

## ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 656.051

DOI: 10.30977/АТ.2219-8342.2020.46.0.47

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО АВТОТРАНСПОРТА  
В ГОРОДСКИХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ЗАДЕРЖЕК НА ПЕРЕКРЕСТКАХБу Д. М.<sup>1</sup>, Горбачёв П. Ф.<sup>1</sup>, Колий А. С.<sup>1</sup>, Свичинский С. В.<sup>1</sup>,<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

**Аннотация.** Рассматривается новый подход к распределению транспортных потоков на улично-дорожных сетях городов, основанный на оценке времени задержек транспортных средств на перекрестках. Обосновывается целесообразность использования функции Р. Акселика при оценке времени задержки и приводятся практически приемлемые значения ее калибровочных параметров в программе VISUM.

**Ключевые слова:** транспортный поток, скорость движения, интенсивность движения, регулируемый перекрёсток, VD функция, транспортная модель, VISUM.

**Введение**

Распределение транспортных потоков (ТП) является последним этапом в общепринятой четырёхэтапной процедуре транспортного моделирования территорий [1]. В результате распределения разработчик модели получает значения интенсивностей ТП на элементах транспортной сети, которые используются для оценки точности моделирования и настройки модели. На этом этапе транспортного моделирования часто возникают проблемы, обусловленные недостаточной точностью модели и потребностью ее калибровки.

Причины, вызывающие расхождения фактических и расчётных интенсивностей ТП, существуют на всех этапах моделирования, начиная со сбора исходных данных, и обусловлены случайной природой самого транспортного процесса и величин, его определяющих. Однако этап распределения потоков является самым настраиваемым с точки зрения возможности воздействия на результаты моделирования, и методика его выполнения требует особого внимания. В связи с этим совершенствование существующих подходов к моделированию транспортных потоков на городских улично-дорожных сетях (УДС) является актуальной задачей.

**Анализ публикаций**

При глубоком изучении особенностей выполнения этапа распределения ТП по УДС некоторые из них вызывают сомнения в своей справедливости и при этом создают резервы для существенного повышения точно-

сти моделирования движения индивидуального транспорта (ИТ). Основной такой особенностью является используемая для проведения расчётов информационная основа – пропускная способность (ПС) участков УДС. В описаниях существующих методик отличаются только используемые в них стратегии распределения ТП [2–4], все они при этом используют для расчётов ПС участков УДС.

В работе [2] описывается специальное программное обеспечение, разработанное американскими учёными для решения рассматриваемой задачи. В диссертации [2] автором предлагается собственный метод распределения ТП, основанный на имитации поведения водителей. Обширный обзор [3] описывает большинство известных подходов к распределению ТП, используемых в настоящее время. При этом, несмотря на разнообразие подходов в упомянутых работах, расчётной основой описанных в них процедур всегда является ПС участков УДС.

Такая постановка вопроса является общепринятой, не вызывает сомнений у транспортных инженеров и в последних исследованиях, в частности в работе [5] её значимость и приоритетность даже усиливаются. Так, в указанной работе выделяются два недостатка методики равновесного распределения потоков на основе принципа Вардропы, обусловленных интеграцией отдельных участков УДС в альтернативные пути, и предлагается получать характеристики альтернативных маршрутов, основываясь на времени проезда каждого участка.

Время проезда участков УДС во всех упомянутых работах определяется в зависимости от степени их загрузки, т.е. близости интенсивности ТП на участке к его ПС. При этом используются самые разные модели, но отношение интенсивности ТП на участке к его ПС везде является носителем информации для расчёта времени проезда участка. Главной проблемой такого подхода является недостаточный уровень обоснования значений ПС одной полосы движения, из которых формируется ПС всего участка.

В одном из наиболее известных методических документов по управлению ТП – Highway Capacity Manual (НСМ) 2000 [6] – приводится такое определение: «Пропускная способность участка – это пропускная способность самой ограниченной точки на нём». И тут же делается вполне резонное утверждение, что если на участке сети находятся регулируемые перекрёстки (РП) или он ими заканчивается, то ПС участка обычно определяется РП с наименьшей ПС по направлению данного участка. Далее, в методике оценки уровня обслуживания (Level of Service) ИТ, сводящейся к определению средней скорости движения (СД) по участку, делается упор на особом влиянии РП, их количества и параметров работы на скорость движения ТП по участку. Порядок расчёта СД на участке предполагает оценку времени его свободного преодоления и времени задержки автомобилей на РП [6]. Тут следует отметить, что документы, подобные НСМ 2000 [6], разработаны во многих странах и это даёт возможность утверждать, что они являются основополагающими в своей сфере.

Описанный подход к определению уровня обслуживания на городских улицах охватывает практически все их основные типы. Он никак не учитывает пропускной способности полосы движения, а опирается на характеристики РП, которые на них находятся. Также в нем предполагается равное количество полос на участках сети и на перекрёстках, что соответствует реальным условиям на подавляющем большинстве РП в городах. Недостатком такого подхода, для использования в транспортном моделировании, может считаться разве что относительная сложность расчёта задержки ТП на РП при неизвестной загрузке перекрёстка.

Понятие ПС участка дороги появляется в [6] только в разделе с описанием 4-полосных скоростных магистралей, для которых значение ПС задаётся равным 1700 авт./час в од-

ном направлении и 3200 авт./час для обоих направлений движения. Однако вряд ли эти значения могут служить хорошей основой для задания значений ПС одной полосы движения (850 авт./час) или участка в целом для городских условий. В том же руководстве приводятся зафиксированные в ходе натурных обследований фактической интенсивности ТП на таком же типе магистралей, превышающие 2600 авт./час на одну полосу, т.е. больше чем в три раза превышающие значения, заданные как ПС. Такое превышение никак не должно возникать, исходя из самого понятия ПС как параметра обслуживания, выполняющего роль ограничения на максимально возможное значение такой характеристики ТП, как его интенсивность. Необходимо либо уточнять рекомендованные значения ПС, либо уточнять само понятие, вводя дополнительные условия ее определения.

Несмотря на такую неопределённость, большинство существующих методов распределения ТП в расчётах опираются именно на ПС полосы движения или поворотов, а не на характеристики РП. В руководстве к наиболее распространённому в мире программному обеспечению по моделированию транспортных сетей VISUM [7] прямо указывается, что время в пути для ИТ определяется степенью насыщения отрезков и поворотов, которая зависит от интенсивности движения (traffic volume) и ПС этих объектов сети. Для расчёта этого времени используется целый набор предопределённых VD функций (Volume-Delay Functions), увеличивающих так называемое начальное время проезда объекта сети при приближении интенсивности потока к ПС. Разница между участками и поворотами состоит в том, что в VISUM последние не имеют такой характеристики, как длина, а так как в качестве начального времени для участка принимается время его проезда в свободных условиях, для расчёта времени проезда поворотов в качестве начального времени необходимо назначать какой-то «штраф». Никаких указаний на возможную величину этого штрафа руководство к VISUM не даёт.

В конечном счёте, VISUM предоставляет весьма обширные возможности для реализации подходов к расчёту времени задержек, основываясь на параметрах как участков УДС, так и регулируемых пересечений. Однако он не даёт указаний к тому, какой способ расчёта является предпочтительным, и поэтому основным, используемым на сего-

дняшний день способом оценки времени проезда в моделях городских УДС является определение времени проезда участков в зависимости от ТП на них. При расхождении расчётных ТП с их реальными значениями, модель калибруется, используя параметры VD функций участков УДС. Так случилось, по-видимому, из-за большей простоты задания ПС для участков и отсутствием всем понятного методического обеспечения для расчёта времени поездки на основе задержек на перекрёстках.

Обоснованность применения такого подхода в городских условиях вызывает серьёзные сомнения, что вызывает необходимость внимательного изучения его возможностей по сравнению с возможностями подхода, основанного на оценке задержек ТП на перекрёстках.

#### Цель и постановка задачи

Особенностью всех транспортных моделей является описание участков УДС с помощью отрезков (ребер), обязательно соединяющих между собой два узла (вершины). В модели узлы являются объектами, связанными с отрезками, но имеющими своё собственное предназначение и свой набор характеристик. Отрезки в модели не могут быть определены без узлов, а узлы не имеют смысла, если ими не начинается или не заканчивается хотя бы один отрезок.

