

УДК 656.072

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА МАРШРУТЕ

**П.Ф. Горбачев, профессор, д.т.н., О.В. Макаричев, доцент, к.ф.-м.н.,
В.М. Чижик, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. Приведены результаты аналитического моделирования времени ожидания пассажиров на остановочном пункте для возможных вариантов организации работы транспортных средств на городских маршрутах при интервальном способе обслуживания пассажиров.

Ключевые слова: время ожидания, аналитическое моделирование, городской пассажирский транспорт, остановочный пункт, интервал движения, маршрут.

ОЦІНКА ЧАСУ ОЧІКУВАННЯ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ОРГАНІЗАЦІЇ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА МАРШРУТІ

**П.Ф. Горбачов, професор, д.т.н., О.В. Макаричев, доцент, к.ф.-м.н.,
В.М. Чижик, аспірант, ХНАДУ**

Анотація. Наведено результати аналітичного моделювання часу очікування пасажирів на зупинному пункті для можливих варіантів організації роботи транспортних засобів на міських маршрутах при інтервальному способі обслуговування пасажирів.

Ключові слова: час очікування, аналітичне моделювання, міський пасажирський транспорт, зупинний пункт, інтервал руху, маршрут.

WAITING TIME ESTIMATION FOR DIFFERENT METHODS OF ROUTE VEHICLE OPERATION ORGANIZATION

**P. Gorbachov, Professor, Doctor of Technical Science,
O. Makarychev, Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Science,
V. Chyzyk, graduate, KhNAHU**

Abstract. In the paper presented the results of analytical modeling of the passengers waiting time at the transit stops for possible options of organization of vehicles functioning on urban routes at the interval method of passenger service.

Key words: waiting time, analytical modeling, urban passenger transport, transit stop, headways, route.

Введение

Повышение качества обслуживания пассажиров городским пассажирским транспортом (ГПТ) возможно за счет минимизации затрат времени ожидания пассажирами транспортных средств (ТС) на остановочном пункте (ОП) в начале поездки и во время совершения пересадок. При неизвестном расписании

движения ТС на маршруте продолжительность ожидания является для пассажиров случайной величиной, предсказать которую заранее невозможно. При наличии информации о фактическом времени прибытия ТС на ОП ожидание пассажирами посадки в ТС первого из подходящих маршрутов будет определяться только личным отношением пассажира к своему свободному времени и

поездке в целом. Однако в настоящее время в Украине информационное обеспечение пассажиров о расписании движения ТС на городских маршрутах находится на крайне низком уровне. Это касается и города Харькова, в котором наличие расписания на ОП ГПТ – скорее исключение, чем правило. Поэтому исследование случайного времени ожидания пассажирами, характерного для неизвестного пассажирам расписания движения ТС на маршруте, является актуальной задачей.

Анализ публикаций

Оценкой времени ожидания пассажиров (ВОП) прибытия ТС на ОП занимаются как отечественные, так и иностранные авторы. Среди иностранных авторов следует отметить исследование, которое проводилось в Лос-Анджелесе совместными силами работниками Калифорнийского университета, университета штата Флорида, городов Нью-Йорк и Буффало [1]. Основной вопрос, который интересовал исследователей – это как пассажиры оценивают свое время, когда ожидают общественный транспорт [1]. Пассажирам была представлена возможность платить за экономию личного времени. Они могли заплатить 75 центов и отправиться с ОП прямо сейчас, при этом не тратить время на ожидание, или же потратить в среднем на 5,3 минуты больше личного времени, чтобы дожидаться бесплатного проезда. Ждать бесплатного проезда решило 86 % пассажиров. Их поведение предполагает, что стоимость времени ожидания бесплатного проезда меньше, чем 8,5 \$ в час. Исследователи университетов штата Огайо, Иллинойс и Чикаго провели наблюдения, которые позволили определить количественную связь между предполагаемым и фактическим временем ожидания [2]. Исследования показали, что пассажиры воспринимают время ожидания больше, чем фактическое, в диапазоне от 3 до 15 мин при отсутствии информации о времени прибытия ТС на ОП. Среднее воспринимаемое ВОП, по результатам проведения обследования, составило 6,61 минут, а их среднее фактическое время – 5,77 мин. Разность в 0,84 мин – следствие отсутствия расписания на ОП и неосознание его пассажирами [2].

