

Предлагаемая нами разработка позволит, согласно [3], снизить задержки транспортных средств, движущихся по главной дороге, и на 15% уменьшить количество всех аварий на данном светофорном объекте.

1. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения. В 2 ч. – Минск: Фонд БДД, 1996. – 634 с.

2. Аземша С.А., Карасевич С.Н. Организация движения на регулируемых перекрестках. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 56 с.

3. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 328 с.

*Получено 27.04.2010*

УДК 656.11

**А.А.КУСТЕНКО**

*Белорусский национальный технический университет, г.Минск*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ПЕРЕД ОСТАНОВОЧНЫМ ПУНКТОМ ТРАМВАЯ**

Рассматриваются задержки автомобильных транспортных средств, возникающих на остановочном пункте трамвая с посадкой пассажиров с проезжей части. Приведена методика расчета экономических потерь от указанных задержек.

Розглядаються затримки автомобільних транспортних засобів, що виникають на зупинному пункті трамвая з посадкою пасажирів із проїзної частини. Наведено методику розрахунку економічних втрат від зазначених затримок.

In article are considered delays of the automobile vehicles arising on tram-stop. Also is adduced procedure of economic losses from the specified delays.

*Ключевые слова:* трамвай, автомобиль, остановочный пункт, задержки, потери.

Стремительное развитие трамвайное движение обнажило ряд проблемных вопросов, таких как скорость сообщения, безопасность, конфликты с автомобильными потоками и т.д. При решении подобных проблем в Европейских странах применяют различные методы, от радикальных (выносят трамвайное полотно на обособленную территорию), так и более мягких (используют автоматизированные системы, обеспечивающие взаимодействие трамвайного движения и транспортного потока). В данной работе поставлена цель изучить и рассчитать потери автомобильного потока, возникающие на остановочном пункте трамвая. Это позволит определить пути решения подобной проблемы и снизить потери от задержек и остановок автомобильного потока.

В транспортном процессе любого маршрутного транспортного средства предусмотрены остановки с целью посадки и высадки пассажиров. В трамвайном движении можно выделить следующие типы остановочных пунктов (ОП):

– с размещением на обособленном полотне. Они, как правило, располагаются перед перекрестками, потому что трамвай безопаснее обходить спереди. При этом возможно совмещение остановочного пункта трамвая и встречного автобуса (троллейбуса) – для трамвая это перед перекрестком, а для автобуса (троллейбуса) – за перекрестком;

– с размещение на проезжей части. В этом случае остановочный пункт может быть оборудован посадочной площадкой, поднятой над проезжей частью. Преимуществом таких остановочных пунктов является относительная защищенность пешеходов, ожидающих посадки или сошедших с трамвая, а также возможность переходить проезжую часть в тот момент, когда на ней нет машин. Недостатком их является сужение проезжей части, что снижает пропускную способность данного участка дороги и увеличивает вероятность наступления конфликтной ситуации между выходящими пассажирами и транспортным потоком, так как некоторые посадочные площадки не оборудованы ограждениями, а водители не соблюдают правила дорожного движения и не останавливаются перед остановочным пунктом, считая, что наличие приподнятой посадочной площадки избавляет их от этой обязанности. Это приводит к тому, что пассажирам трамвая приходится идти к тротуару между стоящими на перекрестке транспортными средствами;

– размещение остановочного пункта посредине проезжей части без посадочной площадки. Происходит задержка транспортного потока при посадке-высадке пассажиров, что негативно сказывается на всем дорожном движении. Остановочные пункты трамвая, оборудованные посредине проезжей части, могут размещаться перед или за перекрестком. Отсюда можно представить схему совмещенной работы трамвая и транспортного потока.

При размещении остановочного пункта за перекрестком 1-я стоп-линия – перед перекрестком, а 2-я условная стоп-линия – перед остановочным пунктом трамвая. В случае размещения остановочного пункта перед перекрестком 1-я условная стоп-линия – перед остановочным пунктом трамвая, а 2-я стоп-линия – перед перекрестком. На рис.2 и 4 изображена диаграмма движения транспортных средств между этими стоп-линиями.

Расположение остановочного пункта перед перекрестком показано на рис.1.

