

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗАДЕРЖЕК ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ПЕРЕД ОСТАНОВОЧНЫМ ПУНКТОМ ТРАМВАЯ С ПОСАДКОЙ С ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ

Д.В. Капский¹, Н.А. Филиппова², О. Н. Ларин³, А.А. Кустенко⁴

^{1, 4} Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

¹ d.kapsky@gmail.com

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

г. Москва, Россия, umen@bk.ru

³ Российский Университет Транспорта, г.Москва, Россия, larin_on@mail.ru

⁴ alexk1981@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены различные сценарии взаимодействия трамвая и автомобильного транспорта в зависимости от времени прибытия трамвая относительно сигналов светофора. Предложенная модель учитывает такие факторы, как интенсивность транспортного потока, время цикла светофора, расстояние между остановочным пунктом и светофором, а также время простоя трамвая на остановке.

Ключевые слова: транспортный поток, задержки, остановочный пункт трамвая, светофорное регулирование, интенсивность движения, моделирование транспортных потоков, городская мобильность, оптимизация движения.

METHODOLOGY FOR CALCULATING TRAFFIC FLOW DELAYS AT A TRAM STOP WITH BOARDING FROM THE ROADWAY

D.V. Kapsky¹, N.A. Filippova², O.N. Larin³, A.A. Kustenko⁴

^{1, 4} Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

¹ d.kapsky@gmail.com

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University,

Moscow, Russia, umen@bk.ru

³ Russian University of Transport, Moscow, Russia, larin_on@mail.ru

⁴ alexk1981@mail.ru

Abstract. The article examines various scenarios of interaction between tram and automobile transport depending on the tram's arrival time relative to traffic light signals. The proposed model takes into account such factors as traffic flow intensity, traffic light cycle time, the distance between the tram stop and the traffic light, as well as the tram's dwell time at the stop.

Keywords: traffic flow, delays, tram stop, traffic light control, traffic intensity, traffic flow modeling, urban mobility, traffic optimization

