

УДК 711.73: 625.711.4

МОДЕЛЬ ВЫБОРА МАРШРУТА ВЕЛОСИПЕДНОГО ТРАНСПОРТА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В ПУТИ

П.Ф. Горбачёв, профессор, д.т.н., Е.С. Токмиленко, ассистент, ХНАДУ

Аннотация. Представлен метод расчета скорости движения велосипедиста с учетом топографии местности и максимальной физической мощности человека. Предложен метод решения задачи кратчайшего пути с целью минимизации времени движения на основе скорости, близкой к реальной.

Ключевые слова: велосипед, инфраструктура, мощность, скорость, время в пути, планирование.

МОДЕЛЬ ВИБОРУ МАРШРУТУ ВЕЛОСИПЕДНОГО ТРАНСПОРТУ З МЕТОЮ МІНІМІЗАЦІЇ ЧАСУ В ПУТІ

П.Ф. Горбачов, професор, д.т.н., О.С. Токмиленко, асистент, ХНАДУ

Анотація. Представлено метод розрахунку швидкості руху велосипедиста з урахуванням топографії місцевості і максимальної фізичної потужності людини. Запропоновано метод вирішення задачі найкоротшого шляху з метою мінімізації часу руху на основі швидкості, близької до реальної.

Ключові слова: велосипед, інфраструктура, потужність, швидкість, час руху, планування.

BICYCLING ROUTE CHOICE MODEL WITH A PURPOSE TO MINIMIZE TRAVEL TIME

P. Gorbachov, Professor, Doctor of Technical Science, O. Tokmylenko, assistant,
KhNAHU

Abstract. The paper presents the method to compute cycling speed that accounts for topography and maximum physical power of the rider. The method necessary to determine the shortest route between the origin and destination based on realistic speed is proposed.

Key words: bicycle, infrastructure power, speed, travel time, planning.

Вступлення

В настоящее время все большее количество городов во всем мире принимают решение развивать и поддерживать велосипедное движение. Многочисленные исследования показали, что в городах с большой долей велопоездки снижается количество заболеваний среди населения, улучшается экологическая ситуация, а также создаются дополнительные возможности для развития экономики и туризма. В то же время вопрос безопасности велосипедистов остается серьезнейшей проблемой таких инициатив.

Решением проблемы высокой аварийности велосипедистов может стать создание велосипедной инфраструктуры, отделяющей незащищенных велосипедистов от автомобильного транспорта. К сожалению, создание велосипедной инфраструктуры – дорогостоящий процесс, который требует качественного планирования. Поэтому необходимо учитывать факторы, которые стимулируют жителей города использовать велосипед для поездок, чтобы обеспечить успешность проектов по развитию велосипедной инфраструктуры.

Анализ публикаций

Многочисленные исследования показали, что безопасность, цель поездки (утилитарная или рекреационная), время в пути, рельеф местности и др. являются существенными факторами выбора маршрута для велосипедистов [1]. В то же время существующие рекомендации по планированию велоинфраструктуры учитывают далеко не все факторы, а именно безопасность и в некоторых случаях – топографию.

Анализ литературы в сфере планирования велосипедной инфраструктуры показал, что существующие модели предполагают среднюю скорость движения велосипедиста на протяжении всего маршрута и допускают, что время в пути является пропорциональным расстоянию.

Для расчета времени в пути моторизированного транспорта используется значение скорости свободного потока, которое принимается равным разрешенной предельной скорости движения или рассчитывается с учетом задержек. В то же время такой подход не является реалистичным для велосипедного транспорта, для которого одним из основных определяющих факторов скорости является физические возможности велосипедиста [2].

Отношения между скоростью и физическими способностями велосипедиста были описаны Виттом и Вилсоном [3]. Они предполагают, что мощность, необходимая для поддержания велосипедистом определенной скорости, может быть описана физическими законами. В таком случае мощность является функцией от силы сопротивления воздуха, силы сопротивления качения и силы сопротивления гравитации и может быть представлена в виде

$$W_w = [K_A(V + V_w)^2 + mg(s + C_R)]V, \quad (1)$$

где W_w – мощность, необходимая для движения велосипеда, ватт; K_A – коэффициент аэродинамического сопротивления, кг/м; V – скорость движения велосипеда, м/с; V_w – скорость встречного ветра, м/с; m – суммарная масса, рассчитанная как сумма массы велосипедиста и велосипеда, кг; g – гравитационное ускорение, м/с²; s – продольный наклон дороги; C_R – коэффициент сопротивления качению.

