

УДК 656.13.08

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ В ЗОНЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДОВ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. Н. КАРАСЕВИЧ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Введение

В связи с наблюдаемым стремительным ростом количественного и качественно-го состава автомобильного парка при сохранении общего объема улично-дорожной сети (УДС) явно обозначились проблемы функционирования транспортных потоков (ТП). Особенно остро проявляются данные проблемы в зоне железнодорожных переездов (ЖДП). На УДС со значительными объемами движения переезды не справляются с возросшими ТП. Это приводит к резкому снижению скорости сообщения между объектами транспортной сети, продолжительным заторовым ситуациям, увеличению количества аварий в местах их расположения (в т. ч. с особо тяжелыми последствиями), ухудшению экологической ситуации и, как следствие, к колоссальному росту потерь в дорожном движении (ДД).

Значительную часть потерь на ЖДП и подходах к ним составляют именно материальные и социальные потери, связанные с отсутствием оптимальности и эффективности в области организации и управления ДД [1], [2].

Эффективное принятие проектных решений по совершенствованию ОДД на любых типичных объектах УДС возможно только на основе изучения закономерностей движения ТП. Для исследования процесса движения ТП и рационального управления ими наибольшее распространение получили теоретические методы, основанные на разработке математических моделей, позволяющих установить соотношения между наиболее важными характеристиками этого процесса. Имеющиеся на сегодняшний день математические модели ТП позволяют получать приближенные результаты, которые в современных условиях не удовлетворяют необходимым требованиям. С развитием электронно-вычислительной техники и программных средств появляется возможность разработки более точных и детальных рассчитываемых моделей ТП, позволяющих учесть большие объемы данных и более достоверно определять показатели режимов движения ТП и, как следствие, повысить качество проектных решений.

Постановка задачи

Существующая теория ТП дает основание в зависимости от загрузки движением выделить три качественно различных состояния движения ТП на некотором (достаточно протяженном) участке дороги, которые можно условно назвать свободным, групповым и зависимым. Каждое из этих состояний ТП обладает своими типичными, присущими только ему, особенностями и характеристиками. Условное выделение таких характерных состояний движения ТП представляется удобным с позиции более детального теоретического исследования и описания такого физического процесса, как ТП.

В свободном потоке сравнительно малой интенсивности скорость движения транспортных средств близка к скорости свободного движения. При этом распреде-

ление интервалов в потоке носит случайный (вероятностный) характер. Состояние свободного ТП характеризуется независимым движением отдельных ТС, составляющих поток. Многочисленные исследования [1]–[10], а также аппарат теории массового обслуживания указывают на то, что распределение интервалов в свободном потоке близко к экспоненциальному. Распределение Пуассона справедливо для случайных транспортных потоков без последствия и имеет ограниченную область применения. В работе [2] доказано, что частота прибытия автомобилей к ЖДП может быть описана Пуассоновским распределением для интенсивности движения, которая не превышает 300 авт/ч на полосу. Модель образования очереди автомобилей у ЖДП имеет следующий вид:

$$E_{(N)} = 1 + \frac{\rho_1}{1 - \rho}, \quad (1)$$

где $E_{(N)}$ – общее количество автомобилей, прибывающих к пересечению автомобильной дороги с железной дорогой, ед.; $\rho_1 = \lambda B_1$ – число автомобилей, прибывающих к пересечению за время обслуживания первого автомобиля, ед.; $\rho = \lambda B$ – число автомобилей, прибывающих к пересечению за среднее время обслуживания, ед.; λ – интенсивность прибытия автомобилей к пересечению, авт/мин; B_1 – среднее время обслуживания первого автомобиля, мин; B – среднее время обслуживания $i + 1$ автомобиля, мин.

Верхний предел применимости этого распределения получен сопоставлением теоретических и экспериментальных данных по критерию согласия Романовского.