Этими особенностями транспортные модели отличаются от shape-файлов, в которых точки (мультиточки) и линии (полилинии) являются самостоятельными объектами [8]. Это обусловлено более общим характером геоинформационных систем, в которых используются shape-файлы, а практика извлечения данных из таких файлов для транспортных расчётов является только частным случаем их применения.

В транспортных моделях узлы в основном используются для описания перекрёстков, на которых происходят кардинальные изменения условий движения по пересекающимся участкам УДС. Однако узлы нужно использовать и там, где изменяется количество (ширина) полос на участке УДС, дорожное покрытие или максимально разрешённая скорость движения. При построении детальной модели ими, например, можно описывать места прохождения пешеходных переходов через улицу или места установки устройств принудительного снижения скорости. Список объектов, которые могут быть

описаны с помощью узлов, можно продолжать и дальше, но правильнее сформулировать их предназначение таким образом: узлами в транспортной модели описываются все точки на УДС, в которых изменяются условия движения по участкам.

Из того, что все места изменения условий движения по участкам описываются узлами, следует, что отрезки в транспортной модели описывают исключительно участки, имеющие одинаковые характеристики по всей их длине. Это утверждение, несмотря на категоричность, не должно вызывать сомнений в своей справедливости, так как предлагаемый разработчиками программного обеспечения перечень характеристик отрезка в модели предполагает задание ровно одного значения для каждой из них. Такая степень формализации абсолютно необходима для создания модели, и вопрос состоит только в предлагаемых разработчиками возможностях в плане детализации, при описании реальной УДС. Но, вне зависимости от неё, в любой транспортной модели все участки будут однородными по перечню своих характеристик.

И в этой однородности состоит отличие понятия участка в транспортной модели от понятия участка городской улицы, используемого в [6] при оценке уровня обслуживания, которое ближе к понятию полилинии в shape-файле. Участки городских улиц в [6] ограничены снизу по длине – они должны быть не короче 1,5 км в центральной части городов и 3 км на периферии. На таких участках может быть много мест с изменяющимися условиями движения. Возможно, что эта разница в понятиях внесла определённый вклад в то, что методика оценки уровня обслуживания в НСМ [6] получила весьма ограниченное использование при оценке времени проезда по участкам УДС в широко распространённых программах для транспортного моделирования.

Чёткое определение отрезка в транспортной модели, однако, позволяет упростить методику НСМ, поскольку в модели количество пересечений на отрезках теперь не может быть больше двух: одного в начале отрезка и другого – в конце. При этом в соответствии с определением [6] ПС участка определяется пропускной способностью регулируемых перекрёстков на нём. ПС РП при одинаковом количестве полос на участке и перекрестке всегда будет заведомо ниже, чем на участке УДС за счёт возникающих на перекрёстке ограничений по времени его ис-

пользования для конкурирующих потоков участников движения. Таким образом, если надлежащим образом описать задержки на перекрёстке, то исключается необходимость задавать ограничения по ПС отрезков, так как она будет всегда больше ПС соответствующих узлов.

Низкая скорость транспортных средств (ТС) на участках УДС, не имеющих ограничений по условиям движения, всегда обусловлена наличием каких-то препятствий впереди по направлению движения ТП. Такое явление, по сути, можно рассматривать как продвижение в очереди к «узкому» месту УДС, которое в транспортной модели описывается с помощью узла. В этом случае снижение скорости, на самом деле, вызывается необходимостью дождаться возможности преодоления узкого места, а не свойствами участка, на котором наблюдается снижение скорости. Количественно этот процесс характеризуется временем задержки в узком месте.

Как альтернативу стандартному подходу к распределению ТП на основе ПС участков (в дальнейшем «стандартный подход») необходимо разработать новый подход, основанный на оценке задержек ТП на перекрёстках (в дальнейшем «новый подход») и оценить целесообразность или предпочтительность их использования при транспортном моделировании городских систем индивидуального транспорта.

В связи с этим, целью данной работы является сравнительная характеристика двух альтернативных вариантов моделирования ТП ИТ в городе. Критерием оценки эффективности альтернатив должна стать точность описания расчётными ТП их фактических значений. Ограничением на условия решения задачи должно выступить соответствие всех характеристик моделируемого транспортного процесса их реальным значениям на УДС. В первую очередь, это касается времени поездок и скорости движения по сети.

Для достижения цели вначале необходимо из множества альтернативных вариантов проведения расчётов, предлагаемых программным обеспечением, выделить конкретные инструменты, в наибольшей степени раскрывающие особенности каждого способа проведения расчётов и обеспечивающие соответствие реальному объекту. Также необходимо обосновать значения всех параметров моделей, которые необходимо использовать в процедуре распределения ТП.

Сравнение альтернативных подходов к моделированию следует проводить на модели реальной транспортной сети. Это необходимо для обеспечения возможности сравнения расчётных ТП с их фактическими значениями и гарантирует близость решаемой теоретической задачи к проблемам, возникающим в ходе решения практических задач моделирования.

Новый подход – на основе задержек на РП – целесообразно реализовывать, опираясь на характеристики таких элементов модели сети, как повороты, которые характеризуются направлением и задержками при их преодолении, возникающими на РП для разных направлений движения.

Узлы сети целесообразно использовать для создания «сопротивления» движению на нерегулируемых пересечениях с заданным приоритетом проезда или без него. Такие перекрёстки с транспортной точки зрения являются самой ненагруженной движением частью УДС в городах, но они существуют в любой сети и требуют такого же внимания, как и РП.

#### **Обоснование инструментария моделирования транспортных потоков в программной среде VISUM**

VISUM является общепризнанным и наиболее распространённым в мире инструментом транспортного моделирования. Он предоставляет транспортным инженерам широкие возможности для описания реальных транспортных объектов. Распределение транспортных потоков в нём реализуется с помощью процедуры перераспределения [7], служащей, помимо прочего, для определения и анализа транспортного предложения. Перераспределение помогает рассчитывать нагрузку объектов сети и параметры для оценки качества сообщения между транспортными районами. В нём моделируются пассажирские поездки, при которых пользователь индивидуального транспорта выбирает маршрут, т.е. набор отрезков, наиболее удобных для реализации цели изменения месторасположения [7].

Процедура перераспределения основывается на различных алгоритмах, которые определяют маршруты, основываясь на таких параметрах, как время, расстояние и стоимость поездки. Конечным результатом перераспределения являются значения нагрузки на объектах сети – узлах, отрезках, примыка-

ниях, поворотах [7]. В VISUM доступен ряд процедур перераспределения, рис. 1.

Процедура последовательного перераспределения моделирует постепенное, итеративное «наполнение» улично-дорожной сети. Вначале участники транспортного движения наполняют свободную дорожную сеть, в которой для каждой корреспонденции существует только один – самый короткий путь. Каждая итерация нагружает УДС дополнительными транспортными средствами и таким образом увеличивает сопротивление на отрезках и поворотах. Измененное сопротивление влияет на выбор кратчайшего пути на следующей итерации. Основными недостатками процедуры являются значительное влияние на результаты моделирования количества и величины долей, на которые делится матрица корреспонденций, а также окончание расчетов после заданного количества итераций вне зависимости от соответствия между достигнутой нагрузкой и сопротивлением на отрезках [7].

Постепенно
Равновесие
Обучающая процедура
МультиПоследовательность
МультиРавновесие
МультиОбучающая процедура
Стохастический
Дин-Стохастическое
Tribut
Обучающая процедура Tribut

Рис. 1. Альтернативные процедуры перераспределения в VISUM

Процедура равновесного перераспределения разделяет транспортный спрос в соответствии с первым принципом Вардропы [9]: «Каждый отдельный участник транспортного движения выбирает свой маршрут так, что сопротивление на альтернативных путях, в конечном счёте, равно и каждая смена пути на какой-либо другой увеличивает личное время в пути». Исходя из последовательного перераспределения потоков как начального решения, создается равновесное состояние в многоступенчатой итерации. Во внутреннем шаге итерации альтернативные пути для одной корреспонденции приводятся в равновесие. В наружном шаге итерации проверяется, есть ли при новом актуальном состоянии сети новые пути с меньшим сопротивлением. Так как выполнение процедуры завершается только тогда, когда все пути отдельных корреспонденций находятся в состоянии равновесия, авторы утверждают, что её результаты ближе к действительности, чем при последовательном перераспределении [7].

