

Анализ сцепных качеств покрытий автомобильных дорог на подходах к железнодорожным переездам

Д.А. Скоробогатченко, А.С. Забазнов

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В работе авторами представлена методика оценки коэффициента продольного сцепления автотранспортных средств с покрытием автомобильных дорог на подходах к железнодорожным переездам. Особенностью предлагаемой методики является возможность использования в качестве входных данных при оценке сцепных качеств покрытий автомобильных дорог, большого количества переменных характеризующих как движущиеся автотранспортные средства, так и покрытие автомобильных дорог в совокупности с погодно-климатическими факторами. Многофакторная оценка коэффициента сцепления на подходах к железнодорожным переездам будет способствовать повышению безопасности движения на пересечениях с железнодорожными путями в рамках разработки системы управления содержанием автомобильных дорог. В качестве инструмента реализации методики авторами предлагается использовать нечеткие деревья решений. Приведен пример анализа коэффициента сцепления и дана оценка точности полученных результатов в сравнении с фактическими данными.

Ключевые слова: коэффициент сцепления, железнодорожный переезд, содержание дорожного покрытия, нечеткое дерево решений.

Введение

Пересечения автомобильных дорог и железнодорожных путей в одном уровне являются чрезвычайно опасными элементами улично-дорожной сети и существенно влияют на эффективность эксплуатации как автомобильного, так и железнодорожного транспорта. Автомобильное сообщение через такие пересечения сопряжено с непроизводительными потерями времени транспорта и пассажиров, столкновения на железнодорожных путях приводят к задержкам движения, повреждениям верхнего строения пути и подвижного состава, что оказывает существенное влияние на экономическую составляющую перевозочного процесса как по автомобильным так и по железным дорогам [1]. Однако, наиболее острой проблемой связанной с пересечениями железнодорожных и автомобильных путей в одном уровне является несоответствие безопасности движения [2] нормативным

требованиям (Федеральный закон от 10.12.1995 № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения»). Как показывает анализ статистики (см. рис. 1), смертность в ДТП, происходящих на железнодорожных переездах в одном уровне имеет практически прямую корреляцию с их количеством [3].

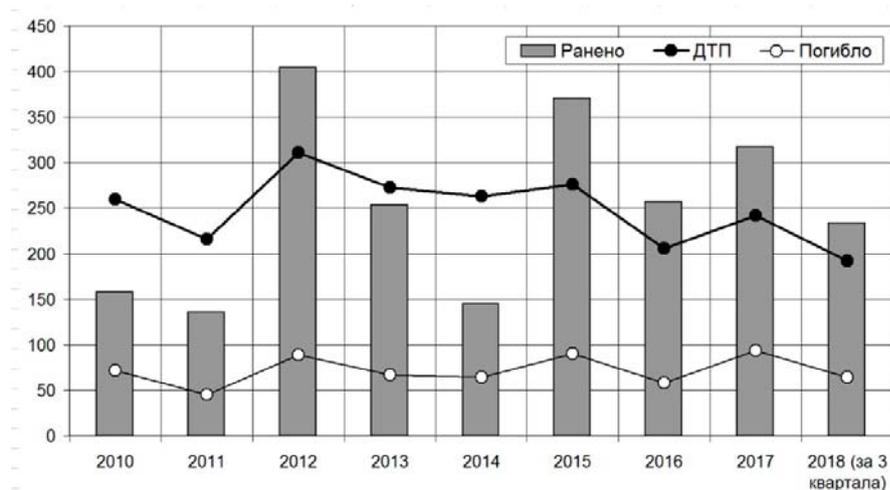


Рис. 1. – Анализ количества ДТП и уровня травматизма в них на пересечении железнодорожных путей и автомобильных дорог в одном уровне

Следовательно, в настоящее время особую значимость приобретают вопросы обеспечения безопасности движения через переезды, повышения их пропускной способности и сокращения непроизводительных простоев автотранспорта на них.

