

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ РАЗГРУЗКЕ ОЧЕРЕДИ АВТОМОБИЛЕЙ У ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДОВ

Рассматривается проблема снижения потерь в дорожном движении на пересечениях автомобильных дорог с железными дорогами в одном уровне. Приводятся результаты натурных наблюдений и экспериментального исследования процесса движения автомобилей при разгрузке очереди, образовавшейся у железнодорожного переезда. Детально проанализированы распределение временных интервалов убытия автомобилей из очереди у переезда, а также поведение первого автомобиля в очереди (лидера очереди). Показаны особенности режимов движения плотного транспортного потока через железнодорожное полотно: прогрессирующее падение скорости ведомых автомобилей очереди в результате снижения скорости лидера (лидеров), закономерность изменения скорости лидера очереди и интенсивности убытия автомобилей из очереди. Полученные результаты исследований могут быть использованы с целью совершенствования и повышения эффективности организации дорожного движения.

**В** современных условиях резкого увеличения числа автомобилей на улично-дорожной сети (УДС), когда все чаще необходимо обеспечивать движение транспортных потоков (ТП) высокой интенсивности, особенно важными являются исследования насыщенных режимов движения транспортных средств (ТС) и установление характерных для них закономерностей. Пересечения автомобильных дорог с железными дорогами в одном уровне являются сложными элементами УДС, на которых характерно образование плотных ТП. Резкое снижение скорости и увеличение плотности ТП на этих пересечениях оказывает негативное влияние на эффективность эксплуатации автомобильного транспорта и сопровождается высоким уровнем потерь. Плотный ТП является неустойчивым и может приводить к заторам, а также к столкновениям ТС. Движение на неэкономичных режимах (частые разгоны и торможения) и непроизводительная работа двигателя автомобиля, обусловленные стесненными условиями в потоке, значительно ухудшают экологическую обстановку в зоне железнодорожного переезда (ЖДП). Очевидно, что с ростом автомобилизации населения и развитием железнодорожных перевозок эти потери будут неуклонно возрастать. Поэтому требования к качеству организации дорожного движения (ОДД) на этих объектах улично-дорожной сети постоянно повышаются.

Грамотное принятие проектных решений по совершенствованию условий движения в зоне ЖДП возможно только на основе изучения закономерностей движения ТП. Большой научный и практический интерес представляет изучение процесса убытия автомобилей из очереди у ЖДП, при котором наблюдаются особенно небольшие скорости движения и высокая плотность ТП. С точки зрения регулирования движения наиболее важным

является исследование возмущений в ТП, вызывающих задержки, вынужденную остановку и конфликтные ситуации. При этом одними из основных характеристик, которые необходимо определить, являются распределение интервалов между автомобилями, следующими друг за другом по одной полосе движения, а также закономерность набора скорости первым автомобилем (лидером) очереди после выключения запрещающих движение сигналов светофорной переездной сигнализации.

В целом эти характеристики изучены в мировой практике и не являются препятствием при проектировании ОДД в зоне ЖДП [1–3]. Однако имеются недостаточно изученные вопросы, связанные с особенностями и закономерностями движения ТП на ЖДП и подходах к ним в процессе образования и разгрузки очереди. Вместе с этим, при постоянном росте уровня автомобилизации населения и улучшении динамических характеристик современных ТС необходимо обновление данных о характеристиках ТП в различных условиях движения.

По своей сути процесс разгрузки очереди автомобилей – это динамический во времени процесс, подверженный влиянию различных факторов [4]. Убытие автомобилей из очереди характеризуется максимальным взаимодействием ТС, поскольку пространственные интервалы между автомобилями близки к минимальным дистанциям безопасности. Водитель в таком режиме движения вынужден подчиняться общему режиму движения ТП и реагировать на изменения скорости лидирующих ТС в потоке. Максимально возможная интенсивность убытия автомобилей из очереди характеризуется **потоком насыщения**, который является одним из наиболее важных параметров при светофорном регулировании.

