

Уточнение условий возникновения транспортных заторов в сетях со светофорным регулированием

Н.А. Орлов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: В статье рассматривается процесс формирования очереди транспортных средств перед регулируемым перекрестком. Классические модели задержки и очереди предполагают, что все прибывающие к пересечению транспортные средства размещаются на стоп-линии. Если в свободных условиях движения данное допущение является приемлемым, то в условиях насыщенного движения требуется учет пространственно-временного распределения очереди. Для этого описание динамики очереди дополнено переменными положения фронта очереди и фронта отъезда очереди. Под понятием фронт очереди понимается положение последнего автомобиля в очереди, а под фронтом отъезда - положение автомобиля, начинающего движение при разъезде очереди. Приведены аналитические зависимости для вычисления значений указанных переменных, как при постоянном прибытии транспортных средств, так и при произвольном циклическом профиле потока. Уточнены условия блокирования транспортных связей с учетом введенных переменных.

Ключевые слова: задержка, длина очереди, транспортные связи, блокирование, светофорное регулирование, фронт очереди, фронт разъезда очереди.

Введение

Продолжительность задержки транспортных средств получила широкое применение в качестве критерия оптимизации управления, как на отдельном пересечении, так и сети [1, 2]. Процесс формирования очереди транспортных средств представляется следующим образом – на запрещающий сигнал r формируется очередь транспортных средств с интенсивностью $q(t)$. При включении разрешающего сигнала g начинается разъезд очереди с интенсивностью $q-S$, при этом количество транспортных средств в очереди принимает максимальное значение Q_{max} . Область под линией профиля представляет собой задержку за цикл регулирования [3].

Используя различные предположения о характере прибытия и отъезда автомобилей в работах [5-8] были получены модели очереди и задержки при стационарных условиях движения, в работе [9] приводятся зависимости для не стационарных условий. Указанные модели задержки и очереди

транспортных средств предполагают, что все прибывающие к пересечению транспортные средства размещаются на стоп-линии. В свободных условиях движения данное допущение является приемлемым. В условиях насыщенного движения становится важным не только количество автомобилей в очереди, но и ее пространственно-временное распределение по связи.

Пространственно-временное распределение очереди по транспортной связи

Рассмотрим подробнее формирование и разъезд очереди с учетом пространственно-временного распределения автомобилей по транспортной связи (рис. 1).