Одним из основных параметров, определяющим безопасность движения на переездах, эксперты называют сцепление шин автотранспортных средств с покрытием автомобильных дорог, оцениваемое через величину коэффициента сцепления [4]. Эффективное управление коэффициентом сцепления осуществляется службами содержания в рамках автоматизированных систем поддержки принятия решений при эксплуатации автомобильных дорог (в соответствии с ОДМ 218.9.001-2013). При этом ГОСТ Р 50597-2017 (Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения

безопасности дорожного движения) регламентирует лишь минимальное значение коэффициента сцепления по условиям безопасности движения, а в качестве основных определяющих факторов дают ограниченный набор параметров, оставляя вне поля зрения многие существенные, но трудноизмеримые показатели. В связи с этим можно сделать вывод, что в настоящее время особую актуальность приобретает разработка методики многофакторной оценки коэффициента сцепления на пересечениях автомобильных дорог и железнодорожных путей в одном уровне в рамках планирования работ по содержанию автомобильных дорог.

Постановка задачи и анализ литературы

Коэффициент продольного сцепления (φ) определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{P_{\text{сц}}}{G_a} \quad (1)$$

$P_{\text{сц}}$ - максимально возможное на участке автомобильной дороги значение силы сцепления между шинами транспортного средства и покрытием; G_a - вес транспортного средства.

В соответствии с ГОСТ 30413-96 (Дороги автомобильные. Метод определения коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием) влияние внешних факторов предлагается осуществлять в виде внесения температурных поправок. Влияние погодных условий на коэффициент сцепления представлено в [5]. При этом авторы прямо говорят о необходимости более широкого включения погодных факторов при оценке коэффициента сцепления. Как отечественные, так и иностранные исследователи [6] при определении коэффициента сцепления традиционно исходят из положения необходимости комплексного учета влияния множества факторов различной природы в рамках системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» (ВАДС). Классификация этих факторов в соответствии с приведена на рис. 2.



Рис. 2. – Факторы ВАДС, определяющие коэффициент сцепления с покрытием автомобильной дороги

Фундаментальный подход к анализу факторов, определяющих коэффициент сцепления представлен в [7]. Автором на основе математической обработки статистических материалов предлагаются подходы к определению коэффициента сцепления в зависимости от состояния покрытия (снег, дождь, гололед) и различных скоростей движения АТС.

По данным, приводимым в [8], значительное влияние на коэффициент сцепления оказывают физические характеристики поверхности дороги (шероховатость, волнистость), ее состояние (тип покрытия, степень загрязнения, уровень влажности), физико-механические характеристики материала протектора АТС (модуль упругости) и его рисунок, а также от конструкция шины.

Анализируя подходы к моделированию коэффициента сцепления следует отметить работу [9], в которой для целей проектирования и эксплуатации железнодорожных переездов предложен многофакторный

подход к определению опасной зоны торможения АТС. Однако коэффициент сцепления автомобильных шин с дорогой берется в числе прочих факторов без расчета. Для оценки воздействия погодно-климатических факторов находят применение вероятностные методы [10]. На основе численных методов анализа, возможно моделирование работы тормозной системы автомобиля в системе ВАДС [11]. Разработаны методы оценки коэффициента сцепления на основе учета различий в дорожных условиях используя методы наименьших квадратов и нелинейной оптимизации [12].

Проведенный анализ математических методов к оценке коэффициента сцепления считаем, что комплексный учет влияния всей совокупности факторов системы ВАДС на коэффициент сцепления удобно осуществить на основе применения деревьев решений, подобно изложенному в [13]. Добавление нечетких множеств позволит учесть модели дополнительную информацию, зачастую остающуюся вне поле зрения. Таким образом, целью данной работы является разработка методики комплексной многофакторной оценки коэффициента сцепления на подходах к железнодорожным переездам в рамках разработки системы управления содержанием и повышения безопасности движения на пересечениях с железнодорожными путями.

Многофакторная модель оценки сцепных качеств.

Отличительной чертой деревьев решений является то, что каждый пример определенно принадлежит конкретному узлу [13]. В нечетком случае это не так. Для каждого атрибута необходимо выделить несколько его лингвистических значений и определить степени принадлежности примеров к ним. Вместо количества примеров конкретного узла нечеткое дерево решений группирует их степень принадлежности. Коэффициент – это соотношение примеров $D_j \in S^N$ узла N для целевого значения i , вычисляемый как:

$$P_i^N = \sum_{S^N} \min(\mu_N(D_j), \mu_i(D_j)) \quad (2)$$

$\mu_N(D_j)$ – степень принадлежности рассматриваемого примера D_j к узлу дерева N ; $\mu_i(D_j)$ – степень принадлежности рассматриваемого примера относительно цели i ; S^N – множество всех возможных примеров узла дерева N .