В работе [5] показано, что при включении зеленого сигнала светофора интервалы времени меж-

ду убывающими легковыми автомобилями от линии «СТОП» перекрестка, начиная с пятого – седьмого номеров в очереди, являются постоянными для данной очереди (рисунок 1).

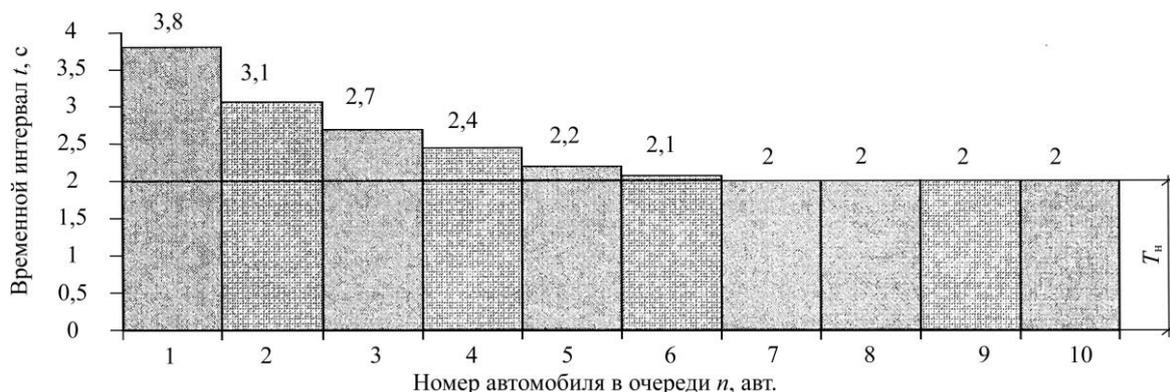


Рисунок 1 – Распределение интервалов при разгрузке очереди легковых автомобилей от линии «Стоп» перекрестка после включения зеленого сигнала (по данным Б. Гриншилдса)

типов ТС не изменяется, но величина последних несколько увеличится. Исследования, приведенные в работе [6], показывают, что величина интервалов убытия из очереди грузовых автомобилей на 50 % больше, чем у легковых. Накопленную разность между величинами первых и установившихся интервалов называют **потерянным временем** [1].

Известно, что одним из наиболее значимых факторов, снижающих величину потока насыщения, является наличие помех на проезжей части, в частности присутствие неровностей покрытия. Натурные наблюдения за процессом движения ТП через железнодорожное полотно, а также фактор наличия на переезде конструктивных неровностей проезжей части в виде настила и рельсов сформировали гипотезу о прогрессирующем падении скорости ТС в потоке вследствие движения потока автомобилей через неровности переезда, что непосредственно связано с возникновением возмущений в потоке, приводящих к негативным последствиям (заторам, конфликтам и авариям). В связи с этими обстоятельствами поставлена задача проверки выдвинутой гипотезы и уточнения закономерностей изменения, исследуемых характеристик ТП для повышения эффективности проектирования ОДД в зоне ЖДП.

Для изучения рассматриваемых характеристик ТП было проведено экспериментальное исследование на трех ЖДП с одним, двумя и тремя путями соответственно. Критерием выбора ЖДП явились наиболее благоприятные дорожные условия, где железнодорожные пути пересекаются автомобильной дорогой под прямым углом, подходы к переезду представляют собой прямой горизонтальный участок с асфальтобетонным покрытием без значимых дефектов и продольных уклонов. На

Величина  $T_n$  установившегося интервала убытия легковых автомобилей из очереди, образующейся у перекрестка, составляет порядка 2 с. Характер распределения интервалов убытия других

рассматриваемых переездах ровность резинового настила соответствовала действующим нормативам. Измерения временных интервалов проводились в створе линии шлагбаума, а при его отсутствии – в створе стоп-линии. При исследовании использовались секундомеры, видеокамера и видеомagneтофон. В качестве способа определения скорости применялся известный метод измерения времени прохождения мерного расстояния [1, 3]. Среднюю скорость на мерном участке определяли по следующей формуле:

$$v = L / (t_k - t_n), \quad (1)$$

где  $L$  – длина мерного расстояния, м;  $t_k$  – время прохождения автомобилем конца мерного расстояния, с;  $t_n$  – время прохождения автомобилем начала мерного расстояния, с.