Для расчета потерь от задержек автомобилей у остановочного пункта трамвая возьмем за основу методику расчета потерь, рассмотренную в [1-5], и приведем ее к виду, учитывающему влияние трамвайного движения. Для этого необходимо определить следующие показатели.

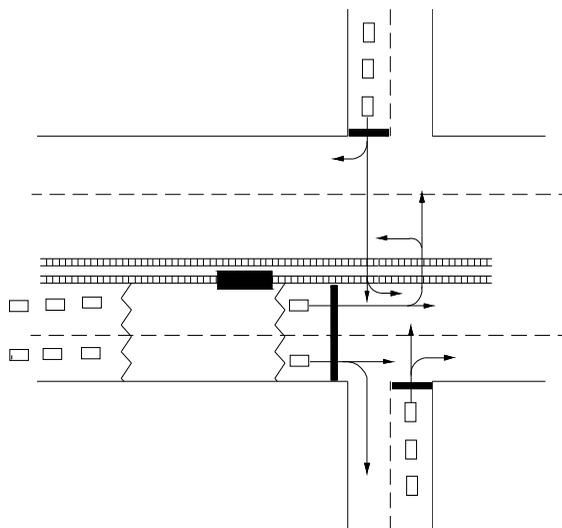


Рис.1 – Условная схема расположения остановочного пункта перед перекрестком

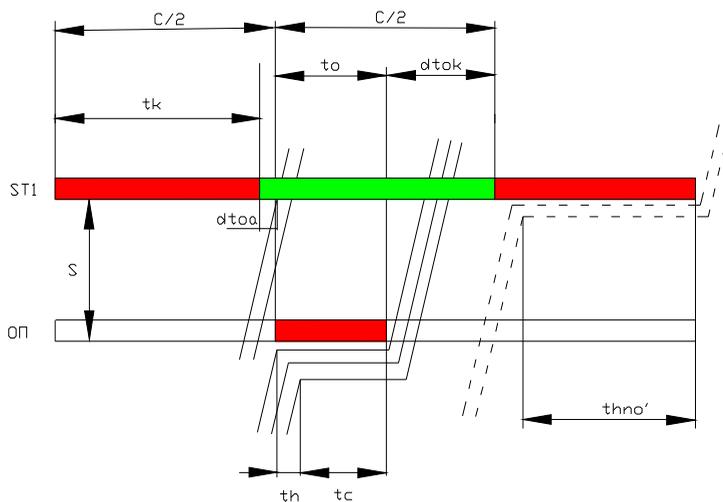


Рис.2 – Диаграмма движения транспортных средств при расположении остановочного пункта трамвая перед перекрестком

Интенсивность движения трамвая ( $q_m$ ) можно определить как экспериментальным путем, так и путем обработки соответствующей документации по трамвайному движению (так как трамвай движется по расписанию).

Интенсивность движения транспортного потока ( $q$ ) рекомендуется принимать 60%-ную доверительную вероятность распределения интенсивности движения за расчетный период:  $q$  – расчетная интенсивность движения,  $q = \bar{q} \cdot (1 + I_q)$  а/с, где  $\bar{q}$  – математическое ожидание распределения интенсивности движения на исследуемой полосе, а/с;  $I_q$  – коэффициент вариации распределения интенсивности движения.

$$I_q = \frac{\sigma_q}{q} \cdot \frac{n}{n-1},$$

где  $\sigma_q$  – средне квадратичное отклонение распределения интенсивности движения, а/с;

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{\sum (\bar{q} - q_i)^2 \cdot n_i}{\sum n_i}},$$

где  $n$  – количество измерений переменной величины.

$$\bar{q} = \frac{\sum q_i \cdot n_i}{\sum n_i},$$

где  $q_i$  – текущее значение величины  $q_i$ ;  $n_i$  – частота появления величины  $q_i$ .

Измерение интенсивности движения рекомендуется проводить по методике БНТУ [1-4], согласно которой в течение 10 мин. каждого измерительного периода наблюдатель фиксирует специальными символами все проходящие транспортные средства, как правило, по каждой полосе отдельно.

Ускорение трамвая ( $a_m$ ) определяется в зависимости от модели трамвая, его технического состояния. Значение ускорения можно взять из технической документации на трамвайный вагон (для трамваев г.Минска  $a_m = 1 \text{ м/с}^2$ ).