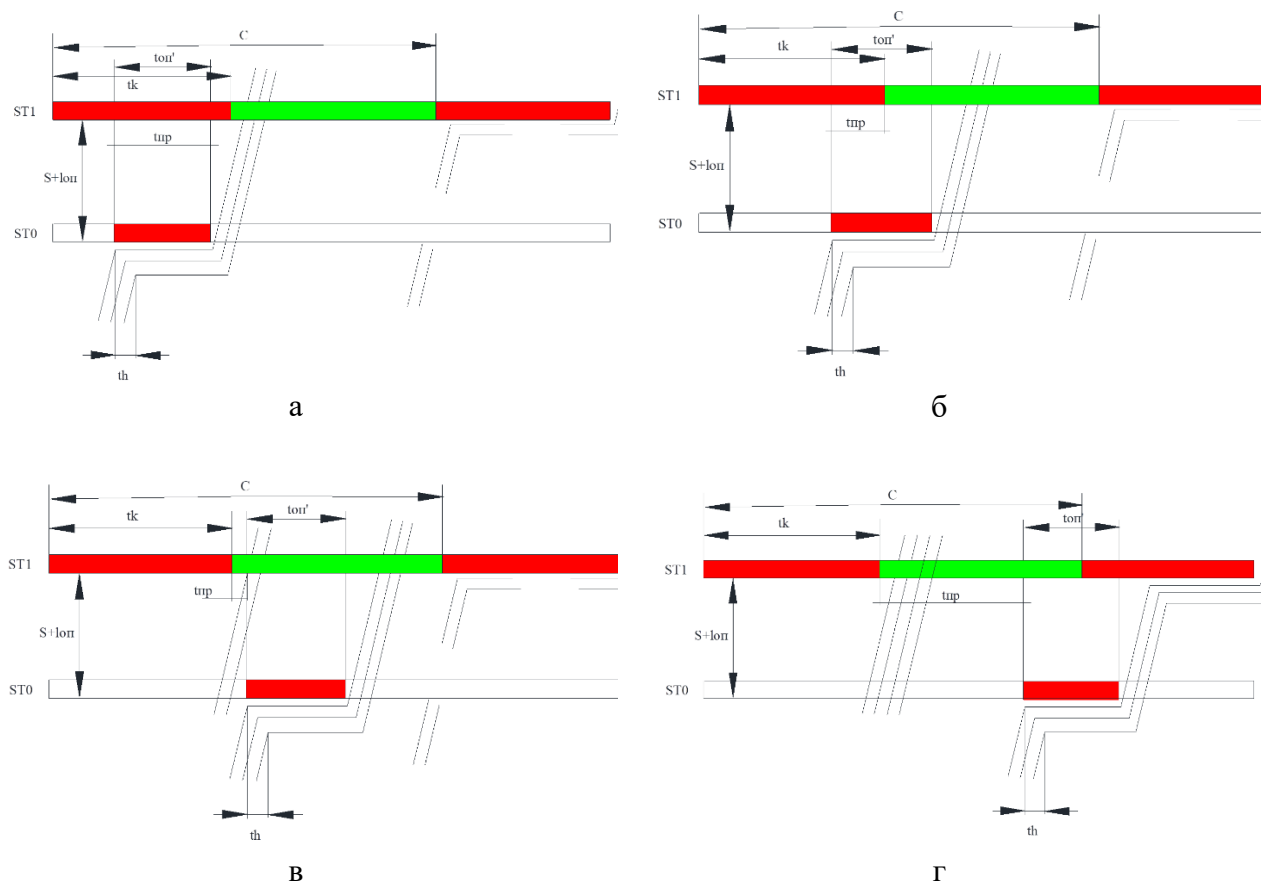
Введение

Целью данной работы является разработка методики расчета задержек транспортного потока перед остановочным пунктом трамвая с посадкой с проезжей части (ОППЧ), учитывающей различные сценарии взаимодействия трамвая

и автомобилей в зависимости от времени прибытия трамвая относительно сигналов светофора. Предложенная модель позволяет оценить влияние остановочного пункта на задержки транспортного потока и может быть использована для оптимизации работы светофоров и улучшения транспортной ситуации в городе.

В статье рассмотрены различные варианты расположения остановочного пункта относительно перекрестка, а также проведены экспериментальные исследования на реальных остановочных пунктах для подтверждения адекватности модели. Результаты работы могут быть полезны для транспортных инженеров и городских планировщиков, занимающихся оптимизацией транспортных потоков.

При расположении остановочного пункта перед перекрестком



ST0 – стоп-линия образованная остановкой трамвая на ОППЧ; ST1 – стоп-линия у СФО;
 C – продолжительность светофорного цикла, с; $t_{оп'}$ – продолжительность существования условной стоп-линии в ОППЧ, с; t_{np} – время прибытия трамвая относительно светофорного цикла, с; t_k – продолжительность запрещающего сигнала светофора, с; t_z – продолжительность разрешающего сигнала светофора, с; S – расстояние между стоп-линиями, м;
 $l_{оп}$ – длина ОППЧ, м; t_h – время движения с потоком насыщения, с.

Рисунок 1 – Структура цикла СФО и условной стоп-линии у ОППЧ перед СФО

При данном расположении остановочного пункта возможно 4 различных вариантов развития событий в зависимости от времени прибытия трамвая относительно включения зеленого сигнала светофора:

I – В этом случае задержка автомобилей на первой условной стоп-линии происходит во время горения красного сигнала светофора и, следовательно, не оказывают влияния на задержку у последующего светофорного объекта (все автомобили проходят СФО после выключения условной стоп-линии ST0) (Рисунок 1.а).

$$\text{Условие: } t_{np} + t'_{on} < 0 \quad (1)$$

$$\text{Результат: } t_3 = 0, \text{ с} \quad (2)$$

II – Время существования условной стоп-линии у остановочного пункта частично совпадает со временем горения зеленого сигнала светофора и все автомобили проходят СФО после выключения условной стоп-линии ST0 (Рисунок 1.б).