С увеличением количества автомобилей на УДС происходит уменьшение интервалов между автомобилями (увеличение плотности ТП). При этом взаимодействие ТС в потоке неизбежно. Режим движения любого автомобиля в потоке определяется законом движения соседних с ним ТС. В таких потоках возникают эффекты, которые методика, базирующаяся на теории массового обслуживания и вероятностей, не в состоянии теоретически предугадать и в должной мере описать. Это состояние характерно для так называемых «плотных ТП», к которым относятся групповое и зависимое состояния ТП. Особенность режима движения ТС в этих условиях заключается в том, что водителям навязывается скорость движения потока, которая задается водителями направляющих автомобилей.

Групповому движению ТС на УДС присущ процесс «пачкообразования» в потоке, т. е. расчленение потока на отдельные группы (пачки). При этом состоянии ТП наблюдаются несколько большие интенсивности движения, чем в свободных условиях и взаимодействие автомобилей в потоке максимально. Расстояния между автомобилями в образовавшихся группах близки к минимальным дистанциям безопасности и не подчиняются экспоненциальному распределению. В процессе движения через ЖДП характерным примером образования группового потока является процесс убытия автомобилей из очереди, образовавшейся у переезда. Пачки в потоке, возникающие после прохождения автомобилей через железнодорожное полотно, по мере движения по перегону относительно медленно рассасываются, и поток на некотором участке имеет ярко выраженную групповую форму.

Образовавшийся групповой поток существует некоторый промежуток времени, т. е. является событием стихийным, нестабильным, кратковременным. После чего он либо рассасывается по перегону, либо, по мере насыщения, переходит в зависимое состояние ТП, когда интенсивность движения достигает пропускной способности, отведенной для движения проезжей части. При этом происходит резкое изменение

характера движения, сопровождающееся стремительным снижением и выравниванием скорости движения до значений, близких к скоростям тихоходных ТС в потоке. Интервалы между автомобилями в таком потоке становятся близки к детерминированным, равным минимальным дистанциям безопасности движения между автомобилями. В зависимом состоянии ТП представляет собой длинную «колонну» ТС, движущихся с небольшой скоростью, в которой обгоны, опережения и перестроения из одной полосы в другую практически отсутствуют. Водитель при таком режиме движения вынужден подчиняться общему режиму движения в потоке. Дальнейшее насыщение ТП характеризуется прерывистым движением потока с периодическими остановками. Наиболее полное описание поведения ТП с групповым и зависимым характером движения рассмотрено в работах [1], [4], [5], [12].

ЖДП являются местом резкого изменения (снижения) скорости и (увеличения) плотности ТП при примерно неизменном уровне интенсивности движения. Эти изменения относятся к характерным особенностям процесса движения потоков автомобилей в зоне ЖДП и кардинально влияют на достоверность теоретического описания таких ситуаций и, как следствие, последующее качество оценки степени соответствия проектных решений необходимым требованиям.

В последнее время объем ТП через ЖДП значительно увеличился. Потоки, близкие к потокам насыщения, являются неустойчивыми и часто вызывают неоправданные остановки ТС, заторовые и аварийные ситуации. В связи с этими обстоятельствами все более насущными становятся исследования поведения плотных ТП, особенностей взаимодействия ТС внутри потока и реакции на изменение дорожной обстановки. Применяемые в настоящее время методы оценки эффективности проектных решений по ОДД в зоне ЖДП недостаточно эффективны, так как не в полной мере учитывают фактические условия движения современных ТС на таких объектах УДС и не обеспечивают оптимальные условия по таким показателям, как потери времени и безопасность движения. В значительной мере это связано с несовершенством применяемых теоретических моделей ТП.

Методы исследований

Особенности системы «ДД» делают невозможным построение адекватной аналитической модели, позволяющей исследовать варианты организации движения в этой системе и ее характеристики в различных условиях. В то же время имитационное моделирование как метод исследования такого рода объектов представляется перспективным подходом к решению этой проблемы, а именно: оно позволяет быстро и с достаточной точностью прогнозировать характеристики сложных систем подобной природы и оптимизировать значимые параметры, выбирая соответствующие параметры оптимизации. Такой подход имеет более широкие возможности, чем использование теории массового обслуживания, ввиду возможности моделирования движения ТП любой интенсивности [7], [8], [11].

