



Особенности методов оценки перспективной интенсивности движения при проектировании платных автодорог



Константин Сергеевич Микрюков

Государственная компания «Автодор», Москва, Россия.

✉ tkonstya@yandex.ru.

Константин МИКРЮКОВ

АННОТАЦИЯ

При разработке проектов строительства новых дорог одной из главных характеристик, определяющих основные параметры дороги, является перспективная интенсивность движения. Именно от перспективной интенсивности зависят расчётная скорость; конструкция дорожной одежды; общее число полос движения; ширина полос движения и обочин; продольный уклон; радиус кривых в плане; поперечный уклон; радиус выпуклых и вогнутых кривых в продольном профиле; ширина разделительной полосы; схема пересечения и примыкания с другими дорогами.

Существующие методы прогнозирования интенсивности движения для платных автомагистралей также

имеют детерминированный характер и не могут служить оценке диапазона значений для перечисленных показателей.

В связи с этим целью исследования является выявление особенностей, достоинств и недостатков существующих методов оценки перспективной интенсивности движения для платных автомагистралей.

В процессе исследования рассмотрены как традиционные, классические методики (экстраполяция, исторический анализ, аппроксимация), так и перспективные инновационные подходы, базирующиеся на теории нечёткой логики и нейросетевом моделировании.

Ключевые слова: транспорт, проектирование автомобильных дорог, интенсивность движения, платная автомагистраль, моделирование транспортных потоков, пропускная способность.

Для цитирования: Микрюков К. С. Особенности методов оценки перспективной интенсивности движения при проектировании платных автодорог // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-8>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно строительство и содержание автомобильных дорог происходит за счёт государства (центральных и/или местных органов власти). Средства для финансирования дорог в основном формируются благодаря поступлению налоговых (акцизы, местные налоги), таможенных и других (дорожные сборы) платежей [1]. Во второй половине XX века во многих странах мира повысилась актуальность вопросов вредных выбросов автотранспорта и массовых пробок на дорогах.

Пробки на дорогах – это глобальная проблема, с которой приходится сталкиваться практически каждому человеку, живущему в большом городе. Это приводит к огромным потерям времени. К тому же быстрое развитие транспорта, особенно нынешнее неограниченное использование личных автомобилей, вызывает серьёзное загрязнение воздуха и энергетический кризис. Эти проблемы существенно ограничивают дальнейшее развитие инфраструктуры и городов по всему миру. В связи с этим на сегодняшний день существует острая необходимость в разработке адаптивной государственной политики и соответственно реализации эффективных мер, которые позволят преодолеть обозначенные проблемы, вызванные неустойчивыми транспортными системами, а впоследствии будут способствовать развитию эффективных, низкоуглеродных и энергосберегающих городских транспортных систем.

На первом этапе решения данных проблем некоторые страны начали строить платные дороги. Плата за проезд является одним из эффективных методов, который позволяет управлять спросом на дорожное движение. Также она широко известна как полезный инструмент для уменьшения заторов на дорогах и сокращения выбросов от транспортных средств [2]. Последние достижения в области информационных и коммуникационных технологий упростили внедрение схем дорожного ценообразования. В мире есть несколько хорошо известных успешных примеров электронного ценообразования на дорогах, в том числе схемы взимания платы за въездные дороги в Калифорнии, Сингапуре и Лондоне, которые базируются на расчёте среднегодовой суточной перспективной интенсивности движения.

В качестве перспективного обычно принимается период равный 20 годам. То есть, в течение 20 лет автомобильная дорога должна эффективно функционировать в тех параметрах, которые определяются категорией дороги и заданы на этапе её строительства [3]. Следовательно, в зависимости от надёжности установления среднегодовой суточной перспективной интенсивности движения на этапе проектирования дороги будет зависеть стоимость её строительства и эффективность функционирования в будущем.

При этом необходимо отметить, что существующие методики определения перспективной интенсивности движения для строительства новых платных дорог существенно отличаются в зависимости от спецификации методов, составляющих их основу, учёта тех или иных параметров автостреды, применяемых измерительных приборов, целей установления платы за проезд.

Поэтому с учётом вышеизложенного, изучение особенностей, возможностей, ограничений и сфер применения методов оценки перспективной интенсивности движения при строительстве платных дорог является актуальной научно-технической проблемой, решению которой и посвящена данная статья.