В этом случае трамвай прибывая на ОППЧ на запрещающий сигнал светофора образует условную стоп-линию (ST0), которая частично остается «включенной» на разрешающий сигнал светофора, тем самым продлевая запрещающий сигнал, для транспортных средств, оказавшихся перед или в зоне ОППЧ. При этом оставшееся время размещающего сигнала светофора позволит всем накопившимся транспортным средствам (т/с) проехать регулируемый объект в данном цикле. Таким образом ST0 задержит только транспортные средства, приехавшие к стоп-линии перед светофорным объектом (ST1) и попавшие в зону ОППЧ. Данное положение достигается при соблюдении следующего условия:

$$t_{np} < 0 \text{ и } t_{np} + t'_{on} \geq 0 \quad (3)$$

И условие, при соблюдении которого все т/с проедут регулируемый объект в данном цикле:

$$t_z - t_{np} - t'_{on} \geq t_{p2} + t_{oa} \quad (4)$$

где t_{p2} – время рассасывания очереди, накопившейся во время горения запрещающего сигнала светофора и существования условной стоп-линии у ОППЧ при соблюдении условия (3), с.

$$t_{p2} = \frac{((t_k + t_{np} + t'_{on}) \cdot q - n_{oc}) \cdot K_o}{q_h}, \text{ с} \quad (5)$$

где

K_o – коэффициент приращения очереди: $K_o = \frac{q_h}{q_h - q}$;

q – интенсивность транспортного потока, авт./с;

q_h – поток насыщения, авт./с;

t_{oa} – время на движение транспортного потока между началом ОППЧ и ST1, с.

$$t_{oa} = \frac{S \cdot a + V^2}{V \cdot a}, \text{ с} \quad (6)$$

где S – расстояние между началом ОППЧ и ST1, м;

a – ускорение транспортного потока, м/с²;

V – техническая скорость движения транспортного потока на данном участке, м/с;

n_{oc} – количество транспортных средств прибывших к ST1 на запрещающий сигнал светофора и находящихся за зоной ОППЧ, ед.

При этом устанавливается ограничение, что т/с должно быть не более чем реально, в соответствии с интенсивностью движения способно проехать за время существования ST1.

$$n_{oc} = \frac{S}{l_o} \leq n_k, \text{ ед} \quad (7)$$

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

n_k – количество т/с подъезжающих к ST1 за время ее существования:

$$n_k = t_k \cdot q \cdot K_o, \text{ с} \quad (8)$$

$$t_k = (1 - \lambda) \cdot C, \text{ с} \quad (9)$$

В результате время задержки т/с по причине образования ST0 составит:

$$t_z = (t_{np} + t'_{on}) \cdot (n_k + n'_{on} - n_{oc}), \text{ с} \quad (10)$$

где n'_{on} – количество т/с прибывающих к ST0 за время ее существования на разрешающий сигнал СФО при соблюдении условия, с;

$$n'_{on} = \frac{(t_{np} + t'_{on}) \cdot q}{2}, \text{ ед.} \quad (11)$$

III – Время существования условной стоп-линии у остановочного пункта частично совпадает со временем горения зеленого сигнала светофора и часть автомобилей не успевают пройти СФО в данном светофорном цикле.

В данном случае не все т/с успевают проехать СФО за время разрешающего сигнала и часть из них остается на второй цикл:

$$t_z - t_{np} - t'_{on} \leq t_{p2} + t_{oa} \quad (12)$$

В результате время задержки примет вид:

$$t_z = (t_{np} + t'_{on}) \cdot (n_k + n'_{on} - n_{oc}) + n_{oc} \cdot t_k, \text{ с} \quad (13)$$

где n_{oc} – количество т/с оставшихся на второй цикл для данных условий (12), с;

$$n_{oc} = n - n_{np} - n_{oc} \geq 0, \text{ ед.} \quad (14)$$

где n_{np} – количество т/с прошедшие СФО в данном цикле, с;

$$n_{np} = (t_z - t_{np} - t'_{on} - t_{oa}) \cdot q_h, \text{ ед.} \quad (15)$$

n – количество т/с в светофорном цикле:

$$n = C \cdot q, \text{ ед.} \quad (16)$$

В данном случае все т/с после «выключения» ST0 двигаются с интенсивностью потока насыщения, при этом движение т/с начинается с начала зоны остановочного пункта, что увеличивает время на проезд СФО на время движения от начала ОППЧ до ST1 (t_{oa}).

