

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ КООРДИНИРОВАННОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ И ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ

Канд. техн. наук, доц. КАПСКИЙ Д. В., инж. НАВОЙ Д. В.

Белорусский национальный технический университет

В качестве базовой принята методика расчета экономических потерь, разработанная в БНТУ [1]. В этой методике имеется допущение, которое снижает точность определения потерь от задержек поворотных транспортных потоков (ТП). Сущность его заключается в следующем.

Потери в дорожном движении, по определению, есть социально-экономическая стоимость невынужденных издержек процесса движения. При определении экономических потерь от задержек транспорта на регулируемом перекрестке в качестве нормативной принята равномерная скорость движения 60 км/ч ($v = 60$ км/ч, $I_v = 0$). Все, что отличается от этого режима в худшую сторону (снижение скорости и увеличение неравномерности), принято считать невынужденной издержкой, вызывающей потери – именно так считается в базовой методике.

Однако такая скорость ($v = 60$ км/ч; $I_v = 0$) на регулируемых перекрестках возможна только для транзитных (прямых) транспортных потоков. В то же время для поворотных, особенно для правоповоротных транспортных потоков, в большинстве случаев она физически недостижима, поскольку определяется относительно небольшим радиусом поворота траектории движения транспортных потоков. В свою очередь радиусы поворота определяются многими факторами, в том числе и независимыми от организации движения, и их (радиусы), как правило, следует рассматривать как данность. Следовательно, пониженная (по отношению к 60 км/ч) скорость поворотных транспортных потоков до каких-то пределов является вынужденной издержкой и, следовательно, не приводит к потерям. Поэтому в каждом конкретном случае для поворотных ТП необходимо определять максимальную (эталонную) скорость, ниже которой (а не 60 км/ч) начинаются невынужденные издержки, приводящие к потерям [2, 3].

Экономические потери рассчитываются для каждого расчетного модуля координированного регулирования (КР) и затем суммируются

в пределах магистрали или ее исследуемого участка. Расчетный модуль состоит из выхода предыдущего светофорного объекта (СФО) (регулируемый перекресток или регулируемый пешеходный переход), исследуемого перегона и входа последующего СФО (рис. 1). Установленные на исследуемом перегоне специальные транспортные светофоры (если они имеются) – предсигналы либо светофор для маршрутного пассажирского транспорта на остановочном пункте – играют вспомогательную роль и здесь не относятся к светофорным объектам.

Транспортные средства (ТС), уходящие с координированного направления (КРН) в пересекаемые улицы на регулируемые перекрестки (РПК) (координированные поворотные), относятся к входу в СФО, и потери для них рассчитываются. Транспортные средства, входящие на КРН с пересекаемых улиц на РПК, относятся к выходу из СФО, и потери на выходе для них считаются только при расчете потерь с некоординированных направлений. ТС, входящие на КРН с боковых проездов, мест стоянки или остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта, относятся к исследуемому перегону, и потери на входе для них не рассчитываются.

