия сводится к решению задачи минимизации выпуклой функции, зависящей от затрат агентов на проезд по ребрам транспортной сети. Отличие от модели стабильной динамики состоит в том, что постулируется зависимость затрат времени на проезд по ребру от величины потока автомобилей на этом ребре.

Для определения этой зависимости используется простая физическая модель Танака, отражающая желание водителей, с одной стороны, двигаться как можно быстрее, а с другой стороны – безопасно. Возникает понятие безопасного расстояния между автомобилями как функции от их скорости в потоке. Расстояние в 2 м будет безопасным в пробке при движении со скоростью 5 км/ч, но не будет безопасным при движении со скоростью 100 км/ч. А именно, безопасное расстояние складывается из длины автомобиля, произведения времени реакции водителя на скорость автомобиля (это расстояние водитель пройдет, пока сообразит, что надо, например, затормозить) и слагаемого, пропорционального квадрату скорости. Квадрат скорости объясняется длиной тормозного пути (расстояние, которое проходит машина после торможения), определяемого, в свою очередь, переходом кинетической энергии в тепло за счет работы силы трения. Таким образом, у нас есть зависимость безопасного расстояния от скорости (1). Но безопасное расстояние есть величина обратная к плотности автомобилей

(2). А скорость – это величина обратная к времени прохождения данного ребра (участка дороги) (3). В свою очередь, величина потока автомобилей (число автомобилей, проходящих в единицу времени через заданное сечение дороги) может быть вычислена как произведение скорости автомобилей (в потоке) на плотность (4). Таким образом, у нас есть пять величин: безопасное расстояние, плотность, скорость, поток, время и четыре соотношения между этими величинами, из которых можно найти искомую связь между временем прохождения ребра и потоком на ребре.

На практике используют упрощенную версию этой модели, называемую BPR-моделью. В наших исследованиях удалось показать, что эту функцию затрат можно параметризовать с помощью одного параметра так, что при стремлении этого параметра к нулю модель Бекмана переходит в модель стабильной динамики. На наш взгляд, модель стабильной динамики более адекватно отражает реальное поведение водителей, поскольку исходит из более простой входной информации.

Куда более существенным является тот факт, что модель никак не описывает транспортные заторы, т. е. ситуации, при которых интенсивность и скорость потока малы – ситуации обычной Московской пробки.

На рис. 9 приведена BPR функция макромодели и зелено-красная диаграмма состояния транспортного потока, полученная с помощью микромоделирования в системе COS.SIM. Точно такую же загибающуюся диаграмму мы можем наблюдать на данных с датчиков дорожного движения в Москве. В пробке, когда характеристики потока определяются не плотностью машин, а индуцированы некоторым «бутылочным горлышком» впереди по потоку, кривая меняет цвет с зеленого на красный и загибается назад. Видим, что модель Бекмана (коричневая кривая) описывает только ситуацию свободного движения.

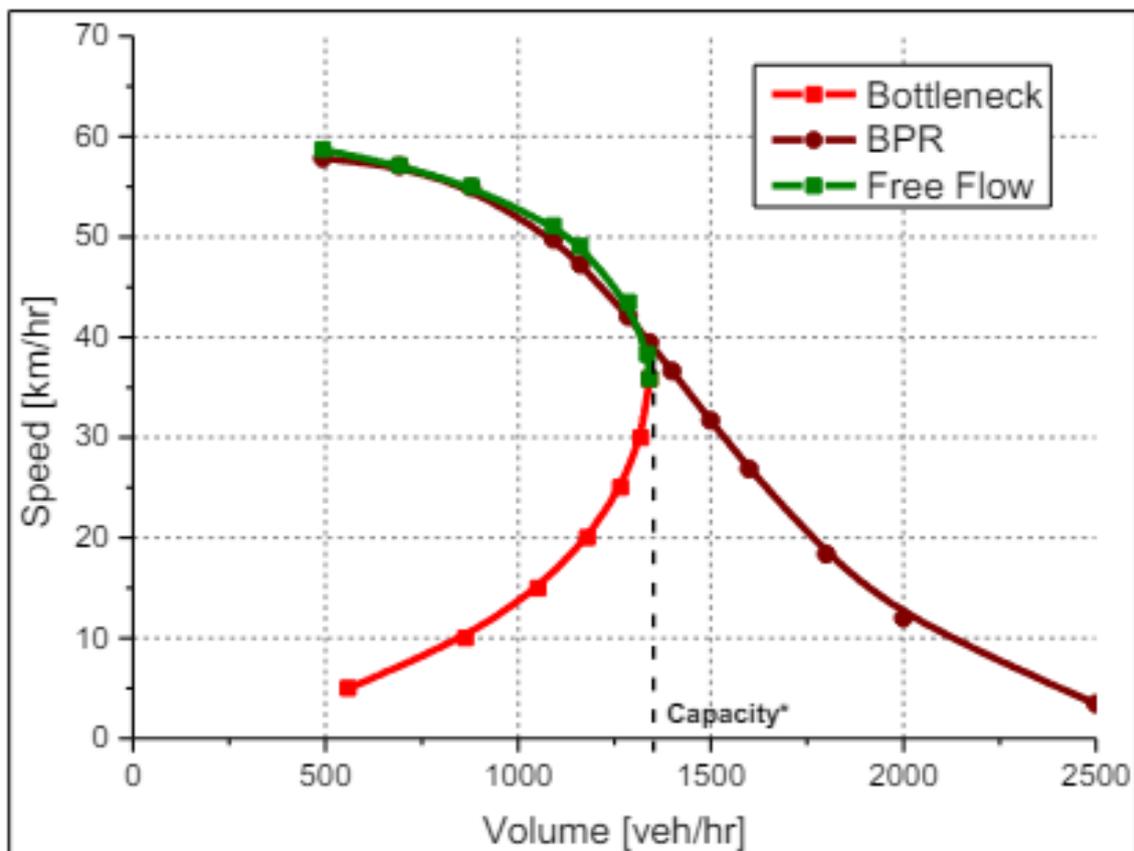


Рис. 9. BPR-функция модели

2.2. Плотности потоков транспортных систем

Вообще фундаментальная диаграмма, как и вообще теория Лайтхила – Уизема, недостаточно описывала движение при больших плотностях потока.

Еще в начале 70-х годов в теорию были введены классифицирующие понятия свободного, частично связанного, связанного и насыщенного движения по аналогии с фазовыми переходами в жидкостях (газ, жидкость, замерзающая жидкость, лед). В некоторых теоретических представлениях фазы частично связанного и связанного объединяют в понятие синхронизированного потока, а насыщенное движение называют движением в заторах. Перечисленные состояния автомобильного потока принципиально отличаются по наблюдаемым свойствам.

При свободном движении автомобиля, движущиеся с любой удобной для их водителей скоростью, не создают помех друг другу, если на трассе полос больше одной в каждом направлении. Максимальная скорость ограничена только соответствующими знаками.

В частично связанной фазе количество автомобилей увеличивается до уровня, когда водителям приходится согласовывать скорость и маневрирование с отдельными участниками движения. При увеличении же плотности до уровня связанного движения скорость приходится координировать со скоростью потока, а маневрирование затруднено. В связанном потоке начинают формироваться группы автомобилей, перемещающиеся по дороге как единое целое, причем такие «кластеры» могут занимать все ряды. При этом величина средней скорости потока перестает быть только функцией его плотности.

Профессор Калифорнийского университета в Беркли Карлос Даганзо, например, причины осложнения движения связывает со сменой рядности, сужениями, расширениями (!), конфигурацией дороги (изгибы, тоннели, подъемы, спуски), изменением скорости отдельных машин и различиями непосредственно самих машин.

Он же, кстати, один из немногих, кто дал определение, что такое дорожная пробка: «Если возмущение скоростей, возникшее на некотором участке, образует очередь, распространяющуюся вверх по потоку за пределы этого участка, то в транспортном потоке возникают заторы».

Дальнейшие исследования выявили необходимость выделения в отдельную стадию движение по принципу «старт-стоп». Иногда и ее делят на несколько фаз, соответствующих волнам плотности разной степени, чередующихся с менее загруженными отрезками дороги. Волны эти могут быть как одиночными, так и множественными. Одиночная волна может возникнуть еще при частично связанном движении, например, когда появляется участок с пониженной пропускной способностью (авария, сужение дороги, светофор) и приток автомобилей к переднему фронту волны превышает отток от ее заднего фронта (волна движется навстречу потоку автомобилей). При этом задний фронт тоже может двигаться навстречу потоку, когда препят-

ствие устранено. Когда же средняя дистанция между автомобилями становится ниже критического уровня, неустойчивое движение превращается в серию «старт-стоп» волн.

Благодаря натурным исследованиям на дорогах, чем в 70-х годах активно занимались, к примеру, опять-таки в США, удалось определить уровни загруженности при перечисленных ранее фазах движения. Так, свободная фаза сохраняется при заполненности длины участка полосы автомобилями от 0 до 15 %.

То есть когда суммарное расстояние между машинами составляет до 85 % чистого асфальта! При 15 – 22 % заполненности наблюдается частично связанное движение. Связанное – 22 – 35 %. А уже от 35 % занятой дороги начинается «старт-стоп» движение!

Фундаментальная диаграмма и ее последующие интерпретации наглядно демонстрируют необходимость одного из макронаправлений борьбы с пробками – снижения плотности потока. Оба варианта пути для достижения этого – строительство новых дорог и уменьшение числа машин на дорогах – с разной степенью интенсивности применяются в Москве. Новые дороги, может, появляются не так быстро и не в том количестве, как мечталось бы, но процесс идет. Шаги по усложнению пользования машиной в черте города делаются куда активнее (в основном, правда, организацией платных парковок и развешиванием знаков «остановка запрещена»). Тут вполне можно поставить галочку в графе «выполняется». Но на заторность движения влияют и другие факторы, в числе которых, например, скоростной режим и рядность.

2.3. Обзор математических методов, описывающих движения транспортных потоков

2.3.1. Общие положения

Английский философ Роджер Бэкон однажды сказал: «Практика рождается из тесного соединения физики и математики». Действительно, окружающий нас мир живёт по законам физики, подкреплённым математическими формулами. Просто люди привыкли к этому, и

поэтому даже не замечают. Все знают, что если что-то бросить или уронить, то это обязательно упадёт. Человечество давно пытается взять под контроль мир физических явлений, или хотя бы предсказать их последствия. Так, например, в 50-е годы прошлого века, с развитием исследования процессов, возникающих при взрыве бомбы, учёные углубились в изучении газовой динамики, которая стала основой изучения математических моделей движения транспорта. Так, появились первые макроскопические (гидродинамические) и микроскопические (например, следование за лидером) модели. Со временем количество таких моделей увеличивалось, вводились новые неизвестные, системы уравнений усложнялись, позволяя показывать наиболее адекватные схемы построения дорожной сети, прогнозировать загрузку тех или иных участков дороги, уменьшать затраты на передвижение пользователей этой сети.

Рассмотрим наиболее известные на сегодняшний день математические модели, описывающие движение транспортных потоков.

2.3.2. Макроскопические модели

Одними из самых известных методов математического описания движения транспортного потока являются гидродинамические (макроскопические) модели транспортного потока.

В этом случае, транспортный поток рассматривают как поток одномерной сжимаемой жидкости, учитывая, что поток сохраняется и существует взаимно-однозначная зависимость между скоростью и плотностью транспортного потока. То есть, чем выше плотность потока (чем больше машин на дороге), тем меньше средняя скорость потока.

Разработка этого метода началась очень давно, поэтому достижения классической гидродинамики стали мощным инструментом для изучения движения транспортного потока. Этот метод чаще всего используется для краткосрочных расчётов движения потока, например, для оптимизации светофорной сигнализации.

Модель Лайтхилла-Уизема-Ричардса. Одна из самых известных моделей транспортных потоков является модель Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR). Для его описания используют закон сохранения массы (количества автотранспортных средств). При этом допускаются следующие допущения:

- транспортный поток непрерывен. Плотность (ρ) – это число машин, которые занимают единицу длины дороги;
- величина потока (q) – это число машин, которые пересекают отметку x за единицу времени, и она определяется локальной плотностью $\rho: q = Q(\rho)$. При этом скорость потока:

$$v(\rho) = \frac{Q(\rho)}{\rho}$$

- количество транспортных средств на участке дороги без разветвлений (съездов-въездов) сохраняется.

Модель Танака. Модель Танака – один из способов определения зависимости в фундаментальной диаграмме (рис. 10). В данной модели рассматривается движение транспорта по одной полосе. Предполагается также, что их скорость не превышает v_{\max} . Плотность

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

где $d(v) = L + c_1 v + c_2 v^2$ – среднее расстояние между автомобилями для определённой скорости потока, L – средняя длина транспортного средства, c_1 – время реакции водителей, c_2 – коэффициент, зависящий от тормозного пути: от состояния дорожного покрытия и погодных условий. Из зависимости $d(v)$ можно получить зависимость $v(\rho)$, удовлетворяющую условиям модели LWR.