Анализ последних исследований и публикаций свидетельствует о том, что вопросы платных дорог неоднократно становились предметом исследований отечественных и зарубежных авторов.

Наиболее комплексное раскрытие указанная проблематика получила в трудах В. И. Брызгалова, М. О. Карпушко [4], И. Г. Айю Андани, Л. Ла Паи Пуэлло, К. Т. Гёрса (I. G. Ayu Andani, L. La Paix Puello, Karst T. Geurs) [5].

Вопросами оптимального проектирования платных дорог с точки зрения устойчивого развития территорий занимались А. В. Вишневский, С. С. Игошин, М. О. Карпушко, И. Л. Бартоломей [6].

Прогнозированию параметров транспортных потоков с применением аналитических методов посвятили свои труды В. С. Андреев, О. А. Агеева [1; 7], Й. Х. Сусено, М. Агунг Вибово, Багус Харио Сетиаджи (Yudi Harto Suseno, Muhammad Agung Wibowo, Bagus Hario Setiadji) [8].

Однако, несмотря на большой спектр научных исследований по указанной проблематике, вопрос интенсивности движения по будущей автомагистрали, алгоритм её расчё-



та и определяющие факторы влияния, а также механизм корректировки с учётом изменений социально-экономического развития территории до сих пор остаются нерешёнными.

Таким образом, целью проведённого исследования является повышение точности обоснования технических параметров и расширение подходов к оценке перспективной интенсивности движения платных автомагистралей, через выявление недостатков и преимуществ в существующих методах обоснования перспективной интенсивности движения, которые не учитывают множество факторов.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

Интенсивность является одним из основных показателей, который характеризует условия движения потока, и определяется количеством транспортных средств, пересекших улицу или дорогу в единицу времени [8]. Одной из особенностей данного показателя является то, что он изменяется во времени, и это изменение носит стохастический характер, полученные значения интенсивности могут значительно отличаться в течение определённых часов дня, дней недели, месяцев в году и т.д.

При сохранении существующих тенденций трафика рост интенсивности движения на платных дорогах рано или поздно достигнет уровня пропускной способности, что, в свою очередь, негативно отразится на условиях движения, вызовет снижение комфорта, заторы, повышение опасности на дорогах и так далее. Все эти факторы наносят вред здоровью людей и вызывают непредвиденные расходы для дорожного сектора, увеличивая энергоёмкость дорог [9].

На сегодняшний день на практике широко используются расчётные методы оценки перспективной интенсивности движения на платных автострадах, которые делятся на несколько больших групп.

Первая группа методов предполагает проведение расчётов исходя из перспективы социально-экономического развития региона, где планируется построить новую платную дорогу. В расчёт принимается широкий круг разнообразных данных, на основании которых можно определить степень влияния тех или иных факторов на интенсивность движения и выяснить, существует ли связь, и если да, то в какой форме (прямой, обратной, ли-

нейной или нелинейной) и какое уравнение может её описать, а также в какой степени интенсивность движения подвержена колебаниям (изменениям). К таким факторам относятся состояние, обустройство и благоустройство дорог; численность населения в районе исследования; состав транспортного потока; географические и климатические условия; наличие мест притяжения; плотность дорожной сети и др. Основу данных методов составляет экстраполяция. Точность прогнозирования развития интенсивности движения зависит от правильно выбранной гипотезы изменения этого процесса – темпа прироста.

Графики, построенные по данным учёта трафика в течение периода наблюдения, зачастую имеют точки с определённым разбросом, что позволяет, при обработке данных применять различные закономерности экстраполирования с практически одинаковой погрешностью. В результате рассчитываются прогнозные значения интенсивности [8].

Наибольшее распространение получили следующие гипотезы:

1. Рост интенсивности движения соответствует линейной зависимости:

$$N_t = N_0 (1 + q)t, \quad (1)$$

где N_t – перспективная интенсивность через t лет (расчётная), авт/д;

N_0 – интенсивность в год проектирования (фактическая), авт/д;

q – динамика прироста/сокращения интенсивности в долях от интенсивности за предыдущий год.