Далее осуществляется расчет коэффициента P^N , обозначающий общие характеристики примеров узла N . Для нечетких деревьев, в отличие от стандартных деревьев решений, используется отношение P_i^N / P^N , для расчета которого необходимо учитывать степень принадлежности.

Оценку количества информации для определения класса объекта из множества возможных P^N необходимо рассчитывать по формуле:

$$E(S^N) = -\sum_i \frac{P_i^N}{P^N} \cdot \log_2 \frac{P_i^N}{P^N} \quad (3)$$

Далее необходимо рассчитать энтропию по следующей формуле:

$$E(S^N, A) = -\sum_j \frac{P_i^{N|j}}{P^N} \cdot E(S^{N|j}) \quad (4)$$

$N|j$ – дочерний узел для узла N .

На следующем шаге, алгоритм определяет атрибут A^* , характеризующийся максимальным приростом информации:

$$G(S^N, A) = E(S^N) - E(S^N, A) \quad (5)$$

$$A^* = \arg \max_A G(S, A) \quad (6)$$

Далее, узел N разбивается на подузлы $N|j$. Степень принадлежности каждого примера D_k определяется пошагово по формуле:

$$\mu_{N|j}(e_k) = \min(\mu_{N|j}(D_k), \mu_{N|j}(D_k, a_j)) \quad (7)$$

$\mu_{N|j}(D_k, a_j)$ – степень принадлежности примера D_k к атрибуту a_j .

Важно отметить, что из рассмотрения удаляются те подузлы, степень принадлежности которых, равна нулю.

Алгоритм повторяется до тех пор, пока все рассматриваемые примеры не будут классифицированы или же не будут использованы для разбиения все атрибуты.

Принадлежность к целевому классу для новой записи определяется по следующей формуле:

$$\sigma_j = \frac{\sum_l \sum_k P_k^l \cdot \mu_l(D_j) \cdot \chi_k}{\sum_l (\mu_l(D_j) \cdot \sum_k P_k^l)} \quad (8)$$

P_k^l – коэффициент соотношения примеров листа l для значения целевого класса k ; $\mu_l(D_j)$ – степень принадлежности примера к узлу l ; χ_k – степень принадлежности значения целевого класса k к положительному значению исхода классификации.

Основываясь учете влияния на коэффициент сцепления комплекса факторов системы ВАДС (см. рис. 2), проиллюстрируем работу метода. В качестве примера из всего многообразия факторов используем два - скорость движения и характеристика покрытия. С одной стороны, не вызывает сомнений, что скорость движения АТС занимает ключевое положение, определяя коэффициент сцепления. С другой стороны конструктивные особенности современных автомобилей (системы противоскольжения, АБС и электронные системы стабилизации) активно развиваясь в последние десятилетия, значительно повысили безопасность движения [14], снизив влияние в системе ВАДС автомобиля. В связи с этим на первый план выступило влияние качества поверхности дорожного покрытия, одним из факторов которого, воздействующим на коэффициент сцепления является макрошероховатость [15]. Рассмотрим ее в комплексе со скоростью движения.

В таблице 1 по данным натуральных измерений приведены результаты восьми наблюдений, представляющие собой зависимость коэффициента сцепления от скорости движения (в км/ч) и макрошероховатости покрытия (в мм). На основе двух факторов построим нечеткое дерево решений, с помощью которого проиллюстрируем оценку коэффициента сцепления для примера, характеристиками которого мы не располагаем (автомобиль движущийся по покрытию с макрошероховатостью 1 мм и скорость 50 км/ч).

Таблица 1

Набор обучающих примеров для иллюстрации построения нечеткого дерева решений

№ п/п	Макрошероховатость поверхности покрытия, мм	Скорость движения, км/ч	Коэффициент продольного сцепления
1	0,3	40	0,38
2	0,3	50	0,35
3	2,5	50	0,45
4	2,5	60	0,42
5	4,5	60	0,43
6	4,5	70	0,41
7	6,5	70	0,42
8	6,5	80	0,4

Представим, атрибут «макрошероховатость» тремя значениями «слабая», «повышенная» «значительная», а атрибут «скорость» – «низкая», «средняя» и «высокая». Степень принадлежности каждого из рассмотренных примеров к значениям атрибутов представлена в таблице 2.