Обзор существующих на сегодняшний день имитационных моделей дает представление о многообразии этих моделей. Имеется также ряд работ, в которых описываются модели, близкие к ним по своим качествам. Все эти модели нашли наиболее широкое применение на практике. Однако грубость предположений относительно свойств и режимов движения ТП значительно снижает ценность применения этих моделей в методах оценки качества ОДД на ЖДП и подходах к ним.

Ниже рассматривается имитационная математическая модель плотного ТП, опубликованная в работе [11], которая, как представляется, наиболее пригодна для практического использования в целях оптимизации решений по организации движения в зоне ЖДП.

Рассматривается ТП, движущийся по одной полосе движения без обгонов, опережений и перестроений. Исходя из особенностей процесса движения ТС в плотном потоке в основе данной модели заложено стремление водителя ведомого автомобиля поддерживать расстояние до автомобиля-лидера в пределах от минимально безопасного D_{\min} до максимально допустимого D_{\max} , а также двигаться со скоростью лидера. При этом водитель ведомого ТС реагирует на изменение режима движения лидера по стечению времени реакции (t_p).

Выделяются следующие режимы движения RE(I): остановка (ускорение и скорость ТС равны нулю) – $V0$; движение со скоростью лидера (в т. ч. с ускорением или замедлением; расстояние до лидера находится в пределах номинальной дистанции от D_{\min} до D_{\max}) – VC ; увеличение скорости до скорости лидера (разгон) – RN ; снижение скорости до скорости лидера (торможение) – TZ ; выравнивание скорости после разгона – BR ; выравнивание скоростей после торможения – BT .

В модели приняты следующие обозначения: $J_{t_{\max}}$ – максимальное замедление, допустимое по условиям сцепления колес с дорогой; K_{γ_i} – коэффициент эффективности торможения i -го автомобиля; J_{t_d} – замедление при торможении, предельно допустимое по комфортности; $J_{t_{\min}}$ – минимальное замедление при торможении; l – габаритная длина всех автомобилей в потоке; t_v – допустимое время разгона ведомого автомобиля для достижения скорости лидера; dt – шаг дискретизации процесса; φ – коэффициент сцепления колес с дорогой; i – порядковый номер автомобиля, движущегося в потоке; S_i – координата пути i -го автомобиля; $d_{кр}$ – предельно допустимая минимальная дистанция между автомобилями; J_{\max} – максимально возможное ускорение при разгоне; dS – дистанция между автомобилями; J_p , J_t , dx – вспомогательные переменные; J – ускорение автомобиля; V – скорость автомобиля; $J_{p_{\max}}$ – максимальное ускорение, допустимое по условиям сцепления колес с дорогой; t_{0i} – момент начала отсчета времени реакции водителя; J_{p_d} – ускорение при разгоне, предельно допустимое по комфортности; V_H – начальная скорость потока; n – число автомобилей в потоке; t – текущее время движения.

Скорость и ускорение лидера задаются пользователем. При этом рассчитываются значения координат пути лидера и ведомого автомобиля, а также минимальное, максимальное и критическое расстояние между автомобилями по следующим формулам:

$$S_{i-1} = S_i + D_{\min} + l_{i-1}, \quad (2)$$

$$D_{\min} = 0,05 \cdot (V_i)^2 + 4, \quad (3)$$

$$D_{\max} = 1,25 \cdot D_{\min}, \quad (4)$$

$$d_{кр} = 0,25 \cdot D_{\min}. \quad (5)$$

Моделирование включает два этапа:

1. Определение режима движения лидера, исходя из введенных значений: ускорения и граничной скорости лидера. Если введенное ускорение больше нуля, то лидер движется в режиме разгона (RN), меньше – в режиме торможения (TZ), если ускорение равно нулю, либо его скорость превысила введенную граничную, то автомобиль движется с постоянной скоростью (VC).