В работах [3, 4] приведены результаты имитационного моделирования ВОП на ОП при неизвестном расписании движения ТС на

маршруте. Работы носят практическую ценность определения случайной величины ВОП, но не имеют достаточного теоретического обоснования. В работе [5] приведены результаты моделирования среднего ВОП для двух вариантов движения ТС на маршруте, которые обеспечивают минимальное и максимальное значения ВОП. В результате получены границы его изменения: от половины планового интервала до величины, почти равной интервалу.

В результате анализа литературных источников по исследованию ВОП выявлено, что основная их часть направлена на определение продолжительности ожидания, оценку его стоимости и восприятия пассажирами. Мало внимания уделяется определению статистических характеристик ВОП, что является важным аспектом при оценке эффективности возможных путей повышения качества функционирования ГПТ.

Цель и постановка задачи

Низкий уровень контроля и взаимодействия между заказчиком транспортных услуг и исполнителем – транспортными предприятиями приводит к несоблюдению графиков движения ТС, способствует чрезмерной свободе выбора водителями режимов движения на городских маршрутах. В результате на них сформировались саморегулируемые отношения между водителями, работающими на одном или общих участках маршрутов. Это привело к появлению новых форм организации движения ТС на маршрутах. Целью исследования является формализация возможных форм работы ТС на маршрутах общественного транспорта и проведение для них аналитической оценки ВОП на ОП. При этом полагается, что подход пассажиров к ОП описывается простейшим потоком и имеет свойства стационарности, ординарности и отсутствие последствия [6], а также что пассажиры не имеют информации о расписании движения маршрутного транспорта. Еще одним общим ограничением при формировании моделей является невозможность спаривания ТС на маршрутах.

Теоретические исследования времени ожидания пассажиров

Наилучшим вариантом организации работы общественного транспорта на маршруте сле-

дует считать прибытие ТС на ОП через равные интервалы времени без отклонений от графика [5]. При таких условиях среднее ВОП принимает минимальное значение, которое равно половине интервала. В реальности такой вариант работы следует считать достаточно редким. С одной стороны, в расписании движения реальных маршрутов зачастую встречаются разные интервалы, а ТС нередко прибывают на ОП с некоторым отклонением от планового времени прибытия. При рассмотрении второго варианта обычно полагается, что отклонение времени прибытия ТС на ОП распределено по стандартизованному нормальному закону [3]. А невозможность спаривания автобусов приводит к тому, что стандартное отклонение этой величины рассчитывается согласно правилу трех сигм [3]

$$\sigma_I = \frac{I}{6}, \quad (1)$$

где I – средний интервал движения ТС на маршруте, мин; σ_I – среднеквадратичное отклонение фактического момента времени прибытия ТС на ОП от планового, мин.

Формула для расчета ВОП согласно с [7]

$$M(t) = \frac{M(i^2)}{2M(i)}, \quad (2)$$

где M – оператор математического ожидания; t – среднее значение ВОП ТС на ОП, мин; i – фактический интервал прибытия ТС на ОП, мин.

При этом

$$M(i^2) = I^2 + \sigma_i^2, \quad (3)$$

где σ_i^2 – дисперсия случайной величины интервала между соседними прибытиями ТС на ОП, мин.

В таком случае, исходя из условия сложения дисперсий двух независимых случайных величин

$$\sigma_i^2 = 2\sigma_I^2 = \frac{I^2}{18}. \quad (4)$$

Подстановка (4) в выражение (2) определяет математическое ожидание ВОП

$$M(t) = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{18}\right). \quad (5)$$

То есть ВОП при таком варианте организации работы ТС на маршруте обеспечивает достаточный уровень качества обслуживания пассажиров, который незначительно отличается от наилучшего варианта организации работы ГПТ.