Модель Уизема. В 1974 году Уизем предположил учесть так называемую дальнзоркость водителей. То есть водители двигаются с определённой скоростью, которая зависит от ситуации на дороге. Иначе говоря, при увеличении плотности потока впереди водители уменьшают скорость, а при уменьшении плотности – увеличивают скорость.

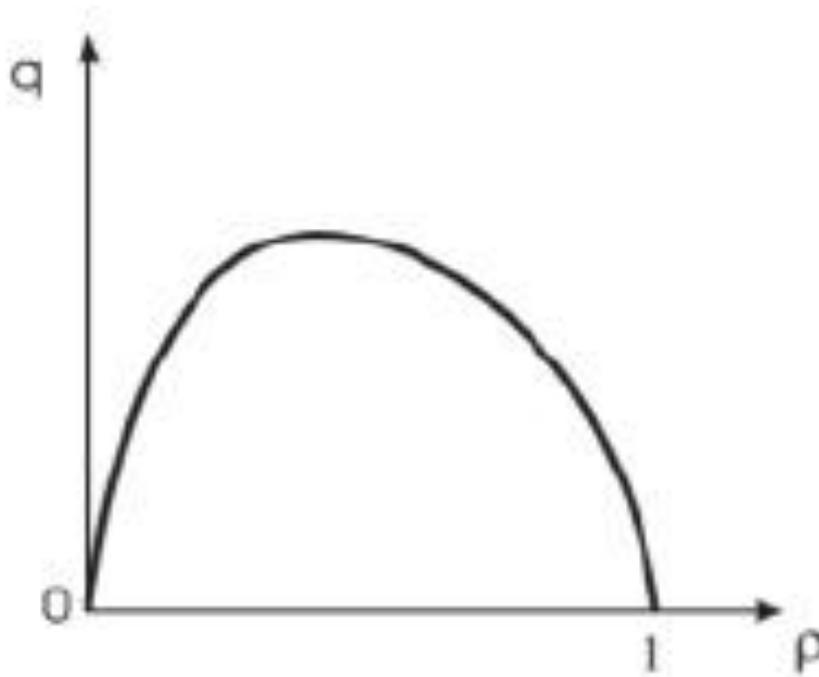


Рис. 10. Фундаментальная диаграмма транспортного потока

Модель Пейна. В 1971 создаётся модель Пейна, которая является следующим шагом развития модели LWR. Она представляет собой обобщенный закон сохранения

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0,$$

в котором между скоростью и плотностью нет прямой зависимости.

Модель Эйва – Раскла. Эйв и Раскл, учитывая недостатки модели Пэйна – Уизема, разработали новую модель. В её основу легли следующие тезисы:

1. Для описания модели используется система дифференциальных уравнений гиперболического типа;
2. Значения скорости и плотности, полученные в результате решения задачи Римана с произвольными неотрицательными граничными условиями, должны оставаться неотрицательными и не должны превышать максимально возможную скорость;
3. Собственные значения, полученные при решении задачи Римана с произвольными данными, не должны превосходить скорости потока. То есть, едущие сзади автомобили не оказывают влияния на впереди идущие транспортные средства;

4. Решение должно реалистичным. То есть, торможение вызывает волны сжатия, а ускорение – волны разрежения;

5. При низкой плотности потока автомобилей решение должно зависеть от исходных данных.

2.3.3. Микроскопические модели

Под микроскопическими моделями понимают модели, в которых моделируется поведение каждого автомобиля. Такой подход более точен, по сравнению с макромоделями, но этот подход требует больших вычислительных ресурсов.

Модель оптимальной скорости. Модель оптимальной скорости, или модель Бандо, имеет следующие особенности:

- водитель движется с максимальной скоростью, поддерживая достаточное расстояние до впереди идущего автомобиля;
- водитель движется с оптимальной скоростью, с достаточным расстоянием до впереди идущего автомобиля.

Движение автомобиля задаётся через уравнение ускорения:

$$\dot{v} = \frac{d^2x}{dt^2} = \alpha [V_{\text{оптималь}}(\Delta x) - v]$$

Модель следования за лидером Дженерал Моторс. Другим важным классом микроскопических моделей (наряду с моделями оптимальной скорости) являются модели следования за лидером.

В 1959 г. сотрудники концерна Дженерал Моторс Д. Газис, Р. Херман, Р. Потс предложили одну из первых нетривиальных микроскопических моделей однополосного транспортного потока, с помощью которой можно получить фундаментальную диаграмму. Простейшим вариантом предложенной модели является следующая модель:

$$\dot{s}_n^i(t+\tau) = \alpha \frac{s_{n+1}^i(t) - s_n^i(t)}{s_{n+1}^i(t) - s_n^i(t)}, \alpha > 0.$$

Модель «разумного водителя» Трайбера. Модели оптимальной скорости и следования за лидером можно объединить в одну общую микроскопическую модель разумного водителя (Intelligent Driver Model (IDM)):

$$s_n'(t) = F(s_{n+1}(t) - s_n(t), s_{n+1}'(t) - s_n'(t)) - s_n'(t), s_n'(t).$$

2.3.4. Мезомодели

Не смотря на разнообразие толкования мезомоделей, чаще всего под ними так называемые «кинетические модели». Данный метод основывается на выводе макроскопической модели из описания процесса микроскопического взаимодействия автомобилей с использованием кинетического уравнения. Таким образом, при мезомоделировании рассматривается поток транспорта в целом, не моделируя отдельно взятые автомобили. Но, при этом учитываются особенности поведения водителей.

Модель Пригожина-Больцмана. В модели Пригожина-Больцмана рассматриваются две функции распределения вдоль магистрали: для одного автомобиля – $f(x, v, t)$, для двух – $f_2(x, v, t, x', v', t)$. Пусть ожидаемое количество автомобилей в интервалах Δx и Δv во время t – $f(x, v, t) \Delta x \Delta v$. Тогда пусть $f(x, v, t) \Delta x \Delta v \Delta x' \Delta v'$ будет равно ожидаемому количеству пар автомобилей таких, что первое будет находиться в окрестностях x в интервале Δx и v в интервале Δv , а второе, соответственно, в окрестностях x' в интервале $\Delta x'$ и в окрестностях v' в интервале $\Delta v'$.

Уравнение Пригожина-Больцмана для потока трафика есть:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \right) f(x, v, t) = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{rel}.$$

Левая часть – оператор потока, применённый к функции распределения функции от одного АТС. Правая часть есть формула Пригожина, включающая в себя два различных распределения – процессов коллизии и процессов релаксации.

Модель Пригожина-Хермана. Херман и Пригожин обобщили модель газовой динамики последнего. Главное отличие данной модели заключается в модернизации правой части уравнения Пригожины-Больцмана. Программа каждого водителя как выражение от распределения желаемых скоростей остаётся независимой от локальной концентрации.

Модель Пригожина, несмотря на увлечение газовой динамикой, вызывала множество вопросов и критики. Две наиболее серьёзные критики:

1. Корректность члена, выражающего замедление, (авторы используют термин «взаимодействие») сомнительна при наличии очередей автомобилей. Это связано с тем фактом, что корреляция, присущая очередям, делает неверной предположение о хаотическом порядке взаимодействия автомобилей, лежащего в основе члена замедления кинетического уравнения Пригожина – Хермана;

2. Отсутствие производной в члене, выражающем релаксацию, вызывает вопросы, связанные с корректностью модели. Корректность выражения для времени релаксации, таким образом, не может быть доказана. Кроме того, также проблематично понять смысл значения времени релаксации и, таким образом, определить способ его экспериментального определения.

Модель Хелбинга. Чтобы избавиться от недостатков моделей, основанных на уравнении Пригожина, Хелбинг для описания транспортного потока использовал методы, которые используются при описании физики сыпучих материалов. Таким образом он получил уравнения типа Навье – Стокса. С помощью уравнения Павери – Фонтана и метода, аналогичного решению уравнений Эйлера для обычных жидкостей, Хелбинг вывел макроскопическое уравнение движение транспортного потока. Особенностью модели является зависимость равновесной скорости от плотности и средней скорости в точке взаимодействия.

2.3.5. Клеточные автоматы

По сути, модель клеточных автоматов являются частным случаем микроскопических моделей описания движения транспортных потоков. Их главное отличие – дискретизация пространства и времени. Также стоит отметить, что данная модель интересна своей скоростью и своим сложным поведением в динамике, включая такие интересные феномены, как самоорганизующаяся критичность, формирование спиральных образцов, колеблющаяся или хаотическая последовательность состояний.

Высокая скорость и эффективность вычислений в сочетании со следующими свойствами делают эти модели идеально подходящими для параллельных вычислений:

- дискретизация пространства в идентичные ячейки (узлы решётки) j размера Δx ;
- конечное количество возможных состояний $g(x)$;
- параллельное обновление по времени $t=i\Delta t$ с элементарным шагом Δt ;
- глобально применимые правила обновления;
- взаимодействия близкого порядка с конечным (небольшим) количеством соседних узлов.

Их применение в моделировании динамики дорожного движения вызвало колоссальную активность в связи с попытками понять причины нестабильности трафика, ответственные за рваный ритм движения и за заторы как на автострадах, так и в городах.

Среди перечисленных групп моделей транспортного потока стоит отметить мезомодели и клеточные автоматы. Именно они получили мощный толчок в развитии не только в теоретической части, но и в практической – на их основе пишутся программы имитации дорожного движения. Учитывая проблемы современных городов, а именно дорожные заторы в неудачно построенных участках или в час пик, также стоит сказать, что именно эти модели могут помочь для построения нового участка или обновления старого, установка светофора, расширение проезжей части и т. д. Данные сравнения всех четырёх групп приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительный анализ основных методов математического описания
дорожных потоков**

Название группы моделей	Суть модели	Плюсы	Минусы	Особенности
Макромодели	Транспортный поток рассматривается как поток одномерной сжимаемой жидкости	Позволяет охватить большую часть дорожной сети, по сравнению с микромоделями	Высокая степень обобщения, например, смена полос или поворот, обычно не учитываются	Большинство моделей основывается на уравнениях классической гидродинамики
Микромодели	Моделируется поведение каждого автомобиля	Позволяет достичь более точного описания движения автомобилей	Требует больших вычислительных ресурсов при практическом применении, чувствительны к ошибкам	Учитывается связь автомобиля с автомобилями-«соседями», а также с элементами инфраструктуры дорожной сети
Мезомодели	Транспортный поток моделируется в целом, учитывая особенности поведения водителей	Позволяет охватывать большую территорию, учитывая особенности поведения водителя	Меньшая детализация по сравнению с микромоделями	Данные обновляются не каждый временной шаг, а только при изменении параметров сети или поведения автомобиля
Клеточные автоматы	Дискретизация пространства и времени	Высокая скорость и эффективность вычисления	Условность дискретизации пространства и времени	Самоорганизующаяся критичность, формирование спиральных образцов, колеблющаяся или хаотическая последовательность состояний

Мы рассмотрели основные методы математического описания движения транспортного потока, наиболее употребляемые специалистами при расчетах схемы построения дорожной сети. На самом деле, существует ещё огромное количество моделей и их вариации. Использование конкретного метода или их совокупности обуславливается масштабом транспортных потоков и особенностями тех или иных дорожных развязок. Некоторые модели подходят для планирования установки светофора и регулировки его работы, некоторые для постройки новой развязки, некоторые для построения целых магистралей. Использование совокупности моделей позволит провести более точные расчеты и планирование автодорог.

Данная тема с каждым годом становится всё более актуальной в связи с увеличением автомобилей на дорогах, а значит, и повышением плотности потоков, особенно в «час пик».

Практическое применение научных методов позволит не только повысить качество планирования строительства городских дорог и магистралей, но улучшить жизнь каждого из нас.

Учитывая особенности каждой модели, авторами планируется разработать модель, с помощью которой можно будет предсказать скорость и направление распространения уличных заторов, вызванных ДТП или различными ремонтными работами. Данная разработка будет иметь практическое значение, и может быть применима как в деятельности служб ГИБДД, так и аварийных комиссаров.

Вывод.

Выбор конкретного метода или их совокупности обуславливается масштабом транспортных потоков и особенностями тех или иных дорожных развязок.

Микро-подход обеспечивает наилучшие возможности для исследования устойчивости при взаимодействии автомобилей, столь важной для безопасности движения. Макро-подход особенно удобен

для изучения установившегося состояния транспортного потока и вопросов эффективности. Инженерно-психологический подход применяют для исследования уникальных сенсорных и моторных характеристик водителя и соответствующих ограничений; на этой основе стремятся свести к минимуму число ситуаций, в которых водитель оказывается не в состоянии надлежащим образом управлять автомобилем, а также регулировать абсолютную и относительную скорости.