2. Возрастающие темпы прироста интенсивности движения:

$$N_t = N_0 (1 + q)^t, \quad (2)$$

3. Перспективная интенсивность движения выражается логистической кривой с начальным стремительным ростом, который со временем переходит в незначительный прирост:

$$N_t = N_0 \left[1 + 0,01 \left(k_1 t + k_2 \sum_{i=1}^n t_i^{\frac{1}{3}} \right) \right], \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, полученные экспериментальным путём и зависящие от начального прироста интенсивности, определяются по выражению [11]:

$$k_1 = 6,7 - 0,3q_n, \quad (4)$$

$$k_2 = 1,3q_n - 6,7. \quad (5)$$

4. Перспективная интенсивность движения может быть определена полиномом следующего вида:

$$N_i = N_0 + a_i + b_{i2} + c_{i3} + \dots + m_m, \quad (6)$$

где $a, b, c \dots m$ – коэффициенты, полученные экспериментальным путём.

В указанном многочлене количество членов ряда зависит от типа кривой и данных об интенсивности движения.

Вторая группа базируется на исторически сложившихся объёмах трафика на аналогичных дорогах, на основании чего составляется прогноз об изменениях интенсивности в течение расчётного периода. Данный метод позволяет получить очень усреднённую, приблизительную оценку, которая характеризуется значительным уровнем неточности, поэтому данные методы целесообразно использовать только на первоначальном этапе проектирования строительства платных автодорог с дальнейшим обязательным уточнением полученных данных.

Третью группу составляют методы, основанные на многофакторном анализе, но их следует использовать только для тех районов, где собрана широкая база данных об интенсивности движения и факторах, влияющих на неё.

Достаточно широкое распространение в зарубежной практике в процессе оценки интенсивности трафика получило использование аппроксимирующих функций. Для реализации этого метода необходим исходный ряд статических данных, который выравнивается графико-аналитическим или математическим подбором аналитической функции, позволяющей максимально приблизить теоретические и статистические данные в максимально возможной степени [12]. Данная группа методов имеет определённые сходства с вычислением интенсивности на основании исторических данных, но её несомненным преимуществом является возможность использовать цифровую обработку данных, а также отсутствие «жёстко» заданной априорной связи искомого решения с конкретной моделью, что позволяет методам показывать лучшие результаты в условиях неопределённости.

Итак, измерения проводятся на аналогичной магистрали на протяжении ограниченной выборки дней, рассчитываются среднее значение (M) и стандартное отклонение (S) ежедневной нагрузки в часы загруженности. Оценки нормального и высокого уровня нагрузки (L) осуществляются по формуле:

$$L = M + k \cdot S, \quad (7)$$

различные значения коэффициента k используются для нормального и высокого уровней нагрузки.

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - M)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где X_i – согласованный по времени трафик в часы загруженности, измеренный в i -й день;

$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ – среднее выборочное значение;

n – количество дней измерения.

Если период измерения составляет менее 30 дней, то оценка будет не очень надёжной. В этом случае целесообразно провести специальные измерительные исследования для определения типичных значений стандартного отклонения (например, как функции среднего значения выборки).

Ряд авторов считает, что с целью проведения оценки перспективной интенсивности движения для проектов строительства платных автодорог недостаточно применять только методики на основе прямых экстраполяций, а целесообразно дополнительно использовать метод экспертных оценок и метод нейросетевого моделирования [13; 14].

Особого внимания заслуживает нейросетевое моделирование интенсивности транспортного потока в зависимости от экологической нагрузки и параметров проектируемой автотранспортной инфраструктуры. В этой связи возникает необходимость выделения в модели ключевых групп со смысловыми контекстно-зависимыми связями, что позволяет разделить модельный анализ на группы:

- Группа № 1. Анализ пространственно-временной интенсивности, данная группа содержит только информацию об интенсивности движения;

- Группа № 2. Пространственный анализ интенсивности, данная группа имеет информацию о плотности трафика, объектах дорожного сервиса и дорожной сети на прилегающей территории;

- Группа № 3. Пространственный анализ воздействия на окружающую среду, данная группа содержит возможные дорожно-транспортные происшествия, технические средства управления движением, транспортный поток и информацию о дорожной сети на прилегающей территории.

Решение проблемы прогнозирования, в каждой выбранной группе, включает вы-



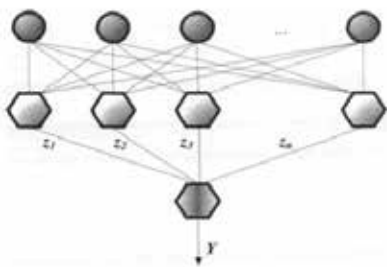


Рис. 1. Персептрон Розенблатта для прогнозирования интенсивности дорожного трафика на платной автомагистрали [выполнено автором].