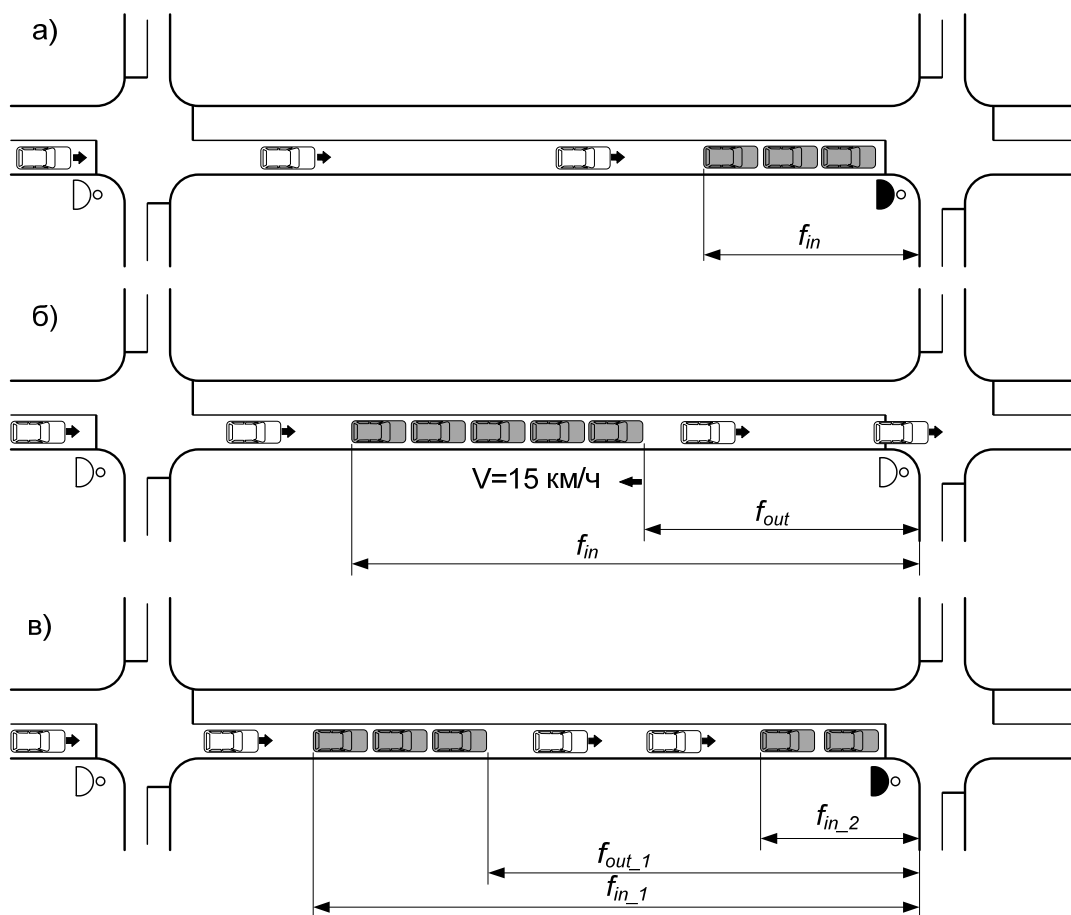


Рис. 1 Динамика образования очереди при насыщенном движении

Введем следующие обозначения для описания динамики очереди: f_{in} – положение фронта очереди, м; f_{out} – положение фронта отъезда транспортных средств, определяющего точку отъезда очередного транспортного средства.

Положение фронта очереди f_{in} определяет точку остановки прибывающих транспортных средств. При отсутствии остаточной очереди, в момент включения запрещающего сигнала (рис. 1а) формируется очередь, фронт которой в дискретном виде определяется выражением:

$$f_{in}(k+1) = f_{in}(k) + q(k) \cdot L_{veh} \cdot \Delta; \quad (2.44)$$

где $f_{in}(k)$ – положение фронта очереди в текущий момент, м; $f_{in}(k+1)$ – положение фронта очереди в последующий момент, м; Δ – шаг моделирования, с; L_{veh} – средний динамический габарит автомобиля в очереди, м; $q(k)$ – интенсивность движения, авт/с.

В указанных условиях положение фронта очереди также может быть определено как:

$$f_{in}(k+1) = Q(k+1) \cdot L_{veh}. \quad (1)$$

При включении разрешающего сигнала отъезжающие транспортные средства формируют фронт отъезда f_{out} (рис. 1б). При этом очередь распадается на две части. Первую часть составляют неподвижные транспортные средства, вторую – движущиеся от фронта разъезда к стоп-линии. Можем записать следующее выражение, определяющее положение фронта отъезда:

$$f_{out}(k+1) = f_{out}(k) + V_{out} \cdot \Delta; \quad (2)$$

где V_{out} – скорость распространения фронта отъезда.

Динамика f_{out} определяется особенностями движения транспортных средств по полосе без возможности совершения обгона – движение $n+1$ автомобиля возможно после того, как начнет движение n автомобиль.

Соответственно скорость распространения фронта отъезда может быть определена как:

$$V_{out} = \frac{L_{vech}}{\tau_{out}},$$

где τ_{out} – время реакции водителя на отъезд впереди идущего автомобиля, с.

При среднем динамическом габарите автомобиля 5,3 м и времени реакции водителя 1,2 с скорость распространения фронта отъезда составит 4,42 м/с (15,9 км/ч). Данные натурных исследований, приведенные в [10] показали, что скорость распространения фронта отъезда постоянна и в среднем составляет $V_{out} = 15$ км/ч. С учетом стабильности V_{out} формулу (2) запишем следующим образом:

$$f_{out}(k+1) = f_{out}(k) + 4,167 \cdot \Delta.$$

Следует отметить, что при включении разрешающего сигнала светофора (точка b на рис. 2) количество автомобилей в очереди начинает сокращаться, в то время как положение фронта очереди продолжает увеличиваться.

Соответственно выражение (1), содержащее количество автомобилей в очереди, уже не может быть использовано для вычисления фронта очереди. Исчезновение фронта очереди, и соответственно начало движения всех транспортных средств (точка a на рис. 2) происходит при выполнении условия:

$$f_{in}(k) = f_{out}(k). \quad (3)$$

С учетом формулы (3) положение фронта очереди будет определяться следующим образом:

$$f_{in}(k+1) = \begin{cases} 0 & \text{при } f_{out}(k) = f_{in}(k) \\ f_{in}(k) + q(k) \cdot L_{vech} \cdot \Delta & \end{cases}.$$