Обработка результатов исследования проводилась методами теории вероятностей и математической статистики на основе стандартных компьютерных пакетов, а также с помощью программного обеспечения STATGRAPHICS Plus.

**Исследование распределения временных интервалов между автомобилями.** Рассматривались очереди, состоящие только из легковых автомобилей, количество которых было не менее 15. Всего было просчитано 40 очередей на каждый переезд. Каждому автомобилю очереди присваивался номер  $n = 1, 2, 3...$  Значения интервалов, определенные для одних и тех же номеров автомобилей, представляют собой статистический ряд. Для обработки данного ряда строится статистическая плотность распределения интервалов между автомобилями. Диапазон интервалов для каждого номера  $n$  разбивается на несколько промежутков

и подсчитывается количество значений  $f_i$ , попавших в каждый промежуток. Разделив  $f_i$  на общее количество наблюдений  $N$ , получим частоту, соответствующую каждому промежутку:

$$p_i = f_i N. \quad (2)$$

В таблице 1 приведен пример расчета для  $n = 9$ .

Таблица 1 – Расчет вероятностей распределения временных интервалов для  $n = 9$

| Разряды $x_i, \dots, x_{i+1}$ | Среднее значение интервала $\Delta t_i$ | Частота разряда $f_i$ | Частость $p_i$ |
|-------------------------------|---|-----------------------|----------------|
| $2,0 \leq \Delta t < 2,5$     | 2,25                                    | 2                     | 0,050          |
| $2,5 \leq \Delta t < 3,0$     | 2,75                                    | 4                     | 0,100          |
| $3,0 \leq \Delta t < 3,5$     | 3,25                                    | 7                     | 0,175          |
| $3,5 \leq \Delta t < 4,0$     | 3,75                                    | 8                     | 0,200          |
| $4,0 \leq \Delta t < 4,5$     | 4,25                                    | 11                    | 0,275          |
| $4,5 \leq \Delta t < 5,0$     | 4,75                                    | 4                     | 0,100          |
| $5,0 \leq \Delta t < 5,5$     | 5,25                                    | 4                     | 0,100          |

На рисунке 2 приведена гистограмма распределения интервалов между 9 и 10 автомобилями в очереди, которая позволяет считать, что выравнивание полученных статистических рядов для каждого  $n$ , т. е. выбор теоретической кривой распределения, возможно при помощи распределения Эрланга. Оценка согласованности эмпирического и теоретического распределений произведена по критериям согласия Пирсона  $\chi^2$  и Романовского  $R$ .

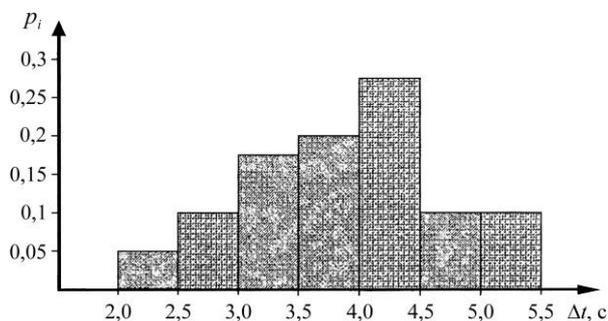


Рисунок 2 – Гистограмма распределения интервалов между 9 и 10 автомобилями очереди

Значения статистических характеристик Эрланговского распределения рассчитываются путем последовательного интегрирования по частям. На рисунке 3 нанесены экспериментальные точки, соответствующие средним значениям временных интервалов между автомобилями в очереди, и аппроксимирующая кривая.