Ускорение автомобилей в транспортном потоке ( $a_a$ ) определяется в зависимости от состава транспортного потока, для легкового ав-

томобиля ускорение

$$a_a - \text{ускорение автомобиля, } a_a = \frac{2,5}{K_{ph}}, \text{ м/с}^2.$$

*Продолжительность простоя трамвая на остановочном пункте* ( $t_{on}$ ) определяется экспериментально либо задается из таблицы согласно классификации остановочных пунктов по признаку пассажирообмена:

категория 1 – сильно нагруженные остановочные пункты, в районе пересадочных транспортных узлов, крупных объектов пешеходного тяготения и т.д.:  $t_o=24-28$  с;

категория 2 – средненагруженные остановочные пункты, обычная (стандартная) нагрузка:  $t_o=18-20$  с;

категория 3 – слабонагруженные остановочные пункты, частная одноэтажная застройка, парковочная зона и т.д.:  $t_o=15-18$  с.

*Состав транспортного потока.* В качестве расчетных значений коэффициентов приведения  $K_{ni}$  (динамический),  $K_{no}$  (экономический) рекомендуется принимать средневзвешенные значения по результатам измерения интенсивности движения за расчетный период:

$$K_{n*} = \frac{\sum K_{ni} \cdot n_i}{\sum n_i},$$

где  $K_{ni}$  – значение коэффициентов приведения для данного замера интенсивности движения;  $n_i$  – число замеров интенсивности движения.

*Поток насыщения* – это наибольшая средняя за время горения зеленого сигнала интенсивность убытия автомобилей от стоп-линии при рассасывании достаточно длинной очереди.

Расчетное значение потока насыщения определяется по формуле

$$q_h = \frac{0,55(t_z - 3)}{t_z \cdot K_{ni} \cdot K_{yn}}, \text{ а/с},$$

где  $K_{yn}$  – коэффициент условий по потоку насыщения,  $K_{yn}=1-1,2$ .

Для трамвайного движения поток насыщения определяется по формуле

$$q_{htm} = \frac{t_z - 7}{5t_z \cdot K_{ny}}, \text{ тр./с}.$$

Годовой фонд времени ( $\Phi_T$ ) определяется, в основном, категорией улицы. Однако, в некоторых случаях, например, мощное транзитное движение либо работа зрелищных или увеселительных предприятий, на величину годового фонда времени могут оказывать влияние и другие факторы. Поэтому расчетчик, пользуясь приведенными в методике цифрами, вправе корректировать их в определенных рамках с приведением четкого и убедительного обоснования. Ниже приведены рекомендуемые значения годового фонда времени:

– магистральные улицы общегородского значения (сильнонагруженные объекты)	14x300	4200
– магистральные улицы районного значения (средненагруженные объекты)	12x300	3600
– улицы местного значения (слабонагруженные объекты)	10x300	3000
– улицы в жилых зонах и приравненные к ним дворовые территории (ненагруженные объекты)	10x300	3000

Параметры светофорного цикла:  $C$  – продолжительность светофорного цикла, с;  $t_z$  – продолжительность зеленого сигнала светофора, с;  $t_k$  – продолжительность красного сигнала светофора, с.

Они определяются из паспортных данных или экспериментальным путем. При измерениях необходимо добиться полного совпадения результатов, для чего следует выполнить не менее трех замеров.

Время прибытия трамвая на остановочный пункт относительно времени включения зеленого сигнала светофора. Это время зависит от работы предыдущих светофорных объектов и его можно определить двумя способами:

– экспериментальным путем:

$$\Delta t_o = \frac{\sum_{i=1}^{Q_{mp}} t_{oi}}{Q_{mp}},$$

где  $t_{oi}$  – время прибытия  $i$ -го трамвая к остановочному пункту (СТО) (отсчет ведется от времени включения зеленого сигнала светофора, т.е. при прибытии трамвая на красный сигнал светофора время будет отрицательное, а на зеленый – положительное);  $Q_{mp}$  – интенсивность движения трамваев, тр/ч;

– расчетный путем. Исходя из допущения, что прибытие трамвая в течение светофорного цикла является случайным и подчиняется равномерному распределению и принимая за точку отсчета времени нача-

ло включения красного сигнала на ST1 рассчитаем время возникновения ST0:

$$\Delta t_o = \frac{C}{2} - t_k.$$

При этом  $\Delta t_o$  может быть как положительной, так и отрицательной.