2. Определение режима движения ведомого автомобиля. Если в начальный момент времени скорость потока равна нулю, то моделирование процесса начинается с трогания с места лидера. После того, как дистанция между лидером и ведомым ав-

томобилем превысила D_{\min} , начинается отсчет времени реакции водителя автомобиля, следующего за лидером. По его истечении ведомый автомобиль разгоняется, но при этом ускорение определяется из условия, что ведомый достигнет скорости лидера за определенное время (t_v). Однако это ускорение не должно превышать J_{\max} . Если лидер продолжает разгон, то ускорение ведомого автомобиля определяется по формуле

$$J_p = J_{i-1} \cdot \left(1 + \frac{t_p}{t_v}\right). \quad (6)$$

Если лидер уже не разгоняется, то:

$$J_p = \frac{(V_{i-1} - V_i)}{t_v}. \quad (7)$$

Из-за множества различных условий водитель ведомого автомобиля не всегда справляется с поставленной задачей (достигнуть скорости лидера за определенное время и двигаться на расстоянии от D_{\min} до D_{\max}). Поэтому ему часто приходится снижать скорость до скорости лидера, т. е. выравнивать скорость.

Возможность перехода ведомого автомобиля к выравниванию скорости после разгона выражается условием: $dS \leq D_{\max}$. Величина замедления будет такова, чтобы его скорость достигла скорости лидера на участке от D_{\min} до D_{\max} , но при этом не должна превышать предельно допустимое значение замедления по условиям комфорта (Jt_d), а также значение замедления, допустимого по условиям сцепления колес с дорогой (Jt_{\max}):

$$Jt = J_{i-1} - \frac{(V_{i-1} - V_i)^2}{2 \cdot (dS - dx)}, \quad (8)$$

$$J_{\max} = \frac{g \cdot \varphi}{K\varepsilon_i}. \quad (9)$$

Торможение ведомого автомобиля начинается при уменьшении dS до D_{\min} и истечении времени реакции водителя, причем замедление ограничивается Jt_{\max} . Замедление в данном случае рассчитывается по формуле

$$Jt = J_{i-1} - \frac{(V_i - V_{i-1})^2}{2 \cdot (dS - d_{кр})}. \quad (10)$$

Переход к выравниванию скорости ведомого автомобиля после торможения происходит на участке от $d_{кр}$ до d_{\max} , причем с таким ускорением, чтобы его скорость достигла скорости лидера до наступления момента, когда dS станет равным D_{\max} .

Данная расчетная модель вследствие детального воспроизведения управляющих действий водителя при движении в плотном потоке наиболее полно отражает динамику «коллективного» движения автомобилей. Однако она недостаточно полно учитывает особенности и закономерности процесса движения насыщенных потоков автомобилей в зоне ЖДП и может быть использована только для предварительных расчетов и ориентировочных оценок качества принимаемых решений на таких объемах УДС. Для повышения адекватности моделирования движения ТП на ЖДП и

подходах к ним автором разработан алгоритм действий водителя по управлению ТС на дорогах с участками ограничения скорости [13], который может быть включен, как составляющая в рассмотренную модель ТП (рис. 1).