Обучающая процедура отображает процесс «обучения» участников транспортного движения во время перемещения по сети. Исходя из принципа «всё или ничего», водители учитывают информацию последней поездки для нового поиска путей. При этом сопротивление для поиска путей выводится из сопротивления при актуальной интенсивности движения и из сопротивления, рассчитанного на предыдущей итерации. Утверждается, что при достаточном количестве итераций метод дает близкие к действительности, стабильные результаты, но требует, как правило, большего количества поисков пути, чем процедура равновесного перераспределения [7].

В стохастическом перераспределении для каждой корреспонденции создаются альтернативы путей при изменении сопротивления объектов сети согласно распределению ТП. Таким образом, учитывается неполная информированность участников движения о дорожной обстановке, ее индивидуальное восприятие и предпочтения. В результате в одном шаге итерации можно определить не только самый короткий путь, но и альтернативные пути с более высокими сопротивлениями. После поиска пути спрос распределяется по альтернативам согласно модели разделения. В отличие от равновесного, в стохастическом перераспределении нагружается больше путей уже в слабо нагруженной сети, так как, согласно модели разделения, небольшая часть спроса переходит на второстепенные пути. Считается, что реальность здесь отображается в большей степени, чем при применении принципа Вардропы [7].

Процедуры мультиперераспределений могут моделировать ТП для нескольких сегментов спроса одновременно [7]. Для решаемой в данной статье задачи, в которой рассматривается только один сегмент транспорта – ИТ, их использование нецелесообразно.

Процедура TRIBUT предназначена для учёта сборов за проезд по платным дорогам и, в отличие от классического подхода, использует случайную значимость времени в пути. Этот подход является более реалистичным в плане гибкости цен при использовании платных дорог, но для рассматриваемого случая интереса не представляет.

Динамическое стохастическое перераспределение отличается от всех других процедур перераспределения ИТ точным моделированием времени, от которого зависит осуществление поездок в сети. В динамиче-

ском перераспределении задается полный диапазон времени перераспределения, который разделяется на интервалы одинаковой длины, например, 15-минутные. Поиск альтернативных путей для каждой корреспонденции производится независимо от конкретного момента перераспределения. Как и при статическом стохастическом перераспределении, проводятся несколько поисков кратчайшего пути со случайно варьируемыми сопротивлениями элементов сети. Все последующие действия зависят от времени. Для каждого интервала времени из всего спроса определяется доля и момент желаемого времени отправления. Со стороны предложения транспортных услуг на выбор предоставляются пары «отправление – прибытие» (сообщения), состоящие из пути и интервала времени отправления. Сопротивление сообщения состоит из его сопротивления в сети и разницы между фактическим и желаемым интервалом времени отправления. При определении сопротивления для каждого элемента сети сохраняется нагрузка и, в зависимости от степени нагрузки, время в пути отдельно для каждого интервала времени [7]. Такое усложнение процедуры обусловлено желанием разработчиков повысить точность результатов моделирования, однако целесообразность её использования для непродолжительных по времени пиковых периодов вызывает сомнения.

Все вышеописанные процедуры предполагают поиск кратчайшего по величине сопротивления пути и последующую нагрузку путей для всех пар «отправление – прибытие» (транспортных районов). Однако количество альтернативных путей между пунктами отправления и прибытий и распределение транспортного спроса между ними в процедурах определяется по-разному.

В последовательном распределении определяется единственный кратчайший путь на каждой итерации расчета и нагружается в соответствии с долей спроса, приходящегося на данную итерацию.

В процедуре равновесного перераспределения помимо поиска кратчайшего пути происходит уравнивание сопротивления найденных путей за счет итеративного изменения нагрузки путей с минимальным и максимальным сопротивлениями. В обучающей процедуре также осуществляется уравнивание найденных путей, однако их сопротивление на каждой следующей итерации

зависит от сопротивления, порожденного нагрузкой на предыдущей итерации.

Стохастическое перераспределение предполагает определение кратчайшего и ближайших к нему путей с последующим разделением спроса между ними на основе моделей выбора – логит-модели, преобразования Бокса-Кокса, моделей Кирхгофа и Лозе. Сопротивление пути в этом случае преобразуется в его полезность с последующим применением одноименной теории.

Процедура TRIBUT в разделении спроса схожа с последовательным и равновесным перераспределением, однако при расчете сопротивления позволяет учесть величину сбора за пользование платными дорогами.

В динамическом стохастическом перераспределении величина нагрузки на путь также, как и в (статическом) стохастическом, определяется на основе моделей выбора (логит, Бокса-Кокса, Кирхгофа, Лозе), однако в определении сопротивления путей (их полезности) учитывается время начала поездки участника движения.

Подводя итоги изучения особенностей процедур перераспределения ТП, доступных в VISUM, можно заключить, что для дальнейшего использования в эксперименте, наиболее подходящими являются базовые односегментные процедуры последовательного, равновесного и обучающего перераспределений. Они являются относительно простыми, что дает возможность рассчитывать на понимание полученных результатов. Кроме того, потенциально они гораздо более чувствительны ко времени проезда ТС по элементам сети, чем сложные процедуры, что является очевидным преимуществом в случае сравнительной характеристики стандартного и нового подходов к расчету этого времени и распределению ТП на его основе. При этом анализ приведенных основ, на которых построены процедуры, позволяет утверждать, что наиболее чувствительным к времени проезда является последовательное перераспределение.

Касательно основы расчетов для процедуры перераспределения – сопротивления пути – следует отметить, что основными его компонентами являются сопротивление отрезков и сопротивление поворотов, которыми в модели описываются направления движения на перекрестках (узлах) [7]. Для ИТ сопротивление отрезков и поворотов в VISUM определяется временем их проезда, зависящим от времени проезда в свободном

ТП и соотношения между интенсивностью движения транспорта и пропускной способностью объекта сети. В расчет сопротивления может быть включена величина сбора за пользование платными дорогами и тогда сопротивление пути может быть рассчитано на основе времени проезда и стоимости времени функционирования того или иного вида ИТ (Value of Time) и выражено в денежных единицах [7].

Таким образом, следующим элементом модели, определяющим результаты перераспределения, является сопротивление пути, т.е. регулируемая пользователем комбинация различных параметров. В данном случае, когда рассматривается распределение исключительно индивидуального транспорта в УДС без платных участков, единственным элементом сопротивления должно выступать время поездки.

Время поездки, под которым в модели подразумевается более общее понятие – время преодоления объектов сети, рассчитывается на основе VD функций. Как было описано в обзоре литературных источников, они служат для учёта того обстоятельства, что с растущей интенсивностью движения увеличивается время поездки (сопротивление) на объектах сети. Все VD функции основываются на предположении, что время движения на объекте сети является монотонно растущей функцией от нагрузки на объект сети (интенсивности движения) [7].

VISUM предлагает пользователям идентичные наборы VD функций для всех объектов сети, в том числе отрезков и поворотов:

- BPR (Bureau of Public Roads) № 1, 2, 3;
- CONICAL and CONICAL MARGINAL;
- EXPONENTIAL;
- INRETS;
- LOGISTIC;
- QUADRATIC;
- SIGMODAL № 1, 2;
- AKCELIK № 1, 2;
- LOHSE;
- LINEAR BOTTLENECK.

Все функции используют одни и те же исходные данные, основными из которых являются время преодоления объекта без нагрузки, пропускная способность и текущая нагрузка на него. Они также содержат три калибровочные параметры –  $a$ ,  $b$  и  $c$ , которые в разных функциях принимают разный физический смысл.

Следует отметить, что большая часть этих функций имеет априорный характер и не

основывается на каких-либо серьёзных исследованиях. Их задача – обеспечить транспортному инженеру как можно большими возможностями для повышения точности описания реальных ТП путем подбора наиболее подходящей функции и ее параметров.