При рассмотрении случая, когда в расписании движения ТС на маршруте встречаются разные интервалы, было принято допущение, что интервалы прибытия ТС на ОП ГПТ могут принимать только два значения: I_{\min} – минимальный интервал движения ТС на маршруте; I_{\max} – максимальный интервал движения ТС на маршруте. При этом сумма минимального и максимального интервалов равна двум средним интервалам движения ТС на маршруте

$$I_{\min} + I_{\max} = 2 \cdot I. \quad (6)$$

Используя формулу (2), можно получить следующее выражение

$$M(t) = \frac{I_{\min}^2 + I_{\max}^2}{2 \cdot (I_{\min} + I_{\max})}. \quad (7)$$

Для характеристики разброса интервалов целесообразно ввести вспомогательную величину $S \geq 1$, которая показывает, во сколько раз максимальный интервал больше минимального. Тогда максимальный интервал будет рассчитываться как

$$I_{\max} = S \cdot I_{\min}. \quad (8)$$

Подстановка выражения (8) в (7) дает математическое ожидание ВОП ТС на ОП в следующем виде

$$M(t) = \frac{I_{\min}}{2} \cdot \left(\frac{1+S^2}{1+S}\right). \quad (9)$$

С другой стороны, с учетом (6)

$$I_{\min} = \frac{2 \cdot I}{S+1}, \quad (10)$$

тогда

$$M(t) = \frac{1+S^2}{(1+S)^2} \cdot I. \quad (11)$$

В случае, когда $S = 2$

$$M(t) = \frac{1+4}{9} \cdot I = I \cdot 0,55, \quad (12)$$

а при $S = 3$, $M(t) = I \cdot 0,625$. То есть для такого расписания длительность ожидания пассажирами ГПТ пропорциональна отношению максимального интервала к минимальному.

Во время наблюдений за работой ГПТ было выявлено, что во многих случаях ТС отправляются от конечного остановочного пункта вслед за предыдущим ТС при наполнении салона до какого-то критического уровня. Критический уровень, например заполнение всех сидений в салоне автобуса, является результатом коллективного поведения водителей, а время наполнения салона при высокой интенсивности подхода пассажиров не является значимым и не влияет на отправку ТС. Такая ситуация наблюдается на многих конечных ОП или на промежуточных остановках с большим пассажирообменом (вблизи станций метрополитена, рынков и т.д.), где происходит ритмичное или постепенное накопление пассажиров. В таком случае ТС отправляется от конечного ОП вслед за предыдущим через время, за которое салон наполнится до заданного уровня $l \geq 1$. А плотность распределения времени между очередными ТС, при условии простейшего потока подхода пассажиров к ОП, имеет вид

$$f_l(x) = \lambda \cdot \frac{(\lambda x)^{l-1}}{(l-1)!} \cdot e^{-\lambda x}, \quad (13)$$

где l – заданный уровень наполнения автобуса, чел.; λ – интенсивность потока пассажиров, чел./мин.

Математическое ожидание времени отправления очередного ТС составляет

$$I = M(i) = \frac{l}{\lambda}, \quad (14)$$

$$M(i^2) = \int_0^{\infty} x^2 f_l(x) dx = \frac{l \cdot (l+1)}{\lambda^2}. \quad (15)$$

Стационарное математическое ожидание ВОП на ОП рассчитывается как

$$M(t) = \frac{M(i^2)}{2M(i)} = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{l}\right). \quad (16)$$

Например, при $l = 5$

$$M(t) = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{5}\right) = I \cdot 0,6.$$

Если уровень наполнения салона $l = 10$, а параметр простейшего потока $\lambda = 60$ чел./час, тогда средний интервал отправления ТС от ОП будет равен

$$I = \frac{l}{\lambda} = \frac{1}{6} = 10 \text{ мин.}$$

Для такого случая математическое ожидание ВОП ТС на ОП

$$M(t) = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{10}\right) = I \cdot 0,55 = 5 \text{ мин } 30 \text{ с.}$$

С другой стороны, при таком способе взаимодействия между водителями часто наблюдается ситуация, когда время отправления ограничено некой величиной. Эта ситуация характерна для невысокой интенсивности подхода пассажиров или избыточного количества ТС на маршруте. Тогда время отправления контролируется другими водителями, находящимися на начальном ОП маршрута.