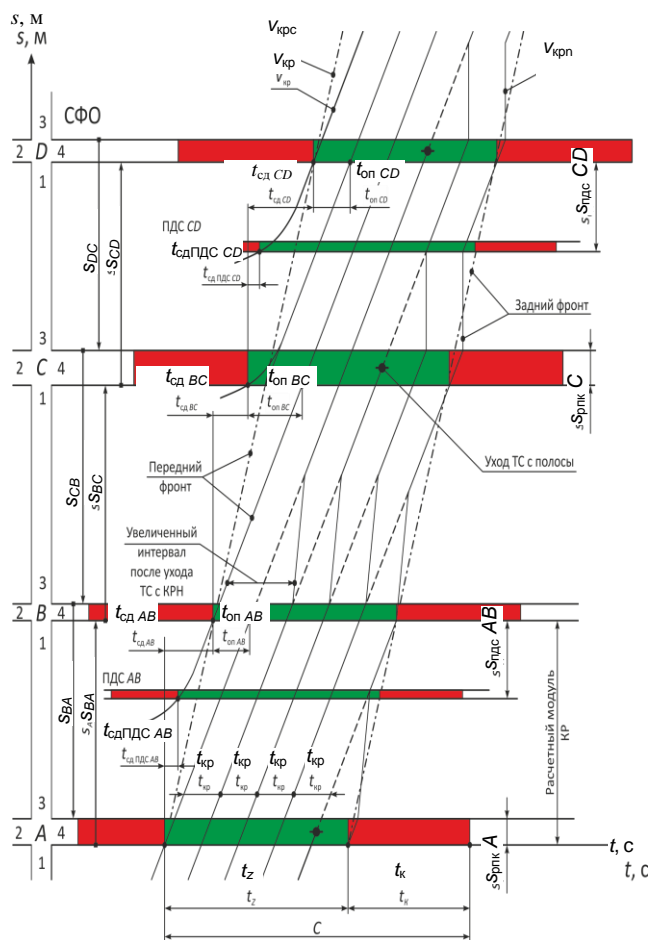


Рис. 1. Некоторые параметры КР ($t-s$ -диаграмма): A, B, C, D – наименование СФО; ПДС АВ, ПДС AD – то же предсигналов перед СФО В и D; $t_{здAB(BC, CD)}$ – сдвиг включения ЗС на СФО В по отношению к СФО А, с; $t_{оп(AB, BC, CD)}$ – время «опережения» включения ЗС на СФО В по отношению к расчетному времени прибытия первого координированного ТС со СФО А, с; $T_{кр}$ – интервал координированного движения (на исследуемом перегоне), с; t_z – продолжительность ЗС, с; t_k – продолжительность запрещающего сигнала (включая оба переходных интервала), с; C – продолжительность СФЦ, с; s_{AB} – расстояние между стоп-линиями при движении от СФО А к СФО В, м; s_{BA} – то же при движении от В к А, м; $v_{крн}$ – скорость координации, предписываемая, м/с; $v_{крс}$ – то же сообщения КР, м/с; $v_{крт}$ – то же движения последующего ТС при заполнении увеличенного интервала, образовавшегося после ухода с полосы предыдущего ТС, м/с

Транспортное средство считается координированным, только после того как оно пройдет на зеленый сигнал (ЗС) первого светофора, установленного на координированном направлении. Транспортные средства координированного направления, идущие в плотной группе (координированной пачке), считаются координированными и называются пачковыми. ТС координированной пачки, проходящие исследуемый расчетный модуль транзитом, называются ко-

ординированными транзитными. ТС координированной пачки, уходящие с КРН на пересекающие улицы на РПК, называются координированными поворотными. Все остальные транспортные средства координированного направления, идущие вне координированной пачки и, как правило, попадающие на красный сигнал (КС), считаются внепачковыми. Внепачковые ТС, остановленные на КС светофорного объекта, требуют больше времени ЗС, поскольку они трогаются с места и значительная часть времени ЗС расходуется на их разгон в пределах перекрестка.

Чтобы исключить потери дорогостоящего времени зеленого сигнала СФО на разгон внепачковых автомобилей, используется так называемый «предсигнал» – специальный транспортный светофор, установленный на некотором удалении (около 80 м) от СФО, действующий только на одну сторону улицы и останавливающий все внепачковые ТС (за исключением тех, которые входят на КРН уже за предсигналом) [4, 5]. Зеленый сигнал на предсигнале включается заранее с таким расчетом, чтобы остановленные на нем транспортные средства успели разогнаться до скорости координации и прошли светофорный объект с ходу, желательно в самом начале включения ЗС, при этом они сливаются с догнавшей их координированной пачкой и возглавляют ее.

Потери от задержек и остановок транспорта и перерасхода топлива на предсигнале не рассчитываются, поскольку эти издержки считаются вынужденными и, по определению, не приводят к потерям. Дело в том, что любое ТС, выехавшее на координированное направление с боковых улиц или проездов, не может пройти следующий светофорный объект раньше включения зеленого сигнала в направлении координации. Следовательно, с момента выезда на КРН и до начала включения ЗС на светофорном объекте оно должно либо двигаться очень медленно, что неприемлемо со всех точек зрения, либо двигаться с «нормальной» скоростью и остановиться у СФО, ожидая включения ЗС. Однако, как уже указывалось, остановка у стоп-линии светофорного объекта приводит к значительным невынужденным издержкам, что крайне нежелательно. Поэтому всем выгодно остановиться и ожидать зеленый сигнал на светофорном объекте на некотором удалении от него

(т. е. на предсигнале) и проходить его с ходу, заранее разогнавшись на перегоне.

Что касается специального транспортного светофора для маршрутного пассажирского транспорта, то его установка на выходе из остановочного пункта решает задачу недопущения дополнительной остановки подвижной единицы перед СФО, которая некомфортна для пассажиров и отнимает около 9–10 с ЗС в координированном направлении.

Если же в координированном направлении разрешена остановка-стоянка ТС либо остановочный пункт маршрутного пассажирского транспорта (МПТ) организован без заездного кармана, то такие ситуации рассматриваются как исключение одной полосы из координированного регулирования с соответствующим увеличением нагрузки на оставшиеся полосы. Сюда же относятся ситуации, когда с одной полосы разрешено транзитное и левоповоротное конфликтное движение, а также транзитное и правоповоротное конфликтное движение без обеспечения достаточной емкости накопительной площадки перед пешеходным переходом. В этих ситуациях движение по полосе считается некоординированным и расчет потерь проводится как для локального светофорного объекта. Наличие нерегулируемого пешеходного перехода на перегоне несовместимо с понятием координированного регулирования и рассматривается как разрыв координации. Точно так же рассматривается наличие на координированном регулировании магистрали нерегулируемого кольцевого перекрестка, железнодорожного переезда, ремонтных работ с закрытием отдельных полос движения, длинных (более 700–800 м) перегонов без установки предсигналов и т. д. [6–8].

Расчет экономических потерь при координированном регулировании неразрывно связан с расчетом потерь при локальном регулировании, что объясняется несколькими причинами. Во-первых, конфликтное движение поворотных транспортных потоков при уходе на регулируемый перекресток с координированного направления принципиально не отличается при обоих видах регулирования. Во-вторых, при изменении продолжительности ЗС в КРН мы тем самым обязательно изменяем продолжительность ЗС в некоординированных направле-

ниях, что значимо отражается на величине суммарных потерь. Например, отсутствие предсигнала требует увеличения ЗС в КРН примерно на 5 с, которые приходится отнимать у некоординированных направлений, что в ряде случаев приводит к неприемлемым последствиям. В-третьих, сегодня в условиях перегрузки координация не работает, и все светофорные объекты по существу являются локальными. И последнее. Существующие методики расчета потерь в дорожном движении (ДД) постоянно совершенствуются, что соответствует требованиям Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь [9, п. 6.4 или 6.3]. Как следствие, в существующую методику «Определение потерь в ДД», опубликованную в начале 2006 г. [1], внесены некоторые уточнения и изменения, повышающие ее качество.