Однако такой уровень формализации не выглядит убедительным при решении научных задач. Поэтому для проведения экспериментальных исследований целесообразно выбрать функцию, которая является результатом исследования реальных процессов задержки ТС на перекрестках. Из приведенного списка этому требованию соответствует VD функция Р. Акселика, которая в интерфейсе VISUM имеет название AKCELIK [10]. Она была получена на основе общепринятой, для ненагруженных условий работы РП формулы Ф. Вебстера

$$t_d = \frac{T(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{T}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)}, \quad (1)$$

где  $t_d$  – средняя задержка одного автомобиля на отдельном подъезде к перекрестку, с;  $T$  – продолжительность светофорного цикла, с;  $\lambda$  – доля разрешающего сигнала для данного направления движения в светофорном цикле  $\lambda = T_p / T$ ;  $T_p$  – продолжительность разрешительной фазы для выбранного направления в светофорном цикле, с;  $x$  – удельная нагрузка на полосу движения (степень насыщения),  $x = q / \lambda s$ ;  $q$  – интенсивность транспортного потока в данном направлении движения, с<sup>-1</sup>;  $s$  – поток насыщения (интенсивность разъезда автомобилей при разрешающем сигнале светофора), с<sup>-1</sup> [11].

Первое слагаемое в формуле (1) называется равномерной задержкой (uniform delay), второе слагаемое – переполнением, третье имеет корректировочный характер и обычно заменяется множителем 0,9 перед двумя первыми слагаемыми.

Основным недостатком формулы Вебстера считается ограниченный диапазон нагрузки на направление, обычно  $x < 0,9$ , в котором она даёт приемлемые оценки времени задержки.

Формула Акселика является одним из примеров ухода от этого недостатка. Она получена как приближение к формуле А. Миллера [12] и имеет такой вид:

$$t_d = \frac{T(1-\lambda)^2}{2\left(1-\lambda\frac{x}{c}\right)} + 900a \left[ \left(\frac{x}{c}-1\right) + \sqrt{\left(\frac{x}{c}-1\right)^2 + \frac{8bx}{dac}} \right], \quad (2)$$

где  $a$  – продолжительность рассматриваемого периода функционирования УДС, ч;  $b$  – калибровочный параметр (family parameter);  $c$  – калибровочный параметр, корректирующий ПС полосы движения;  $d$  – пропускная способность полосы движения, ед./ч.

Формула (2) имеет широкое практическое применение, так как реализована в программном обеспечении SIDRA (Signalized Intersection Design and Research Aid), которое создано и развивается Австралийским исследовательским центром автомобильных дорог [13]. Методика расчета задержек на ее основе, как и программное обеспечение, являются частью Австралийского руководства по управлению дорожным движением [14], выпускаемого государственным агентством Austroroad.

Ещё одним аргументом в пользу использования формулы (2) является её общность с аналогичными оценками времени задержки на РП в американском [6] и канадском руководствах по управлению дорожным движением [15]. Они построены на одной основе, предназначены для достижения одних целей, дают схожие результаты и, больше того, имеют общую для всех форму расчета [10]. Перечисленные издания [6, 14, 15] являются наиболее авторитетными методическими указаниями по управлению дорожным движением, а национальные стандарты в других странах по большей части схожи с упомянутыми. Поэтому выбор формулы (2) для сравнительного анализа альтернативных подходов к перераспределению ТП по сети практически полностью отражает существующие подходы к оценке задержек на РП.

В VISUM зависимость (2) несколько модифицирована и используется в виде

$$t_d = t_0 + \frac{3600}{4} \cdot a \times \left[ (\text{sat} - 1) + \sqrt{(\text{sat} - 1)^2 + \frac{8 \cdot b \cdot \text{sat}}{d \cdot a}} \right], \quad (3)$$

$$\text{sat} = \frac{q}{d \cdot c}.$$

где  $t_0$  – время проезда объекта сети в свободных условиях движения.

Что касается ближайшей, по содержанию, VD функции AKCELIK2, то она представляет собой приспособленный к отрезкам вариант функции AKCELIK. Это автоматически обеспечивает возможность проведения эксперимента с альтернативными подходами к перераспределению ТП по сети. Других полноценных альтернатив выбранной функции AKCELIK среди имеющихся в VISUM функций нет, и поэтому она будет использоваться в дальнейших расчётах.

В формуле (3) снова возникает переменная, обозначающая ПС полосы движения, которая не имеет обоснованных значений для городских улиц. Однако для перекрёстков хорошо известен такой показатель, как поток насыщения, который представляет собой максимальную интенсивность разъезда автомобилей от регулируемого перекрёстка при постоянно включенном разрешающем сигнале светофора. Он колеблется в небольших диапазонах и не противоречит известным значениям фактических интенсивностей движения. В HCM 2000 [6] его значения рекомендуется принимать такими:

- 1700 ед./ч для центральной части городов, с диапазоном изменения 1600 – 1800 ед./ч;
- 1800 ед./ч а для всех остальных случаев, с диапазоном изменения 1700 – 1950 ед./ч.

Благодаря тому, что количество ТС, начинающих движение от перекрёстка на разрешающий сигнал светофора, ограничено продолжительностью этого сигнала, поток насыщения определяется для условий отсутствия препятствий движению. Эта свобода приближает его к максимально возможной интенсивности движения ТС по полосе движения без препятствий. Поэтому поток насыщения целесообразно принять в качестве ПС полосы движения как наиболее стабильную, надёжную и проверенную оценку максимальной интенсивности движения ТП в городских условиях:

$$d = s. \quad (4)$$

Эта оценка ПС полос движения может быть использована как при стандартном перераспределении ТП – на основе пропускной способности отрезков, так и для нового подхода к перераспределению – на основе задержек на поворотах (РП).



При использовании формулы (3) в новом подходе остаётся вопрос оценки времени задержки при свободной сети  $t_0$ . В стандартном подходе должна использоваться VD функция AKCELIK2, в которой время задержки для свободной сети равно отношению:

$$t_0^s = \frac{l}{V_f}, \quad (5)$$

где  $t_0^s$  – стандартное время проезда свободного участка сети;  $l$  – длина участка;  $V_f$  – скорость свободного движения по участку.

В новом подходе, при определении  $t_0^n$  – задержки свободного движения на поворотах, которые не имеют длины, это значение нужно задавать. С точки зрения процессов, происходящих непосредственно на РП,  $t_0^n$  – это среднее время задержки ТС на светофоре при отсутствии других ТС в сети, т.е. при  $x = 0$ . В этом случае  $t_{d1}$ , первое слагаемое в формуле (2), которое практически без изменений перешло в нее из формулы (1), принимает следующий вид

$$t_{d1} = \frac{T(1-\lambda)^2}{2\left(1-\lambda\frac{x}{c}\right)} = \frac{T\left(1-\frac{T_p}{T}\right)^2}{2} = \frac{(T-T_p)^2}{2T}. \quad (6)$$

Полученное выражение представляет собой следствие из теоремы Смита, по которому рассчитывается время ожидания в системе массового обслуживания с прерыванием [16]. Она является теоретически корректной оценкой времени задержки на перекрёстке при случайном прибытии ТС и нулевой нагрузке на него и будет использована в эксперименте.

Тогда в новом подходе начальное время преодоления поворотов будет равно сумме средних значений времени проезда ТС по ненагруженному участку перед перекрёстком и ожидания возможности проезда РП:

$$t_0^n = \frac{l}{V_f} + \frac{(T-T_p)^2}{2T}. \quad (7)$$

Из трёх калибровочных параметров в формуле (3) неопределёнными являются

два –  $b$  и  $c$ , так как продолжительность периода моделирования автоматически определяется параметрами модели, в которой проводится эксперимент.

Параметру  $b$  сложно придать какой-то физический смысл, исходя из его роли в формуле (3). Это простой калибровочный коэффициент (family parameter), который в VISUM имеет очень широкий диапазон возможных значений,  $b \in [0,1;1000]$ , что требует обязательного задания правил его определения в эксперименте.

Для этого вначале необходимо определиться со значением третьего калибровочного коэффициента –  $c$ . Он встречается в (3) только как множитель при потоке насыщения и, таким образом, представляет собой корректировочный коэффициент к ПС объектов сети. Поэтому, несмотря на предоставляемый в VISUM широкий диапазон возможных значений –  $c \in [0,1;100]$ , его значения не должны сильно отличаться от 1 ни в большую, ни в меньшую сторону. Предварительно границы его значений можно принять как:

$$0,75 \leq c \leq 1,25. \quad (8)$$

Это соответствует 25-процентному отклонению от ПС полосы движения, равной потоку насыщения, в большую и меньшую сторону. Подобные отклонения не являются критичными и достижимы на практике, о чем свидетельствует информация из НСМ [6].