Можно предположить, что время простоя на посадку пассажиров ограничивается константой T . Тогда ТС простаивает на ОП время, за которое салон наполнится пассажирами до уровня l , но не больше времени T с момента отправки предыдущего ТС. При этом, как и в предыдущих технологиях организации работы подвижного состава на маршрутах, процесс подхода пассажиров описывается простейшим потоком с параметром λ . Тогда интервал отправления ТС имеет плотность распределения

$$f_l(x; T) = \begin{cases} \lambda \cdot \frac{(\lambda \cdot x)^{l-1}}{(l-1)!} \cdot \frac{e^{-\lambda x}}{A_l(T)}; & x \leq T \\ 0; & x > T \end{cases}, \quad (17)$$

где $A_l(T)$ – постоянная величина, найденная из условия нормировки.

Математическое ожидание интервала прибытия ТС на ОП находится путем интегрирования выражения

$$I = M(i) = \int_0^{\infty} x f_l(x; T) \cdot dx = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{A_{l+1}(T)}{A_l(T)}. \quad (18)$$

Второй момент случайной величины интервала прибытия ТС на ОП имеет следующий вид:

$$M(i^2) = \int_0^{\infty} x^2 f_l(x; T) dx = \frac{l \cdot (l+1)}{\lambda^2} \cdot \frac{A_{l+2}(T)}{A_l(T)}. \quad (19)$$

Подстановка выражений (14) и (15) в формулу (2) дает математическое ожидание ВОП на ОП в следующем виде:

$$M(t) = \frac{l+1}{2 \cdot \lambda} \cdot \frac{A_{l+2}(T)}{A_{l+1}(T)}, \quad (20)$$

или

$$M(t) = \frac{I}{2} \cdot \left(\frac{A_l(T) \cdot A_{l+2}(T)}{(A_{l+1}(T))^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{l} \right). \quad (21)$$

Так как функция $A_l(T)$ имеет монотонный характер, то ограничение по времени отправления ТС сокращает время ожидания пассажиров.

Выводы

Анализ литературных источников показал, что вопрос моделирования ВОП на ОП городских маршрутов исследован только для частных случаев организации работы ТС на маршрутах и существует необходимость в поиске аналитических зависимостей для расчета продолжительности ожидания ГПТ. Разработанные аналитические модели расчета ВОП для разных форм организации работы общественного транспорта на городских маршрутах могут быть использованы для

моделирования транспортных систем городов и определения качества обслуживания пассажиров общественным транспортом.

Проведенные исследования ВОП носят теоретический характер, поэтому в дальнейшем необходимо проведение экспериментальной проверки адекватности полученных моделей.

Литература

1. Baldwin Hess D. Waiting for the Bus / D. Baldwin Hess, J. Brown, D. Shoup // Journal of Public Transportation. – 2004. – Vol. 7, № 4. – P. 67–84.
2. Mishalani R. Passenger wait time perceptions at bus stops: Empirical results and impact on evaluating real-time bus arrival information / R. Mishalani, M McCord, J. Wirtz // Journal of Public Transportation. – 2006. – Vol. 9, № 2. – P. 89–106.
3. Горбачев П. Ф. Параметры плотности распределения времени ожидания пассажирами городских маршрутов / П. Ф. Горбачев // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2007. – № 37. – С. 90–95.
4. Горбачов П. Ф. Дослідження часу очікування пасажирів на зупиночних пунктах міського пасажирського транспорту / П. Ф. Горбачов, В. М. Чижик // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – № 30. – С. 134–138.
5. Горбачов П. Ф. Аналітична оцінка мінімальних та максимальних витрат часу пасажирів на зупинці міського маршруту / П. Ф. Горбачов, В. М. Чижик // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2012. – № 32. – С. 67–71
6. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов / Н. Ш. Кремер. – М.: Юнити-Дана, 2004.
7. Блинкин М.Я. Модифицированная схема Зильберталя: анализ обобщение применение / М. Блинкин, Г. Гуревич // Совершенствование перевозок пассажиров автомобильным транспортом: сб. тр. НИИАТ. – 1981. – №.5. – С. 16–32.

Рецензент: Е.В. Нагорный, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2013 г.