Экономические потери на регулируемых перекрестках, как правило, рассчитываются только для регулируемого режима движения. Поскольку экономические потери при нерегулируемом режиме движения весьма незначительны (более чем на порядок меньше потерь при регулируемом режиме) из-за малой интенсивности движения, они не рассчитываются. Некоторая компенсация этих потерь производится за счет выбора годового фонда времени работы регулируемого перекрестка и некоторого увеличения расчетной интенсивности движения (ИД) по сравнению со средним значением.

Рассчитываются потери от издержек движения транспорта и пешеходов. Среди издержек движения транспорта рассматриваются задержки, остановки, перепробег и перерасход топлива, а при движении пешеходов – задержки и перепроход. Задержки и остановки транспорта рассчитываются для каждой полосы каждого направления, а потери от них суммируются в пределах перекрестка. Перепробег транспорта и потери от него определяются только в случае запрещения или отнесения поворотов, что, как правило, сопровождается перепробегом со всеми вытекающими последствиями. Потери от перерасхода топлива определяются для так называемого расчетного суммарного ТП.

Задержки пешеходов определяются для каждого пешеходного перехода, а потери от них суммируются в пределах перекрестка. Пе-

репроход пешеходов и потери от него определяются только в случае закрытия пешеходного перехода или существенного (более 6 м от линии тротуаров) отнесения его от перекрестка.

Потери на перегоне определяются для транспорта от задержек, остановок, перепробега и перерасхода топлива. Остановки на перегоне могут иметь место в случае перегрузки, наличия нерегулируемого пешеходного перехода (НПХ), остановочного пункта (ОП) трамвая без конструктивно выделенной (защищенной) посадочной площадки либо при наличии ОП троллейбуса или автобуса без заездного кармана.

Задержки, кроме перечисленных выше случаев остановок, могут иметь место при отличии средней технической скорости движения ТП от нормативной (60 км/ч). В этом случае также определяются потери от перерасхода топлива. Что касается перепробега, то он, как правило, происходит вне исследуемого перегона, однако потери от перепробега рассчитываются, поскольку его источник (причина) находится на исследуемом КРН.

Для пешеходов потери на перегоне определяются в случае ликвидации НПХ, переноса РПХ либо организации двухэтапного (вместо одноэтапного) перехода на регулируемый пешеходный переход (РПХ).

Как правило, повышенные задержки образуются при перегрузке. Под перегрузкой понимают такое кратко- или среднесрочное состояние исследуемого объекта, при котором коэффициент загрузки полосы движением превышает нормативно-допустимые значения ($x > 0,93$) и на отдельных полосах или направлениях образуются непрекращающиеся очереди транспортных средств.

Различают пиковый T_0 и непиковый T периоды работы светофорного объекта. Расчеты потерь производятся отдельно для каждого периода, и результаты суммируются. Напомним, что T_c – продолжительность (расчетная) существования транспортной нагрузки, ч/сут. При $\Phi_t = 4200$ ч/год $T_c = 14$ ч/сут., при $\Phi_t = 3600$ ч/год $T_c = 12$ ч/сут., при $\Phi_t = 3000$ ч/год $T_c = 10$ ч/сут. T_0 – продолжительность пикового периода, ч/сут., определяется экспериментально или задается расчетчиком; T – продолжительность непикового периода: $T = T_c - T_0$, ч/сут.

Расчетный годовой фонд времени определяется по формуле

$$\Phi_t = 300T, \text{ ч/год}; \Phi_{t0} = 300T_0, \text{ ч/год}.$$

e_{t0} – удельная задержка за пиковый период, с/авт. Она рассчитывается по формуле Брилона и Ву [10]

$$e_{t0} = \frac{C_0(1-\lambda_0)^2}{2(1-\lambda_0 x_0)} + \frac{N_0}{q_{н0}\lambda_0}, \text{ с/авт.},$$

где C_0 – продолжительность светофорного цикла при перегрузке, с; λ_0 – доля зеленого сигнала в цикле при перегрузке; x_0 – коэффициент загрузки полосы движением при перегрузке,

$$x_0 = \frac{q_0}{\lambda q_{н0}},$$

q_0 – средняя пиковая интенсивность движения (рис. 2), замеряемая после образовавшейся очереди автомобилей (в пространстве, т. е. там, где еще нет затора), авт./с; $q_{н0}$ – поток насыщения при перегрузке, авт./с (для параметров q_0 и $K_{пн0}$); N_0 – средняя длина очереди перед стоплинией в течение пикового периода T_0 , авт.,

$$N_0 = 524T_0 q_{н0} \lambda_0 \left[1,09x_0 - 1 + \sqrt{(1,09x_0 - 1)^2 + \frac{1,09x_0 - x_{п0}}{175 q_{н0}\lambda_0}} \right]$$

при $0,93 < x_0 < 1,14$;

$$N_0 = 900 T_0 q_{н0} \lambda_0 \left[x_0 - 1 + \sqrt{(x_0 - 1)^2 + \frac{x_0 - 0,92 x_{п0} - 0,08}{300 q_{н0}\lambda_0}} \right]$$

при $x_0 \geq 1,14$.