Максимальное значение задержек достигается, когда время прибытия трамвая к остановочному пункту совпадает со временем включения зеленого сигнала светофора. При этом наибольшие задержки приходятся на т/с оставшиеся на второй цикл.

IV – Время существования условной стоп-линии у остановочного пункта полностью совпадает со временем горения зеленого сигнала светофора и часть автомобилей успевают пройти до ее «включения» и остается время на движение транспортного потока после ее «выключения», при этом все накопившиеся автомобили успевают проехать в данном светофорном цикле (Рис.1.в).

В данном случае соблюдается следующее условия, когда время «включения» и «выключения» ST0 приходится на время горения разрешающего сигнала СФО:

$$t_{np} > 0 \text{ и } t_z - t_{np} - t'_{on} > 0 \quad (17)$$

И условие, при соблюдении которого все т/с проедут регулируемый объект в данном цикле:

$$t_z - t'_{on} - t_{np} \geq t_{pIV} \quad (18)$$

где t_{pIV} – время рассасывания очереди, накопившейся во время горения запрещающего сигнала светофора и существования условной стоп-линии у ОППЧ при соблюдении условия (17), с.

$$t_{pIV} = \frac{(n_{\partial ko} + n_{on}) \cdot K_o}{q_h} \geq 0, \text{ с} \quad (19)$$

где $n_{\partial ko}$ – количество транспортных средств, оставшихся перед ST0 во время ее включения:

$$n_{\partial ko} = (t_k + t_{np}) \cdot q \cdot K_o - n_{\partial o} - n_{\partial k} \geq 0, \text{ с} \quad (20)$$

$n_{\partial k}$ – количество транспортных средств, прошедших через ST1 во время работы ST0:

$$n_{\partial k} = \frac{S + l_{on}}{l_{\partial}} \leq \frac{l_{\partial o}}{l_{\partial}}, \text{ авт.} \quad (21)$$

где l_{on} – длина остановочного пункта трамвая, $l_{on}=30\text{м}$;

при $t_{oa} \geq C$, $n_{\partial k} = 0$

$l_{\partial o}$ – протяженность очереди транспортных средств на ST1 в момент включения ST0:

$$l_{\partial o} = (t_k + t_{np}) \cdot q \cdot l_{\partial} \cdot \left(1 - \frac{t_{np}}{t_p}\right) \geq 0, \text{ м} \quad (22)$$

$n_{\partial o}$ – количество транспортных средств, прошедших через ST1 до включения ST0:

$$n_{\partial o} = t_{np} \cdot q_{\partial o} < n, \text{ авт.} \quad (23)$$

где $q_{\partial o}$ – интенсивность движения транспортных средств до включения ST0:

$$q_{\partial o} = \frac{t_1 \cdot q + t_2 \cdot q_h}{t_{np}}, \text{ а/с} \quad (24)$$

где t_1 – доля свободного времени на движение через ST1:

$$t_1 = t_{np} - t_p \geq 0, \text{с} \quad (25)$$

где t_p – время рассасывания очереди, накопившейся во время горения запрещающего сигнала СФО:

$$t_p = \frac{C \cdot (1 - \lambda) \cdot q \cdot K_o}{q_h} \quad (26)$$

t_2 – доля времени на движение транспортных средств с интенсивностью потока насыщения: $t_2 = t_{np} - t_1, \text{с}$

n_{on} – количество т/с прибывающих к СТ0 за время ее существования на разрешающий сигнал СФО при соблюдении условия (3.4), с;

$$n_{on} = \frac{t'_{on} \cdot q}{2}, \text{ед.} \quad (27)$$

В результате время задержки примет вид:

$$t_z = (n_{oko} + n_{on}) \cdot t'_{on}, \text{с} \quad (28)$$

В данном случае наблюдается искусственное увеличение продолжительности запрещающего сигнала СФО за счет образования стоп-линии перед ОППЧ. Время существования СТ0 полностью совпадает с временем простоя трамвая на ОП ($t_{оп}'$) и т/с проходят через СТ1 до «включения» СТ0 и после ее «выключения». В тоже время оставшееся время разрешенного сигнала СФО позволяет полностью пропустить все т/с через СФО.