Таблица 2

Степень принадлежности примеров к атрибутам

№ п/п	Макрошероховатость поверхности покрытия, мм			Скорость движения, км/ч		
	Слабая	Повышенн ая	Значительна я	Низкая	Средня я	Высока я
1	0,02	1,00	0,05	0,70	0,19	0,00
2	0,00	0,89	0,11	0,70	0,19	0,00
3	0,00	0,89	0,11	0,00	0,85	0,00
4	0,00	0,64	0,21	0,00	0,85	0,00
5	0,00	0,64	0,21	0,00	0,85	0,06
6	0,00	0,37	0,37	0,00	0,85	0,06
7	0,00	0,37	0,37	0,00	0,24	0,89
8	0,00	0,17	0,57	0,00	0,24	0,89

В начале определяем значение общей энтропии:

$$P_{\text{да}} = 0,38 + 0,35 + 0,4 + 0,42 + 0,43 + 0,41 + 0,42 + 0,40 = 3,26$$

$$P_{\text{нет}} = 0,62 + 0,65 + 0,55 + 0,58 + 0,57 + 0,59 + 0,58 + 0,60 = 4,74$$

$$P = P_{\text{да}} + P_{\text{нет}} = 3,26 + 4,74 = 8,0$$

$$E(S^N) = -\frac{3,26}{8} \cdot \log_2 \frac{3,26}{8} - \frac{4,74}{8} \cdot \log_2 \frac{4,74}{8} = 0,975 \text{ бит.}$$

Теперь рассчитаем $E(SN, \text{«макрошероховатость поверхности»})$:

$$P_{\text{да}}^{\text{слабая}} = \min(0,7; 0,38) + \min(0,7; 0,35) + \min(0; 0,45) + \min(0; 0,42) + \min(0; 0,43) + \min(0; 0,41) + \min(0; 0,42) + \min(0; 0,4) = 0,38 + 0,35 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0,73$$

$$P_{\text{нет}}^{\text{слабая}} = \min(0,7; 0,62) + \min(0,7; 0,65) + \min(0; 0,55) + \min(0; 0,58) + \min(0; 0,57) + \min(0; 0,59) + \min(0; 0,58) + \min(0; 0,60) = 0,38 + 0,35 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 1,27$$

$$P^{\text{слабая}} = 0,73 + 1,27 = 2,0$$

$$E(\text{макрошерохов., слабая}) = -\frac{0,73}{2} \cdot \log_2 \frac{0,73}{2} - \frac{1,27}{2} \cdot \log_2 \frac{1,27}{2} = 0,947 \text{ бит.}$$

Для повышенной и значительной макрошероховатости поверхности покрытия осуществляются аналогичные вычисления. Результат приведен в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчетов для атрибута «макрошероховатость поверхности»

Наименование показателя	Слабая	Повышенная	Значительная
$P_{\text{да}}$	0,73	2,57	0,94
$P_{\text{нет}}$	1,27	3,15	1,30
E в битах	0,947	0,993	0,981

Отсюда находим энтропию:

$$E\left(S^N, \begin{array}{l} \text{макрошер.} \\ \text{покрытия} \end{array}\right) = \frac{1,4}{7,58} \cdot 0,947 + \frac{4,27}{7,58} \cdot 0,993 + \frac{1,91}{7,58} \cdot 0,981 = 0,981 \text{ бит.}$$

$$G(S^N, \text{макрошероховатость покрытия}) = 0,975 - 0,981 = -0,006 \text{ бит.}$$

Проводя подобные вычисления для атрибута «скорость движения», получаем:

$$E(S^N, \text{скорость движения}) = 0,990 \text{ бит.}$$

$$G(S^N, \text{скорость движения}) = -0,015 \text{ бит.}$$

Минимальное снижение информации обеспечивает атрибут «микрошероховатость покрытия», следовательно, разбиение начнется с него. Далее осуществляется расчет степени принадлежности к новому узлу каждой записи, используя формулу (7).

Очевидно, что нет записей принадлежащих к узлу [микрошероховатость покрытия = значительная и скорость движения = низкая]. В связи с этим данный узел удаляется. Полученное в результате этого дерево представлено на рис. 3.

