

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО ТРАНСПОРТНОЙ РАЗВЯЗКЕ НА ОБРАЗОВАНИЕ ЗАТОРОВ НА ЛЕВОПОВОРОТНЫХ ОТВЕТВЛЕНИЯХ

IMPACT OF VARIATIONS IN ROAD INTERCHANGE TRAFFIC INTENSITY ON FORMATION OF TRAFFIC JAMS AT LEFT-TURN BRANCHES

Н. В. Вишняков,
заместитель декана
факультета транспортных
коммуникаций Белорусского
национального технического
университета,
г. Минск, Беларусь

Рассмотрены теоретические положения по образованию транспортного затора при движении транспортного потока (ТП) на транспортной развязке по типу «клеверный лист». Приведено обоснование использования микро- и макроимитационного моделирования ТП. Дана характеристика модели следования за лидером с описанием действий водителя транспортного средства (ТС), движущегося с более высокой скоростью за впереди идущим транспортным средством. Проведены исследования пропускной способности лево- (ЛПО) и правоповоротных соединительных ответвлений (ППО) реальных транспортных развязок Республики Беларусь. По реальным данным существующей интенсивности и состава движения просчитаны результаты имитационного микромоделирования ТП. Получены графики зависимости плотности транспортного потока на ЛПО от интенсивности движения на пересекаемой дороге транспортной развязки при начальных стадиях образования транспортного затора на правых полосах движения. Дана оценка их пропускной способности. Рассмотрен вопрос образования волны транспортного затора и ее влияние на скорость движения по соседним полосам. Проведена оценка пропускной способности транспортной развязки, которая является сложным и многофакторным показателем, зависящим от скорости движения, плотности ТП на межпетлевом участке (МПУ), распределения автомобилей по составу, состояния покрытия, размеров геометрических элементов дороги, состояния и типа автомобиля, психофизиологического состояния водителя. Приведены рекомендации по снижению риска образования транспортного затора на ЛПО и в зоне МПУ.

Ключевые слова: транспортная развязка, транспортный затор, имитационное моделирование, микромоделирование и макро-моделирование движения, психофизиологическая модель восприятия, транспортный спрос, плотность транспортного потока, уровень загрузки движением, пропускная способность ЛПО, волна затора, межпетлевой участок, зона переплетения транспортных потоков, углы вхождения в транспортный поток, граничные интервалы.

Theoretical provisions have been considered with regard to the traffic jam formation during the traffic flow (TF) movement at a clover-

leaf road interchange. The rationale has been given for application of micro- and macrosimulation of the TF. The characteristic has been given for the following the leader model with the description of activities of a driver in a vehicle moving with higher speed following a vehicle moving ahead of it. The throughputs of left-turn (LTB) and right-turn (RTB) connecting branches at real road interchanges in the Republic of Belarus have been analyzed. The real data of effective intensities and traffic composition were used to calculate the TF microsimulation results. Plots have been constructed for the LTB traffic flow density versus the intensity of traffic at a crossed road of a road interchange during the initial stages of formation of a traffic jam at right traffic lanes. Their throughput assessment has been given. The matter of formation of the traffic jam wave has been studied, as well as its impact on the speed of vehicles on adjacent lanes of the road. The assessment has been carried out for the road interchange throughput, a complex and multifactor indicator being the function of the movement speed, the TF density at an interloop section (ILS), the distribution of automobiles by composition, the pavement condition, the sizes of geometric elements of a road, the automobile type and condition, the driver's psychophysiological condition. The recommendations have been given for reduction of the risk of formation of a traffic jam at an LTB and in an ILS zone.

Keywords: road interchange, traffic jam, simulation, traffic microsimulation and macrosimulation, psychophysiological model of perception, traffic demand, traffic flow density, traffic load level, LTB throughput, jam wave, interloop section, traffic flow weaving zone, angle of entry into the traffic flow, boundary intervals.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальные прогнозы по развитию дорожного движения делаются исходя из удваивания грузоперевозок в 2050 году, при этом основную нагрузку в перспективе будут нести именно автомобильные дороги. Одними из наиболее острых проблем, связанных с дорогами и улицами, являются: недостаточная пропускная способность, значительная транспортная загруженность, и как правило, высокая вероятность образования транспортных заторов, транспортные задержки и низкая безопасность проезда по существующим транспортным развязкам.

В настоящее время отсутствует единое общепринятое определение транспортного затора. В теориях ТП, как правило, затор рассматривается как одно из его состояний. Возможны различные причины возникновения транспортных заторов:

- поведение отдельных водителей;
- закономерности движения транспортных средств;
- геометрические параметры дорог и их пересе-

чений;

- случайные возмущения скоростей.