V – Время существования условной стоп-линии у остановочного пункта полностью совпадает со временем горения зеленого сигнала светофора и часть автомобилей успевают пройти до ее «включения» и остается время на движение транспортного потока после ее «выключения», при этом накопившиеся автомобили не успевают проехать в данном светофорном цикле.

Условие, указывающее, что не все т/с проедут регулируемый объект в данном цикле:

$$t_z - t'_{on} - t_{np} \leq t_{PIV} \quad (29)$$

В результате время задержки примет вид:

$$t_z = (n_{oko} + n_{on}) \cdot t'_{on} + n'_{ocm} \cdot t_k, \text{с} \quad (30)$$

где n'_{oct} – количество т/с оставшихся на второй цикл для данных условий (28), с;

$$n'_{oct} = n - n_{до} - n_{ок} - (t_k - t_{np} - t'_{on}) \cdot q, \text{ ед.} \quad (31)$$

VI – В этом случае отсутствует время свободное для движения после выключения условной стоп-линии и время существования условной стоп-линии постепенно сокращается, при этом все накопившееся автомобили успевают пройти до «включения» условной стоп-линии у ОППЧ (Рисунок 1.г).

В данном случае отсутствует время на движение т/с после «выключения» ST0 и как следствие соблюдается условие:

$$t_{np} > 0 \text{ и } t_z - t_{np} - t'_{on} \leq 0 \quad (32)$$

А также соблюдается условие, при котором все т/с накопившиеся во время горения запрещающего сигнала СФО успевают проехать до «включения» ST0:

$$t_{np} \geq t_p \quad (33)$$

В результате время задержки составит:

$$t_z = \left(\frac{(t_z - t_{np})}{2} + t_k \right) \cdot n''_{on}, \text{ с} \quad (34)$$

где n''_{on} – количество т/с прибывающих к ST0 за время ее существования на разрешающий сигнал СФО при соблюдении условия (32), с;

$$n''_{on} = (t_z - t_{np}) \cdot q, \text{ ед.} \quad (35)$$

VII – В этом случае отсутствует время свободное для движения после выключения условной стоп-линии и время существования условной стоп-линии постепенно сокращается, при этом все накопившееся автомобили успевают пройти до «включения» условной стоп-линии у ОППЧ.

Условие, при котором не все т/с накопившиеся во время горения запрещающего сигнала СФО успевают проехать до «включения» ST0:

$$t_{np} \leq t_p \quad (36)$$

В результате время задержки составит:

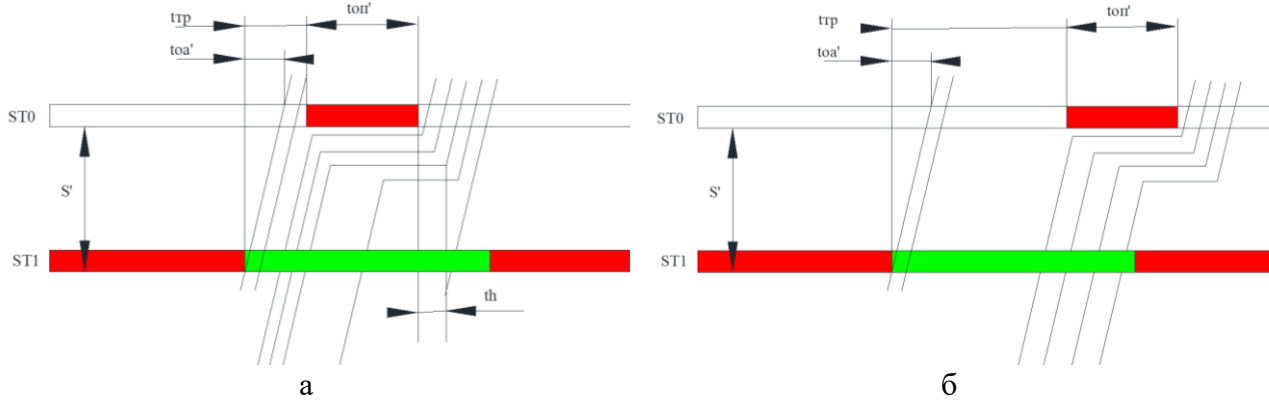
$$t_3 = \left(\frac{(t_z - t_{np})}{2} + t_k \right) \cdot n''_{on} + n''_{ocm} \cdot t_k, \text{ с} \quad (37)$$