Значения коэффициентов  $b$  и  $c$  должны приниматься исходя из необходимости обеспечения близости результатов моделирования к реальности, с точки зрения времени поездки в сети и скорости движения ТС по ней. Диапазон значений этих характеристик УДС должен определяться натурными наблюдениями на реальном объекте.

Что касается нерегулируемых перекрёстков, то время их проезда (сопротивление на поворотах) рассчитывается с использованием той же VD функции AKCELIK (3), где  $t_0^{new}$  следует рассматривать как калибровочный параметр, значение которого задаётся исходя из цели минимизации отклонений между расчетными и реальными интенсивностями ТП на отрезках, примыкающих к таким пересечениям.

### Моделирование транспортных потоков на транспортной сети центральной части города Харькова

Основными требованиями, предъявляемыми к транспортной модели, на которой следует проводить эксперимент, являются небольшие размеры объекта моделирования и его реальность. Реальность объекта предполагает, что в модели должны быть фактические данные, которые достаточно полно характеризуют параметры функционирования реальной УДС. При этом не требуется, чтобы модель была актуальной на сегодняшний день, т.к. эксперимент преследует исключительно познавательные, научные цели и не требует принятия никаких решений относительно вариантов развития объекта.

Выполнение другого требования – к размерам модели – необходимо, чтобы исключить из эксперимента проблему большого масштаба, т.е. упростить модель и тем самым повысить уровень инженерного восприятия результатов эксперимента.

Ещё одним требованием к модели является высокая загруженность сети в ней, что вступает в противоречие с небольшими размерами сети, если рассматривать модель целого города. В небольших городах УДС обычно загружены движением не очень сильно. Поэтому наиболее подходящей для проведения эксперимента по сравнительной оценке возможностей стандартного и нового подходов к моделированию ТП на сети является разработанная в ХНАДУ модель центральной части города Харькова (рис. 2).

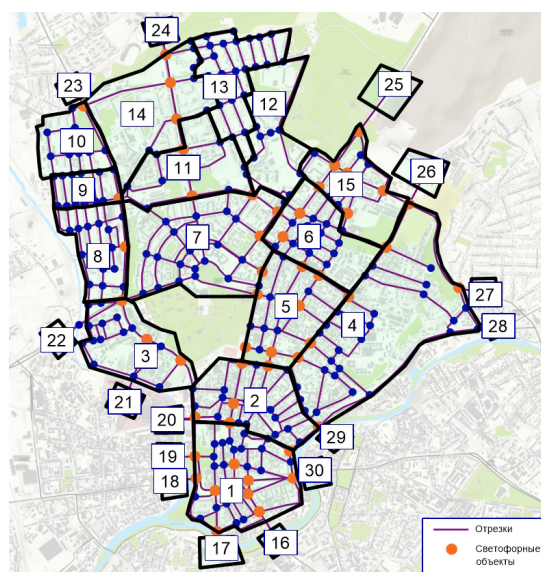


Рис. 2. Модель транспортной системы индивидуального моторизованного транспорта в центральной части города Харькова

Границы территории в модели последовательно проходят: по ул. Веснина, спуску Журавлевскому; ул. Шевченко до пр. Московского; вдоль реки Харьков до ее пересечения с рекой Лопань; вдоль реки Лопань до места, где она выравнивается на карте с перекрестком улиц Клочковская и Новгородская; по ул. Новгородской до пересечения с пр. Науки; по реке Саржинка; по ул. Динамовской до пересечения с ул. Сумской; ул. Сумской до пересечения с ул. Веснина.

Модель описывает площадь 12,25 км<sup>2</sup>, что составляет приблизительно 3,5 % площади Харькова в действующих границах. Она состоит из 15 внутренних и 15 внешних транспортных районов. Внутренние районы расположены на моделируемой территории, внешние – описывают её входы и выходы, то есть связи центра города с окружающей его периферией. Модель охватывает пиковый период суток с 8<sup>00</sup> до 10<sup>00</sup>. Остальные её параметры детально описаны в работе [17].

Следует отметить, что средняя ошибка модели, которая была рассчитана как относительное отклонение между реальными и фактическими ТП на 186 участках, составила 37 % [17]. В первую очередь, такая высокая погрешность модели объясняется использованием слишком большого количества контрольных точек, многие из которых находятся на второстепенных участках УДС. Случайные значения фактических интенсивностей в контрольных точках при сравнении с детерминированными значениями расчётных ТП всегда приводят к росту ошибки при увеличении количества контрольных точек. Поэтому в данном эксперименте для сравнения были оставлены 40 значений фактических интенсивностей ТП на основных магистралях центральной части города (рис. 3).

Второй причиной невысокой точности модели является не очень глубокое погружение её разработчиков в параметры стандартной методики перераспределения ТП из-за того, что модель создавалась для решения задач транспортного планирования скорее микро-, а не макроуровня [17]. Несмотря на это, имеющаяся модель центральной части Харькова полностью основана на реальных данных и предоставляет полный объём фактической информации, необходимый для проведения эксперимента.

Особенно важно, что для данного объекта моделирования существуют ориентиры по фактической скорости движения, относящиеся к периоду создания модели и приведенные в работе [18].

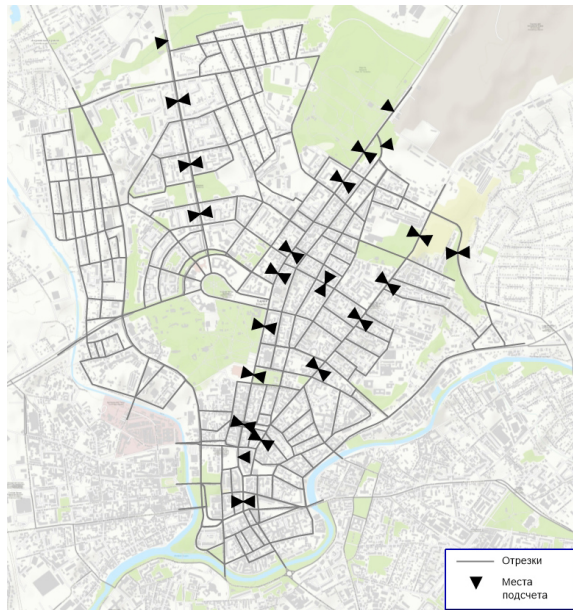


Рис. 3. Размещение контрольных точек в модели центральной части города Харькова

Исходя из замеров фактической скорости движения маршрутных транспортных средств в транспортном потоке, получилось, что фактическая скорость ТП в центре Харькова колеблется в пределах

$$V_{ТП} \in [13,1;24,5] \text{ км/ч.} \quad (9)$$

Эти пределы приняты в качестве границ для расчётных значений средней скорости

Таблица 1 – Диапазоны изменения коэффициента  $b$  и скорости, км/ч, при стандартном подходе

№ опыта	$c = 1,25$			$c = 1,0$			$c = 0,75$		
	$b$	$V_{ТП}$	$\Delta_{ТП}, \%$	$b$	$V_{ТП}$	$\Delta_{ТП}, \%$	$b$	$V_{ТП}$	$\Delta_{ТП}, \%$
1	14	24,4	26	7,5	24,4	26,2	0,1	22,3	35,3
2	17	22,3	26,6	9,9	22,5	27	1,4	21,5	32,6
3	20	19,8	28,6	12,2	20,3	26,5	2,7	20,3	27,5
4	23	18,1	28,6	14,6	17,7	28,4	4	18,7	25,1
5	26	17,2	27,6	17	15,9	28,7	5,3	17,6	26,9
6	29	16,1	28,7	19,4	15,1	29	6,6	16,5	26,7
7	32	15	29,7	21,7	14,9	26	7,9	14,6	30
8	35	14,7	31,5	24,1	13,8	28,8	9,2	14	31,3
9	38	13,1	31,3	26,5	13,1	31,4	10,5	13	32,8

Таблица 2 – Диапазоны изменения коэффициента  $b$  и скорости, км/ч, при новом подходе

№ опыта	$c = 1,25$			$c = 1,0$			$c = 0,75$		
	$b$	$V_{ТП}$	$\Delta_{ТП}, \%$	$b$	$V_{ТП}$	$\Delta_{ТП}, \%$	$b$	$V_{ТП}$	$\Delta_{ТП}, \%$
1	3	24,5	21,7	1	23,9	22,4	2	21,8	16,4
2	10,5	21,6	22,6	7	21,3	22,5	4,8	19,8	21,2
3	18	19,7	25,8	13	19,4	26,3	7,5	18,4	26,6
4	25,5	18,1	31	19	17,6	30,8	10,3	16,5	29
5	33	16,8	27,8	25	16,2	28	13	15,9	30,1
6	40,5	15,6	32,4	31	15,1	30,9	15,8	14,7	29,2
7	48	14,8	30,9	37	14,2	31,1	18,5	14,3	26,5
8	55,5	14,2	33,4	43	13,7	35,1	21,3	13,8	30,3
9	63	13,4	34,4	49	13	35,4	24	13	35,4

движения при выборе значений коэффициентов  $b$  и  $c$  в модели.