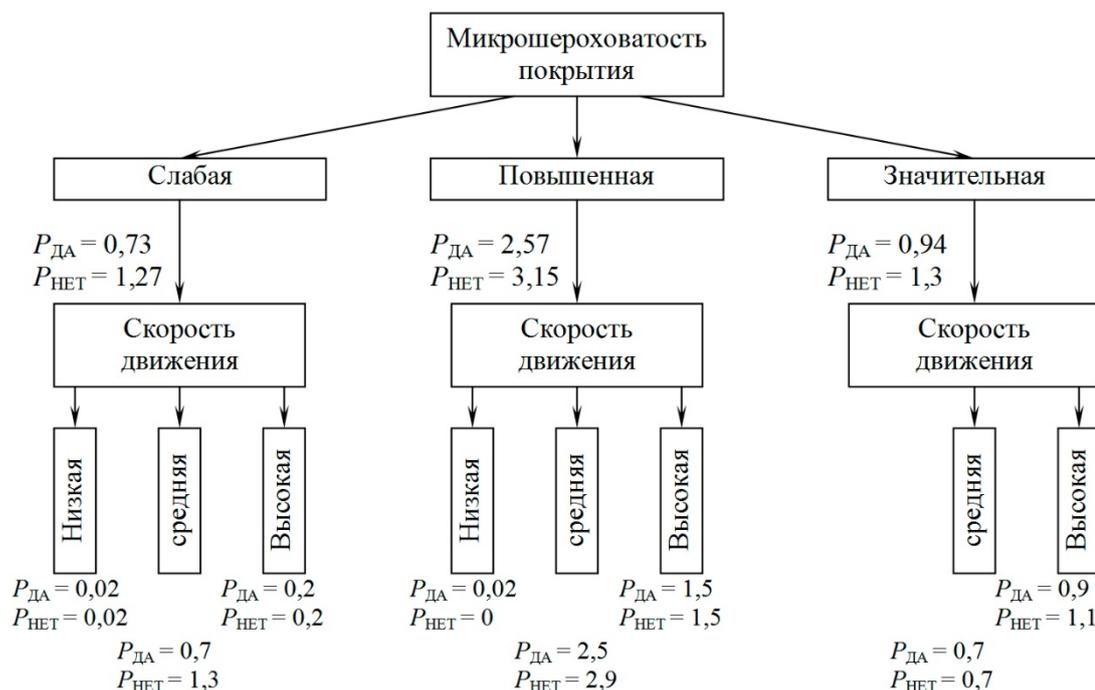


Рис. 3. – Иллюстрация оценки коэффициента сцепления с использованием правил, построенных для двух переменных

Далее определяем коэффициент сцепления для автомобиля не представленного в примере для обучения - скорость движения 50 км/ч и макрошероховатость покрытия 1 мм. Новый объект принадлежит к четырем узлам:

- [микрошероховатость покрытия= слабая и скорость = средняя],
- [микрошероховатость покрытия= слабая и скорость = высокая],
- [микрошероховатость покрытия= повышенная и скорость =средняя],
- [микрошероховатость покрытия= повышенная и скорость = высокая].

Подставляя полученные значения в формулу (7), определяем коэффициент сцепления:

$$\sigma = \frac{0,7 \cdot 0,02 \cdot 1 + 1,3 \cdot 0,02 \cdot 0 + 0,2 \cdot 0,02 \cdot 1 + 0,2 \cdot 0,02 \cdot 0 + 2,5 \cdot 0,37 \cdot 1 + 2,9 \cdot 0,37 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0,37 \cdot 1 + 1,5 \cdot 0,37 \cdot 0}{(0,7 + 1,3) \cdot 0,02 + (0,2 + 0,2) \cdot 0,02 + (2,5 + 2,9) \cdot 0,37 + (1,5 + 1,5) \cdot 0,37} = 0,45$$

По данной методике на языке С# был реализован алгоритм с расширенным количеством переменных. В частности, авторами были включены геометрические характеристики покрытия на подъезде к железнодорожному переезду, состояние покрытия, его однородность а также факторы внешней среды в виде температуры и влажности. Для формирования нечеткого дерева решений было использовано 218 наблюдений.