где n'_{ocm} – количество т/с оставшихся на второй цикл для данных условий (35), с;

$$n''_{ocm} = n_k - n_{до} - n_{док}, \text{ ед.}$$

При расположении остановочного пункта за перекрестком

При расположении остановочного пункта за перекрестком возникают два различных сценария движения транспортного потока через ОППЧ:



ST0 – стоп-линия образованная остановкой трамвая на ОППЧ;

ST1 – стоп-линия у СФО; $t_{on'}$ – продолжительность существования условной стоп-линии в ОППЧ, с; t_{oa} – время на движение транспортного потока между ST1 и ST0, с; t_{tp} – время движения трамвая между стоп-линией ST1 и условной стоп-линией перед светофорным объектом ST2, с;;

S – расстояние между стоп-линиями, м; t_h – время движения с потоком насыщения, с.

Рисунок 2 – Структура цикла СФО и условной стоп-линии у ОППЧ за СФО

VIII – Трамвай прибывает к первой стоп-линии на сигнал светофора так, что транспортный поток имеет запас времени на преодоление второй условной стоп-линии до ее включения. При этом на все время существования стоп-линии ST0, транспортные средства проходят через стоп-линию ST1. (Рисунок 2.а)

Данное положение достигается при соблюдении следующего условия:

$$t_z - t_{np} - t'_{on} - t_{mp} + t'_{oa} \geq 0, \text{ с} \quad (38)$$

В результате время задержки составит:

$$t_3 = (n_{on} + n_{np}) \cdot t'_{on}, \text{ с} \quad (39)$$

где n_{nph} – количество т/с оставшихся у условной стоп-линии ST0, двигающиеся с потоком насыщения:

$$n_{nph} = n_k - n_{\partial oc} \geq 0, \text{ с} \quad (40)$$

где $n_{\partial oc}$ – количество т/с успевших проехать стоп-линию ST0 до ее включения:

$$n_{\partial oc} = t'_{\partial o} \cdot q'_{\partial o} < n, \text{ с} \quad (41)$$

где $t'_{\partial o}$ – время свободного движения транспортных средств до включения ST0:

$$t'_{\partial o} = t_{np} + t_{mp} - t'_{oa}, \text{ с} \quad (42)$$

$$t_{np} \geq 0, \text{ с}$$

t_{oa} – время на движение транспортного потока между ST1 и ST0, с.

$$\text{при } t_{np} < 0, \quad t'_{oa} = \frac{S' \cdot a + V^2}{V \cdot a}, \text{ с} \quad (43)$$

$$\text{при } t_{np} \geq 0, \quad t'_{oa} = \frac{S'}{V}, \text{ с} \quad (44)$$

где S' – расстояние между ST1 и ST0, м;

t_{mp} – время движения трамвая между стоп-линией ST1 и условной стоп-линией перед светофорным объектом ST2, с;

$$t_{mp} = \frac{S' \cdot a_{p-m} + V_{mp}^2}{V_{mp} \cdot a_{p-m}}, \text{ с} \quad (45)$$

где V_{mp} – техническая скорость движения трамвая на данном участке, м/с.

$$q'_{\partial o} = \frac{t_1 \cdot q + t_2 \cdot q_h}{t'_{\partial o}}, \text{ а/с} \quad (46)$$

где t_1 – доля свободного времени на движение через ST1: $t_1 = t'_{\partial o} - t_p \geq 0, \text{ с}$

t_2 – доля времени на движение транспортных средств с потоком насыщения:

$$t_2 = t'_{\partial o} - t_1, \text{ с}$$

IX – Трамвай прибывает к первой стоп-линии на зеленый сигнал светофора, и все транспортные средства успевают преодолеть вторую стоп-линию до ее включения. (Рисунок 2.б)