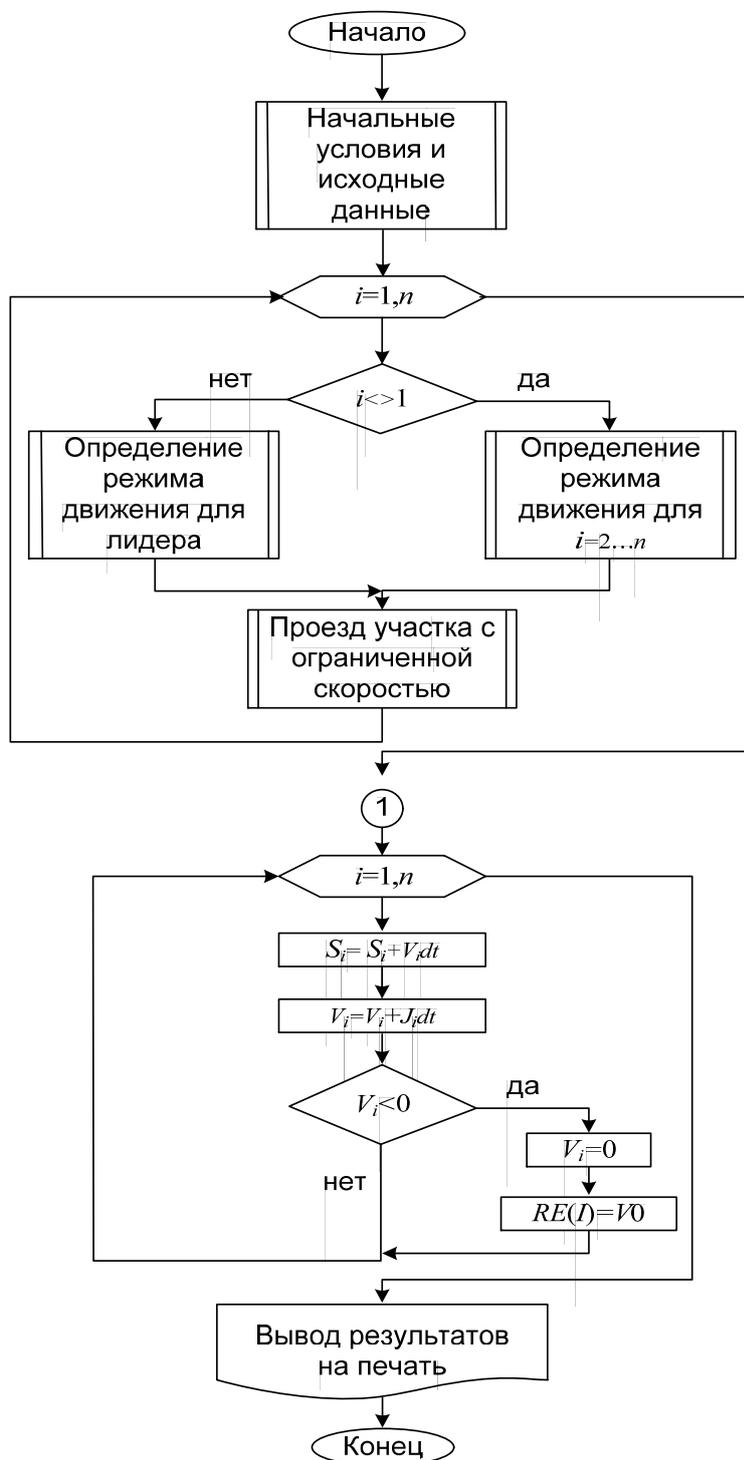


Рис. 1. Алгоритм исследовательской компьютерной программы

Алгоритм имитационного моделирования движения плотного ТП на дорогах с участками ограничения скорости движения показан на рис. 2.