Однако уравнение скорости с заданной мощностью принимает вид кубического многочлена, который является неудобным для задачи маршрутизации. Вилсон и Пападополус [4] предлагают использовать итеративный метод (2) с параметром сходимости K_C .

$$V = \left(\frac{W_{\max}}{K_A(V + V_w)^2 + mg(s + C_R)} + K_C V \right) \frac{1}{K_C + 1}. \quad (2)$$

Эмпирические исследования поведения велосипедистов при помощи GPS-навигаторов показали, что людям свойственно придерживаться постоянной скорости движения (от 20 до 25 км/ч) до тех пор, пока поддержание этой скорости не требует чрезмерных физических усилий [5]. Витт и Вилсон предполагают, что для длительных поездок мощность непрофессионального спортсмена может падать до 40 ватт [3]. В то время как книга биоастрономических данных указывает, «здоровый мужчина» может поддерживать мощность до 300 ватт на протяжении поездок до 40 минут [6]. Паркин и Ротерам предлагают максимальную теоретическую мощность в 250 ватт при движении вверх по дороге с вертикальным наклоном. Это значение было рассчитано по методике, схожей с той, которая представлена в этой статье, где мощность рассчитывается на основе массы велосипедиста, скорости движения и наклона дороги, полученных с помощью GPS-навигатора и других переменных.

Анализ показал, что физические способности велосипедиста, представленные в виде мощности, должны учитываться при расчете времени в пути. До настоящего времени не существовало метода определения реалистичного времени в пути, базирующегося на модели изменения скорости движения в связи с топографией местности.

Цель и постановка задачи

Целью данной статьи является разработка модели планирования велосипедной инфраструктуры на основе минимального времени в пути.

Время в пути – важный фактор, который влияет на решение участников дорожного движения использовать велосипед для перемещения. Возможность реалистично предсказать время в пути для велосипедиста позволит усовершенствовать процесс транспортного планирования и повысить надежность велосипедного транспорта.

Данное исследование ставит перед собой задачу – найти ответ на два важных вопроса процесса планирования велосипедной инфраструктуры: (1) как выбрать трассу велосипедного маршрута на основе реалистичного времени в пути и (2) как собственно рассчитать реалистичное время в пути, учитывая физические способности велосипедиста.

Для того чтобы ответить на эти вопросы, следующие задачи должны быть решены:

- определить критерии, которые имеют наибольшее влияние на время в пути велосипедного транспорта;
- разработать модель расчета времени в пути, которая учитывает максимальную мощность, доступную велосипедисту;
- решить проблему выбора маршрута между заданными точками методом минимального времени в пути.

Теоретическая модель

Выбор кратчайшего по времени маршрута осуществляется методом поиска набора звеньев сети, которые дают наименьшее суммарное значение времени, и математически может быть представлено как

$$T_{\min} = \min_{1 \leq i \leq n} \{T_i\}, \quad (3)$$

где T_{\min} – время в пути по кратчайшему маршруту, мин; T_i – сумма времени проезда всех звеньев альтернативного маршрута i , мин.

Время в пути одного звена определяется как длина звена, разделенная на среднюю скорость движения велосипедиста на этом звене. В то время как длина звена является постоянной величиной, скорость движения может меняться в зависимости от сложности маршрута, препятствий на пути и др. факторов. Данная модель предполагает, что велосипедист будет поддерживать постоянную комфортную скорость движения до тех пор, пока это не требует дополнительных физических усилий. На основе анализа источников модель, представленная в этой статье, предполагает максимальную мощность велосипедиста равной 200 Ватт и среднюю комфортную скорость равной 22 км/ч.

Для расчета зависимости мощности и скорости от рельефа местности использовалась

модель Витта и Вилсона (1). Так как скорость встречного ветра – непостоянная величина, которая изменяется от местности, сезона и даже времени суток, модель мощности (1) была упрощена до вида

$$W_w = [K_A V + mg(s + C_R)] \cdot V \quad (4)$$

и модель времени до вида

$$V = \left(\frac{W_{\max}}{K_A V^2 + mg(s + C_R)} + K_C V \right) \frac{1}{K_C + 1}. \quad (5)$$

Таким образом, мощность (W_w), необходимая для поддержания скорости ($V = 22$ км/ч), рассчитывается на основе уравнения (1а) и сравнивается с максимальной мощностью велосипедиста ($W_{\max} = 200 \cdot W$). Если $W_w > W_{\max}$, то V пересчитывается с заданной мощностью ($W_w = W_{\max}$) на основе уравнения (5).