Данное положение достигается при соблюдении следующего условия:

$$t_z - t_{np} - t'_{on} - t_{mp} + t'_{oa} \leq 0, \text{ с} \quad (47)$$

В результате время задержки составит:

$$t_z = (n'''_{on} + n_{nph}) \cdot (t_z - t_{np} - t_{mp} + t'_{oa}), \text{ с} \quad (48)$$

где n'''_{on} – количество т/с прибывающих к ST0 за время ее существования на разрешающий сигнал СФО при соблюдении условия (47), с;

$$n'''_{on} = \frac{(t_z - t_{np} - t'_{on} - t_{mp} + t'_{oa})}{2} \cdot q \cdot K_o \geq 0, \text{ ед.} \quad (49)$$

X – Возможен вариант, при котором расстояние между ST0 и ST1 достаточно большое, а время запрещающей фазы на СФО такой, что на ST0 прибывают транспортные средства, прошедшие ST1 на последующем после проезда трамвая светофорном цикле.

При этом, при соблюдении условия (47), соблюдается следующее условие:

$$t_{np} + t'_{on} + t_{mp} - C - t'_{oa} > 0, \text{ с} \quad (50)$$

В результате время задержки составит:

$$t_z = (n'''_{on} + n_{nph}) \cdot (t_{np} + t'_{on} + t_{mp} - C - t'_{oa}), \text{ с} \quad (51)$$

$$n'''_{on} = \frac{(t_{np} + t'_{on} + t_{mp} - C - t'_{oa})}{2} \cdot q \cdot K_o \geq 0, \text{ ед.} \quad (52)$$

Подтверждение адекватности модели расчета задержек транспортных средств перед остановочным пунктом с посадкой с проезжей части

Для проверки адекватности предложенной модели произведены исследования на ОП «Дорошевича» и на ОП «Б. Хмельницкого» в направлении Зеленого луга.

ОП «Дорошевича» расположен за регулируемым перекрестком, расстояние от стоп-линии на перекрестке до начала остановочного пункта 60м, длина остановочного пункта 45м. Исследование проводились в межпиковое время ра-

боты трамвая, в светлое время суток, в солнечную погоду, интенсивность транспортного потока 0,156 авт./с, время цикла 100с, время зеленого сигнала 60с. Проведено 156 замеров, результаты сгруппированы на интервалах по 5с с момента включения разрешающего сигнала светофора.

Проведем проверку предложенной модели на другом ОППЧ, расположенном перед СФО, с другими значениями факторов интенсивности транспортного потока и расстояния от ОППЧ до СФО.

Остановочный пункт «Б.Хмельницкого» расположен за регулируемым перекрестком, расстояние от стоп-линии на перекрестке до начала остановочного пункта 220м, длина остановочного пункта 45м. Исследование проводилось в межпиковое время работы трамвая, в светлое время суток, в солнечную погоду, интенсивность транспортного потока 0,24 авт./с, время цикла 100с, время зеленого сигнала 70с. Проведено 145 замеров, результаты сгруппированы на интервалах по 5с с момента включения разрешающего сигнала светофора.

Статистический анализ показал, что теоретическая модель хорошо описывает экспериментальные данные. Различия между ними статистически не значимы, что подтверждает адекватность модели. Модель хорошо предсказывает экспериментальные данные. Небольшие различия могут быть связаны с погрешностями измерений или случайными факторами.

Заключение

На основе моделирования разработана методика, предназначенная для расчета временных потерь транспортных средств на стоп-линии перед ОППЧ в условиях совместного проезда трамвая и смешанного транспортного потока, а также при наличии СФО, расположенного в непосредственной близости. Методика учитывает взаимодействие трамвайного и автомобильного движения, а также влияние светофорного регулирования на формирование задержек транспортных средств. Предложенная методика и выявленные оптимальные временные параметры прибытия трамвая к ОППЧ представляют собой научно обоснованный инструмент для повышения эффективности управления транспортными потоками в городских условиях. Их применение позволит снизить задержки транспортных средств, улучшить пропускную способность дорожной сети и повысить уровень обслуживания пассажиров общественного транспорта. Результаты исследования могут быть использованы для разработки стратегий координации движения, оптимизации светофорного регулирования и планирования инфраструктурных изменений в зонах ОП.