Здесь $x_{п0}$ – значение коэффициента загрузки полосы движением, выше которого будут ожидать перенасыщенные циклы,

$$x_{п0} \approx 0,67 + \frac{q_{н0} \lambda_0 C_0}{600},$$

$C_0, T_0, q_{н0}, \lambda_0, x_0$ определены ранее.

Расчет потерь проводится в такой последовательности. Определяются удельная задержка e_t и годовые потери Π_t для непикового периода T по исходным данным $q, K_{пн}, K_{пз}$ и Φ_t . Затем

вычисляются удельная задержка при перегрузке и годовые потери Π_0 для пикового периода T_0 по исходным данным q_0 , $K_{пн0}$, $K_{пз0}$ и $\Phi_{т0}$.

Отдельно необходимо рассмотреть задержки транспорта, возникающие при координированном регулировании. Это происходит из-за наличия помех переднему или заднему фронту координированной пачки на светофорном объекте, а также из-за помех, возникающих на перекрестках между объектами.

Помеха переднему фронту на СФО. В качестве помехи переднему фронту (рис. 3) можно рассматривать:

1) недостатки плана координации, в том числе и оставляющие избыточное время по переднему фронту $t_{изб}^{F1}$, позволяющее первым машинам переднего фронта, увеличив скорость и выйдя из графика координации, тем не менее успешно пройти предыдущий светофорный объект (из-за наличия $t_{изб}^{F1}$), но вынуждающие их «упереться» в красный сигнал на последующем СФО, не имеющем такого избыточного

дения (координированной пачки) на зеленый сигнал, в том числе при отсутствии предсигнала, мигания (перемигивания) красного сигнала, удлиненного (свыше 3 с) желтого сигнала, недостаточной видимости сигналов светофора и т. д.;

- сознательное превышение скорости координации при низких заданных ее значениях, которые психологически очень трудно выдерживать;

- сознательное превышение скорости при отсутствии у водителей значимых стимулов ее соблюдения и надлежащего оперативного контроля;

3) значимое увеличение – по отношению к расчетной – интенсивности движения внепачковых автомобилей в «часы пик»;

4) возникновение помех заднему фронту.

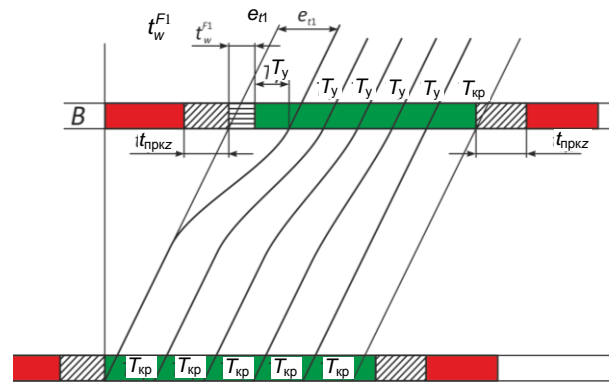


Рис. 3. t - s -диаграмма преодоления помехи переднему фронту менее 3 с (без остановки): T_y – минимальный интервал убытия; $T_{кр}$ – интервал координированного движения; t_w^{F1} – помеха переднему фронту менее 3 с; $t_{пкз}$ – переходный интервал от КС к ЗС; $t_{пкз}$ – то же от ЗС к КС; e_{n1} – задержка 1-го автомобиля

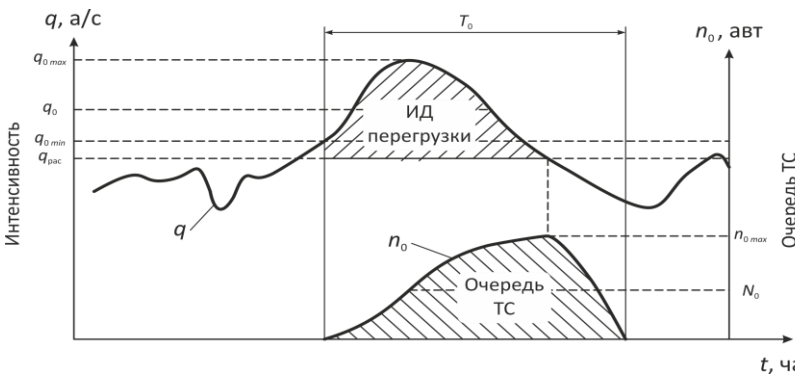


Рис. 2. Некоторые параметры перегрузки при КР: q_{0max} – максимальная ИД перегрузки, авт./с; q_{0min} – минимальная ИД перегрузки, авт./с; q_0 – то же средняя (расчетная), авт./с; $q_{рас}$ – ИД, при которой начинается рассасывание очереди, авт./с; n_{0max} – максимальная длина очереди на полосе, авт.; N_0 – средняя (расчетная) длина очереди, авт.; T_0 – расчетный период перегрузки, ч/сут.