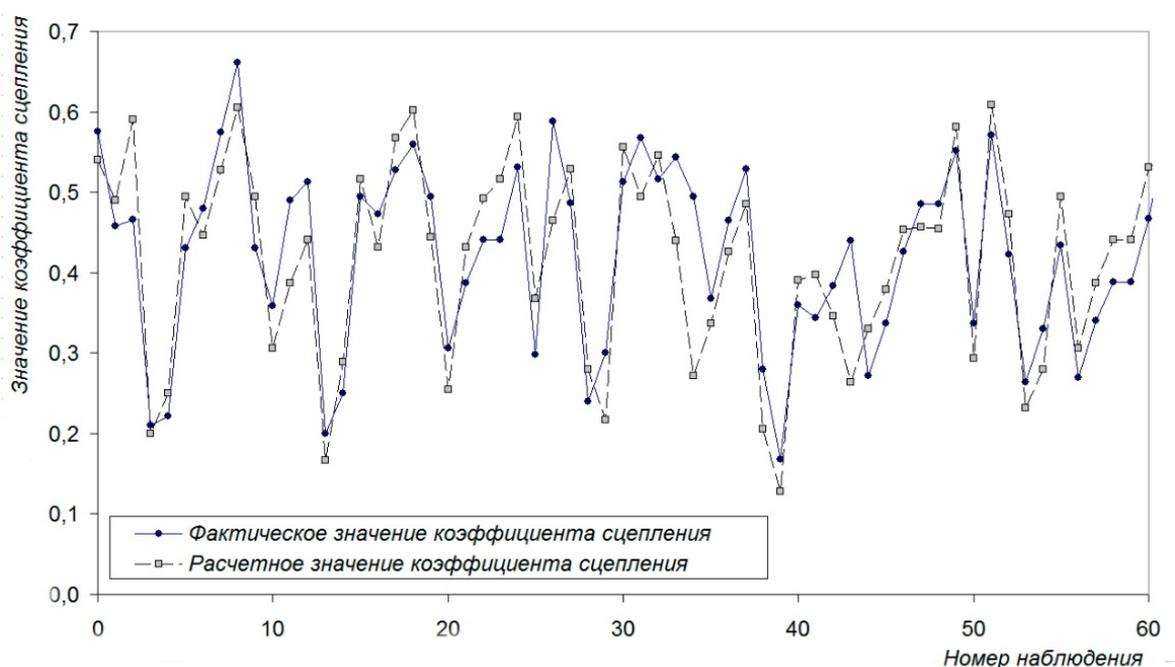


Рис. 4. – Оценка коэффициента сцепления на подъезде к железнодорожному переезду в сравнении с фактическими данными

Оценка коэффициента сцепления в сравнении с фактически данными, не участвовавшими в процессе формирования правил нечеткого дерева решений представлена на рис. 4.

Верификация оценки коэффициента сцепления по предлагаемой методике позволяет говорить о достаточно хороших результатах работы методики. Так средняя абсолютная ошибка (Mean absolute percentage error) при оценке шестидесяти наблюдений в различное время суток и года не превышает 14 %.

Основные выводы

Авторами предложена методика оценки продольного коэффициента сцепления шин АТС с покрытием на подходах к железнодорожным переездам в одном уровне, позволяющая использовать комплекс факторов система ВАДС. В основе предлагаемой методики лежит применение нечеткого дерева решений. В результате применения методики можно сделать следующие выводы:

1. Методика позволяет анализировать сцепные качества покрытий автомобильных дорог используя в качестве входных переменных всю совокупность данных в рамках системы ВАДС, в том числе и представленных вербально. Это осуществляется благодаря синтезу нечетких множеств с логико-лингвистической формой оценки и правил дерева решений. В целях практического использования методика была реализована на языке C#.

2. Средняя ошибка прогнозирования с использованием предлагаемой методики, основанной на нечетком дереве решений не превышает 15 %, что свидетельствует о ее статистической значимости и целесообразности к применению в дорожно-эксплуатационных организациях, осуществляющих работы по обслуживанию подходов к железнодорожным переездам в рамках систем поддержки принятия решений при эксплуатации автомобильных дорог.

3. Результаты оценки коэффициента сцепления, полученные с использованием предлагаемой методики рекомендуется использовать как при разработке оперативных планов мероприятий по борьбе с образованием снеговых и ледяных отложений на покрытии автомобильных дорог, так и при решении вопросов, связанных с организацией разметки, скоростного режима и изменения геометрических параметров автодорог на подходах к железнодорожным переездам.