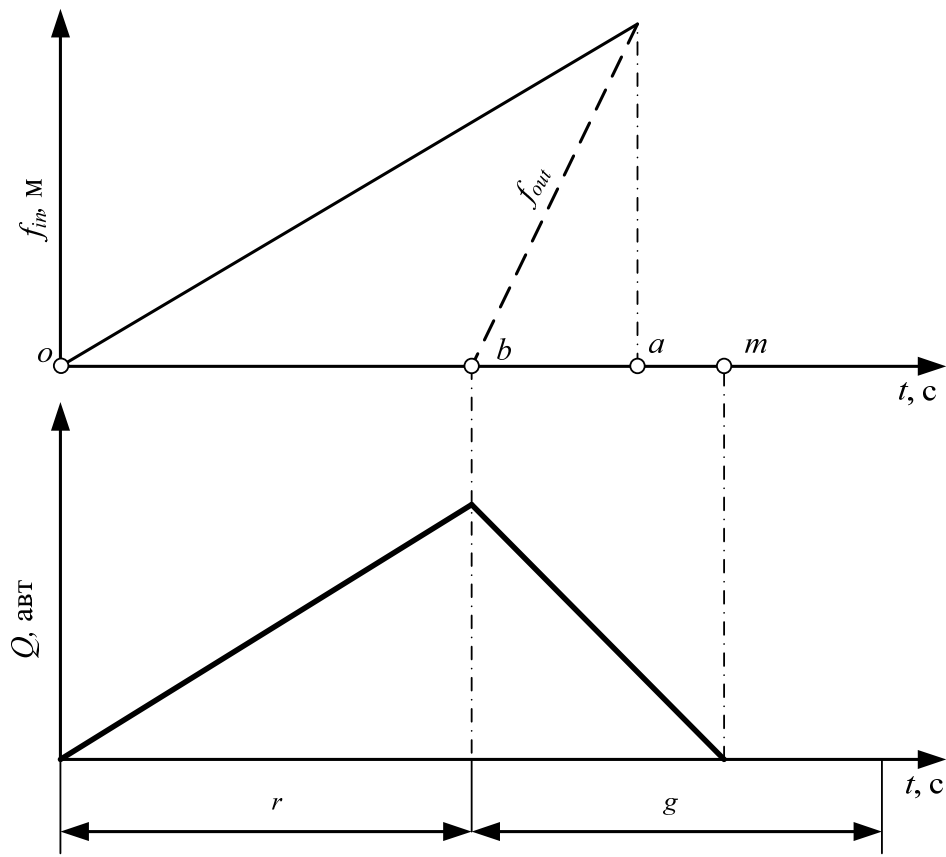


Рис. 2 Диаграмма соотношения очереди транспортных средств и положения фронта очереди

Отметим, что очередь транспортных средств после исчезновения фронта очереди продолжает существовать (на участке от точки a до m $Q(k) > 0$).

Выключение разрешающего сигнала светофора вновь инициирует процесс образования фронта очереди. При достаточно большой длине перегона и интенсивности движения возможно одновременное наличие двух и более фронтов очереди и разъезда на перегоне (рис. 2в). Таким образом, каждый светофорный цикл инициирует на транспортной связи формирование собственного фронта образования и разъезда очереди.

Условие блокирования транспортных связей

Сформулируем условие блокирования входящих в перегон транспортных связей с учетом приведенных выше зависимостей:

$$f_{in}(k) > L_{edg}; \quad (4)$$

где L_{edg} – длина перегона, м.

Выражение (4) определяет условие блокирования входящих транспортных связей в произвольный момент времени, в том числе и при разрешающем сигнале светофора.

Определим момент исчезновения фронта очереди и его положение при этом на транспортной связи за цикл регулирования. Существование фронта очереди (рис. 2) определяется двумя интервалами. Первый интервал определяется продолжительностью действия запрещающего сигнала (отрезок ob), второй – моментом достижения фронтом отъезда $f_{out}(k)$ фронта очереди $f_{in}(k)$ (отрезок ba) при включении разрешающего сигнала. Максимально удаление фронта очереди F_{in} вычисляется следующим образом:

$$F_{in} = Q_o \cdot L_{vech} + \sum_{i=0}^b q_i \cdot L_{vech} + \sum_{j=b}^a q_j \cdot L_{vech}; \quad (5)$$

где Q_o – остаточная очередь на связи, авт; q_i – количество прибывших автомобилей в интервале i , авт; $b=r$ – длительность запрещающего сигнала, с; a – длительность разрешающего сигнала, во время которого существует фронт очереди, с.