2.4. Стохастический подход к моделированию транспортного потока. Вероятностные распределения

2.4.1. Сущность вероятностного подхода

Для оценки вероятности появления того или иного события, происходящего при движении автомобилей, можно использовать один из двух методов. Первый метод дает статистическую вероятность, которая имеет большое значение и широко используется в математической статистике; второй метод приводит к теоретической вероятности.

В теории вероятностей основные факторы известны, но результат нельзя предсказать с абсолютной достоверностью. В математической статистике имеется конечный результат, но причины, обусловившие его появление, неизвестны.

Одно из затруднений, возникающих при применении теории вероятностей, состоит в определении всех возможных способов появления данного события. В большинстве азартных игр игрок по существу вытаскивает тот или иной шанс из «черного ящика», где различного рода выигрыши и их относительные пропорции известны заранее. Однако в большинстве реальных дорожно-транспортных ситуаций редко удается перечислить все возможные исходы. Необходимо также иметь в виду, что нельзя отрывать теорию вероятностей от математической статистики, так как обычный подход состоит в том, чтобы взять из «черного ящика» обоснованную экспериментальную выбор-

ку, а затем оценить, при каком доверительном уровне она представляет все содержимое «ящика».

2.4.2. Биномиальное распределение в моделировании транспортных потоков

Первые исследования транспортных потоков носили статистический характер. Они включали методы измерения средних значений и средних квадратических отклонений таких характеристик транспортных потоков, как скорость и интенсивность движения. Однако оказалось, что для полного описания транспортного потока недостаточно знания таких показателей, как параметр сдвига и дисперсия, а необходимо рассматривать распределение вероятностей. Бином Ньютона имеет вид

$$(p + q)^n = \sum_{x=0}^n \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{(n-x)}. \quad (2.1)$$

Коэффициенты данного разложения называются биномиальными коэффициентами, часто они выражаются символически как

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}. \quad (2.2)$$

Формула (3.2) дает число сочетаний из n элементов по x . Если разделить все автомобили на пять классов: малолитражные, стандартные легковые, пикапы, грузовые и автобусы, то число сочетаний из пяти элементов по два составит

$$\frac{5!}{2!3!} = 10.$$

На величины p и q никакие ограничения пока не налагаются.

Рассмотрим теперь последовательность независимых испытаний. Пусть p обозначает вероятность того, что определенное событие произойдет при данном испытании, следовательно, $q = 1 - p$ – вероятность того, что это событие при одном испытании не произойдет. По-

сколькx $p + q = 1$, то сумма $n + 1$ членов ряда, записанного в правой части формулы (2.1), также должна быть равна единице. Следовательно, каждый член биномиального разложения представляет собой некоторую вероятность, а все члены образуют так называемое биномиальное распределение. Формула для биномиального распределения имеет вид:

$$P(x) = \binom{n}{x} p^x q^{(n-x)}, \quad (2.3)$$

где p – вероятность успешного исхода при любом данном испытании;

q – вероятность неудачного исхода при любом данном испытании;

n – число независимых испытаний;

x – число успешных испытаний;

$P(x)$ – вероятность появления x успешных исходов при x испытаниях.

Рассмотрим приближение автомобилей к перекрестку, где, как показали исследования, 25 % автомобилей совершают правый поворот, а левый поворот запрещен. Согласно формуле (2.3), вероятность того, что один из трех последовательно движущихся автомобилей совершит правый поворот, равна

$$P(1) = \frac{3!}{1!2!} (0,25)^1 (0,75)^2 = 0,422.$$

2.4.3. Дискретное распределение в моделировании транспортных потоков

Моменты классической механики связаны с физическими свойствами тел, имеющих некоторую массу. Первый начальный момент связан с центром тяжести, второй момент относительно центра тяжести называется моментом инерции. В теории вероятностей моменты также играют исключительно важную роль. Аналогия между телом с единичной массой и распределением вероятностей позволяет провести важную аналогию между свойствами моментов. Точно так же, как некоторые тела могут быть полностью описаны с помощью моментов, некоторые распределения вероятностей можно полностью описать с

помощью моментов. k – начальный момент дискретного распределения $P(x)$, например

биномиального распределения, определяется как

$$\mu_k = \sum_{x=0}^{\infty} x^k P(x). \quad (2.4)$$

Первый момент μ называется средним. Второй момент μ_2 используется для нахождения дисперсии σ^2 , так как

$$\sigma^2 = \mu_2 - \mu^2. \quad (2.5)$$

Первый момент биномиального распределения находится путем подстановки выражения (2.3) в формулу (2.4). После перегруппировки членов имеем

$$\mu = np. \quad (2.6)$$

Второй момент вычисляется аналогично с помощью тождества

$$x^2 = x(x-1) + x.$$

В конечном счете, имеем

$$\mu_2 = n(n-1)p^2 + np. \quad (2.7)$$

При подстановке выражений (2.6) и (2.7) в формулу (2.5) находим дисперсию биномиального распределения

$$\sigma^2 = npq. \quad (2.8)$$

2.4.4. Пуассоновское распределение в моделировании транспортных потоков

При рассмотрении прибытия автомобилей к перекрестку, невозможно определить, сколько автомобилей не прибыло к перекрестку. В ситуациях такого рода необходимо применять пуассоновское распре-

деление. В формуле для пуассоновского распределения используется постоянная Эйлера e

$$e = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots = 2,7183\dots \quad (2.9)$$

Это число является основанием натуральных логарифмов. Если возвести e в некоторую степень m , то результат также можно выразить в виде бесконечного ряда:

$$e^m = 1 + m + \frac{m^2}{2!} + \frac{m^3}{3!} + \dots \quad (2.10)$$

Чтобы то или иное разложение можно было считать распределением вероятностей, сумма всех его членов должна равняться единице. Чтобы разложение e^m можно было использовать в качестве распределения вероятностей, необходимо лишь разделить обе части выражения (2.10) на e^m

$$1 = e^{-m} \left(1 + m + \frac{m^2}{2!} + \frac{m^3}{3!} + \dots \right) \quad (2.11)$$

Формула (2.11) дает сумму членов пуассоновского распределения, следовательно, формулой для распределения будет выражение для общего члена

$$P(x) = \frac{e^{-m} m^x}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (2.12)$$

Это распределение весьма удовлетворительно описывает число отдельных событий x , выраженное через среднее число этих событий. Чтобы оценить среднее значение, необходимо лишь подставить выражение (2.12) в формулу (2.4):

$$\begin{aligned} \mu &= 0 + me^{-m} + \frac{2m^2e^{-m}}{2!} + \frac{3m^3e^{-m}}{3!} + \dots; \\ \mu &= me^{-m} \left(1 + m + \frac{m^2}{2!} + \dots \right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Заметим, что выражение в круглых скобках равно e^m . Так, в формуле (2.12) m есть среднее пуассоновского распределения. Дисперсия пуассоновского распределения равна среднему значению. Пуассоновское распределение позволяет выполнять: анализ интенсивности движения в данном пункте, определение вероятности наличия свободного места на стоянке, изучение пространственного распределения некоторых дорожно-транспортных происшествий и проектирование развязок для транспорта, совершающего левый поворот.

Глава 3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

1-й этап. Плотность транспортного потока

Плотность транспортного потока является пространственной характеристикой, определяющей степень стесненности движения на полосе дороги. Ее измеряют числом транспортных средств, приходящихся на 1 км протяженности дороги.

Предельная плотность транспортного потока достигается при неподвижном состоянии колонны транспортных средств, расположенных вплотную друг к другу на полосе.

Предельное значение плотности транспортного потока q_{\max} составляет 170 – 200 авт./км в зависимости от состава транспортного потока.

При разных значениях плотности движения могут складываться разные уровни эксплуатационных условий по степени стесненности. В зависимости от плотности транспортного потока движение по степени стесненности подразделяют на *свободное, частично связанное, насыщенное и колонное*.

Численные значения q_a в физических единицах (автомобилях), соответствующих этим состояниям транспортного потока, весьма существенно зависят от параметров дороги, в первую очередь от ее плана и профиля, коэффициента сцепления, а также состава транспортного потока по типам транспортных средств, что, в свою очередь, влияет на выбираемую водителями скорость движения.

Скорость движения v_a является важнейшим показателем транспортного потока, так как цель всех мероприятий по организации дорожного движения – обеспечение скорости транспортного потока, наиболее приближенной к максимально возможной из условий безопасности дорожного движения.

В практике организации дорожного движения в зависимости от методов измерения и расчета рассматривают:

– мгновенную скорость движения v_a – скорость, фиксируемую в отдельных типичных сечениях (точках) дороги. Именно мгновенная скорость движения в значительной степени влияет на безопасность движения, поскольку определяет кинетическую энергию автомобиля, т. е. его тормозной путь и время, которое имеется у водителя для оценки опасной ситуации;

– максимальную скорость движения v_m – наибольшую мгновенную скорость движения, которую может развить транспортное средство. Для дорожного движения большое значение имеет максимальная скорость движения транспортного средства, которая ниже разрешенной. Такие транспортные средства становятся препятствием для нормального движения транспортного потока;

– крейсерскую скорость движения v_k – скорость, с которой водитель стремится ехать в данных условиях. Если транспортный поток движется более медленно или более быстро, водитель испытывает дискомфорт. В зависимости от типа личности водитель быстрее ощущает усталость, становится невнимательным или раздражительным;

– разрешенную скорость движения $v_{раз}$ – скорость, разрешенную на данном участке дороги нормативными документами или средствами регулирования дорожного движения;

– рекомендуемую скорость движения $v_{рек}$ – скорость, с которой рекомендуется двигаться водителю и которая обеспечивает безопасность дорожного движения в данных условиях;

– *безопасную скорость движения $v_{б.д.}$* – скорость, при которой водитель в состоянии предпринять необходимые действия при возникновении опасной ситуации. Соблюдение безопасной скорости движения с большой вероятностью позволяет гарантировать безопасность поездки;

– экономичную скорость движения $v_{эkn}$ – скорость, при которой затраты на движение (в основном расход топлива) минимальны;

– скорость сообщения v_c – скорость, которая является измерителем времени доставки пассажиров и грузов. Скорость сообщения

определяется как отношение расстояния между точками сообщения ко времени нахождения транспортного средства в пути (времени сообщения). Этот же показатель применяется для характеристики скорости движения по отдельным участкам дорог.

Между параметрами транспортного потока существуют определенные зависимости. Характер этих зависимостей достаточно сложный, на них влияет громадное количество факторов, связанных не только непосредственно с транспортным потоком, но и с условиями его движения по дороге, метеоусловиями, временем года и суток и т. п. При исследовании транспортных потоков влияющие на них факторы могут рассматриваться как детерминированные или как вероятностные величины.

Вероятностный подход более близок природе транспортного потока, но сложен для математического описания. Детерминированный подход легче реализовать в инженерных методиках, и при тщательном анализе исходных данных он дает достаточно точные для практики результаты.

При исследовании транспортных потоков используют два подхода.

Первый предполагает исследование процессов, происходящих внутри потока, поэтому он получил название *микроскопическое моделирование*. Микроскопическое моделирование рассматривает транспортный поток как взаимное положение следующих друг за другом автомобилей и основано на *теории следования за лидером*. Предполагается, что основное влияние на изменение параметров движения конкретного автомобиля (ведомого) оказывает изменение скорости движения находящегося перед ним автомобиля-лидера.

Исследования показали, что влияние на изменение скорости ведомого автомобиля начинается, когда временной интервал между ним и ведомым автомобилем составляет в городских условиях – 6 с, вне населенных пунктов – 9 с.

Второй подход к изучению транспортных потоков рассматривает его как целостный процесс, характеризуемый только внешними параметрами. При таком подходе создаются *макроскопические модели*,

которые рассматривают такие характеристики транспортного потока как скорость, интенсивность, плотность движения и т. п.

Между скоростью движения, плотностью и интенсивностью движения существует соотношение $N_a = v_a q_a$, которое графически может быть изображено в виде так называемой *основной диаграммы транспортного потока* (рис. 11).