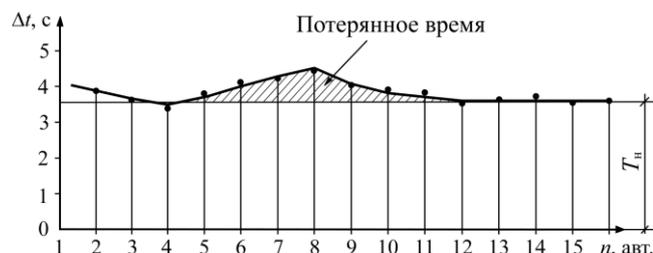


Рисунок 3 – Распределение временных интервалов при разгрузке очереди легковых автомобилей у железнодорожного переезда с тремя путями

Анализ построенной кривой показывает, что с момента начала разгрузки очереди интервалы между автомобилями выходят на некоторый стационарный режим, независимый от места ТС в исследуемом ряду, только после пересечения створа линии шлагбаума одиннадцатым автомобилем очереди. Вместе с этим имеются основания выделить следующие особенности изменения интенсивности убытия ТС в зависимости от их порядкового номера в очереди. Так, имеют место достаточно ярко выраженные фазы роста, спада и установившейся интенсивности разгрузки очереди.

Рост интенсивности убытия автомобилей из очереди наблюдается в начальный период рассасывания очереди, когда створ линии шлагбаума пересекают первые четыре автомобиля. Начиная с пятого номера очереди, интервалы между автомобилями заметно увеличиваются, в результате чего происходит накопление потерянного времени. Фаза спада интенсивности убытия автомобилей заканчивается в районе одиннадцатого номера очереди. После этого скорость движения автомобилей в створе линии шлагбаума несколько увеличивается и постепенно стабилизируется, интервалы также стабилизируются и начинают зависеть, в основном, только от разгонной динамики и длины автомобиля. Установившийся интервал убытия автомобилей из очереди в конечной фазе достаточно устойчиво сохраняется. Характер распределения интервалов практически не зависит от числа пересекаемых железнодорожных путей на переезде. Однако величина интенсивности убытия ТС из очереди с ростом количества пересекаемых железнодорожных путей снижается.

Детальный анализ режима движения автомобилей при разгрузке длинной очереди у ЖДП позволил следующим образом объяснить установленные эмпирическим путем особенности этого процесса. При подъезде непосредственно к пересечению железнодорожного полотна водители ТС, в большинстве своем, несколько снижают скорость движения (или переходят в режим равномерного движения без ускорения и замедления) и преодолевают неровности на переезде (настил и рельсы) также с меньшей величиной скорости, чем на подходе к переезду. При этом возникают перепады скоростей движения транспортных единиц в потоке, которые обуславливаются мотивацией водителей увеличить дистанцию безопасности между автомобилями. В связи с этим происходят дополнительные потери времени, которые накапливаются по мере роста номера в очереди.

Следует отметить прогрессирующее падение скорости у всех автомобилей, составляющих рассматриваемую группу, после снижения скорости автомобиля, двигавшегося в данной группе первым. Прогрессирующее снижение скорости ТП

также наблюдается в результате снижения скоростей движения лидирующей группой ТС очереди. На основе наблюдений можно следующим образом представить процесс прогрессирующего падения скорости.

Первый автомобиль снижает скорость ( $v_1$ ), развитую на подходах к переезду, до скорости ( $v_2$ ), определяемой дорожными условиями переезда, на который он выезжает. Наблюдения показали, что последующий автомобиль снижает скорость на **большую** величину и, следовательно, между минимальными скоростями появляется разность (*величина нарастания снижения скорости на один автомобиль*  $\Delta v = v_1 - v_2$ ). Она зависит от величины уменьшения скорости и отрицательного ускорения направляющих автомобилей очереди. Снижение скорости может происходить с отрицательными ускорениями разной величины. Чем больше величина отрицательного ускорения лидера (лидеров), тем меньше интенсивность потока автомобилей и больше вероятность вынужденной остановки ТС. При 14 и более автомобилях в очереди и резком снижении скорости (приблизительно в 2 раза и более) часто происходит остановка последних автомобилей в очереди и возникает затор, т. е. чем больше величина отрицательного ускорения, тем при меньшем количестве автомобилей в очереди происходит остановка последнего из них. Длина затора увеличивается тем быстрее, чем больше превышение интенсивности ТП на подходах к ЖДП над пропускной способностью зоны рассасывания затора. В эксплуатационных условиях нередко состояние настила ЖДП и подходов к нему таково, что не позволяет двигаться автомобилям со скоростью более 5 км/ч. Это резко увеличивает задержки ТС и повышает вероятность попутных столкновений ТС, а также вынужденной остановки автомобиля в потенциально опасном месте.