времени;

2) несоблюдение (превышение) водителями скорости координации по следующим причинам:

- несоответствие заданной скорости реально необходимой (завышение);
- естественная погрешность при отсутствии подсистемы информации и подсистемы наве-

Если продолжительность помехи переднему фронту меньше 3 с ($t_w^{F1} \leq 3$ с), то водителям, как правило, удается преодолеть помеху без остановки ТП за счет уплотнения координированной пачки с интервала $T_{кр}$ до T_y .

Удельная задержка t_w^{F1} при возникновении помехи переднему фронту продолжительностью менее 3 с определяется по формуле

$$e_{тw}^{F1} = \frac{n_w^{F1} (n_w^{F1} + 1) T_y}{2n_{кр} (T_{кр} - T_y)}, \text{ с/авт.},$$

где $T_{кр}$ – интервал координированного движения в нормальных условиях; $T_{кр} = 2\sqrt{K_{пнкp}}$, с; T_y – минимальный интервал убытия координированных автомобилей с ходу в затрудненных условиях,

$$T_y = 1,65\sqrt{K_{пнкp}}, \text{ с};$$

n_w^{F1} – число притормаживаемых автомобилей, авт./цикл;

$$n_w^{F1} = \frac{t_w^{F1}}{T_{кр} - T_y} \leq n_{кр},$$

где t_w^{F1} – продолжительность существования помехи переднему фронту, с. По условию задачи $t_w^{F1} \leq 3$ с.

Если система координации имеет действенные подсистемы информации и наведения лидеров на зеленый сигнал, а также обеспечена отличная видимость сигналов светофора, то водители переднего фронта способны без остановки преодолеть и более продолжительную помеху переднему фронту (4 с). Следует также отметить, что при наличии предсигнала помеха переднему фронту возникает, как правило, на предсигнале, а СФО работает в нормальном режиме. Однако это не отражается на ходе расчетов и величине издержек, поэтому в целях упрощения рассматривается ситуация возникновения помехи на СФО, т. е. при отсутствии предсигнала.

Имеет место перегрузка, если

$$t_w^{F1} + n_w^{F1} T_y > t_z + n_b T_{кр} - t_{оп},$$

где t_z – продолжительность зеленого сигнала в координированном направлении, с; $t_{оп}$ – время опережения включения зеленого сигнала на исследуемом СФО, с; n_b – число внепачковых автомобилей на полосе, авт./цикл.

Если $t_w^{F1} > 3$ с (t_{w3}^{F1}), то лидирующие в пачке водители не могут преодолеть такую помеху с ходу и вынуждены остановиться (рис. 4). В этом случае убытие будет происходить уже с места с интенсивностью потока насыщения q_n , авт./с. В результате минимальный интервал убытия будет равен интервалу потока насыщения

$$T_n = \frac{1}{q_n}, \text{ с}.$$

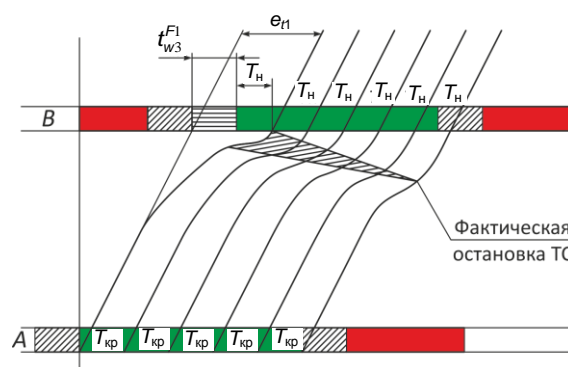


Рис. 4. t - s -диаграмма преодоления помехи переднему фронту более 3 с (с остановкой): t_{w3}^{F1} – помеха переднему фронту более 3 с; T_n – интервал убытия по потоку насыщения (с места); e_{t1} – задержка 1-го автомобиля (показан вариант преодоления помехи с использованием части переходного интервала $t_{пpзк}$)

Удельная задержка t_{w3}^{F1} при возникновении помехи переднему фронту продолжительностью более 3 с определяется по формуле

$$e_{w3}^{F1} = \frac{n_{w3}^{F1}(n_{w3}^{F1} + 1) T_n}{2n_{кр}(T_{кр} - T_n)}, \text{ с/авт.},$$

где n_{w3}^{F1} – число остановленных помехой переднему фронту автомобилей, авт./цикл;

$$n_{w3}^{F1} = \frac{t_{w3}^{F1}}{T_{кр} - T_n} \leq n_{кр}, \text{ авт./цикл}.$$

Поскольку T_n существенно больше T_y и в ряде случаев приближается к $T_{кр}$, преодоление помехи свыше 3 с, производимое с остановкой, является весьма трудным и опасным и очень часто приводит к сбою координации или к перегрузке.

Годовые потери от задержек при наличии помехи переднему фронту определяются по формуле

$$\Pi_{fw}^{F1} = e_{fw}^{F1} \bar{q}_{кр} K_{пзк} \Phi_{fw}^{F1} C_t, \text{ дол./год},$$

где Φ_{fw}^{F1} – годовой фонд времени существования помехи t_w^{F1} , ч/год;

$$\Phi_{fw}^{F1} = T_w^{F1} \cdot 300, \text{ ч/год},$$

где T_w^{F1} – продолжительность существования помехи t_w^{F1} , ч/сут., определяется экспериментально или задается расчетником. Аналогично вычисляются потери от помехи более 3 с (t_{w3}^{F1}).