полнение определённых шагов, таких, как исходная обработка данных, подбор шкалы измерений, создание модели для анализа, проверка пригодности модели для построенной модели по прогнозированию интенсивности движения на проектируемой автомагистрали. Исходная обработка включает в себя нормализацию данных, кодировку нечисловой информации и устранение связей. Главная цель исходной обработки заключается в максимизации энтропии распределения параметров данных [15]. Наибольшее значение энтропии позволяет использовать информацию, находящуюся во входном наборе данных, на предельном уровне, что в итоге благоприятно влияет на точность моделей нейронных сетей.

На рис. 1 представлена нейронная сеть, которая может быть использована для оценки перспективной интенсивности движения в процессе проектирования строительства платных автодорог.

Цель пространственно-временной модели нейронной сети состоит в том, чтобы предсказать объём трафика на участке автодороги на основе информации о фактической интенсивности в подобных точках в заданный момент времени. Модель будет выполнять расчёт по разности шаблонных операций, которые соединяют значение фактической интенсивности со значением интенсивности в заданный момент времени.

С учётом вышеизложенного для синтеза прогноза интенсивность движения формально представляется следующим образом:

$$I = \langle \Omega, G, X, Y, U, T, \rho, \gamma, \zeta \rangle,$$

где $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{n \times m}\}$ – диапазон условий функционирования автомагистрали;

$G = \langle V, (D, W) \rangle$ – модель перекрёстков, примыканий, представленная графом G в пространстве R ;

$V = \{v_i\}$ – графические вершины (узлы), соответствующие узлам перспективного трафика;

$D \subseteq V \times V$ – набор диаграмм по участку дороги и дорожной сети с весовыми коэффициентами $W = \langle \wedge, P, Z \rangle$ (интенсивность, скорость и состав дорожного движения на заданном участке дороги);

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – набор свойств и детерминант, которые описывают состояние дороги и принимают свои собственные значения;

$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ – диапазон исходных значений (количество и типы транспортных средств, поворотов, перекрёстков, пешеходных переходов и т.д.);

$U = \{U_1, U_2, \dots, U_i\}$ – диапазон возможных режимов движения по автодороге;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots\}$ – дискретное или непрерывное время;

$\rho: X \times U \times T \rightarrow \Omega$ – описание изменений в состоянии объекта в заданном состоянии (динамика интенсивности движения при изменении внешних параметров);

$\rho: \Omega \times T \rightarrow Y$ – заключение с описанием наблюдений за динамикой интенсивности движения (оценки, выводы и т.д.);

ζ – внешние неконтролируемые факторы, влияющие на изменения интенсивности.

Отдельного внимания в процессе анализа методов оценки перспективной интенсивности движения для проектов на строительство платных автодорог заслуживает ряд технических подходов, из числа которых можно выделить следующие:

1. Методы понижающих коэффициентов теоретической пропускной способности, позволяющие определить максимальный объём потоков на автодороге или отдельных её элементах без учёта пропускной способности перекрёстков и примыканий. Недостатком этого метода является невозможность определить интенсивность движения на участке дороги между перекрёстками и примыканиями. Расхождение расчётных и фактических результатов расчёта максимальной интенсивности движения на участке автомобильной дороги с использованием данных методов составляет от 200 до 600 авт./час.

2. Методы определения максимальной интенсивности движения на основе функциональных зависимостей моделей транспортного потока «интенсивность–скорость».

Недостатком этого метода является отсутствие учёта влияния перекрестков и примыканий на интенсивность движения. Эти способы определяют лишь наибольшее значение интенсивности движения при средней скорости движения и при частичном учёте состава транспортного потока. Расхождение полученных результатов – от 200 до 400 авт./час.