Возникающие перепады скоростей изменяют плотность ТП по длине очереди. При этом в районе железнодорожного полотна происходит образование зоны повышенной плотности, которая смещается против движения к концу очереди. Такой процесс разгрузки очереди автомобилей является неустойчивым, сопровождается дополнительными потерями времени и может вызывать конфликтные и заторовые ситуации [7]. На рисунке 3 видно, что для очереди легковых автомобилей потерянное время в каждом цикле составляет около 3 с. Очевидно, что величина этого потерянного времени при убытии из очереди грузовых автомобилей и автобусов, а также с ухудшением дорожных условий на переезде увеличится.

**Исследование закономерности набора скорости лидером очереди.** В ходе эксперимента исследовалось поведение первого автомобиля

очереди после остановки его перед стоп-линией регулируемого ЖДП с тремя путями. Исследование проводилось от момента начала движения после выключения красных сигналов светофорной переездной сигнализации до прохождения отметки в 50 м за ЖДП с учетом рекомендаций по измерению мгновенных скоростей движения, приведенных в [1, 3]. Результаты замеров фиксировались группой хронометражистов с помощью секундомеров. При этом каждый хронометражист отмечал время прохождения начала и конца мерного расстояния автомобилем и время от момента выключения красных сигналов светофора до момента пересечения начала мерного участка. Вместе с этим регистрировалось время от момента выключения красных сигналов светофора переездной сигнализации до начала движения первого автомобиля очереди и отмечалось положение ТС относительно «стоп-линии» для внесения поправок при расчетах. С целью исключения ошибки репрезентативности объем статистической выборки был увеличен до 100 очередей. Аналогично тому, как при исследовании временных интервалов строилась статистическая функция распределения скоростей.

По виду построенной гистограммы сделан вывод о том, что распределение скоростей подчиняется нормальному закону распределения. Для упрощения вычисления статистических характеристик за представителя каждого ряда принимали его середину –  $v_i$ . В этом случае числовые характеристики исследуемой случайной величины вычисляются по формулам:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^k f_i v_i}{N}, \quad (3)$$

где  $k$  – количество разрядов,  $\bar{v}$  – средний интервал между автомобилями, с;

$$D = \frac{\sum_{i=1}^k f_i (v_i)^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^k f_i v_i \right)^2}{N - 1}, \quad (4)$$

где  $D$  – дисперсия;

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

Доверительные интервалы полученных статистических оценок вычисляли по формулам:

$$\bar{D} = D/N, \quad (6)$$

где  $\bar{D}$  – средняя дисперсия;

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{D}}. \quad (7)$$

Вычисленное значение средней скорости  $v$  с вероятностью 0,95 лежит в интервале  $\bar{t} \pm 2\sigma$ . После математической обработки экспериментальных данных построена зависимость скорости от времени, которая приведена на рисунке 4.