Литература

1. Тарасов А.В. О безопасности движения на неохраняемых переездах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 1. С. 33-40.
 2. Соболев С.А. О безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестник РГУПС. 2005. № 2. С. 100-104.
 3. Показатели состояния безопасности дорожного движения // Сайт статистики ГИБДД – URL: stat.gibdd.ru.
 4. Карпущенко Н.И., Величко Д.В., Колмогорова Т.В. Проблема обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 4. С. 47–50.
 5. Ботвинева Н.Ю., Буракова И.С., Стрельцова Т.Н., Нестерчук А.В. Исследование влияния погодных условий на величину коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием // Фундаментальные исследования. 2013. №11. С. 407-411.
 6. Li L., Yang K., Jia G., Ran X., Song J., Han Z.-Q. Comprehensive tire-road friction coefficient estimation based on signal fusion method under complex maneuvering operations // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 56-57. pp. 259-276.
 7. Немчинов, М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей. М.: Транспорт, 1985. 231 с.
 8. Кузнецов Н.П., Рассохин С.А. Определение коэффициента сцепления шины автомобиля // Интеллектуальные системы в производстве. 2009. № 2(14). С. 34-41.
 9. Чиграй Г.В. Прогнозирование состояния безопасности движения и рисков на железнодорожных переездах с учетом влияния вероятностных факторов // Транспортные системы и технологии перевозок. 2015. №10. С. 112-116.
-

10. Волков И.В., Коновалов П.Ю. Разработка эффективных решений ремонта дорожной одежды на городских магистралях // Инженерный вестник Дона, 2015, №2, ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072

11. Логачев В.Г., Тюлькин В.А., Кравченко С.В. Влияние возраста водителя на профессионально важные психофизиологические качества // Инженерный вестник Дона, 2015, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2762.

12. Liu, C., Peng H. Road friction coefficient estimation for vehicle path prediction // Vehicle System Dynamics. 1996. Vol. 25. pp. 413-425.

13. Скоробогатченко Д.А. Агуреев И.А. Модель краткосрочного прогнозирования состояния дорожного покрытия для целей оперативного управления зимним содержанием городской улично-дорожной сети // Вестник РГУПС. – 2018. № 1. С. 93-100.

14. Jin L.-Q., Ling M., Yue W. Tire-road friction estimation and traction control strategy for motorized electric vehicle // PLoS ONE. 2017. Vol. 29. P. 12.

15. Васильев А.А., Горин Л.Н., Игошин Д.Н., Ильин М.М. Зависимость коэффициента сцепления от шероховатости дорожного покрытия // Вестник НГИЭИ. 2014. № 10 (41). С. 32-37.

References

1. Tarasov A.V. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya. 2014. № 1. pp. 33-40.

2. Sobolev S.A. Vestnik RGUPS. 2005. № 2. pp. 100-104.

3. Pokazateli sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Road Safety Indicators]. Sayt statistiki GIBDD. URL: stat.gibdd.ru.

4. Karpushchenko N.I., Velichko D.V., Kolmogorova T.V. Transport Rossiyskoy Federatsii. 2011. № 4. pp. 47–50.

5. Botvineva N.YU., Burakova I.S., Strel'tsova T.N., Nesterchuk A.V. Fundamental'nyye issledovaniya. 2013. №11. pp. 407-411.



6. Li L., Yang K., Jia G., Ran X., Song J., Han Z.-Q. Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 56-57. pp. 259-276.
7. Nemchinov, M.V. Stsepnyye kachestva dorozhnykh pokrytiy i bezopasnost' dvizheniya avtomobiley [Coupling qualities of road surfaces and traffic safety]. M.: Transport, 1985. 231 p.
8. Kuznetsov N.P., Rassokhin S.A. Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve. 2009. № 2(14). pp. 34-41.
9. Chigray G.V. Transportnyye sistemy i tekhnologii perevozok. 2015. №10. pp. 112-116.
10. Volkov I.V., Konovalov P.YU. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, part 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072
11. Logachev V.G., Tyul'kin V.A., Kravchenko S.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2762.
12. Liu, S., Peng N. Vehicle System Dynamics. 1996. Vol. 25. pp. 413-425.
13. Skorobogatchenko D.A. Agureyev I.A. Vestnik RGUPS. 2018. № 1. pp. 93-100.
14. Jin L.-Q., Ling M., Yue W. PLoS ONE. 2017. Vol. 29. P. 12.
15. Vasil'yev A.A., Gorin L.N., Igoshin D.N., Il'in M.M. Vestnik NGIEI. 2014. № 10 (41). pp. 32-37.