Средняя скорость движения ТС достаточно полно характеризует результаты моделирования и гораздо нагляднее среднего времени поездки, для которого ориентиры оказались недоступны [17].

При этом в модели скорость движения определяется исходя из времени проезда участков, поэтому выполнение условия по реальности значений скорости автоматически приведет к реальным значениям среднего времени поездки. Это делает среднюю скорость движения ТС единственным параметром в эксперименте, по которому оценивается общее соответствие модели реальному объекту.

Для каждого подхода к моделированию – стандартного и нового – проводилось по три серии экспериментов с использованием процедуры последовательного перераспределения. В каждой серии из диапазона (8) принималось постоянное значение коэффициента  $c$  – равное 0,75; 1 и 1,25. Значения коэффициента  $b$  принимались таким образом, чтобы охватить весь диапазон допустимых значений скорости (9). Каждая серия состояла из 9 экспериментов с равномерным распределением коэффициента  $b$  по диапазону значений скорости. Полученные в результате ряды средней скорости движения ТС, а также достигнутая в эксперименте средняя относительная ошибка моделирования интенсивностей ТП  $\Delta_{ТП}$  приведены в табл. 1 и 2.

Характеристики вариации параметра  $b$  и средней скорости движения – размах вариации  $R$  и стандартное отклонение  $\sigma$  – при стандартном и новом подходах к распределению ТП приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристика вариации коэффициента  $b$  и скорости по результатам эксперимента

Показатель	$c = 1,25$		$c = 1,0$		$c = 0,75$	
	$b$	$V_{ТП}$	$b$	$V_{ТП}$	$b$	$V_{ТП}$
Стандартный подход к распределению ТП – на основе пропускной способности отрезков						
$R$	24	11,2	19	11,4	10,4	9,3
$\sigma$	7,7	3,5	6,1	3,8	3,4	3,2
Новый подход к распределению ТП – на основе задержек на регулируемых перекрестках						
$R$	60	11,1	48	10,9	22	8,8
$\sigma$	19,4	3,5	15,5	3,5	7,1	2,8

Как видно из табл. 1–3, новый подход к распределению ТП предоставляет возможность более тонкой настройки модели на реальные значения скорости движения ТС, поскольку в этом подходе при очень схожих характеристиках вариации  $V_{ТП}$  диапазон значений параметра  $b$  намного шире.

По результатам построения графиков в системах координат  $(b; c; \Delta_{ТП})$  и  $(b; c; V_{ТП})$  (рис. 4, 5), можно заметить, что изменение точности расчета ТП и скорости движения ТС при новом подходе происходит более равномерно, чем при стандартном. С инженерной точки зрения это можно трактовать как более прогнозируемое влияние параметров  $b$  и  $c$  на результаты моделирования, что указывает на предпочтительность применения нового подхода в инженерных задачах.

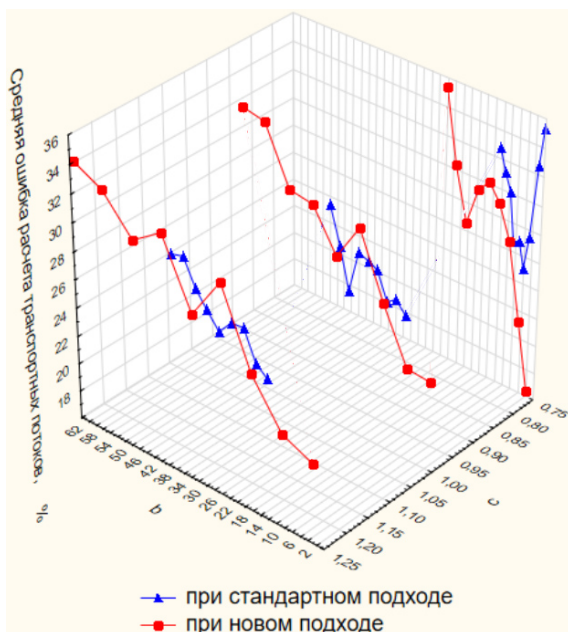


Рис. 4. Относительная ошибка модели,  $\Delta_{ТП}$

Отдельно следует отметить тот факт, что при применении нового подхода можно достичь большей точности расчета интенсивностей ТП, ведь при нем минимальное значение  $\Delta_{ТП}$  составляет 16,4 %, что ощутимо меньше чем  $\min(\Delta_{ТП}) = 25,1\%$  при стандартном подходе. Это указывает на существенное преимущество нового подхода к распределению ТП, поскольку именно он дает возможность обеспечить соответствие результатов транспортного моделирования сразу двум фактическим показателям функционирования транспортной системы – средней скорости движения ТС и интенсивности ТП. Этого нельзя сказать о стандартном подходе, при котором модель обеспечивает достижение либо реальных скоростей ТП, либо (теоретически) интенсивностей.

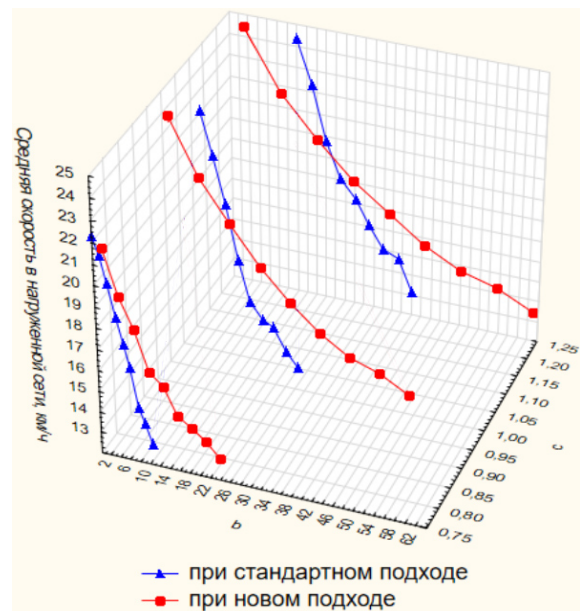


Рис. 5. Средняя скорость ТП,  $V_{ТП}$

Подобный результат приводит, с одной стороны, к очевидному, а с другой – довольно важному соображению о том, что транспортная модель при хорошем соответствии одному фактическому параметру функционирования объекта может давать существенные погрешности в других параметрах. Так, по результатам эксперимента при значительных колебаниях интенсивности транспортных потоков, которые можно охарактеризовать ошибкой их расчета  $\Delta_{ТП}$ , средняя  $V_{ТП}$  может находиться в пределах допустимых реальных значений. С большой вероятностью данный вывод имеет и обратную силу – распространенное стремление разработчиков транспортных моделей обеспечить высокую

точность расчета интенсивности ТП может привести с существенным погрешностям в значениях скорости.