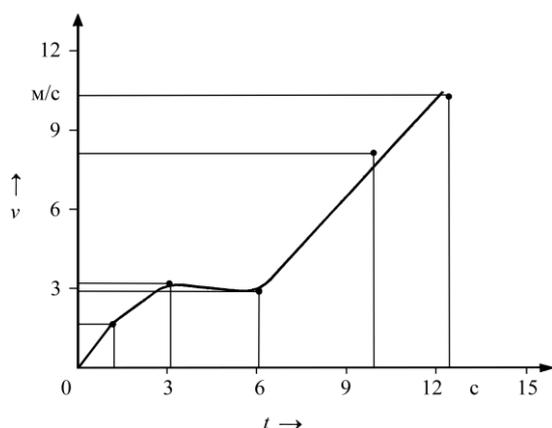


Рисунок 4 – Зависимость скорости движения лидера очереди от времени в зоне железнодорожного переезда с тремя путями

Характер построенной кривой показывает закономерность набора скорости первым автомобилем очереди при ее разгрузке у переезда с тремя путями. Видно, что на определенном этапе наблюдается некоторое снижение скорости лидером очереди. Возникновение этого явления связано с особенностями процесса движения автомобилей через неровности проезжей части в зоне ЖДП. Это обстоятельство можно объяснить стремлением водителей двигаться через участок ухудшения дорожных условий с ускорениями, допустимыми по условиям комфортности, а также увеличением влияния сил сопротивления поступательному движению автомобиля на данном участке.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что интервалы между автомобилями при разъезде длинной очереди у ЖДП зависят от позиции автомобиля в очереди, разгонной динамики и длины автомобиля, места остановки у переезда лидера очереди, а также от

числа путей, пересекаемых автомобильной дорогой (улицей). Причем чем больше железнодорожных путей пересекает автомобильная дорога, тем больше величина интервалов между автомобилями. Характер распределения интервалов в однородном ТП практически не зависит от числа пересекаемых железнодорожных путей на переезде. Отмечено прогрессирующее падение скорости у всех автомобилей, составляющих поток, после резкого снижения скорости лидера (лидирующей группы).

Полученные в ходе эксперимента результаты могут быть использованы в целях совершенствования ОДД на ЖДП и подходах к ним. Перспективно применение расчетных моделей плотного ТП для дальнейшего проведения исследований характеристик движения потоков автомобилей при изменении управляющих воздействий и ухудшении дорожных условий в зоне ЖДП.

#### Список литературы

- 1 Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения. В 2 ч. / Ю. А. Врубель. – Мн. : Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 634 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 / МАДИ. – М., 1978. – 21 с.
- 3 Автомобильные перевозки и организация дорожного движения : перев. с англ. / П. Клафи [и др.]. – М. : Транспорт, 1981. – 592 с.
- 4 Важник, Ю. П. Разработка и применение нелинейной модели убывания автомобилей из очереди при светофорном регулировании : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Ю. П. Важник; БГПА. – Мн., 1998. – 21 с.
- 5 Мэтсон, Т. М. Организация движения / Т. М. Мэтсон, У. С. Смит, Ф. В. Хард. – М. : Автотрансиздат, 1960. – 463 с.
- 6 Романов, А. Г. Дорожное движение в городах: закономерности и тенденции / А. Г. Романов. – М. : Транспорт, 1984. – 80 с.
- 7 Карасевич, С. Н. Экспериментальное исследование разгрузки очереди автомобилей на пересечениях автомобильных и железных дорог в одном уровне / С. Н. Карасевич // Экологическая безопасность и энергосбережение на транспорте : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. В. М. Овчинникова. – Гомель : БелГУТ, 2006. – С. 159–162.

Получено 02.10.2007

#### S. N. Karasevich. Investigation of transport flow characteristics at relieve of automobile queue at railway crossings.

The problem of losses lowering in traffic at one level crossings of roads with railways is considered. The results of full-scale observations and experimental investigations of automobile flow at relieve of automobile queue at crossings with different number of tracks crossed are given. Distribution of automobile departure time intervals from the queue at the crossing and also the behavior of the first automobile in the queue (queue leader) are analyzed. The peculiarities of dense traffic flow movement regime across the railway track are shown: gradual speed decrease of the queue leaded automobiles as the result of leader's speed decrease, regularity of queue leader speed change and intensity of queue automobiles departure. We offer the method of improvement of traffic conditions at long queue relieve at one level crossings of roads with railways. The obtained results may be used with the aim of improvement and effectiveness increase of traffic organization on railway crossings.