В табл. 1 представлены значения входных параметров модели.

Таблица 1 Значения входных параметров модели

Параметр	Значение
Коэффициент аэродинамического сопротивления (K_A), кг/м	0,3871
Скорость движения велосипеда (V), м/с	6
Масса (m), кг	95
Гравитационное ускорение (g), м/с ²	9.81
Продольный наклон дороги (s)	Варьируется
Коэффициент сопротивления качению (C_R)	0,003
Максимальная мощность велосипедиста (W_{\max}), W	200
Параметр сходимости (K_C)	0,5

Данная модель позволяет рассчитать скорость движения велосипедиста, приближенную к реальности, и, соответственно, определить реалистичное время в пути, учитывая физические способности велосипедиста.

Методика проведения анализа

Для тестирования модели была выбрана улично-дорожная сеть города Вашингтон, округ Колумбия, США. Вашингтон имеет

репутацию города, в котором велосипед часто используется для поездок на работу, и поэтому развитие инфраструктуры является оправданной целью для Вашингтона. Широкий диапазон значений наклона дороги предоставляет возможности для тестирования модели. Также имеется система краткосрочной аренды велосипедов (CapitalBikeShare), которая насчитывает 175 станций в городе и округе. Исследование проводилось на сети улиц, соединяющих пять станций аренды велосипедов. Задача поиска кратчайших по времени маршрутов была решена с помощью приложения Network Analyst программного продукта ArcGIS 10.1. Геоинформационная база дорог США ESRI (www.arcgis.com) была использована для создания модели уличной сети, геодезические данные об изменении рельефа местности были получены на официальном сайте национальной программы геопространственного учета США (www.nationalmap.gov).

Для каждого участка дороги были заданы значения длины, процент поперечного наклона и характеристика направления движения в одну или две стороны. Так как топография, а значит и мощность, и скорость, может значительно отличаться для двух направлений движения одного и того же участка дороги, значения скорости были рассчитаны по методике, описанной выше, для каждого звена в оба направления. На основе значений скорости было определено время в пути и составлена матрица времен между узлами уличной сети, на основе которой были рассчитаны кратчайшие (по времени) маршруты между пятью велостанциями (в общей сложности 20 маршрутов). Пример маршрута представлен на рис. 1. Характеристика маршрутов представлена в табл. 2.

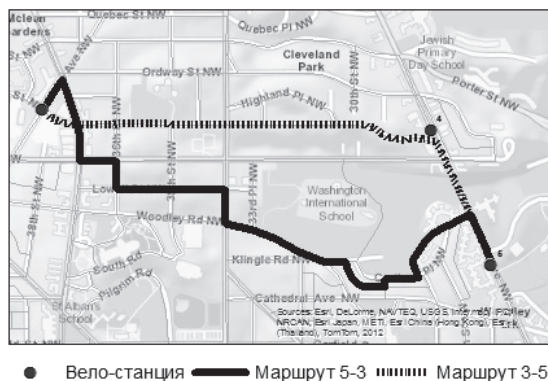


Рис. 1. Кратчайший по времени маршрут

Анализ трассы маршрута между парой станций для двух направлений показал, что трассы маршрутов совпали только для двух пар станций (1–2/2–1 и 4–5/5–4), для которых длина маршрута значительно короче остальных (695 м и 529 м соответственно).

Таблица 2 Характеристика маршрутов

Маршрут	Время, мин	Длина, м
1–2	2,43	695
1–3	7,4	1933
1–4	10,12	3001
1–5	9,71	2873
2–3	6,86	1766
2–4	8,35	2407
2–5	7,73	2224
3–4	4,57	1505
3–5	5,74	1927
4–5	1,54	529
2–1	2,85	695
3–1	6,32	1777
3–2	5,22	1664
4–1	11,47	3070
4–2	8,61	2375
4–3	7,08	1580
5–1	11,28	2932
5–2	8,43	2237
5–3	9,25	2498
5–4	1,54	529

Поиск альтернативной трассы между этими парами станций требует значительного увеличения длины маршрута, что негативно отражается на времени в пути. Время в пути для остальных маршрутов не пропорционально длине маршрута и в значительной степени зависит от средней скорости.