Наличие случайных и субъективных причин требует учета психофизиологических особенностей водителей транспортных средств (ТС) при исследовании транспортного затора.

В научных работах советских и российских ученых В. Н. Луканина, В. Ф. Бабкова, В. В. Сильянова [1] рассматривались вопросы экспериментального и теоретического исследования, математического моделирования ТП.

Основы исследования внутренней динамики поведения ТП заложены в трудах Б. Гриншилдса, Х. Гринберга, которые одними из первых описали аналитически фундаментальную кривую «скорость – плотность» для ТП на одной полосе и установили современный вид зависимости «скорость – интенсивность» для ТП.

Большой вклад в изучение вопросов влияния интенсивности движения, состава потока на скорость ТП внесли ученые В. В. Сильянов [1], Г. И. Клинковштейн [2] и другие.

Для описания процесса функционирования потока транспорта и его формализации широко используются имитационное моделирование. В разное время построением моделей ТП занимались Д. Дрю [3], Б. С. Кернер [4] и другие.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАТОРОВ

На современном этапе исследование ТП приобрело особо актуальное значение в связи с ростом интенсивности движения автотранспорта. В большинстве случаев инструментом, применяющимся для исследования транспортных систем, является математическое моделирование. Поскольку законченную теорию поведения сложных динамических систем, таких как заторообразование на транспортных развязках, сразу построить не всегда удается, то для этих систем первоначально формулируется функциональная модель. В дальнейшем ее проверяют с помощью расчетов на ЭВМ и осуществляют постепенное наращивание исходной информации об условиях и характеристиках движения. Следует отметить, что в последние годы все большую роль приобретает аппроксимированное моделирование случайного непрерывного процесса в виде последовательности дискретных величин.

На современном рынке программных продуктов СНГ можно отметить систему моделирования движения Vissim + Visum (PTV Vision). По своим возможностям и области решаемых задач система включает пакет программного обеспечения для планирования, анализа и организации транспортного движения. В модуле VISUM PTV Vision® ре-

ализован уровень макро моделирования, в котором объектом моделирования является ТП. В модуле VISSIM PTV Vision[®] реализован уровень микро моделирования ТП. Микроскопические (микро-) модели – модели, которые описывают поведение транспортных средств и водителей в деталях, в том числе взаимодействие среди автомобилей, при смене полосы движения, реагирование на инциденты и поведение при слиянии потоков. Микроскопические модели подходят для оценки интеллектуальных транспортных систем (ИТС), так как представление многих динамических систем управления дорожным движением требует такого мелкозернистого моделирования процесса движения.

Помимо более простых моделей, в которых за основу берутся постоянные скорости и неизменное поведение в пути следования за впереди идущими ТС, используется имитационная модель следования (модель Видемана). Основная идея модели заключается в том, что водитель ТС, движущегося с более высокой скоростью, начинает тормозить при достижении своего индивидуального порога восприятия относительно удаленности от впереди идущего, когда дистанция до него начинает восприниматься им как слишком малая. Водитель не может точно оценить скорость впереди идущего ТС, поэтому он снижает скорость своего ТС до величины ниже скорости впереди идущего ТС. Это продолжается до тех пор, пока он не начнет снова немного ускоряться после достижения своего порога восприятия, когда он начнет оценивать возникшую между ним и впереди идущим ТС дистанцию как слишком большую. Это ведет к постоянному легкому ускорению и замедлению движения. С помощью расчетных функций распределения скоростей и дистанций имитируется различное поведение водителей. Модели ориентируются на характеристики индивидуального ТС. Модель следования (модель Видемана), выигрывает по количеству учитываемых факторов в моделировании ТП на микроуровне. Она включает в себя характеристики водителя и самого ТС. После многочисленных эмпирических исследований, проведенных техническим университетом города Карлсруэ (ФРГ), эта модель следования за впереди идущим ТС стала эталонной. Экспериментальные измерения доказывают, что изменившаяся за последние годы манера езды и технические возможности ТС корректно отображаются в данной модели.

Рассмотрим некоторые аспекты образования транспортного затора на транспортной развязке. Одними из самых распространенных полных транспортных развязок на территории СНГ являются сооружения по типу

«клеверный лист». Главное их достоинство – полная развязка движения с помощью одного путепровода. Левоповоротные соединительные ответвления выполнены по схеме петли, правоповоротные проектируют по кратчайшему направлению. Наибольшая пропускная способность – по прямому направлению пересекающихся дорог. Наименьшая пропускная способность наблюдается на левоповоротных соединительных ответвлениях, она ограничивается зонами переплетения потоков на межпутевом участке и зоной слияния с главной дорогой.