3. Методы, основанные на использовании функциональных зависимостей «интенсивность–скорость», полученных на основе экспериментальных исследований. Также данные методы не делают поправки на перекрёстки и примыкания, в результате расхождение полученных результатов расчёта находится в пределе – от 100 до 300 авт./час.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие методики оценки перспективной интенсивности движения для проектов на строительство платных автодорог существенно отличаются между собой. Как правило, перспективную интенсивность движения определяют с помощью экстраполяции, аппроксимации накопленных статистических данных. Точность прогнозирования с использованием этих методов зависит от правильно выбранной гипотезы. Перспективными методиками являются те, которые базируются на теории нечёткой логики и нейросетевого моделирования, поскольку позволяют использовать современные методы высокоинтеллектуального анализа, основанного на методах упорядочивания и приведения качественных данных к количественной величине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреюк В. С., Агеева О. А. К вопросу об организации проезда по платным дорогам. Анализ мирового опыта и российской практики и факторы повышения эффективности // Евразийский юридический журнал. – 2018. – № 4 (119). – С. 367–368. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34858461>. Доступ 27.08.2021.
2. Suwanto, F., Kurnianto, Y. F., Setiabudi, B., Sholeh, M. N. Toll road maintenance towards minimum service standard. IOP conference series. Earth and environmental science, 2021, Vol. 700, 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/700/1/012058.
3. Борисов А. И., Андреев Д. В. Проблемы эффективности платных дорог // Финансовая экономика. –

2018. – № 7. – С. 2160–2162. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36828855>. Доступ 27.08.2021.

4. Брызгалов В. И., Карпушко М. О. Особенности платных дорог для автомобильного транспорта на основе анализа российского и мирового опыта // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-техн. конференции. – 2020. – С. 58–61. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44183389&pf=1>. Доступ 27.08.2021.

5. Andani, I. G. Ayu, Puella, L., Geurs, K. T. Effects of toll road construction on local road projects in Indonesia. Journal of Transport and Land Use, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 179–199. DOI: 10.5198/jtlu.2019.1258.

6. Карпушко М. О., Бартоломей И. Л. Перспективы развития многофункциональных дорожных зон на территории Пермского края // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 3. – С. 77–93. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30103539>. Доступ 27.08.2021.

7. Андреюк В. С. Особенности системы бюджетного планирования и контроля исполнения бюджетов в сфере эксплуатации платных автомобильных дорог // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 1. – № 8. – С. 51–54. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26644536>. Доступ 27.08.2021.

8. Suseno, Yu. H., Wibowo, M. A., Setiadji, B. H. Risk Analysis of BOT Scheme on Post-construction Toll Road. Procedia Engineering, 2015, Vol. 125, pp. 117–123. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.018.

9. Setiawan, D., Milyardi, R., Ing, T., Rizkiana, C. Risk Allocation Model For Cismudawu Toll Road Projects. IOP conference series. Materials science and engineering, 2021, Vol. 1071, 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1071/1/012008.

10. Панкратова А. В., Ермилов А. С. Анализ методик повышения эффективности назначения перспективной интенсивности движения при проектировании автомобильных дорог // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2018. – № 1 (27). – С. 30–32. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32497131>. Доступ 27.08.2021.

11. Halás, M., Kraft, S. Modeling and Prediction of Long-Distance Traffic Flows Through the Example of Road Transport in the Czech Republic. Scottish geographical journal, 2016, Vol. 132, Iss. 1, pp. 103–117. DOI: 10.1080/14702541.2015.1084029.

12. Nguyen, Tin T., Krishnakumari, P., Calvert, S. C., Vu, Hai L., Lint van, H. Feature extraction and clustering analysis of highway congestion. Transportation research. Part C. Emerging technologies, 2019, Vol. 100, pp. 238–258. DOI: 10.1016/j.trc.2019.01.017.

13. Zhao, L., Bi, Z., Lin, M., Hawbani, A., Shi, J., Guan, Y. An Intelligent Fuzzy-based Routing Scheme for Software-Defined Vehicular Networks. Computer Networks, 2021, Vol. 187, 107837. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.107837.

14. Ma, D., Sheng, B., Ma, X., Jin, S. Fuzzy hybrid framework with dynamic weights for short-term traffic flow prediction by mining spatio-temporal correlations. IET intelligent transport systems, 2020, Vol. 14, Iss. 2, pp. 73–81. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0287.

15. Alkheder, Sh., AlRukaibi, F. Enhancing pedestrian safety, walkability and traffic flow with fuzzy logic. Science of the total environment, 2020, Vol. 701, 134454. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134454.

Информация об авторе:

Микрюков Константин Сергеевич – главный специалист Государственной компании «Автодор», аспирант Российского университета транспорта, Москва, Россия, mkonstya@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 16.04.2021, одобрена после рецензирования 05.08.2021, принята к публикации 27.10.2021.