Анализ всех маршрутов показал, что некоторые участки улично-дорожной сети являются более благоприятными для велосипедного движения, чем остальные, так как через них проходит одновременно несколько кратчайших маршрутов. В то же время весь путь следования необязательно одинаково привлекателен для велосипедного движения в оба направления.

Тестирование модели

Для проверки модели на адекватность было совершено 6 тестовых заездов между стан-

циями 3 и 5 в два направления (трасса маршрута 3–5 отличается от трассы маршрута 5–3). Для тестирования был выбран мужчина в возрасте 29 лет, в хорошей физической форме, но не профессиональный спортсмен, который ездит на велосипеде более одного раза в неделю. Для фиксирования времени было использовано мобильное приложение, которое позволяет определить трассу маршрута и время движения велосипедиста, и дает возможность останавливать запись времени, когда велосипедист останавливается (например, на перекрестке). Результаты заездов приведены в табл. 3.

Таблица 3 Результаты тестирования модели

Способ оценки	Время проезда по маршруту	
	3 – 5	5 – 3
Тест 1	6 мин 1 с	9 мин 52 с
Тест 2	6 мин 23 с	9 мин 43 с
Тест 3	6 мин 15 с	10 мин 14 с
Модель	5 мин 45 с	9 мин 15 с

Как видно из табл. 2, значения времени тестовых заездов несущественно отличаются от значений модели. Наибольшее отклонение от модельного времени в заезде 3 на маршруте 5–3 может объясняться накопленной усталостью велосипедиста. Эксперимент был прекращен после того, как участник заезда сообщил о физической усталости.

Необходимо также отметить, что предложенная модель дает время проезда, которое во всех случаях оказалось меньше фактического времени, затраченного велосипедистом в заездах. Это означает, что параметры модели требуют дополнительной проверки на большем массиве данных.

Выводы

Методика расчета реалистичного времени движения велосипедистов, которая принимает во внимание физическую нагрузку на велосипедиста, позволяет рассчитать скорость, близкую к той, которую может развить непрофессиональный велосипедист в реальных дорожных условиях. Дальнейшее уточнение параметров модели следует провести на более широком массиве данных, полученных после многократного проезда большого числа велосипедистов по улично-дорожной сети города.

Планирование велосипедной инфраструктуры между основными центрами тяготения с учетом минимальных по времени маршрутов позволит снизить уровень усталости велосипедистов и сделать этот вид транспорта более привлекательным для реализации потребности жителей городов в передвижениях.

В то же время методика, представленная в данной работе, позволит усовершенствовать существующие модели прогнозирования велосипедных перемещений. В конечном итоге, данная методика может быть интегрирована в известные средства планирования индивидуальной поездки (вебкарты, мобильные приложения и т.д.), с помощью которых велосипедист сможет выбрать наиболее быстрый или наиболее физически легкий (сложный) маршрут.

Литература

1. Winters M.L. Improving public health through active transportation: Understanding the influence of the built environment on decisions to travel by bicycle (Doctoral Dissertation). – University of British Columbia, 2011. – 163 p.
2. Токмиленко Е.С. Влияние вертикального профиля дороги на затрату энергии при движении на велосипеде / Е.С. Токмиленко, П.Ф. Горбачев // Містобудування і територіальне планування. – Вип. 45, Ч. 3. – 2012. – С. 141–145.
3. Whitt F.R. Bicycling science 2nd edition / F.R. Whitt, D. G Wilson. – Cambridge, MA: The MIT Press, 2004. – 364 p.
4. Wilson D.G. Bicycling science, 3rd edition. / D.G. Wilson, J. Papadopoulos – Cambridge, MA: The MIT Press, 2004. – 476 p.
5. Parkin J. Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal / J. Parkin, J. Rotheram // Transport Policy. – 2010. – 17(5). P. 335–341.
6. Webb P. Bioastronautics data book. Scientific and Technical Information Division / P. Webb. – National Aeronautics and Space Administration, 1964.

Рецензент: В.О. Вдовиченко, доцент, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 6 марта 2013 г.