Если

$$t_{w3}^{F1} + n_{w3}^{F1} T_n > t_z + n_B T_{кр} - t_{оп},$$

то имеет место перегрузка.

Помеха заднему фронту на СФО. В качестве помехи заднему фронту (рис. 5) можно рассматривать:

1) недостатки плана координации, в том числе оставляющие избыточное время по заднему фронту $t''_{изб}$, позволяющее последним машинам координированной пачки, двигаясь с пониженной скоростью (например, не заполняя образовавшиеся после ухода впереди идущих машин в боковые улицы или на другие полосы) и выйдя из графика координации (ленты времени безостановочного движения), тем не менее успешно пройти предыдущий светофорный объект (из-за наличия $t''_{изб}$), но вынуждающие их «упереться» в красный сигнал на последующем СФО, не имеющем такого избыточного времени;

2) несоблюдение (занижение) скорости координации по следующим причинам:

- несоответствия заданной скорости координации реально необходимой (занижение);

- естественной погрешности при отсутствии подсистемы информации и подсистемы наведения на зеленый сигнал, в том числе при отсутствии предсигнала, зеленого перемигивающего сигнала (ЗПС), зеленого мигающего сигнала (ЗМС) и короткого (2 с) желтого сигнала;

- наличия разнообразных помех координированному движению на перегоне – тихоходные транспортные средства, конфликтные повороты без выделения отдельной полосы, несанкционированные остановки-стоянки и т. д.;

- сознательного занижения скорости координации при отсутствии у водителей значимых стимулов ее соблюдения и отсутствии надлежащего оперативного контроля;

3) значимого увеличения – по отношению к расчетной – интенсивности движения внепач-

ковых и (или) координированных автомобилей в «часы пик»;

4) возникновения продолжительных (> 3 с) помех переднему фронту t_{w3}^{F1} .

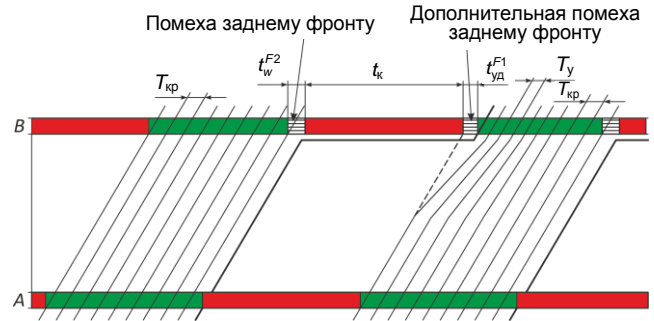


Рис. 5. t - s -диаграмма преодоления помехи заднему фронту: t_w^{F2} – помеха заднему фронту, с; $t_{уд}^{F1}$ – дополнительная помеха переднему фронту, вызванная помехой заднему фронту, с; $t_к$ – продолжительность КС, с; $T_{кр}$ – интервал координированного движения, с; $T_у$ – интервал ухода, с. (Показан вариант возникновения дополнительной помехи

$$t_{уд}^{F1} = T_n, \text{ с})$$

Удельная задержка e_{tw}^{F2} при возникновении помехи заднему фронту определяется по формуле

$$e_{tw}^{F2} = \frac{1}{n_{кр}} \left[n_w^{F2} (t_к + t_w^{F2}) - \frac{n_w^{F2} (n^{F2} + 1) T_{кр}}{2} + \frac{n_w^{F2} (n^{F2} + 1) T_n}{2} \right], \text{ с/авт.},$$

где t_w^{F2} – продолжительность существования помехи заднему фронту, с; n_w^{F2} – число оставленных координированных машин заднего фронта,

$$n_w^{F2} = \frac{t_w^{F2}}{T_{кр}} \leq n_{кр}, \text{ авт./цикл};$$

$t_к$ – продолжительность горения запрещающего сигнала на СФО для координированного направления, с (включая оба переходных интервала).

Годовые потери от задержек транспорта при наличии помехи заднему составят

$$\Pi_{tw}^{F2} = e_{tw}^{F2} q_{кр} K_{пэкр} \Phi_{tw}^{F2} C_t, \text{ дол./год},$$

где Φ_{tw}^{F2} – годовой фонд времени существования помехи t_w^{F2} ;

$$\Phi_{tw}^{F2} = T_w^{F2} \cdot 300, \text{ ч/год},$$

где T_w^{F2} – продолжительность существования помехи t_w^{F2} , ч/сут. (определяется экспериментально или задается расчетчиком).

Следует отметить, что помеха заднему фронту t_w^{F2} обязательно создает дополнительную помеху переднему фронту t_{wd}^{F1} , которую вычислим

$$t_{wd}^{F1} = \frac{t_w^{F2} \cdot T_n}{T_{кр}}, \text{ с.}$$

Суммарная помеха переднему фронту t определяется по формуле

$$t_w^{F1} = t_{wc}^{F1} + t_{wd}^{F1}, \text{ с.}$$

где t_{wc}^{F1} – основная (собственная) помеха переднему фронту, с.