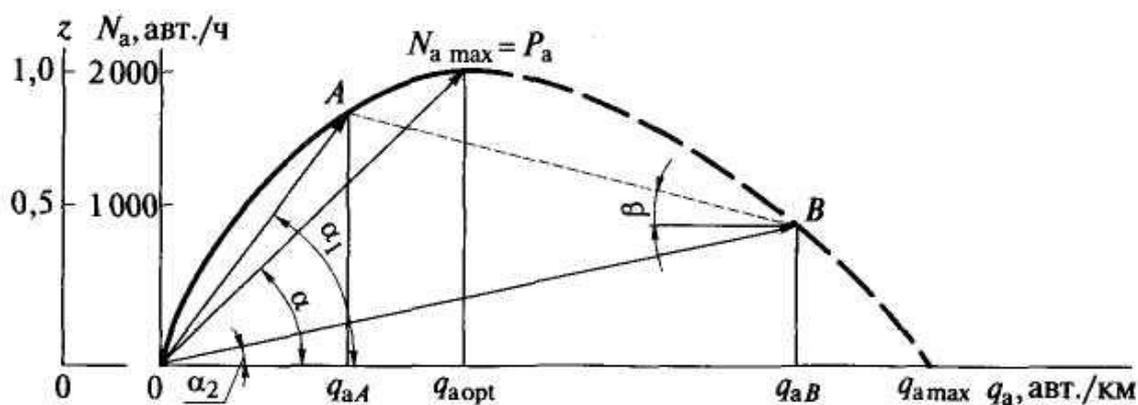


Рис. 11. Основная диаграмма транспортного потока

Диаграмма отражает изменение состояния одnorядного транспортного потока в зависимости от увеличения его интенсивности и плотности. Левая часть кривой (показана сплошной линией) отражает устойчивое состояние транспортного потока, при котором по мере увеличения плотности транспортный поток проходит фазы *свободного*, затем *частично связанного* и *связанного* движения, достигая точки максимально возможной интенсивности – пропускной способности (точка $N_{a max} = P_a$).

В процессе этих изменений скорость транспортного потока падает – она характеризуется тангенсом угла наклона α радиуса-вектора, проведенного от точки 0 к любой точке кривой, характеризующей изменение N_a .

Соответствующие точке $N_{a max} = P_a$ значения плотности и скорости транспортного потока считаются оптимальными по пропускной способности (q_{aopt} и v_{aopt}). При дальнейшем росте плотности (за точкой

P_a перегиба кривой) транспортный поток становится *неустойчивым* (эта ветвь кривой показана штриховой линией).

Переход транспортного потока в неустойчивое состояние происходит вследствие снижения плавности движения, например при появлении препятствия на участке дороги, неблагоприятных метеоусловиях и т. п. Снижение скорости движения автомобилем – лидером группы требует торможения разной интенсивности последующих автомобилей, а затем и разгонов, что создает пульсирующий, неустойчивый поток.

Резкое торможение транспортного потока (находящегося в режиме, соответствующем точке A) и переход его в результате торможений к состоянию по скорости и плотности в положение, соответствующее, например, точке B , вызывает так называемую «ударную волну» (показана тонкой штриховой линией AB), распространяющуюся навстречу направлению транспортного потока со скоростью, характеризующейся тангенсом угла β .

«Ударная волна» является, в частности, источником возникновения попутных цепных столкновений, типичных для плотных транспортных потоков.

В точках 0 и q_{\max} интенсивность движения $N_a = 0$, т. е. соответственно на дороге транспортные средства отсутствуют или транспортный поток находится в состоянии затора (неподвижности).

Радиус-вектор, проведенный из точки 0 в направлении любой точки на кривой (например, A или B), характеризующей N_a , определяет значение средней скорости потока

$$V_a = \frac{N_a}{q_a} = \tan \alpha \quad (3.1)$$

Плотность транспортного потока рассматривается как зависимая переменная, поскольку две другие (интенсивность и скорость движения) являются измеряемыми и независимыми переменными.

2-й этап. Состав транспортного потока

Еще одним важным параметром, характеризующим транспортный поток, является наличие в его составе транспортных средств различного типа – *состав транспортного потока*. Состав транспортного потока влияет на загрузку дорог (стесненность движения), что объясняется, прежде всего, существенной разницей в габаритных размерах автомобилей: от длины 4...5 м для легковых автомобилей, до длины 24 м, характерной для автопоездов. Необходимо учитывать и различие в динамических характеристиках автомобилей различного типа.

Оценка состава транспортного потока осуществляется по процентному составу или доле транспортных средств различных типов.

Знание состава транспортного потока позволяет учесть степень занятости дороги движущимся автомобилем, выражением которой является *динамическая площадь автомобиля* S_a .

Этот показатель характеризует сложность обгона данного автомобиля другим.

Низкие значения S_a незначительно влияют на безопасность движения, а высокие вызывают ее снижение. Динамическая площадь определяется как произведение длины автомобиля l_a на динамический габарит G_a .

$$S_a = G_a \cdot l_a;$$

$$G_a = (B_a + K_a + 0,5)/2, \quad (3.2)$$

где B_a – ширина автомобиля, м;

K_a – ширина колеи (по центрам колес), м;

0,5 – запас для обеспечения разъезда по 0,25 м на сторону.

Для учета в фактическом составе транспортного потока влияния различных типов транспортных средств на загрузку дороги применяют коэффициенты приведения $k_{пр}$ к условному легковому автомобилю, значения которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов приведения $k_{прi}$, по СНиП 2.05.02-85

Транспортные средства	Тип рельефа		
	Равнинный	Пересеченный	Горный
Легковые автомобили			
Грузовые автомобили грузоподъемностью, т:			
	1,5	1,8	2,25
		2,4	
	2,5		3,75
		3,6	4,5
более 14	3,5	4,2	5,25
Автопоезда грузоподъемностью, т:			
	3,5	4,2	5,25
		4,8	
			7,5
Более 30		7,2	

3-й этап. Интенсивность транспортного потока

Приведенная интенсивность движения вычисляется как сумма произведений частных показателей интенсивности движения транспортных средств каждого типа, умноженная на соответствующие коэффициенты приведения:

$$N_{пр} = \sum_{i=1}^m (N_i k_{пр i}) \quad (3.3)$$

где N_i – интенсивность движения транспортных средств данного типа; $k_{прi}$ – соответствующие коэффициенты приведения для данной группы транспортных средств;

m – число типов транспортных средств, на которые разделены данные наблюдений.

Исследования показывают, что используемые коэффициенты приведения являются приближенными или завышенными. Основная причина некорректности состоит в определении $k_{прi}$ как функции грузоподъемности.

В действительности грузоподъемность не имеет прямого отношения к динамике автомобиля. Этот вывод тем более справедлив для современных более динамичных, скоростных транспортных средств. Автомобиль с высокими динамическими характеристиками независимо от грузоподъемности создает меньше помех движению и способствует повышению пропускной способности дороги.

Корректная оценка динамики автомобилей в транспортном потоке позволяет повысить достоверность расчета пропускной способности дороги.

4-й этап. Пропускная способность

В теории транспортных потоков, как пропускная способность, так и транспортная загрузка выражаются через интенсивность движения. Транспортная загрузка дорожного сооружения, подобно потоку воды в трубе или давлению ветра на строение, является случайной величиной, и ее можно выразить лишь через вероятности появления тех или иных значений.

Это соотношение между пропускной способностью и транспортной загрузкой нигде не проявляется так ярко, как на дорожных сооружениях высокого класса с регулированием движения. Это может быть пересечение на одном уровне или система пересечений на одном уровне.

При проектировании дорожного сооружения, регулирующего движение на двух пересекающихся дорогах с большой интенсивностью потоков, исходя из известной транспортной нагрузки, необходимо выбрать требуемое число полос на каждом направлении движения, а затем установить режим работы светофора. В большинстве случаев при реконструкции существующего пересечения или проектировании новой скоростной магистрали, проходящей через город, возможен ряд вариантов при выборе числа полос движения.

Места пересечения существующих крупных артерий на предполагаемом маршруте скоростной магистрали обычно бывают известны, и существуют реальные ограничения на число полос движения на примыкающих въездах и съездах и дорогах, пересекающих скорост-

ную магистраль. Таким образом, задача сводится главным образом к определению режима работы светофора при предполагаемых геометрических характеристиках дороги.

5-й этап. Прогнозирование транспортного потока

Для прогнозирования потока автомобилей, прибывающих к перекрестку, хорошо подходит пуассоновское распределение. Формула Пуассона выражает вероятность прибытия к перекрестку данного числа автомобилей за цикл работы светофора на основе среднего числа прибытий за цикл.

Допущения о равномерном или пуассоновском распределении как моделях транспортного потока имеют определенные ограничения. Допущения: транспортный поток в час «пик» имеет пуассоновское распределение; транспортный поток в час «пик» является равномерным.

На рис. 12 показаны соотношения между интенсивностями потока, предсказываемыми при принятии этих допущений, и интенсивностями, наблюдаемыми при различных других методах исследования. Очевидно, что наилучшую оценку наблюдаемой интенсивности получим при допущении о пуассоновском распределении в периоде «пик», а наименее надежным является допущение о равномерной интенсивности движения в час «пик».

Так как проектирование дорог и дорожных сооружений по существу представляет собой систематизированную попытку найти соотношение между пропускной способностью и транспортной загрузкой, важно представлять себе, как выводятся выражения для пропускной способности и знать их ограничения. Исторически сложилось так, что пропускная способность перекрестка определялась путем анализа расстояний между последовательными автомобилями.

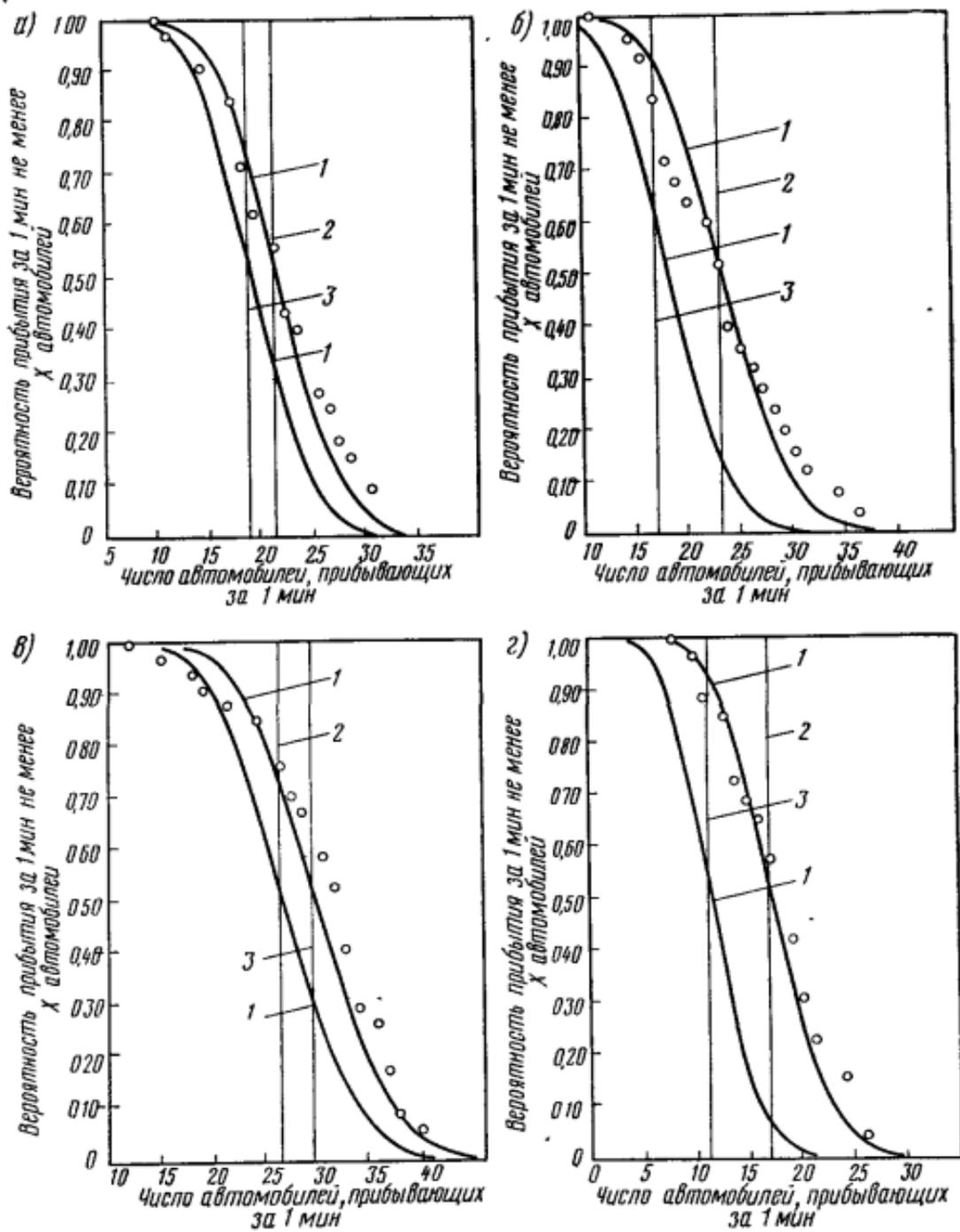


Рис. 12. Соотношение между наблюдаемым и прогнозируемым числом автомобилей, прибывающих к перекрестку в утренние периоды «пик»:

- 1 – интенсивность движения в период «пик», предсказываемая пуассоновским распределением;
- 2 – равномерная интенсивность движения в период «пик»;
- 3 – равномерная интенсивность движения и час «пик»;
- o – наблюдаемая интенсивность движения в период «пик»

Расчет пропускной способности пересечения

Среднее минимальное расстояние D между последовательными автомобилями определяется следующим уравнением:

$$\text{Среднее минимальное расстояние} = \frac{\text{Время}}{\text{Интенсивность}},$$

или

$$D = \frac{G - K}{x - 1}, \quad (3.4)$$

где K – задержка при трогании с места всей последовательности автомобилей и время, необходимое для того, чтобы последний автомобиль проехал через перекресток.