*Количество транспортных средств в светофорном цикле:*

$$n = C \cdot q, \text{ авт.}$$

*Время рассасывания очереди, накопившейся во время горения запрещающего сигнала светофора:*

$$t_p = \frac{C(1 - \lambda) \cdot q \cdot K_o}{q_h},$$

где  $\lambda$  – доля зеленого сигнала в цикле:  $\lambda = \frac{t_z}{C}$ ;  $K_o$  – коэффициент

приращения очереди:  $K_o = \frac{q_h}{q_h - q}$ .

*Время свободного движения транспортных средств до включения ST0.* Этот показатель характеризует временной интервал после выключения ST1 (загорание красного сигнала светофора) и до включения ST0 (открытие трамвайных дверей).

$$t_{do} = \Delta t_o \geq 0.$$

*Время на движение транспортного потока от ST0 до ST1:*

$$\Delta t_{oa} = \frac{S \cdot a + V^2}{V \cdot a},$$

где  $S$  – расстояние между условной стоп-линией ST0 и стоп-линией перед светофорным объектом ST1, м;  $V$  – техническая скорость движения транспортного потока на данном участке, м/с.

*Продолжительность светофорного цикла, оставшегося после выключения ST0:*

$$t_{nc} = t_z - \Delta t_o - t_{on} \geq 0.$$

*Время свободного движения транспортных средств после выключения ST0.* Этот показатель характеризует временной интервал после выключения ST0 (закрытие трамвайных дверей) и до включения ST1 (загорание красного сигнала светофора), за вычетом времени на перемещение между стоп-линиями ST0 и ST1.

$$t_z \geq t'_{nc} = t_{nc} - \Delta t_{oa} \geq 0.$$

*Расчетное время простоя трамвая на остановочном пункте.*

Показатель характеризует долю времени простоя трамвая на остановочном пункте приходящееся на время горения зеленого сигнала светофора

$$t'_{on} = t_z - t_{nc} - t_{до} \geq 0.$$

*Интенсивность движения транспортных средств до включения ST0.*

Данный показатель учитывает как время движения транспортных средств с потоком насыщения, так и время свободного движения.

$$q_{до} = \frac{t_1 \cdot q + t_2 \cdot q_h}{t_{до}}, \text{ а/с,}$$

где  $t_1$  – доля свободного времени на движение через ST1:  $t_1 = t_{до} - t_p \geq 0$ , с;  $t_2$  – доля времени на движение транспортных средств с потоком насыщения:  $t_2 = t_{до} - t_1$ , с.

*Количество транспортных средств, прошедших через ST1 до включения ST0:*

$$n_{до} = t_{до} \cdot q_{до} < n, \text{ авт.}$$

*Протяженность очереди транспортных средств на ST1 в момент включения ST0.*

Этот показатель позволит определить наличие транспортных средств перед ST0 в момент ее включения.

$$l_{оч} = (C \cdot (1 - \lambda) + \Delta t_o - t_{до}) \cdot q \cdot l_o \left( 1 - \frac{t_{до}}{t_p} \right) \geq 0, \text{ м,}$$

где  $l_o$  – динамический габарит между стоящими в очереди транспортными средствами,  $l_o = 6$  м.

*Количество транспортных средств, прошедших через ST1 во время работы ST0.*

Данный показатель показывает, сколько автомобилей проезжают ST1 во время работы ST0.

$$n_{np} = \frac{S - l_{on}}{l_o} \leq \frac{l_{оч}}{l_o}, \text{ авт.,}$$

где  $l_{on}$  – длина остановочного пункта трамвая,  $l_{on} = 30$  м; при  $\Delta t_{oa} \geq C$ ,  $n_{np} = 0$ .