Если одновременно возникли не приводящие к перегрузке помехи переднему и заднему фронтам, то потери от них суммируются.

Следует также отметить, что при наличии предсигнала помеха заднему фронту возникает, как правило, на предсигнале, а СФО работает в «нормальном» режиме максимальной нагрузки. Однако это не отражается на ходе расчетов и величине издержек, поэтому в целях упрощения рассматривается ситуация возникновения помехи на СФО, т. е. при отсутствии предсигнала.

Если $n_w^{F2} T_n > t_z$, то имеет место перегрузка.

Перегрузка на СФО. При перегрузке (рис. 6) координация на исследуемом расчетном модуле отсутствует и светофорный объект (или его предсигнал) работает в режиме перегрузки. При этом при возникновении длинных оче-

дей перегрузка может распространиться и на предыдущие светофорные объекты и их предсигналы [1, 11]. Заметим, что при наличии в системе координации подсистемы недопущения перегрузки последняя на координированном направлении не возникает.

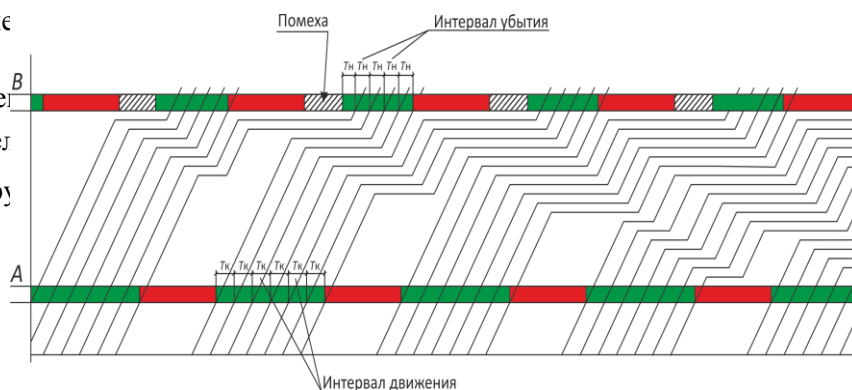


Рис. 6. t - s -диаграмма перегрузки при КР (показано нарастание очереди автомобилей при постоянных помехе и ИД транзитного ТП). Помеха – временной фактор («незапланированные» внепачковые автомобили, недостатки плана координации и т. д.), частично блокирующий движение ТС через стоп-линию СФО. Видно, что очередь, образовавшаяся на СФО В, заблокировала движение на предыдущем СФО А

места T_n , то $q_{ок} < q_{он}$ и очередь существует относительно долго. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении времени смены программ координации, чтобы избежать перегрузки, и при определении продолжительности расчетного периода перегрузки T_0 , если перегрузка все же происходит.

Суммарные потери от задержек транспорта при наличии перегрузки $\Pi_{т0\Sigma}$ определяются по формуле

$$\Pi_{т0\Sigma} = \Pi_t + \Pi_{т0}, \text{ дол./год},$$

где Π_t – потери за непиковый период T , дол./год. При отсутствии помехи (нормальный режим координированного регулирования) $\Pi_t = 0$. При наличии помех t_w^{F1} , t_{w3}^{F1} или t_w^{F2} потери; $\Pi_{т0}$ – потери за пиковый период T_0 ,

$T_k T_k T_k T_k T_k$

$$\Pi_{i0} = e_{i0} \bar{q}_0 K_{пэ0} \Phi_i C_i, \text{ дол./год},$$

\bar{q}_0 , $K_{пэ0}$, Φ_{i0} определяются экспериментально или задаются расчетчиком; e_{i0} – удельная задержка при перегрузке, с/авт.

Задержки на перегоне. Удельная задержка на перегоне КРН есть разность времени пребывания транспортных средств на этом перегоне при движении с исследуемой скоростью $v_{и}$ и при движении с нормативной скоростью $v_{н} = 16,67$ м/с (60 км/ч). Исходя из этого удельная задержка на перегоне одинакова как для координированных, так и для внепачковых транспортных средств.

Удельная задержка на перегоне $e_{п}$ определяется по формуле

$$e_{п} = t_{12} - 0,06S_{12}, \text{ с/авт.},$$

где t_{12} – среднее время прохождения исследуемого перегона координированным транспортным потоком, с, $t_{12} = t_2 - t_1$, с; t_2 – среднее время, отсчитываемое от условного начала координат (в качестве которого принят момент включения зеленого сигнала на предыдущем СФО) до момента пересечения стоп-линии последующего СФО автомобилями координированного направления, с,

$$t_2 = t_{cd2} + t_{оп2} - n_{в2} T_{кр2} + \frac{n_{кр2} T_{кр2}}{2x_{кр2}}, \text{ с} - \text{при отсутствии предсигнала};$$

$$t_2 = t_{cd2} - t_{оп2} + n_{в2} T_{кр2} + \frac{n_{кр2} T_{кр2}}{2x_{кр2}}, \text{ с} - \text{при нали-$$