При устройстве переходно-скоростных полос пропускная способность на ЛПО увеличивается. При интенсивности, близкой к пропускной способности основной полосы движения, на ЛПО начинает образовываться транспортный затор.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАТОРОВ НА СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ОТВЕТВЛЕНИЯХ

Для проведения исследований режима движения ТП, распределения зазоров и минимальных интервалов между ТС, движущимися друг за другом, а также распределения ТС по полосам на участках переплетения ТП использовались имитационные математические модели, созданные на основании цифровых моделей местности (ЦММ) реальных транспортных развязок Республики Беларусь с фактической интенсивностью движения и составом ТП.

Первоначальное образование транспортного затора наблюдается на внешних правых полосах основных дорог (рис. 1, 2).



Рисунок 1 – Образование транспортного затора на развязке по типу «клеверный лист»

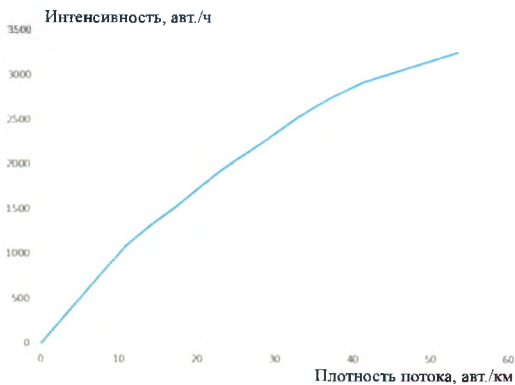


Рисунок 2 – Зависимость плотности ТП на правой полосе дороги от интенсивности движения

При увеличении числа полос движения более четырех на пересекаемых автомагистралях и интенсивности движения более 900 физ. авт./ч, совершающих поворот направо и налево, пропускная способность падает до 300 авт./ч, что в свою очередь вызывает рост аварийности.

В процессе численного эксперимента поэтапно наращивали интенсивность движения на дорожной развязке до момента образования затора. В результате с виртуальных детекторов были получены данные для анализа межпетлевых участков транспортных развязок.

При увеличении доли автомобилей, поворачивающих налево и направо, без увеличения интенсивности на главной дороге (свободный режим движения), наблюдалось незначительное уменьшение скорости и пропускной способности и соответственно незначительное увеличение плотности ТП на съездах (рис. 3).

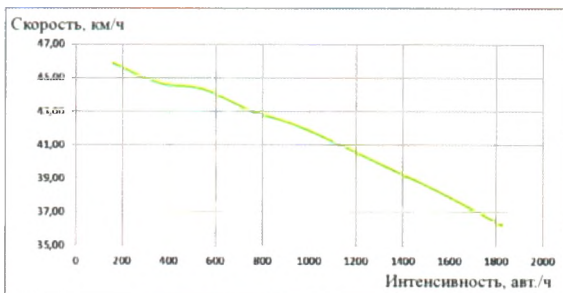


Рисунок 3 – Зависимость средней скорости ТП от интенсивности движения на ЛПО при свободном режиме движения по дороге

Когда в процессе эксперимента дискретно начали увеличивать интенсивность движения на основ-

ной дороге, то было зафиксировано значительное снижение скорости движения и увеличение плотности ТП на ЛПО и ППО (рис. 4).

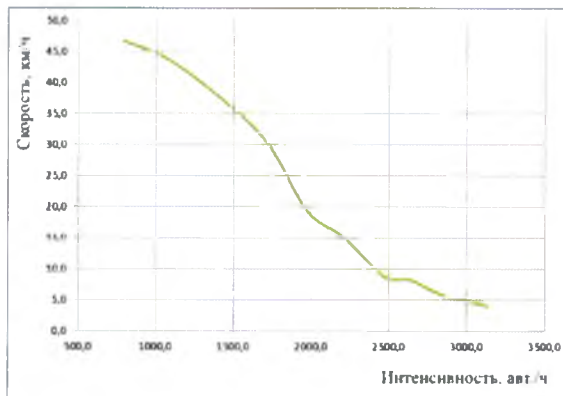


Рисунок 4 – Зависимость средней скорости ТП на ППО от интенсивности движения по дороге

Также при увеличении плотности ТП в зоне МПУ происходит уменьшение динамического габарита и интервала между ТС.

Данный анализ показал, что на режим движения ТС по автомобильной дороге существенно влияет интенсивность движения ТС, въезжающих с ЛПО (рис. 5, 6).