*Интенсивность движения транспортных средств после выключения ST0.*

$$q_h \geq q_{nc} = \frac{n - n_{до} - n_{np}}{t'_{nc}} > 0, \text{ а/с.}$$

*Количество транспортных средств, прошедших через ST1 после выключения ST0:*

$$n_{nc} = t'_{nc} \cdot q_{nc} \leq n - n_{до} - n_{np}, \text{ авт.}$$

*Количество транспортных средств, стоящих в очереди на ST0 в момент ее включения.*

Иногда автомобили, стоящие на ST1, попадают в зону действия остановочного пункта трамвая и вынуждены останавливаться при включении ST0.

$$n_{оч} = (C(1 - \lambda) + \Delta t_o) \cdot q - n_{до} - \frac{S - l_{он}}{l_o} \geq 0, \text{ авт.}$$

*Количество транспортных средств, задержанных на ST0 во время ее работы:*

$$n_3 = t'_{он} \cdot q \leq n - n_{до} - n_{np}, \text{ авт.}$$

*Общее количество задержанных транспортных средств, проехавших ST1 в данном светофорном цикле.*

Этот показатель учитывает количество задержанных транспортных средств с учетом нарастания очереди.

$$n'_3 = (n_3 + n_{np})K_o \leq n - n_{до} - n_{np}, \text{ авт.}$$

*Количество транспортных средств, оставшихся на второй цикл:*

$$n_{ост} = n - n_{до} - n_{nc} - n_{np} \geq 0, \text{ авт.}$$

*Общее количество транспортных средств, оставшихся на второй цикл:*

$$n'_{ост} = n_{ост} \cdot K_o \leq n_{ост} + n, \text{ авт.}$$

*Удельная задержка транспортных средств:*

$$0 \leq e_t^o = \frac{1}{n} \left( \frac{t'_{он} \cdot n_3}{2} + t'_{он} \cdot n_{оч} + \frac{n'_3(n'_3 + 1)}{2q_h} + n_{ост} \cdot C(1 - \lambda) + \frac{n'_{ост}(n'_{ост} + 1)}{2q_h} \right), \text{ с/а.}$$

*Удельная остановка транспортных средств:*

$$e_o^o = \frac{n_3 + n_{ост}}{n}, \text{ ост/а.}$$

Расположение трамвайной остановки за перекрестком показано на рис.3.

*Время рассасывания очереди, накопившейся во время горения запрещающего сигнала светофора:*

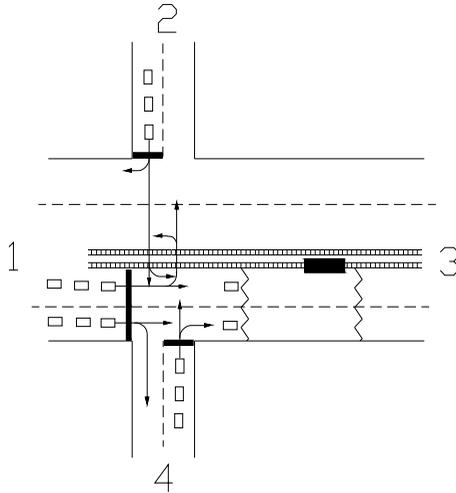


Рис.3 – Условная схема расположения ОП за перекрестком

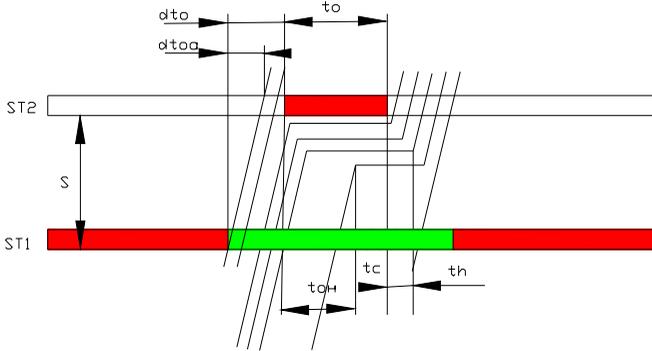


Рис.4 – Диаграмма движения транспортных средств между этими стоп-линиями при расположении остановочного пункта трамвая за перекрестком

$$t_p = \frac{C(1 - \lambda) \cdot q \cdot K_o}{q_h},$$

где  $\lambda$  – доля зеленого сигнала в цикле:  $\lambda = \frac{t_z}{C}$ ;  $K_o$  – коэффициент

приращения очереди:  $K_o = \frac{q_h}{q_h - q / \lambda}$ .