Так как последнему автомобилю разрешается пересекать перекресток при желтом свете, то интервал D равен общей длительности зеленого и желтого сигналов. Переписывая данное выражение, получаем

$$G = (x - 1)D + K$$
$$G = xD + K - D. \quad (3.5)$$

При анализе пропускной способности удобно рассматривать критическую интенсивность движения V на одной полосе для одной фазы. Эта величина характеризует максимальный объем движения за час на одной полосе, который может обеспечить перекресток при данной фазе:

$$V = \frac{3600}{C} x, \quad x = \frac{G - (K - D)}{D}. \quad (3.6)$$

Суммарная критическая интенсивность движения на одной полосе, которую может обеспечить перекресток за один час:

$$\sum V = \frac{3600}{C} \sum x, \quad \sum V = \frac{3600}{C} \cdot \frac{\sum G - \varphi(K - D)}{D}, \quad (3.7)$$

где $C = \sum G$, φ – число фаз. Следовательно

$$\sum V = \frac{3600}{C} \cdot \frac{C - \varphi(K - D)}{D},$$
$$\sum V = \frac{3600}{D} - \frac{3600\varphi(K - D)}{CD}. \quad (3.8)$$

В итоге уравнение длительности цикла C :

$$C = \frac{3600\varphi(K - D)}{3600 - D\Sigma V}. \quad (3.9)$$

Полученные формулы основаны на допущении, о равномерном движении для каждого цикла в течение часа. Разумеется, в действительности этого нет.

Однако если часовую интенсивность движения умножить на некоторый поправочный коэффициент, то уравнения для пропускной способности можно применять и в случае принятия допущения о равномерном движении транспорта в часы «пик».

Формула для функции пуассоновского распределения позволяет определить вероятность прибытия в периоде «пик» не менее $x + 1$ автомобилей за цикл, если известно среднее число m автомобилей, прибывающих за цикл:

$$P(x + 1) = \sum_{x+1}^{\infty} \frac{m^{x+1} e^{-m}}{(x + 1)!}, \quad m = \frac{V}{\frac{3600}{C}}. \quad (3.10)$$

Согласно формуле (3.5)

$$x = \frac{G - (K - D)}{D}; \quad C = \Sigma G. \quad (3.11)$$

Методом последовательных приближений эти четыре уравнения можно привести к более простому виду. Упрощение уравнений значительно облегчается при использовании графика для функции пуассоновского распределения.

Этапы расчета:

Этап 1. Определяются численность населения, расположение дороги и объем движения, влияющие на длительность периода «пик».

Этап 2. интенсивность движения дается для произвольного времени суток, от нее необходимо перейти к интенсивности движения в часы «пик».

Этап 3. Для каждого направления движения вычисляется коэффициент γ , характеризующий длительность периода «пик».

Этап 4. Интенсивность движения в час «пик» на каждом направлении умножается на коэффициент γ ; получаем часовую интенсивность потока.

Этап 5. Согласно допущению о том, что рассматривается сооружение высокого класса, все пересекающиеся потоки движения должны разделяться путем чередования фаз сигнала светофора.

Этап 6. Вариант проекта выбирают путем изменения числа полос движения на рассматриваемых двух улицах. Каждой полосе назначается определенная интенсивность движения, при этом предполагается, что в период «пик» на каждой полосе поток является равномерным.

Этап 7. С помощью значений критических интенсивностей движения для одной полосы вычисляется среднее число автомобилей, прибывающих к перекрестку за цикл работы светофора.

Глава 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ

Объект исследования – пересечение улиц Мира и Горького в городе Владимир (рис. 13), регулируемый перекресток, рассматриваемые транспортные потоки в 3 полосы (прямо, направо, налево).

В вечерние часы возникают заторы (пробки). Кроме того, пересечение характеризуется высоким уровнем аварийности.

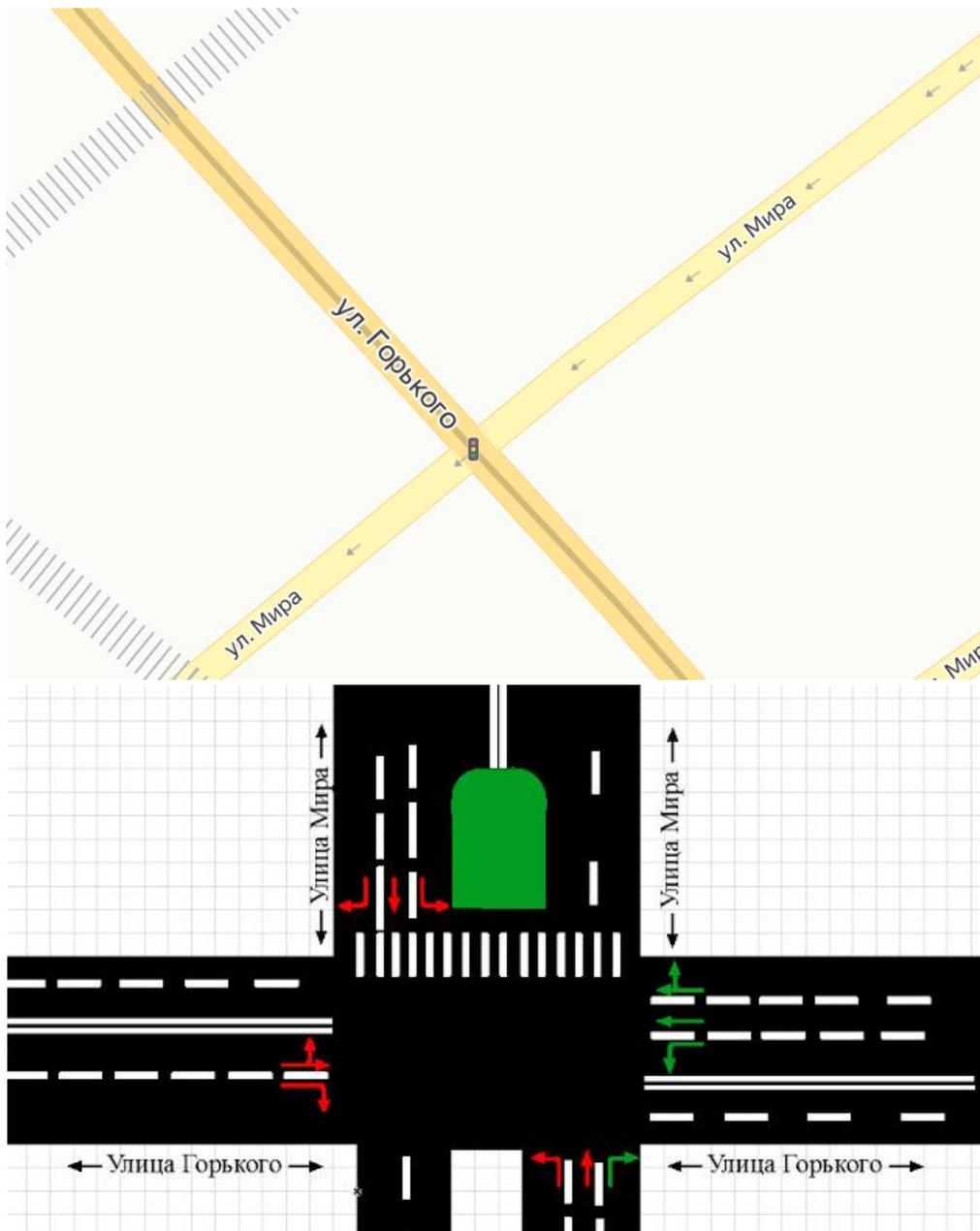


Рис. 13. Перекресток ул. Мира-ул. Горького (город Владимир)

Как можно задать функцию и статистические экспериментальные данные?

- 1) Словесный способ;
- 2) Аналитический способ – через формулы;
- 3) Табличный способ – помогает быстро определить конкретные значения;
- 4) Графический способ – наглядно.

Виды диаграмм:

- линейный график;
- линейчатая диаграмма (гистограмма, столбчатая диаграмма);
- круговая диаграмма;
- точечная диаграмма;
- цилиндрическая диаграмма.

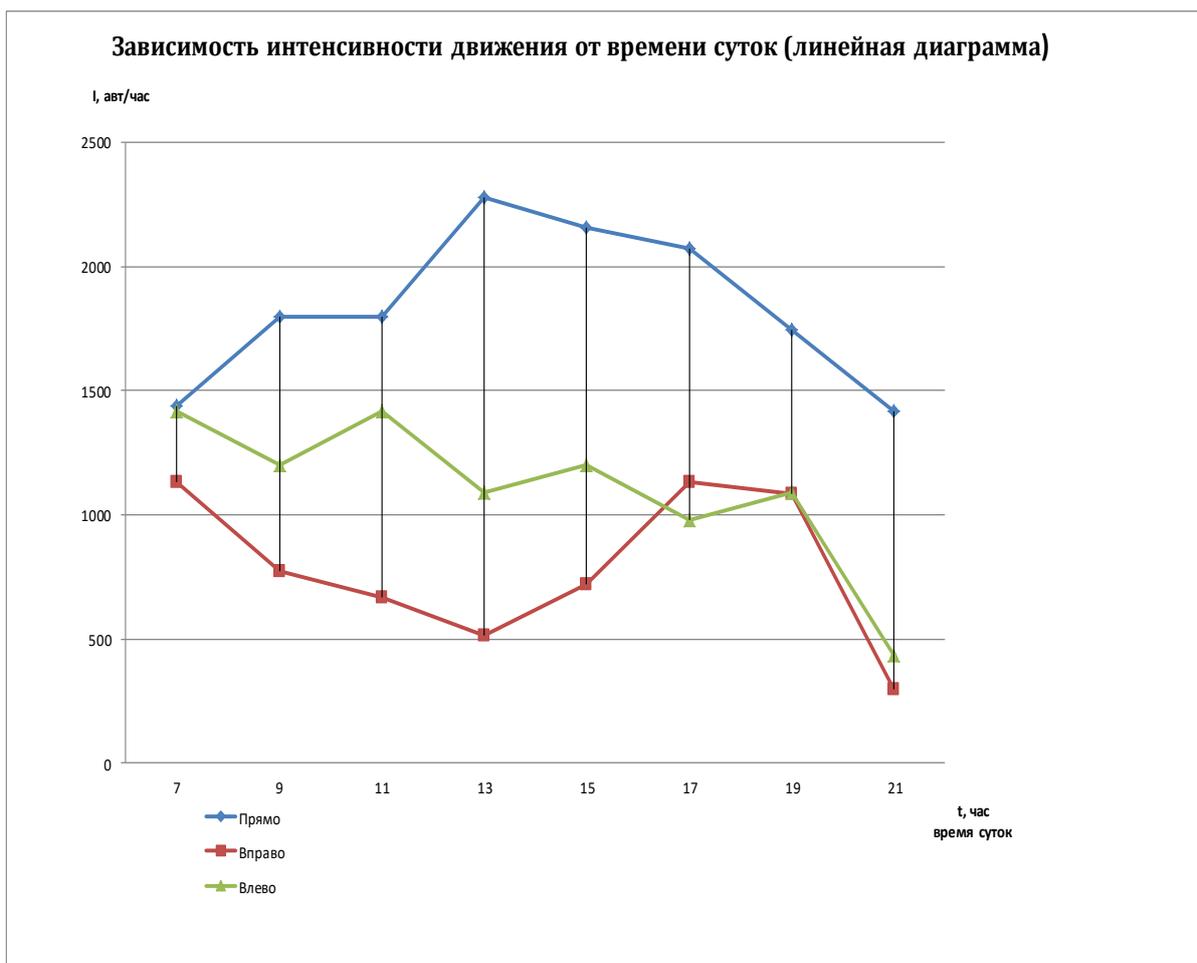


Рис. 14. Зависимость интенсивности движения от времени суток (линейная диаграмма)