На начальных стадиях образования транспортного затора при увеличении интенсивности движения на межпетлевом участке автомобильной дороги на правых полосах движения происходит резкое увеличение плотности ТП. Это снижает скорость движения и пропускную способность полос, расположенных левее. Образуется волна транспортного затора, которая вызывает снижение скорости движения на соседних полосах и распространяется навстречу движению.

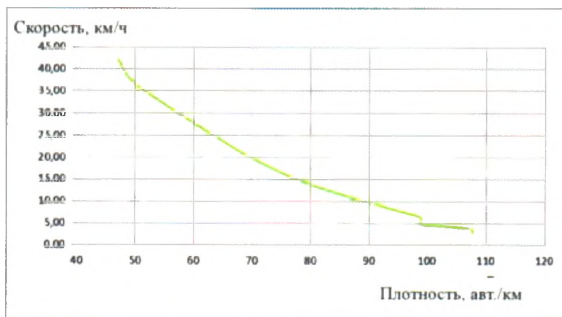


Рисунок 5 – Зависимость средней скорости движения на ЛПО от плотности ТП при увеличении интенсивности движения по дороге

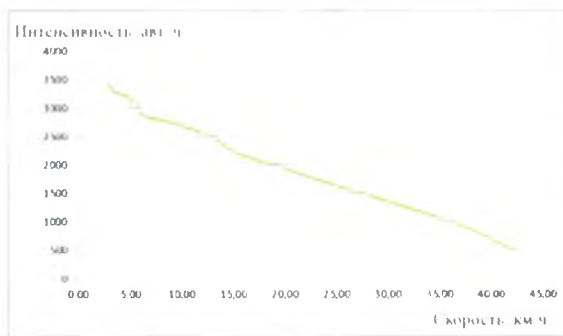


Рисунок 6 – Зависимость средней скорости ТП на ЛПО от интенсивности движения при увеличении интенсивности движения по дороге

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пропускная способность транспортной развязки является сложным показателем, который зависит от скорости движения, плотности ТП на МПУ, распределения автомобилей по составу, состояния покрытия, размеров геометрических элементов дороги, состояния и типа автомобиля, психофизиологического состояния водителя и ряда других факторов.

Моделирование транспортных заторов на ЛПО и ППО при свободном режиме движения по пересе-

кающимся дорогам показало незначительное снижение (до 20 %) скорости транспортного потока. При этом съезды пропускали искусственно заданную интенсивность движения, которая была соизмерима с пропускной способностью полосы автомобильной дороги.

При увеличении интенсивности движения на автомобильной дороге происходило снижение скорости ТП на ЛПО и ППО до значений 25–30 км/ч (фаза «синхронизированный поток» [4]).

При дальнейшем увеличении интенсивности наблюдались резкое увеличение плотности ТП и потеря скорости до значений 3–4 км/ч, что инициировало процесс заторообразования (фаза «широкий движущийся кластер» [4]).

Для снижения риска образования затора на ЛПО следует обеспечить повышение пропускной способности МПУ. Для этого необходимо при проектировании или реконструкции выдерживать максимально возможную длину МПУ. Одновременно нужно обеспечивать предельно малые углы вхождения транспортного потока ЛПО и ППО в ТП автомобильной дороги с целью повышения скорости движения при въезде и создания условий для использования минимальных граничных интервалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М. : Транспорт, 1977. – 303 с.
2. Клиновштейн, Г. И., Афанасьев М. Б. Организация дорожного движения : учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 2001. – 247 с.
3. Дрю, А. Теория транспортных потоков и управление ими. – М. : Транспорт. – 1972. – 424 с.
4. Kerner, B. S., Rehborn, H. Experimental Features and characteristics of traffic jams // Physical Review E. – 1996.

SPISOK ISPOL'ZOVANNOJ LITERATURY

1. Sil'yanov, V. V. Teoriya transportny'x potokov v proyektirovanii dorog i organizacii dvizheniya. – М. : Transport, 1977. – 303 s.
2. Klinkovshstejn, G. I., Afanas'ev M. B. Organizaciya dorozhnogo dvizheniya : uceb. dlya vuzov. – 5-e izd., pererab. i dop. – М. : Transport, 2001. – 247 s.
3. Dryu, A. Teoriya transportny'x potokov i upravlenie imi. – М. : Transport. – 1972. – 424 s.
4. Kerner, B. S., Rehborn, H. Experimental Features and characteristics of traffic jams // Physical Review E. – 1996.

Статья поступила в редакцию 03.12.2018.