Новый подход к распределению ТП позволяет избежать подобного недостатка и при этом ощутимо ограничивает диапазон практически приемлемых значений параметров  $b$  и  $c$  VD функции АКСЕЛИК – параметр  $b$  следует принимать равным не более 5 ( $b \leq 5$ ), а параметр  $c$  варьировать в окрестности 0,75. Также следует обратить внимание на то, что при новом подходе функция АКСЕЛИК применяется в модели для расчета сопротивления таких объектов сети, как «повороты», которые в реальном объекте соответствуют направлениям движения на перекрестках. Движение по этим направлениям, особенно в центральных частях городов и на РП, чаще всего реализуется по одной, реже – двум полосам. В этих условиях выявленные приемлемые значения параметра  $c \approx 0,75$  являются дополнительным аргументом в пользу близости нового подхода к реальности, потому как в функции АКСЕЛИК коэффициент 0,75 при потоке насыщения делает ПС полос, используемых при совершении маневров на перекрестках, ближе к реальным ее значениям в городских условиях.

Из полученных результатов следует, что новый подход к распределению ТП в городских транспортных сетях обеспечивает лучшие результаты моделирования, нежели стандартный, и подчеркивает существенное влияние РП на скорость ТП в городах. При этом отдельно следует обратить внимание на важность учёта при моделировании такого показателя, как скорость движения ТС. Он основан на двух других параметрах – расстоянии и времени проезда – и вовсе не всегда транспортная модель, обеспечивая точность расчета интенсивностей ТП, может точно отображать скорость, а следовательно, и расстояние, вместе со временем проезда по транспортной сети.

### Выводы

На сегодняшний день основным способом оценки времени проезда в городских транспортных сетях является определение времени преодоления участков, в зависимости от степени их загрузки, т.е. близости интенсивности ТП на участке к его ПС. Главной проблемой такого подхода является недостаточный уровень обоснования значений ПС одной полосы движения, из которых формируется ПС всего участка.

ПС участка сети определяется пропускной способностью регулируемых перекрёстков на нём, и если надлежащим образом описать задержки на перекрёстках, то исключается необходимость задавать ограничения по ПС отрезков, так как она будет всегда больше ПС соответствующих РП.

В рамках нового подхода для оценки задержек на перекрестках целесообразно использовать VD функцию Р. Акселика как такую, которая является результатом исследования реальных процессов на перекрёстках, имеет широкое практическое применение в национальных руководствах по управлению дорожным движением и реализована в специализированном программном обеспечении.

Экспериментальные исследования показали, что подход к распределению ТП на основе задержек на перекрёстках позволяет достичь большей точности расчета интенсивностей движения. При его использовании минимальное значение среднего отклонения расчетных потоков от фактических составило 16,4 % в противовес 25,1 % при стандартном распределении.

Новый подход оказывает гораздо большее влияние на распределение ТП в одном и том же диапазоне значений средней скорости движения ТС, то есть интенсивность ТП в нём в гораздо меньшей степени зависти от скорости, чем при стандартном подходе, что создаёт дополнительные возможности для настройки модели.

Полученные результаты указывают на предпочтительность использования нового подхода к распределению ТП в городских транспортных сетях, а также подчеркивают существенное влияние VD функций на скорость ТП в городах, что необходимо учитывать при оценке точности транспортных моделей.

### Литература

1. Garber N.J., Hoel L.A. Traffic and Highway Engineering: fourth edition. Toronto: Cengage Learning, 2009. 1230 p.
2. Ugurmurera J., Gomesy G., Xiaoye S.L., Bayen A. A unified software framework for solving traffic assignment problems. *Distributed, Parallel, and Cluster Computing*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1804.11026v1.pdf>. (дата звернения: 03.04.2020)
3. Gawron C. Simulation-Based Traffic Assignment. Computing User Equilibria in Large Street Networks: Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades / Fakultät der Universität zu Köln.

- URL: <https://kups.ub.uni-koeln.de/9257/1/GawronDiss.pdf>. (дата звернення: 03.04.2020)
4. Saw K., Katti B.K., Joshi G. Literature Review of Traffic Assignment : Static and Dynamic. *International Journal of Transportation Engineering*. 2015, Vol. 2–4. P. 339–347.
  5. He X., Guo X., Liu H.X. A link-based day-to-day traffic assignment model. *Distributed, Parallel, and Cluster Computing*. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1811/1811.10729.pdf>. (дата звернення: 03.04.2020)
  6. Highway Capacity Manual. Washington: TRB, 2010. 1134 p.
  7. PTV VISUM 15 Manual. Karlsruhe: PTV Group. 2015. 2754 P.
  8. Harrington D. Inside AutoCAD 2005. Prentice-Hall, Englewood Cliffs: New Riders, 2005. 930 p.
  9. Wardrop J.G., Whitehead J.I. Correspondence. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Engineering Divisions*. ICE Proceedings, Vol. 1, Issue 5. London, 1952. P. 767-768. DOI:10.1680/ipeds.1952.11362
  10. Akcelik R. The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections. *ITE Journal*. 1988, Vol. 58 (3). p. 23–27.
  11. Webster F.V., Traffic Signal Settings. *Road Research Technical Paper No. 39*. London: Department of Scientific and Industrial Research, 1958. 45 p.
  12. Miller A.J., Australian Road Capacity Guide Provisional Introduction and Signalized Intersections. *Australian Road Research Board*. 1968, Bull. No. 4, 44 p.
  13. Akcelik R. Sidra intersection features. *Technical Note*. 2019. URL: [http://www.sidrasolutions.com/Cms\\_Data/Contents/SIDRA/Media/ProductDocumentation/SIDRA%20INTERSECTION%20Features\\_Jun2019.pdf](http://www.sidrasolutions.com/Cms_Data/Contents/SIDRA/Media/ProductDocumentation/SIDRA%20INTERSECTION%20Features_Jun2019.pdf). (дата звернення: 03.04.2020)
  14. Guide to Traffic Management. Part 6 Intersections, Interchanges and Crossings. Sydney: Austroads. 2017. 232 p.
  15. Teply S., Allingham D.I., Richardson D.B., Stephenson B.W. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Ottawa: Institute of Transportation Engineers, 2008. 232 p.
  16. Smith W.L. Regenerative Stochastic Processes. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Proceedings of the Royal Society A. 1955, vol. 232, №. 1188. P. 6–31.
  17. Колій О.С. Рациональне розташування зупиночних пунктів автобусних та тролейбусних маршрутів відносно регульованих перехресть : дис. ... канд. техн. наук з трансп. сист.: 05.22.01 / ХНАДУ. Харків. 2017. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/2284>. (дата звернення: 03.04.2020)
  18. Горбачов П.Ф., Воронков А.І., Колій О.С., Нікітченко І.Н. Параметры движения маршрутного автомобильного пассажирского транспорта в центральной части г. Харькова. *Вісник ХНАДУ*. 2013. № 60. С. 34–37.

## References

1. Garber N.J., Hoel L.A. (2009). Traffic and Highway Engineering: fourth edition. Toronto: Cengage Learning.
2. Ugurmurera J., Gomesy G., Xiaoye S.L., Bayen A. (2018). A unified software framework for solving traffic assignment problems. *Distributed, Parallel, and Cluster Computing*. Retrieved from: <https://arxiv.org/pdf/1804.11026v1.pdf>. (accessed: 03.04.2020).
3. Gawron C. (1998). Simulation-Based Traffic Assignment. Computing User Equilibria in Large Street Networks: Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades / Fakultät der Universität zu Köln. Retrieved from: <https://kups.ub.uni-koeln.de/9257/1/GawronDiss.pdf>. (accessed: 03.04.2020).
4. Saw K., Katti B.K., Joshi G. (2015). Literature Review of Traffic Assignment : Static and Dynamic. *International Journal of Transportation Engineering*, 2–4. 339–347.
5. He X., Guo X., Liu H.X. (2018). A link-based day-to-day traffic assignment model. *Distributed, Parallel, and Cluster Computing*. Retrieved from: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1811/1811.10729.pdf>. (accessed: 03.04.2020).
6. Highway Capacity Manual. (2010). Washington: TRB.
7. PTV VISUM 15 Manual. (2015). Karlsruhe: PTV Group.
8. Harrington D. Inside AutoCAD 2005. (2005). Prentice-Hall, Englewood Cliffs: New Riders.
9. Wardrop J.G., Whitehead J.I. (1952). Correspondence. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Engineering Divisions*. ICE Proceedings, 1(5). 767-768. DOI:10.1680/ipeds.1952.11362
10. Akcelik R. The Highway Capacity Manual Delay Formula for Signalized Intersections. (1988). *ITE Journal*. 58(3). 23–27.
11. Webster F.V., Traffic Signal Settings. (1958). *Road Research Technical Paper No. 39*. London: Department of Scientific and Industrial Research.
12. Miller A.J., Australian Road Capacity Guide Provisional Introduction and Signalized Intersections. (1968). *Australian Road Research Board*. Bull. 4, 44 p.
13. Akcelik R. (2019). Sidra intersection features. *Technical Note*. Retrieved from: [http://www.sidrasolutions.com/Cms\\_Data/Contents/SIDRA/Media/ProductDocumentation/SIDRA%20INTERSECTION%20Features\\_Jun2019.pdf](http://www.sidrasolutions.com/Cms_Data/Contents/SIDRA/Media/ProductDocumentation/SIDRA%20INTERSECTION%20Features_Jun2019.pdf). (accessed: 03.04.2020).
14. Guide to Traffic Management. Part 6 Intersections, Interchanges and Crossings. (2017). Sydney: Austroads.
15. Teply S., Allingham D.I., Richardson D.B., Stephenson B.W. (2008). Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Ottawa: Institute of Transportation Engineers.
16. Smith W.L. (1955). Regenerative Stochastic Processes. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.