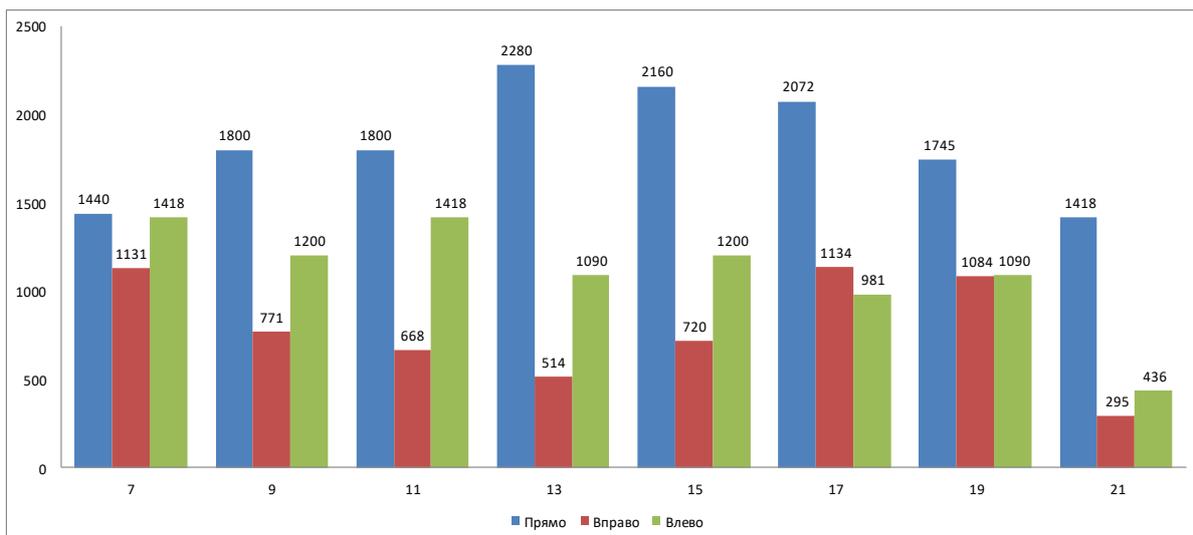


Рис. 15. Зависимость интенсивности движения от времени суток (гистограмма)

По горизонтальной оси (ОХ) – время суток в часах;

По вертикальной оси (ОУ) – интенсивность движения полос (авт/час)

Для круговой диаграммы выберем «срез» времени, соответствующий 13:00.

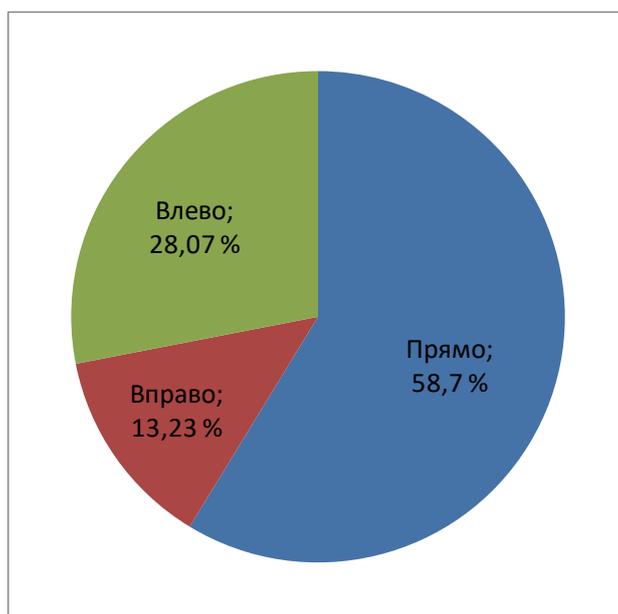


Рис. 16. Распределение направлений движений автомобилей (круговая диаграмма)

Расчёты: $2280+514+1090=3884$ примем за 100%.

Прямо: $(2280 \cdot 100) / 3884 \approx 58,7\%$

Вправо: $(514 \cdot 100) / 3884 \approx 13,23\%$

Влево: $(1090 \cdot 100) / 3884 \approx 28,07\%$

Выводы:

На графиках интенсивности видно, что наибольшая интенсивность будет наблюдаться в дневные часы при движении прямо, в утренние часы налево и в вечерние часы пик направо. На данном перекрестке происходит большое количество мелких и крупных ДТП.

Для прогнозирования потока автомобилей, прибывающих к перекрёстку, хорошо подходит пуассоновское распределение.

Распределение Пуассона выражается известным законом Пуассона. Закон Пуассона часто применяется при решении различных задач организации движения.

Закон Пуассона описывает распределение числа автомобилей n , проходящих через сечение дороги за интервал времени τ . Закон Пуассона также описывает распределение временных интервалов t между автомобилями. При этом задается интенсивность транспортного потока λ .

Закон Пуассона выражается функцией, в которой имеется лишь один свободный параметр λ :

$$p(n) = e^{-\lambda \tau} (\lambda \tau)^n / n!, \quad (4.2)$$

где λ – интенсивность ТП, авт/ч;

τ – интервал времени, ч;

n – число автомобилей;

$p(n)$ – вероятность прохождения числа n автомобилей через сечение дороги за время τ .

В формуле закона применяется функция $n!$ (читается как n факториал). Она является произведением: $n! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot n$. Например, $5! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 = 120$.

В формулу (1) подставляют целые числа n , время τ , ч, рассчитывают вероятности p и строят распределение $p(n)$.

В формуле нормального закона переменная изменяется в диапазоне от минус ∞ до плюс ∞ . В формуле закона Пуассона переменная n изменяется от 0 до некоторого ограниченного значения.

Для нормального закона имеем распределение, симметричное относительно среднего значения переменной. Для закона Пуассона распределение является несимметричным.

Рассмотрим пример построения распределения Пуассона. Для этого примем три интенсивности движения $\lambda = 200, 400$ и 600 авт/ч, интервал времени τ равно 90 с. Сразу приведем интервал к часам:

$$90 \text{ с} = 90 / 3600 = 0,025 \text{ ч.}$$

Подставляем в формулу $p(n)$ закона значения λ , t , варьируем числом n , и вычисляем вероятности p . Получаем функцию распределения вероятности, показанную на рис. 17. При увеличении интенсивности движения имеем возрастание вероятности прохождения через сечение дороги большего числа автомобилей за заданный интервал времени.

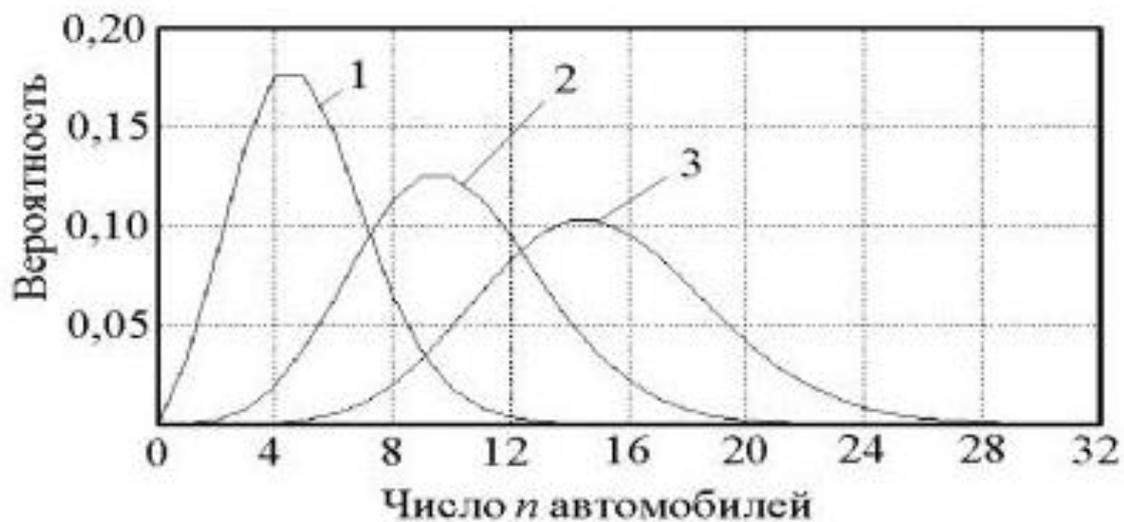


Рис. 17. Вероятности прохождения через сечение дороги n автомобилей при интенсивностях: 1 – 200, 2 – 400 и 3 – 600 авт/ч за время 1,5 мин

Закон Пуассона весьма удобен для практического применения: для расчета распределения нужно задавать лишь интенсивность потока. Это обусловило его широкое применение на практике. Однако об-

ласть применения закона Пуассона ограничена, поэтому были приняты попытки расширения области с помощью поправок.

Для потоков, имеющих большую интенсивность движения, применяют распределение Пирсона или закон Пирсона типа III. Распределение отличается высокой асимметричностью, оно применяется для потоков уровней удобства Б и В. Иногда применяют логарифмический закон распределения.

Вывод.

Результаты экспериментальных исследований показали распределение интенсивностей движения на перекрестке по часам суток.

Глава 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1. Составляющие социально-экономического эффекта

Поскольку сегодня загруженность улично-дорожной сети близка к критической, появляется необходимость формирования организационно-технических мероприятий, которые направлены на повышение эффективности использования автомобилей в условиях ограниченности ресурсов.

Предполагается, что экономический эффект мероприятий в области эффективного использования автомобилей определяется за счет сокращения времени доставки грузов и пассажиров, повышения качества транспортного обслуживания, уменьшения негативного воздействия на окружающую среду и экономических издержек на транспортное обслуживание, а также снижения количества ДТП.

Факторами, оказывающими повышение экономического эффекта, являются:

- скорости движения транспортных средств;
- количество и продолжительность транспортных задержек на пути следования;
- затраты на транспортное обслуживание;
- качество транспортного обслуживания населения;
- экологичность;
- безопасность дорожного движения и т. д.

Транспорт является одной из ведущих отраслей народном хозяйстве. Любые нарушения в перевозочном процессе сказываются на экономических показателях работы транспорта и всего народного хозяйства в целом. Поэтому социально-экономический эффект от работы транспорта имеет различные составляющие, включая потери от неэффективной организации транспортного процесса, потери от непроизводительных простоев, от воздействия на экологическую среду обитания самого человека и многие другие.

Суммарная величина стоимостной оценки экономического эффекта $S(j)$ включает в себя основные показатели:

- транспортные Этр ;
- нетранспортные Энетр ;
- от системы В-А-Д-С ЭВАДС и др.

$$S(j) = \text{Этр}(j) + \text{Энетр}(j) + \text{ЭВАДС}(j). \quad (5.1)$$

Транспортные показатели включают в себя экономический эффект от мероприятий на общественном городском пассажирском транспорте (Эпасс), грузовом транспорте (Эгр) и легковом транспорте (Эл).

$$\text{Этр}(j) = \text{Эпасс}(j) + \text{Эгр}(j) + \text{Эл}(j). \quad (5.2)$$

Эффект от транспортных показателей достигается путем изменения скоростного режима, влияющего на эффективность использования автомобилей.

Эффект на пассажирском транспорте получается главным образом от: – сокращения времени пользования ТС в связи с увеличением скорости движения из-за разгрузки УДС, что приводит к уменьшению интервалов движения транспорта;

- повышения коэффициента использования транспорта пассажирами в связи с увеличением скорости движения и сокращением интервалов движения транспорта и др.

Эффект на грузовом транспорте складывается от:

- сокращения времени доставки и соответственно автомобиле-часов работы автомобилей при заданном количестве транспортной работы, в связи с повышением эксплуатационной скорости движения;
- уменьшение необходимого количества ТС для выполнения транспортной работы за счет увеличения эксплуатационной скорости и уменьшения времени доставки и др.

Эффект на легковом транспорте состоит из:

- увеличения дохода, в связи с сокращением времени в пути пользователей легкового транспорта, а также таксомоторного и ведомственного;
- увеличение дохода при таксомоторных перевозках за счет увеличения скорости движения и др.

Нетранспортный эффект зависит от потерь товарно-материальных ценностей в процессе перевозки, скоропортящихся

грузов, количества ДТП и т. д. Эффект по комплексу системы В-А-Д-С состоит из:

- снижения переменных нормативных затрат автомобилей (расход топлива) в связи со скоростным режимом;
- снижение затрат на ГСМ, ремонт и восстановление шин, ТО и ТР, амортизационным отчислениям;
- снижение загрязнения окружающей среды отработавшими газами и уменьшение шумового воздействия, обусловленного изменением скорости движения и др.