*Время на движение трамвая от ST1 до ST2:*

$$\Delta t_{mp} = \frac{S + V_{mp}^2}{V_{mp}},$$

где  $S$  – расстояние между стоп-линией ST1 и условной стоп-линией перед светофорным объектом ST2, м;  $V_{mp}$  – техническая скорость движения трамвая на данном участке, м/с.

*Время прибытия трамвая к ST2:*

$$\Delta t_o \geq 0, \text{ с.}$$

*Время свободного движения транспортных средств до включения ST2.*

Данный показатель характеризует временной интервал после включения ST1 (загорание зеленого сигнала светофора) и до включения ST2 (открытие трамвайных дверей).

$$t_{do} = \Delta t_o + \Delta t_{oa} - \Delta t_{mp} \geq 0.$$

*Интенсивность движения транспортных средств до включения ST0.*

Этот показатель учитывает как время движения транспортных средств с потоком насыщения, так и время свободного движения.

$$q_{do} = \frac{t_1 \cdot q + t_2 \cdot q_h}{t_{do}}, \text{ а/с,}$$

где  $t_1$  – доля свободного времени на движение через ST1:  $t_1 = t_{do} - t_p \geq 0$ , с;  $t_2$  – доля времени на движение транспортных средств с потоком насыщения:  $t_2 = t_{do} - t_1$ , с.

*Количество транспортных средств, прошедших через ST1 до включения ST0:*

$$n_{do} = t_{do} \cdot q_{do} < n, \text{ авт.}$$

*Количество транспортных средств, остановленных на ST2:*

$$0 \leq n_{on} = t_{on} \cdot q_{on} \leq n - n_{do}, \text{ авт.,}$$

где  $q_{on}$  – расчетная интенсивность транспортного потока в момент накопления очереди:  $q_{on} = \frac{t_1 \cdot q + t_2 \cdot q_h}{t_{do}}$ , а/с.

Здесь  $t_1$  – доля свободного времени на движение через ST1:  $t_1 = t_{on} - t_2$ , с;  $t_2$  – доля времени на движение транспортных средств с потоком насыщения:  $t_2 = t_{do} - t_p \geq 0$ , с.

Время нарастания очереди:

$$0 \leq t_{он} = \frac{n_{он}}{q_{до}} \leq t_{он}, \text{ с.}$$

Общее число транспортных средств, остановленных на СТ2:

$$0 \leq n_o = n_{он} \cdot K_o \leq n - n_{до}, \text{ авт.};$$

$$e_t^* = \frac{1}{n} \left( \frac{t_{он} \cdot n_{он}}{2} + n_{он} (t_{он} - t_{он}) + \frac{n_o (n_o + 1)}{2q_h} \right) \geq 0, \text{ с/а.}$$

Удельная остановка равна:

$$e_o^* = \frac{n_o}{n} \geq 0, \text{ ост./а.}$$

Потери от задержек и остановок рассчитываются по формулам:

$$P_t = e \cdot \bar{q} \cdot K_{пз} \cdot \Phi_t \cdot C_t \cdot K_{тм}, \text{ у.е./год; - для задержек;}$$

$$P_o = e \cdot \bar{q} \cdot 3600 \cdot K_{пз} \cdot \Phi_t \cdot C_o \cdot K_{тм}, \text{ у.е./год; - для остановок;}$$

где  $K_{тм}$  – поправочный коэффициент, учитывающий интенсивность движения трамваев:  $K_{тм} = \bar{q}_{тм} \cdot C \leq 1,5$ .

Таким образом, изучив конфликтную ситуацию, складывающуюся у остановочного пункта трамвая с посадкой пассажиров с проезжей части, можно отметить, что потери находятся в прямой зависимости от времени прибытия трамвая к остановочному пункту относительно режима работы ближайшего светофорного объекта. Для более точного определения потерь в статье приведена подробная методика.

1. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения. В 2-х ч. Ч.2. – Минск: Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 306 с.

2. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения. В 2-х ч. Ч.1. – Минск: Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – 328 с.

3. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении: монография. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.

4. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.

5. Кустенко А.А. Расчет потери от издержек, вызванных простоем транспортного потока перед остановочным пунктом трамвая // Сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф. «Вместе к эффективному дорожному движению». – Минск: БНТУ, 2008.

Получено 27.04.2010