чии предсигнала; t_{cd2} – сдвиг включения зеленого сигнала на последующем СФО по отношению к предыдущему СФО, с; $t_{оп2}$, $t_{оп1}$ – время опережения включения зеленого сигнала соответственно на последующем и предыдущем СФО, с; $n_{в2}$, $n_{в1}$ – число внепачковых транспортных средств на полосе движения соответственно на последующем и предыдущем СФО, авт./цикл; $T_{кр2}$, $T_{кр1}$ – средний интервал движения координированного направления соответственно на последующем и предыдущем СФО, с; $x_{кр2}$, $x_{кр1}$ – условный коэффициент загрузки

полосы движением координированного направления соответственно на последующем и предыдущем СФО,

$$x_{кр} = \frac{n_{кр} T_{кр}}{t_z + t_{оп} - n_{в} T_{кр}} - \text{при наличии предсигнала};$$

$$x_{кр} = \frac{n_{кр} T_{кр}}{t_z - t_{оп} + n_{в} T_{кр}} - \text{при отсутствии предсигнала.}$$

Годовые потери от задержек транспорта на перегоне координированного направления определяются по формуле

$$\Pi_{п} = e_{п} \bar{q}_{кр} K_{пэ кр} \Phi_i C_i, \text{ дол./год},$$

где $\bar{q}_{кр}$ – средняя интенсивность движения на перегоне координированного направления, авт./с; $K_{пэ кр}$ – коэффициент приведения ТП (экономический).

При возникновении помехи переднему фронту менее 3 с, t_w^{F1} , потери от остановок не рассчитываются, поскольку такая помеха, как правило, преодолевается без остановки, с хода. При возникновении помехи переднему фронту более 3 с, t_w^{F1} , удельную остановку вычислим следующим образом:

$$e_{0w3}^{F1} = \frac{n_{w3}^{F1}}{n_{кр}}, \text{ ост./авт.},$$

где n_{w3}^{F1} – число остановленных автомобилей, авт./цикл; $n_{кр}$ – число автомобилей координированного направления, авт./цикл.

Годовые потери от остановок транспорта составят

$$\Pi_{0w3}^{F1} = e_{0w3}^{F1} \bar{Q}_{кр} K_{пэ кр} \Phi_i C_0, \text{ дол./год},$$

где $\bar{Q}_{кр}$ – интенсивность движения, авт./ч; $K_{пэ кр}$ – коэффициент приведения КРН (экономический).

Рассчитаем удельную остановку от помехи заднему фронту

$$e_{0w3}^{F2} = \frac{n_w^{F2}}{n_{кр}}, \text{ ост./авт.},$$

где n_w^{F2} – число остановленных транспортных средств помехой заднему фронту, авт./цикл.

Годовые потери от остановок транспорта из-за помехи заднему фронту определяются по формуле

$$\Pi_{0w}^{F2} = e_{0w}^{F2} \bar{Q}_{кр} K_{пз кр} \Phi_t C_0, \text{ дол./год.}$$

Следует отметить, что для нестандартных расчетов в качестве эталонных условий могут рассматриваться и другие характеристики регулируемых перекрестков, например состав транспортного потока, геометрические параметры перекрестка, наличие уклонов и т. д., – все зависит от характера решаемых задач.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследованиями установлено, что наличие предсигнала позволяет:

- экономить около 5 с зеленого сигнала на светофорном объекте в каждом направлении координации за счет предварительного разгона внепачковых автомобилей;
- экономить около 1 с в каждом переходном интервале после координированных направлений за счет повышения скорости движения на этих направлениях;
- увеличить диапазон координации (т. е. возможность ее реализации при бóльших отличиях в длине перегонов за счет уменьшения ширины ленты безостановочного движения на 6 с (с учетом уменьшения переходного интервала на 1 с);
- чаще применять на средненагруженных светофорных объектах трехфазные светофорные циклы, что резко увеличивает возможности самой координации и решает проблему левоповоротного движения;
- повышать скорость движения и ее равномерность по перегонам;
- освободить перегон для других участников дорожного движения, особенно входящих на магистраль или уходящих с нее;

- исключить распад координированной пачки на длинных (свыше 700–800 м) перегонах.

Проведенные исследования показали, что точность расчета потерь от задержек поворотного транспорта увеличилась примерно на 7 % (потери уменьшились). Это повысило точность расчета экономических потерь на регулируемых перекрестках от 1 до 8 %, в зависимости от интенсивности движения поворотных транспортных потоков и геометрических параметров перекрестка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 252 с.
2. Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения: в 2 ч. / Ю. А. Врубель. – Минск: Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 634 с.
3. Врубель, Ю. А. Потери в дорожном движении / Ю. А. Врубель. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
4. Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
5. Капитанов, В. Т. Управление транспортными потоками в городах / В. Т. Капитанов, Е. Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1988. – 144 с.
6. Urban Street Geometric Design Handbook // Institute of Transportation Engineers. – Washington, 2008. – 460 p.
7. Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
8. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: справ. / пер. с англ. В. У. Рэнкин [и др.]. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
9. Концепция обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь, 2006 г.: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 14 июня 2006 г. – № 757.
10. Методы оценки качества организации дорожного движения / Г. И. Клинковштейн [и др.]. – М.: МАДИ, 1987. – 77 с.
11. Кременец, Ю. А. Технические средства регулирования дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский. – М.: Транспорт, 1981. – 252 с.

Поступила 10.02.2010