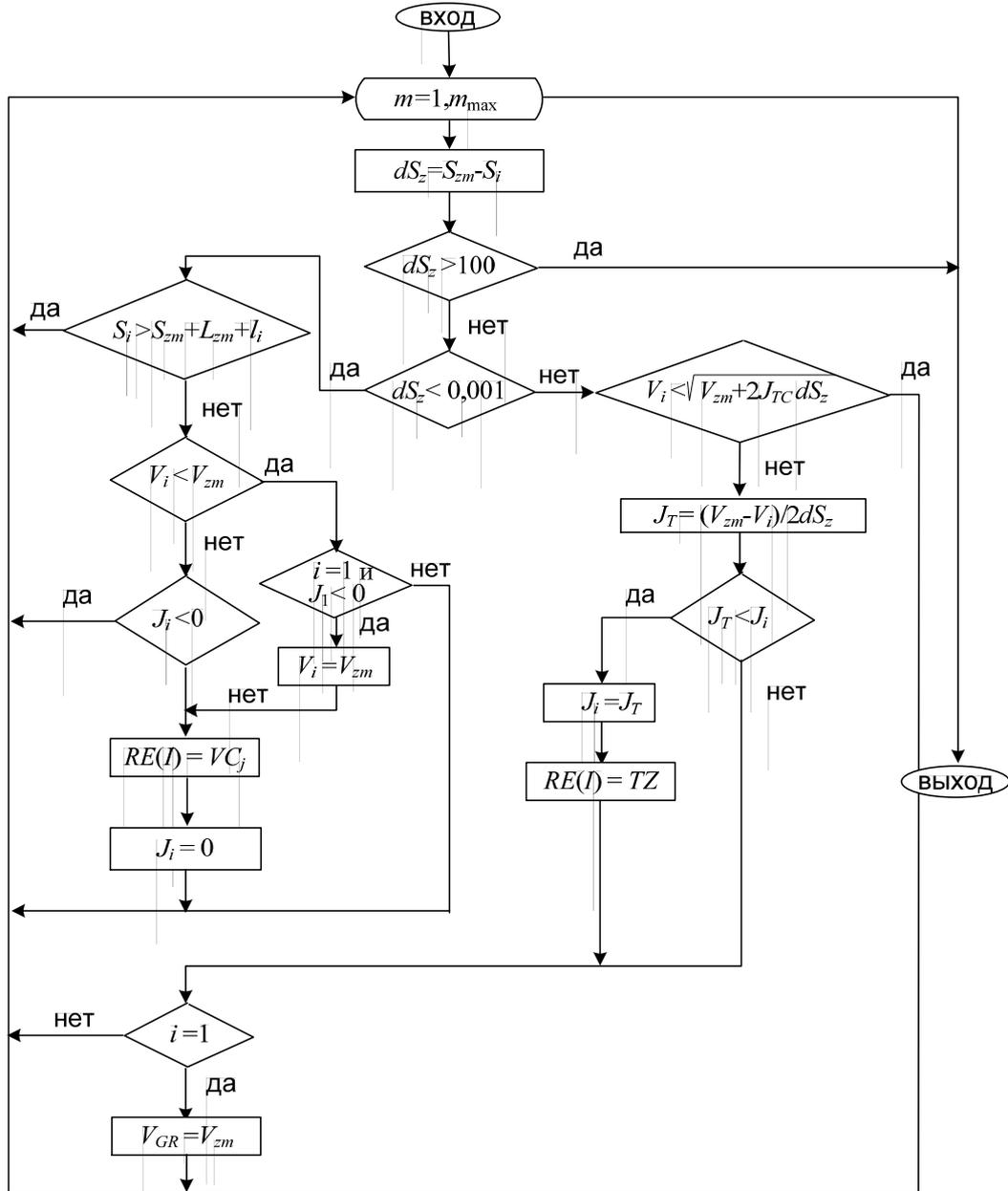


Рис. 2. Блок-схема статистического моделирования движения потока автомобилей на дорогах с участками ограничения скорости: V_{zm} – допустимая величина скорости движения на участке ограничения скорости; S_{zm} – координата начала участка с ограничением скорости движения; L_{zm} – протяженность участка ограничения скорости движения

Результаты эксперимента и их обсуждение

Данный алгоритм позволяет воспроизвести движение каждого отдельного автомобиля в ТП и определить, как показатели режима движения потока в целом, так и отдельных входящих в него ТС. Исследовательская компьютерная программа составлена на алгоритмическом языке Паскаль, графически отображается движение потока автомобилей через зону ограничения скорости. Пример работы исследовательской компьютерной программы показан на рис. 3.

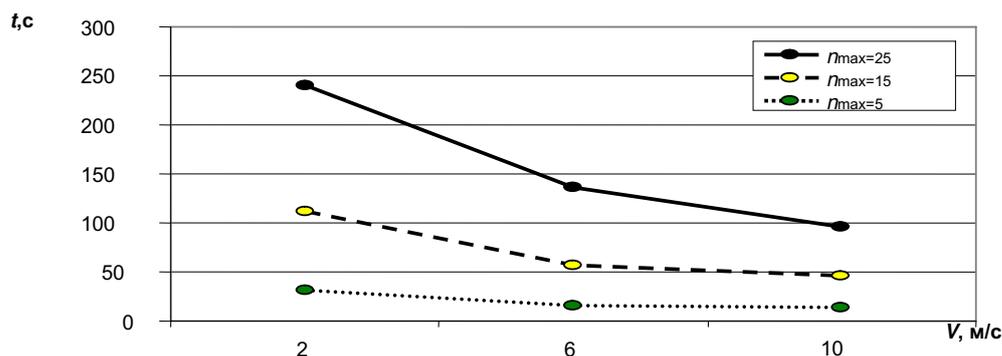


Рис. 3. Зависимость времени проезда потока автомобилей через зону ограничения скорости движения