Список литературы

1. Кустенко А. А. Экономические потери в трамвайном движении г. Минска / А. А. Кустенко // Научно-технический сборник. Коммунальное хозяйство городов. – 2007. – №76. – С.328-331
2. Кустенко, А.А. Расчет потери от издержек, вызванных простоем транспортного потока перед остановочным пунктом трамвая / А.А. Кустенко // Вместе к эффективному дорожному движению: сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Минск:БНТУ, 2008. – С. 69-75.

3. Кустенко А. А. Анализ издержек в трамвайном движении в зоне остановочного пункта / А. А. Кустенко // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: науч. редактор – Ваксман С.А. / Научные материалы юбилейной XVIII международной (восемнадцатой екатеринбургской) научно-практической конференции. – Екатеринбург: Издательство УрГЭУ, 2012 – С.180-184
4. Кустенко А.А. Расчет потери от издержек, вызванных простоем транспортного потока перед остановочным пунктом трамвая / А. А. Кустенко // Сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф. «Вместе к эффективному дорожному движению». – Минск: БНТУ, 2008 – с. 82-86
5. Кустенко А. А. Определение потерь транспортного потока перед остановочным пунктом трамвая / А. А. Кустенко // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – №. 95. – С. 233-244.
6. Vuchic, V.R. Urban Transit: Operations, Planning, and Economics / V.R. Vuchic. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. – 624 p.
7. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
8. Elvik R. Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies // Accident Analysis and Prevention. – 2001. – Vol. 33(1). – P. 9–17. DOI: 10.1016/s0001-4575(00)00010-5
9. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
10. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
11. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: в 2 ч. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. – Ч. 1. – 328 с.

References

1. Kustenko A.A. Ekonomicheskie poteri v tramvaynom dvizhenii g. Minska // Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Kommunal'noe khozyaystvo gorodov. 2007. № 76. S. 328–331.
2. Kustenko A.A. Raschet poteri ot izderzhek, vyzvannykh prostoyem transportnogo potoka pered ostanovochnym punktom tramvaya // Vmeste k effektivnomu dorozhnomu dvizheniyu: sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Minsk: BNTU, 2008. S. 69–75.
3. Kustenko A.A. Analiz izderzhek v tramvaynom dvizhenii v zone ostanovochnogo punkta // Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: nauch. redaktor – Vaksman S.A. / Nauchnye materialy yubileynoy XVIII mezhdunarodnoy (vosemnadtsatoy yekaterinburgskoy) nauchno-prakticheskoy konferentsii. Yekaterinburg: Izdatel'stvo UrGEU, 2012. S. 180–184.
4. Kustenko A.A. Raschet poteri ot izderzhek, vyzvannykh prostoyem transportnogo potoka pered ostanovochnym punktom tramvaya // Sb. nauch. statey Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Vmeste k effektivnomu dorozhnomu dvizheniyu». Minsk: BNTU, 2008. S. 82–86.
5. Kustenko A.A. Opredelenie poter' transportnogo potoka pered ostanovochnym punktom tramvaya // Kommunal'noe khozyaystvo gorodov. 2010. № 95. S. 233–244.
6. Vuchic V.R. Urban Transit: Operations, Planning, and Economics. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. 624 p.
7. Vrubel' Yu.A. Poteri v dorozhnom dvizhenii. – Minsk: BNTU, 2003. – 380 s.
8. Elvik R. Cost-benefit analysis of road safety measures: applicability and controversies // Accident Analysis and Prevention. – 2001. – Vol. 33(1). – R. 9–17. DOI: 10.1016/s0001-4575(00)00010-5
9. Vrubel' Yu.A., Kapskiy D.V., Kot E.N. Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii. – Minsk: BNTU, 2006. – 240 s.

10. Mikhaylov A.Yu., Golovnykh I.M. Sovremennye tendentsii proektirovaniya i rekonstruktsii ulichno-dorozhnykh setey gorodov. – Novosibirsk: Nauka, 2004. – 267 s.
11. Vrubel' Yu.A. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya: v 2 ch. – Minsk: Belorus. fond bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya, 1996. – Ch. 1. – 328 s.