Момент исчезновения фронта очереди определяется положением точки a , определив которую можем решить поставленную задачу. Согласно рис. 2 точка a может быть найдена из выражения:

$$F_{out} = V_{out} \cdot (a - b). \quad (6)$$

Или с учетом (3) и (6):

$$V_{out} \cdot (a - b) = Q_o \cdot L_{vech} + \sum_{i=0}^b q_i \cdot L_{vech} + \sum_{j=b}^a q_j \cdot L_{vech} ; \quad (7)$$

Решение уравнения (7) относительно a при задании интенсивности движения в виде циклических профилей возможно численными методами. Приняв допущение о равномерном характере распределения интенсивности движения в цикле регулирования уравнение (7) примет следующий вид:

$$V_{out} \cdot (a - b) = Q_o \cdot L_{vech} + \bar{q} \cdot b \cdot L_{vech} + \bar{q} \cdot (a - b) \cdot L_{vech} ; \quad (8)$$

где \bar{q} – средняя интенсивность движения в цикле регулирования, авт/с.

Решая уравнение (8) относительно a получим:

$$a = \frac{(Q_o + \bar{q} \cdot b) \cdot L_{vech}}{V_{out} - \bar{q} \cdot L_{vech}} + b. \quad (9)$$

Удаление фронта очереди от стоп-линии F^{in} в светофорном цикле будет вычисляться как:

$$F^{in} = a \cdot \bar{q} \cdot L_{vech}. \quad (10)$$

С учетом формул (9) и (10) условие блокирования транспортной связи примет вид:

$$\left[\frac{(Q_o + \bar{q} \cdot b) \cdot L_{vech}}{V_{out} - \bar{q} \cdot L_{vech}} + b \right] \cdot \bar{q} \cdot L_{vech} \geq L_{edg}. \quad (11)$$

Учет пространственно-временного распределения очереди по транспортной связи позволяет повысить точность прогноза их блокирования. Приведенные аналитические зависимости позволяют определить момент перехода всех транспортных средств, находящихся в очереди в движение, что позволяет выполнить разработку алгоритм управления светофорным объектом для условий насыщенного движения.

Литература

1. Зырянов В. В., Криволапова О. Ю. Моделирование и анализ спроса на объекты совершенствования транспортной сети // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/
2. Криволапова О.Ю. Анализ эффективности проектов совершенствования транспортной сети // «Инженерный вестник Дона», 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/830
3. Власов А.А., Орлов Н.А. Управление насыщенными транспортными потоками в городах: моногр. Пенза: ПГУАС, 2014. 120 с.
4. Власов А. А. Теория транспортных потоков: монография. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2014. 121 с.
5. Beckmann M. J., Mc Guire C. B., Winsten C. B. Studies in the Economics in Transportation. 1956. Yale University Press, New Haven. 226 p.
6. Little, J. D. C. Approximate Expected Delays for Several Maneuvers by Driver in a Poisson Traffic. Operations Research, 1961, №9 (1), pp. 39-52
7. Webster F. V. Traffic signal settings. Road Research Laboratory, London, U.K., 1958. Road Res. Tech. Paper no. 39. 230 p.
8. Newell, G. F. Queues for a Fixed-Cycle Traffic Light. The Annals of Mathematical Statistics. 1960. Vol.31, №.3, pp. 589-597.
9. Highway Capacity Manual 2010, Volume 3. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. , 2010. 533 p.
10. Kerner B.S. The Physics of Traffic. Berlin, New York.: Springer, 2004, 269 p.

References

1. Zyryanov V. V., Krivolapova O. Yu. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/
2. Krivolapova O.Yu. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/830



3. Vlasov A.A., Orlov N.A. Upravlenie насыщчennymi транспортными потоками в городах: monogr [Control of the saturated transport flows in cities]. Penza: PGUAS, 2014. 120 p.
4. Vlasov A. A. Teoriya transportnykh potokov: monografiya [The theory of transport flows]. Penza: Izd-vo PGUAS, 2014. 121 p.
5. Beckmann M. J., Mc Guire C. B., Winsten C. B. Studies in the Economics in Transportation. 1956. Yale University Press, New Haven. 226 p.
6. Little, J. D. C. Approximate Expected Delays for Several Maneuvers by Driver in a Poisson Traffic. Operations Research, 1961, №9 (1), pp. 39-52
7. Webster F. V. Traffic signal settings. Road Research Laboratory, London, U.K., 1958. Road Res. Tech. Paper no. 39. 230 p.
8. Newell, G. F. Queues for a Fixed-Cycle Traffic Light. The Annals of Mathematical Statistics. 1960. Vol.31, №.3, pp. 589-597.
9. Highway Capacity Manual 2010, Volume 3. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. , 2010. 533 p.
10. Kerner B.S. The Physics of Traffic. Berlin, New York.: Springer, 2004, 269 p.