5.2. Снижение потерь от загрязнения окружающей среды и шума при возникновении заторов

Помимо загрязнения воздуха шум от автомобилей является опасным параметрическим загрязнителем окружающей среды. Многие люди в городах с развитой УДС и высокими показателями транспортного потока испытывают воздействие шума более 65 дБа, при этом предельно допустимый уровень (ПДУ) согласно СН 2.24/2.1.8.562-96 считается 55 дБа для территории вблизи жилых домов. Шум оказывает отрицательное воздействие на нервную систему человека, приводит к сердечно-сосудистым и желудочно-кишечным заболеваниям. Человеческий организм способен переносить без последствий в течение долгого времени шумовое воздействие в 20 – 25 дБа, в случае, когда человек находится в больном состоянии, ощущает действие шума в 30 дБа.

Существует множество способов снижения шумового загрязнения от автомобилей на пути его распространения. Эти способы в большинстве случаев, базируются на детерминированном подходе. При этом некоторые ученые придерживаются иного мнения, считают, что неприемлемо использовать в различных моделях только средние показатели характеристик шумового воздействия без учета их средних квадратических отклонения и коэффициентов вариации.

Шумовая характеристика транспортного потока подразумевает уровень звука, который устанавливается в 7,5 м от оси первой полосы проезжей части и на высоте 1,5 м от поверхности земли.

Учитывая условия движения транспортного потока по УДС города шумовая характеристика устанавливается для периода с 7-00 до 23-00.

Уровень звука рассчитывается в зависимости от показателей транспортного потока, в частности от интенсивности движения транспортного потока в целом в часы пик, средней скорости движения, а также доли грузового и пассажирского транспорта в транспортном потоке.

Анализ шумовых характеристик позволяет оценить вероятность возникновения шумового загрязнения от автомобильного транспорта.

На основе этого можно назначать необходимые мероприятия для снижения шумового воздействия на окружающую среду и человека от движения транспортного потока по дорогам города.

Для количественной оценки величины выбросов токсичных компонентов отработавших газов может быть использована следующая методика. Расчетное значение токсичного компонента отработавших газов на выбранном участке рассчитывается по формуле:

$$M_i^p = \sum_{j=1}^k M_{ij}^{pn} + \sum_{j=1}^l M_{ji}^{hn} + \sum_{j=1}^r M_{ij}^{np}, \quad (5.3)$$

где k , l и r – соответственно количество регулируемых перекрестков, нерегулируемых перекрестков и перегонов на выбранном участке; M_{ij} , $hn M_{ji}$, $np M_{ij}$ – соответственно массовые выбросы токсичного компонента на выбранном регулируемом перекрестке, на нерегулируемом перекрестке и на перегоне, г/ч.

Массовый выброс i -го компонента отработавших газов на пересечении,

$$M_i^n = \sum_{j=1}^k m_{ji}, \quad (5.4)$$

где k – количество регулируемых направлений на регулируемом перекрестке или количество второстепенных направлений на нерегулируемом перекрестке.

Часовой массовый выброс i -го токсичного компонента на выбранном перекрестке определяется по формуле:

$$m_i^n = n_o \sum_{j=1}^2 N_j S_{ij} + \frac{t_{xx}}{3600} \sum_{j=1}^2 N_j D_{ij} , \quad (5.5)$$

где n_o – доля остановившихся ТС в данном направлении;

N_j – интенсивность движения автомобилей на данном направлении, авт./ч; S_{ij} – среднее значение массового выброса окиси углерода и окислов азота для j -й группы автомобилей на каждую остановку, г/ост.;

t_{xx} – средняя задержка транспортных средств на данном направлении, с;

D_{ij} – среднее значение массового выброса окиси углерода и окислов азота для j -й группы автомобилей, работающих на холостом ходу, г/ч.

Таким образом, для оценки негативного воздействия транспортного потока на окружающую среду в первую очередь необходимы количественные показатели и методики определения величины выбросов токсичных компонентов, а затем, используя теорию рисков можно определить вероятные зоны негативных воздействий АТС и учитывать это при формировании маршрутов движения.

Необходимо учитывать то, что в городских условиях автомобильный транспорт совершает постоянные разгоны и торможения, двигаясь с различной скоростью на различных участках автомагистрали. Согласно методике, расчет выбросов следующих вредных веществ: углеводороды (СН); оксид углерода (СО); оксид азота NO_x ; формальдегид; диоксид серы (SO_2); сажа; соединения свинца; бензапирен и др.

В районе перекрёстка выбрасывается наибольшее количество вредных веществ автомобилем за счёт торможения и остановки авто-

мобиля перед запрещающим сигналом светофора и последующим его движением в режиме «разгона» по разрешающему сигналу светофора.

Это обуславливает необходимость выделить на выбранной автодороги участки перед светофором, на которых образуется очередь автомобилей, работающих на холостом ходу в течение времени действия запрещающего сигнала светофора.

При расчётной оценке уровней загрязнения воздуха в зонах перекрестков следует исходить из наибольших значений содержания вредных веществ в отработавших газах, характерных для режимов движения автомобилей в районе пересечения автомагистралей (торможение, холостой ход, разгон).

Выброс i -го загрязняющего вещества (ЗВ) в зоне перекрёстка при запрещающем сигнале светофора определяется по формуле:

$$M_{\Pi i}^3 = \frac{P_{\Pi}}{60} \sum_I^{N_{\Pi}} \sum_I^{N_{гр}} M'_{\Pi ik} \cdot G_k \text{ г/мин} \quad (5.6)$$

где P_{Π} - продолжительность действия запрещающего сигнала светофора (включая жёлтый цвет), с;

N_{Π} - количество циклов действия запрещающего сигнала светофора за 20-минутный период времени;

$N_{гр}$ - количество групп автомобилей;

$M'_{\Pi ik}$ (г/мин) - удельный выброс i -го ЗВ автомобилями, k -ой группы, находящихся в «очереди» у запрещающего сигнала светофора;

G_k - количество автомобилей k группы, находящихся в «очереди» в районе перекрёстка в конце каждого цикла действия запрещающего сигнала светофора.

Значения $M'_{\Pi ik}$ определяются по табл. 4, в которой приведены усреднённые значения удельных выбросов (г/мин), учитывающие режимы движения автомобилей в районе пересечения перекрёстка (торможение, холостой ход, разгон), а значения P_{Π} , N_{Π} , G_k - по результатам натурных обследований.

Таблица 4

Удельные значения выбросов для автомобилей, находящихся в зоне перекрёстка М' Пк

Наименование категории автомобилей	№ категории горючих	Выброс, г/мин						
		СО	NO _x (в пересчёте на NO ₂)	СН	Сажа	SO ₂	Формальдегид	Бенз(а)пирен
Легковые	I	0,3	0,01	0,0 4	0,01	0,3 · 10 ⁻²	0,3 · 10 ⁻³	0,15 · 10 ⁻⁶
Автофургоны и микроавтобусы до 3,5 т	II	1,8	0,03	0,2 0	0,03	0,6 · 10 ⁻²	0,9 · 10 ⁻³	0,4 · 10 ⁻⁶
Грузовые от 3,5 до 12 т	III	1,3	0,10	0,5 0	0,22	1,0 · 10 ⁻²	2,3 · 10 ⁻³	1,0 · 10 ⁻⁶
Грузовые свыше 12 т	IV	2,5	0,13	0,8 0	0,45	1,2 · 10 ⁻²	3,5 · 10 ⁻³	1,2 · 10 ⁻⁶
Автобусы свыше 3,5 т	V	1,1	0,10	0,5 2	0,20	1,0 · 10 ⁻²	2,3 · 10 ⁻³	0,9 · 10 ⁻⁶

Рассмотрим на примере количество выбросов автомобилей на перекрёстке ул. Мира – ул. Горького города Владимира. Рассчитаем выбросы различных загрязняющих веществ за час, сутки, год. Данные о количестве автомобилей на перекрёстке «в очереди» на запрещающий сигнал светофора были сняты 22 мая 2024 г. В 18:00.

Направление «влево»: запрещающий сигнал действует 120 с из 153 с цикла (47 мин в час). Количество машин в очереди – 16.

Направление «прямо» по сигналу светофора аналогично направлению «влево». Количество машин в очереди – 20.

Направление «вправо»: запрещающий сигнал светофора действует 80 с из 153 с цикла (31,4 мин в час). Количество машин в очереди – 5.

Из всех категорий автомобилей рассмотрим автомобили 1 категории (легковые автомобили).

1)СО – оксид углерода (при вдыхании связывается с гемоглобином крови что сказывается на центральную нервную систему, вызы-

вает головокружение, головную боль, чувство усталости и замедленную реакцию, вызывает болезнь сердца – стенокардию).

$$16 \cdot 0,3 \cdot 47 = 225,6 \text{ г/час} - \text{«влево»}$$

$$20 \cdot 0,3 \cdot 47 = 282 \text{ г/час} - \text{«прямо»}$$

$$5 \cdot 0,3 \cdot 31,4 = 47,1 \text{ г/час} - \text{«вправо»}$$

$$225,6 + 282 + 47,1 = 554,7 \text{ г/час} - \text{на перекрёстке за час}$$

$$554,7 \cdot 24 = 1332,8 \text{ г/сутки} - \text{на перекрёстке за сутки}$$

$$1332,8 \cdot 365 = 485917,2 \text{ г/год} = 485,9172 \text{ кг/год} - \text{на перекрёстке за}$$

год

2)СН – углеводород (раздражают глаза, слизистую и дыхательные пути, провоцируют головную боль, тошноту и рвоту).

$$16 \cdot 0,04 \cdot 47 + 20 \cdot 0,04 \cdot 47 + 5 \cdot 0,04 \cdot 31,4 = 0,04 \cdot (752 + 940 + 157) = 0,04 \cdot 1849 = 73,96 \text{ г/час} = 1775,04 \text{ г/сутки} = 647889,6 \text{ г/год} = 647,9 \text{ кг/год}.$$

3)NO_x – оксид азота (являются одними из наиболее токсичных компонентов, раздражающе воздействуют на слизистые оболочки глаз, носа, разрушают легкие человека).

$$16 \cdot 0,01 \cdot 47 + 20 \cdot 0,01 \cdot 47 + 5 \cdot 0,01 \cdot 31,4 = 0,01 \cdot (752 + 940 + 157) = 0,01 \cdot 1849 = 18,49 \text{ г/час} = 443,76 \text{ г/сутки} = 161972,4 \text{ г/год} = 161,97 \text{ кг/год}.$$

4)Сажа – аналогично оксиду углерода. 161,97 кг/год

5)SO₂ – диоксид серы (вызывает раздражение глаз и дыхательных путей, а также приводит к ухудшению функции лёгких).

$$16 \cdot 0,003 \cdot 47 + 20 \cdot 0,003 \cdot 47 + 5 \cdot 0,003 \cdot 31,4 = 0,003 \cdot (752 + 940 + 157) = 0,003 \cdot 1849 = 5,547 \text{ г/час} = 133,128 \text{ г/сутки} = 48591,72 \text{ г/год} = 48,59172 \text{ кг/год}.$$

б)Формальдегид (раздражающие вещества, которые вызывают кашель, зуд и жжение в глазах, головную боль и тошноту).

$$16 \cdot 0,0003 \cdot 47 + 20 \cdot 0,0003 \cdot 47 + 5 \cdot 0,0003 \cdot 31,4 = 0,0003 \cdot (752 + 940 + 157) = 0,0003 \cdot 1849 = 0,5547 \text{ г/час} = 13,3128 \text{ г/сутки} = 4859,172 \text{ г/год} = 4,859172 \text{ кг/год}.$$

Таблица 5

Выбросы загрязняющих веществ в зоне перекрёстка
при запрещающем сигнале светофора (в %)

СО	81%
СН	10,8%
NO _x	2,7%
сажа	2,7%
SO ₂	2,5%
формальдегид	0,2%
другие	0,1%

Вывод.

Был проведен анализ загрязнения приземного слоя атмосферы автомобильной дороги г. Владимира (перекресток ул.Мира – ул.Горького). Исследование показало наличие в воздухе исследуемого перекрестка повышение концентраций СО (оксида углерода) и СН (углеводорода).

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

После изучения курса необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Что такое интенсивность движения?
2. Как определяется расчётный период времени для её измерения?
3. От каких факторов зависит интенсивность движения?
4. Отличаются ли понятия «интенсивность движения» и «приведенная интенсивность движения»?
5. Что такое коэффициенты приведения?
6. С какой целью применяются коэффициенты приведения?
7. Что такое неравномерность движения транспортного потока?

Зачем введено такое понятие?

8. Что такое пропускная способность?
9. Для чего применяется коэффициент многополосности?
10. Что характеризует уровень загрузки?
11. При каком значении уровня загрузки наблюдается наиболее устойчивое по характеристикам движения состояние потока?
12. Что такое скорость движения?
13. Что такое крейсерская скорость?
14. Как влияют дорожные условия на скорость движения?
15. Какой закон распределения характеризует скорость свободного движения?
16. Что такое интенсивность движения пешеходного потока?
17. Что такое плотность пешеходного потока?
18. Какое значение плотности характеризует свободное условие движения?
19. Что такое скорость движения пешеходного потока?
20. Что такое продолжительность задержек?
21. Перечислите факторы, влияющие на организацию пешеходного движения.