- ing Sciences. Proceedings of the Royal Society A, 232(1188). 6–31.
17. Koliy O. (2017). *Ratsionalne rozstazhuvannia zupynochnykh punktiv avtobusnykh ta troleibusnykh marshrutiv vidnosno rehulovanykh perekhrest* [Rational location of stops of bus and trolley bus routes with respect to regulated intersections] (Ph.D.). KhNAHU. Retrieved from: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/2284>. (accessed: 03.04.2020). [in Ukrainian]
18. Gorbachov P., Voronkov A., Koliy A. (2013). *Parametry dvizhenija marshrutnogo avtomobil'nogo passazhirskogo transporta v central'noj chasti g. Har'kova* [Parameters of Motion of Route Motor Passenger Transport in Kharkiv Downtown]. *Bulletin of KhNAHU*. 60. [in Russian]

**Бу Дык Минь<sup>1</sup>**, аспірант, тел. +84 090-429-34-18, [vdminh1969@yahoo.com.vn](mailto:vdminh1969@yahoo.com.vn),

**Горбачёв Пётр Фёдорович<sup>1</sup>**, д.т.н., зав. каф. транспортних систем и логистики, тел. +38 050-303-26-22, [gorbachov.pf@gmail.com](mailto:gorbachov.pf@gmail.com),

**Колій Александр Сергеевич<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. транспортних систем и логистики, тел. +38 096-560-33-75, [forgemest@gmail.com](mailto:forgemest@gmail.com),

**Свичинский Станислав Валериевич<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. транспортних систем и логистики, тел. +38 050-609-00-00, [stas\\_svichinsky@ukr.net](mailto:stas_svichinsky@ukr.net)

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Розподіл потоків індивідуального автотранспорту в міських мережах на основі затримок на перехрестях

**Анотація. Проблема.** Існуючі методи визначення часу проїзду по ділянках вулично-дорожньої мережі ґрунтуються на оцінці цього часу залежно від ступеня завантаження ділянки. При цьому використовуються різні залежності, але відношення інтенсивності транспортного потоку на ділянці до її пропускної спроможності всюди є основою для розрахунку. Головною проблемою такого підходу є недостатнє обґрунтування значень пропускної спроможності смуги руху, з якої формується пропускна спроможність ділянки, що ставить під сумнів обґрунтованість застосування такого підходу в міських умовах. В той же час, у авторитетних рекомендаціях з управління транспортними потоками вказується, що наявності на ділянці мережі регульованих перехресть пропускна спроможність ділянки визначається перехрестям з найменшою пропускною спроможністю. Таким чином, можна сформулювати альтернативу підходу до розподілу транспортних потоків на основі пропускної спроможності ділянок та здійснити цей розподіл на основі затримок на перехрестях. Оцінка такої альтернативи є актуальною задачею, адже подібний новий підхід до розподілу транспортних потоків

відкриває резерви для підвищення точності моделювання руху автотранспорту в містах. **Мета.** Порівняльна характеристика двох альтернативних варіантів моделювання транспортних потоків у місті – на основі пропускної спроможності ділянок та на основі затримок на перехрестях. **Методологія.** Експериментальне дослідження розподілу потоків індивідуального транспорту на моделі реального об'єкта з використанням таких параметрів моделі, при яких забезпечується відповідність розрахункової середньої швидкості руху транспортних засобів її фактичним значенням. **Результати.** Підхід до розподілу транспортних потоків на основі затримок на перехрестях дозволяє досягти більшої точності розрахунку інтенсивностей руху. **Оригінальність.** Обґрунтовано новий підхід до розподілу транспортних потоків на основі затримок на перехрестях, в якому виключається необхідність задавати обмеження на пропускну спроможність ділянок мережі. **Практична значущість.** Отримані результати вносять визначеність щодо способу призначення часу проїзду об'єктів мережі у VI-SUM за вільних умов руху та дозволяють підвищити точність моделювання транспортних потоків у містах.

**Ключові слова:** транспортний потік, швидкість руху, інтенсивність руху, регульоване перехрестя, VD функція, транспортна модель, VISUM.

**Бу Дик Минь<sup>1</sup>**, аспірант, тел. +84 090-429-34-18, [vdminh1969@yahoo.com.vn](mailto:vdminh1969@yahoo.com.vn),

**Горбачов Петро Федорович<sup>1</sup>**, д.т.н., зав. каф. транспортних систем і логистики, тел. +38 050-303-26-22, [gorbachov.pf@gmail.com](mailto:gorbachov.pf@gmail.com),

**Колій Олександр Сергійович<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. транспортних систем і логистики, тел. +38 096-560-33-75, [forgemest@gmail.com](mailto:forgemest@gmail.com),

**Свичинський Станіслав Валерійович<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. транспортних систем і логистики, тел. +38 050-609-00-00, [stas\\_svichinsky@ukr.net](mailto:stas_svichinsky@ukr.net)

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### Urban traffic assignment based on signalized intersection delays

**Abstract. Problem.** Existing methods to determine travel time on the road network links are based on the estimation of link saturation. Different formulas are used during the estimation but the ratio of traffic volume to link capacity is always the base for calculations. The main problem of such an approach is an insufficient justification of the lane capacity value which defines link capacity. It causes doubts about the background of the approach application regarding urban traffic flows. At the same time, authoritative traffic management guidelines declare that when there are signal-controlled intersections on the link then the link capacity is restricted by the intersection with minimal capacity. Thus, the alternative to the known traffic assignment approach based on link

capacity can be created and then used to make the assignment on the base of delays at intersections. Evaluation of such an alternative is the actual task as the new approach to traffic assignment opens the scope for improving the accuracy of modelling the traffic flows in cities. **Goal.** The new approach to traffic assignment on the base of intersection delays needs to be tested for the usefulness for transport modelling practice. **Methodology.** The alternative approaches to traffic assignment were experimentally compared based on the parameters of the transport model, which provide the compliance of the calculated average vehicles' speed with the factual one. **Results.** The new approach to traffic assignment based on intersection delays allows a more accurate calculation of traffic volumes. **Originality.** The new approach to traffic assignment based on intersection delays allows avoiding the need to set restrictions on road network links' capacity. **Practical value.** Received results clarify the way to set the free-flow travel time of network objects in VISUM and allow

increasing accuracy of urban traffic flows modelling. **Keywords:** traffic flow, vehicle speed, traffic volume, controlled intersection, VD function, transport model, VISUM.

**V.D. Minh**<sup>1</sup>, Ph.D. student, tel. +840904293418, vdmnh1969@yahoo.com.vn,

**Horbachov Peter**<sup>1</sup>, D.Sc. (Transport Systems), Head of Transport Systems and Logistics Department, tel. +380503032622, gorbachov.pf@gmail.com,

**Kolii Oleksandr**<sup>1</sup>, Ph.D. (Transport Systems), Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, tel. +380965603375, forgemest@gmail.com,

**Svichynskyi Stanislav**<sup>1</sup>, Ph.D. (Transport Systems), Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, tel. +380506090000, stas\_svichinsky@ukr.net

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho street, Kharkiv, 61002, Ukraine.