Для проверки достоверности модели были проведены компьютерные расчеты для ЖДП с тремя путями при характерных для него условиях движения. Сопоставление данных фактических наблюдений с результатами моделирования показало, что их отклонения не превышают 10–15 %.

Заключение

Таким образом, предложенная усовершенствованная расчетная модель ТП может использоваться как эффективный инструмент для исследования «коллективного» движения автомобилей в зоне ЖДП, а также в других «узких» местах на УДС. Модель может применяться для оценки методов организации движения в местах производства дорожно-ремонтных работ и во всех других случаях, когда пропускная способность автомобильных дорог (улиц) не вполне соответствует интенсивности транспортного потока. Использование данной модели позволяет исследователю более достоверно определять показатели режимов движения плотного ТП на дорогах с участками ограничения скорости и, как следствие, получать более полную картину условий движения на проектируемом объекте УДС. При этом проектные решения можно оптимизировать по экономическим критериям и по критериям безопасности.

Следующим этапом в области повышения качества оценки проектных решений, принимаемых по ОДД в зоне ЖДП должен быть ряд исследований, направленных на определение (уточнение) параметров, характеризующих ТП в различных дорожно-транспортных ситуациях, возникающих на практике.

Литература

1. Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения : в 2 ч. / Ю. А. Врубель. – Минск : Белорус. фонд безопасности дорож. движения, 1996. – Ч. 1 ; 2. – 328 с.
2. Баваров, Б. Н. Исследование характеристик движения автомобилей для проектирования пересечений автомобильных дорог с железными дорогами в одном уровне : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.22.03 / Б. Н. Баваров ; МАДИ. – Москва, 1978. – 21 с.
3. Кисляков, В. М. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобилей и пешеходов / В. М. Кисляков, В. В. Филиппов, И. А. Школяренко. – Москва : Транспорт, 1979. – 200 с.
4. Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – Москва : Транспорт, 1977. – 303 с.
5. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю. – Москва : Транспорт, 1972. – 424 с.

6. Гаврилов, А. А. Моделирование дорожного движения / А. А. Гаврилов. – Москва : Транспорт, 1980. – 189 с.
7. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения / А. П. Буслаев [и др.] ; под общ. ред. В. М. Приходько. – Москва : Мир, 2003. – 368 с.
8. Сильянов, В. В. Имитационное моделирование транспортных потоков в проектировании дорог / В. В. Сильянов, В. М. Еремин, Л. И. Муравьева. – Москва : МАДИ, 1981. – 119 с.
9. Математическое моделирование автотранспортных потоков / Н. Н. Смирнов [и др.]. – Москва : МГУ, 1999. – 30 с.
10. Математическое моделирование автомобильных потоков на магистралях / Н. Н. Смирнов [и др.] // Вестн. МГУ. Сер. 1, Математика и механика. – 2000. – № 4. – С. 39–44.
11. Рожанский, Д. В. Моделирование управления транспортным средством в плотном потоке / Д. В. Рожанский // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2007. – № 2(15). – 85 с.
12. Клафи, П. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения / П. Клафи [и др.] ; пер. с англ. – Москва : Транспорт, 1981. – 592 с.
13. Карасевич, С. Н. Алгоритмизация действий водителя по управлению автомобилем в зоне железнодорожного переезда / С. Н. Карасевич // Современный транспорт и транспортные средства: проблемы, решения, перспективы : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2007. – С. 200–203.

Получено 18.10.2007 г.