Студентам можно предложить выполнить работы (реферат, доклад, курсовая работа и др.) на следующие темы:

- транспортный поток;
- пешеходный поток;
- математическое описание транспортного потока;
- пропускная способность дороги;
- исследование характеристик дорожного движения;
- классификация дорожно-транспортных происшествий;
- типы перекрестков;
- оптимизация скоростного потока;
- снижение уровня загрузки дорог;
- движение в темное время суток;
- движение в зимних условиях;
- организация движения при заторах транспортного потока;
- обеспечение безопасных дорожных условий;
- использование технологий интеллектуальных транспортных систем;
- анализ экологических оценок мероприятий по организации дорожного движения;
- влияние интенсивности движения автотранспорта на состояние атмосферного воздуха.

Студентам предлагается выбрать любой участок дороги любой протяженности и рассчитать интенсивность движения на этом участке дороги.

Пример расчета интенсивности движения автомобилей.

Интенсивность движения автомобилей – это важный показатель, который позволяет оценить количество автомобилей, проезжающих определенный участок дороги за определенное время. Расчет этого показателя позволяет определить нагрузку на дорогу и принять соответствующие меры для улучшения транспортной инфраструктуры.

Рассмотрим пример расчета интенсивности движения автомобилей на участке дороги протяженностью 2 километра. За 1 час на этом

участке проехало 200 автомобилей. Для расчета интенсивности необходимо разделить количество автомобилей на протяженность участка дороги и умножить на время наблюдения:

Интенсивность движения автомобилей = количество автомобилей / протяженность участка дороги * время наблюдения

В данном примере:

Количество автомобилей = 200

Протяженность участка дороги = 2 километр

Время наблюдения = 1 час

Подставляя значения в формулу, получаем:

Интенсивность движения автомобилей = $200 / 2 * 1 = 100$ автомобилей/км*ч

Таким образом, на данном участке дороги интенсивность движения автомобилей составляет 100 автомобилей на 1 километр в час.

Возможно выполнение студентами следующей лабораторной работы по исследованию интенсивности движения.

Лабораторная работа

Тема. Исследование интенсивности движения с учетом состава транспортного потока

Цель: изучить методику обследования интенсивности движения.
Оборудование: секундомер, видеорегистратор, курвиметр, лазерный дальномер.

Ход выполнения работы

- 1 Определение участка улично-дорожной сети, на котором будет производиться обследование
- 2 Исследование теоретической части по данной теме обследования.
- 3 Проведение обследования.
- 4 Заполнение отчета (таблицы, графики и т.д.)
- 5 Анализ полученных результатов. Формулирование выводов.

Теоретическая часть

Для исследования движения транспортных средств и объективного анализа получаемых результатов необходимо располагать достаточно полными данными о дорожных условиях улично-дорожной сети. Собирая информацию о состоянии дорожного движения нужно учитывать характеристики транспортного потока.

Основным характеристикам транспортного потока являются:

- интенсивность транспортного потока (интенсивность движения) N_a – это число транспортных средств, проезжающих через сечение дороги за единицу времени. В качестве расчетного периода времени для определения интенсивности движения принимают год, месяц, сутки, час и более короткие промежутки времени (минуты, секунды) в зависимости от поставленной задачи наблюдения и средств измерения;

- неравномерность транспортных потоков во времени (в течение года, месяца, суток и даже часа) имеет важнейшее значение в проблеме организации движения, характеризуется распределением значений интенсивности на исследуемом участке за определённый период;

- состав транспортного потока характеризуется соотношением в нем транспортных средств различного типа. Состав транспортного потока влияет на загрузку дорог (стеснённость движения), что объясняется, прежде всего, существенной разницей в габаритных размерах автомобиля.

Кривые неравномерности движения позволяют выделить так называемые «часы пик», в которые возникают наиболее сложные задачи организации и регулирования движения.

Термин «час пик» является условным и объясняется лишь тем, что час является основной единицей измерения времени. Продолжительность наибольшей интенсивности движения может быть больше или меньше часа. Поэтому наиболее точным будет понятие пиковый период, под которым подразумевают время, в течение которого интенсивность, измеренная по малым отрезкам времени (например, по 15-минутным наблюдениям), превышает среднюю интенсивность периода наиболее оживленного движения.

Временная неравномерность транспортных потоков может быть охарактеризована соответствующим коэффициентом неравномерности K_n . Этот коэффициент может быть вычислен для годовой, суточной и часовой неравномерностей движения. Неравномерность может быть выражена как доля интенсивности движения, приходящейся на данный отрезок времени, либо как отношение наблюдаемой интенсивности к средней за одинаковые промежутки времени.

Стационарный пост наблюдения может дать информацию об интенсивности и составе транспортного потока по типам транспортных средств. В простейшем случае наблюдатели регистрируют проезд каждой транспортной единицы условным знаком в бланке протокола. Изучать движение на стационарных постах можно сплошным или выборочным наблюдением. При сплошном наблюдении фиксируют каждое транспортное средство, проходящее через контролируемое сечение в течение изучаемого периода времени. При выборочном исследовании интенсивности движения транспортные средства регистрируют не непрерывно, а в отдельные периоды времени.

Методические указания

Подсчет интенсивности движения производится на участке улицы на расстоянии не менее 100 м от пересечений и примыканий. В процессе проведения натуральных наблюдений студенту необходимо строго соблюдать правила техники безопасности.

Для обследования интенсивности движения на участке УДС необходимо вычертить схему участка, с указанием геометрических размеров (ширина дороги, количество полос). Технические средства организации движения (знаки, светофоры, разметка и др.) допускаются представлять условными обозначениями.

В качестве расчетного периода времени для определения интенсивности движения в лабораторной работе принимается 1 ч. Исследование интенсивности движения транспортных средств проводится выборочным наблюдением, при этом транспортные средства регистрируются в течение 15 мин каждого часа рабочего дня недели (понедельник-пятница) в трех временных отрезках:

1) с 12.00 до 14.00; 2) с 15.00 до 17.00; 3) с 18.00 до 20.00.

Затем полученные данные распространяются на весь час. Проезжающие транспортные средства заносятся в протокол (таблица 6). С целью изучения структуры транспортного потока результаты наблюдений заносят в таблицу 7.

Таблица 6 – Бланк учета транспортных средств

Интервал наблюдения	Количество транспортных средств по типу, ед.					
	легковые автомобили	грузовые автомобили грузоподъемностью до 2 т	грузовые автомобили грузоподъемностью свыше 2 т	автобусы малой вместимости	автобусы средней вместимости	троллейбусы
13.15...13.30 (четная сторона улицы)						
13.15...13.30 (нечетная сторона улицы)						
15.15...15.30 (четная сторона улицы)						
15.15...15.30 (нечетная сторона улицы)						
18.15...18.30 (четная сторона улицы)						
18.15...18.30 (нечетная сторона улицы)						

Таблица 7 - Состав транспортного потока на участке УДС

Тип транспортных средств	Количество, ед.	Процентное отношение, %
Легковые автомобили		
Грузовые автомобили		
Автобусы и троллейбусы		
Всего		100

Приведенная интенсивность движения определяется по формуле:

$$N_{\text{ПР}(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n 4 \cdot N_i \cdot K_i}{k_{\text{ч}}}$$

где $N_{\text{ПР}(t)}$ - приведенная интенсивность за рассматриваемый промежуток времени, усл.ед/ч;

N_i - интенсивность движения соответствующего типа ТС за рассматриваемый промежуток времени (15 мин), ед/ч;

n – количество типов транспортных средств в исследовании;

K_i - коэффициент приведения соответствующего типа ТС к легковому автомобилю;

$k_{\text{ч}}$ - коэффициент часовой неравномерности, $k_{\text{ч}} = 0,92$.

Полученные результаты подсчетов приводятся к одному условному автомобилю. В лабораторной работе следует принимать коэффициенты приведения по типам транспортных средств, представленные в таблице 8.

Таблица 8 - Интенсивность движения транспортных средств
на участке УДС

Интервал наблюдения	Приведенная интенсивность движения транспортных средств, усл.ед./ч.						
	легковые автомобили	грузовые автомобили грузоподъемностью до 2 т	грузовые автомобили грузоподъемностью свыше 2 т	автобусы малой вместимости	автобусы средней вместимости	Троллей-бусы	Всего
	Коэффициент приведения						
	1,0	1,3	2,2	1,4	2,5	4,6	
13.00...14.00 (четная сторона улицы)							
13.00...14.00 (нечетная сторона улицы)							
Итого							
15.00...16.00 (четная сторона улицы)							
15.00...16.00 (нечетная сторона улицы)							
Итого							
18.00...19.00 (четная сторона улицы)							
18.00...19.00 (нечетная сторона улицы)							
Итого							

Контрольные вопросы

1. Что такое интенсивность движения?
2. Отличаются ли понятия «интенсивность движения» и «приведенная интенсивность движения»?
3. Что такое коэффициенты приведения?
4. С какой целью применяются коэффициенты приведения?
5. Что такое неравномерность движения транспортного потока?
6. Зачем определяют структуру транспортного потока?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тема, рассмотренная в пособии, с каждым годом становится всё более актуальной в связи с увеличением автомобильного транспорта на дорогах, а значит и повышением плотности потоков, особенно в «час пик».

Дальнейшее развитие в области математического моделирования транспортных потоков и его применение приведет к заметному улучшению дорожной ситуации.

Научные методы позволят не только повысить качество планирования строительства городских дорог и магистралей, но и улучшить жизнь каждого из нас.

В заключение хочется отметить, что важность использования транспортных моделей на практике неуклонно растет с каждым годом. Современные реалии требуют системного подхода к процессу транспортного планирования и более согласованного взаимодействия различных структур при выработке и реализации транспортных решений. Постоянное повышение сложности и комплексности транспортных систем, особенно в крупных городах и мегаполисах, масштабность возникающих перед менеджерами и проектировщиками задач, необходимость взаимосвязанного учета колоссального количества факторов – все это обуславливает переход на новые методы транспортного планирования с применением компьютерных транспортных моделей и комплексной оценки последствий мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/22-odm-2182020-2012.pdf>.
2. Организация дорожного движения на перекрестке [Электронный ресурс]. – URL: https://studbooks.net/2194801/tehnika/metodika_issledovaniya_intensivnosti_dvizheniya_sostava_transportnogo_potoka_perekrestke.
3. Задержки на нерегулируемых перекрестках [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/6758013/>.
4. Расчет пропускной способности перекрестка [Электронный ресурс]. – URL: <https://studentopedia.ru/tehnika/raschet-propusknoj-sposobnosti-perekrestka-primenenie-informacionnih-tehnologij-dlya-ocenki.html>.
5. Организация дорожного движения на перекрестке [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=869940>.
6. Расчет пропускной способности транспортного потока на перекрестке [Электронный ресурс]. – URL: <https://vunivere.ru/work24363>.
7. Математические модели транспортных потоков [Электронный ресурс]. – URL: <http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/28331/2/2.pdf>.
8. Обзор математических методов, описывающих движения транспортных потоков [Электронный ресурс]. – URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18368>.
9. Куликов Д. В. Задачи математического моделирования транспортных потоков мегаполиса [Электронный ресурс]. – URL: <https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/12354/1/KulikovMagisterDissertation2018.pdf>.
10. Моделирование транспортных потоков [Электронный ресурс]. – URL: https://de.donstu.ru/CDOCourses/structure/_new_/201696/5459/5024.pdf.

11. Стрельников А. В. Обзор математических методов, описывающих движения транспортных потоков // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 3 – 4.

12. Кокурина Ю.К. Задача коммивояжера // Актуальные проблемы эксплуатации автомобильных средств : материалы XXIV Международ. науч.-практ. конф. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. с.167-171

13. Кокурина Ю.К., Кокурин Н.С. Решение транспортной задачи методом минимальной стоимости. //Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств : материалы XXV Международ. науч.-практ. конф., посвящ. памяти проф. Игоря Николаевича Аринина 23 – 24 нояб. 2023 г. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023, - с.46-50.

14. Латышев М. В., Кокурина Ю. К. Представление распределения скоростей автомобилей в транспортном потоке // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств : материалы XXV Международ. науч.-практ. конф., посвящ. памяти проф. Игоря Николаевича Аринина. 23 – 24 нояб. 2023 г. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – с.56-59.

Учебное электронное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПИСАНИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Учебное пособие

Автор-составитель
КОКУРИНА Юлия Камильевна

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;
Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

Тираж 9 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Институт информационных технологий и электроники
kokurina.1978@mail.ru