



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕСА АВТОМОБИЛЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Андрей Белятинский¹, Екатерина Краюшкина², Александра Скрипченко³, Галина Щербакова⁴

*Национальный Авиационный Университет, Институт Аэропортов,
пр. Космонавта Комарова 1, Киев, Украина 03058*

HTTU Киевский политехнический университет, Киев, пр. Победы, 37

*Эл. почта: ¹beljatynskij@mail.ru; ²ekrayushkina@yandex.ua; ³skrypchenkoleksandra@gmail.com;
⁴galena301094@gmail.com*

Аннотация. В современном научном мире большое внимание уделяется изучению и разработке эмпирических методов определения факторов, влияющих на процесс износа покрытия автомобильной дороги. Отдельную часть в теории взаимодействия колеса автомобильного транспорта с покрытием автомобильной дороги представляет изучение пятна контакта, а именно параметров, влияющих на его геометрические характеристики, и на сцепные характеристики в целом.

Ключевые слова: дорожное покрытие, щебень, каменный материал, компьютерное зрение, оператор Кенни.

Введение

Большинство существующих исследований рассматривает деформирование всех элементов шины (расчет на базе моноотропной оболочки, сетчатой оболочки, комбинации оболочек, модели Бидермана, расчет на основе трехмерной модели методом конечных элементов и т. д.). Такие методы являются рациональными и подходят для вопросов проектирования шин, но не подходят для изучения сцепления колеса с поверхностью проезжей части, а именно пятна контакта. В формировании реакции пятна контакта на действие вертикальной нагрузки наибольшую роль играет протектор, деформация его элементов и силы трения в месте контакта с дорогой (Kragelski 1968).

Шина представляет собой цилиндрическое тело, которое прикасается к жесткой поверхности. Для того, чтобы понять процессы, протекающие в зоне контакта обратимся к задаче Герца, где рассматривается два твердых тела, касающиеся друг к друга. В данной задаче были сделаны следующие предположения: тела заполнены однородными изотропными линейно-упругими средами с модулями Юнга и коэффициентами Пуассона, кривизна поверхностей не влияет на напряженно-деформированное состояние, предельные поверхности заменяют эллиптическими

параболами, область контакта односвязная и ее пределом является эллипс (Поров 2013).

Состояние шины возможно в трех видах – с заниженным давлением, нормальным и повышенным.

Контакт шины автомобиля и поверхности проезжей части носит характер контакта фрикционного типа. Он характеризуется наличием между двумя контактирующими телами – третьего. Третье тело является пленкой, например, в случае автомобильной дороги это может быть пленка воды, пыль, остатки бензина или масла. В настоящее время все, что касается поверхности носит более качественный характер, чем количественный (Vasiliev, Sidenko 1990). Это является причиной невозможности создания точных неаналитических методов оценки износостойкости материалов. Поэтому особую важность приобретает количественный анализ структурных изменений, происходящих непосредственно на фрикционном контакте (Nanghinov 1985). Важность исследования данных процессов состоит в том, что в современных условиях имеет место возрастание интенсивности и увеличение грузоподъемности транспорта. Учет этих процессов необходим при ремонте автомобильных дорог, в том числе и при выборе материалов и технологий для ремонта. Моделирование процессов взаимодействия с оценкой площади контакта шины с поверхностью проезжей части позволит сделать

долгосрочный вывод о выборе материалов и технологий для ремонта.

Общие положения теории трения

Сложность процессов, протекающих во фрикционном контакте, заключается в их многообразии. Механическое деформирование материала происходит по двум схемам: введение с пропахиванием и сварка (с образованием адгезионных мостиков) с последующим их отрывом.

Несмотря на сложность и разнообразие механических, физических и химических процессов есть некоторые общие положения для процесса трения и износа:

1. Трехслойный характер процесса трения заключается в том, что на фрикционном контакте одновременно протекают три взаимосвязанных процесса: взаимодействие поверхностей, изменение под действием трения поверхностных слоев тел и пленок, разрушение поверхностного слоя. Это происходит в связи с тем, что коэффициент трения и износостойкость определяется еще и характером окружающей среды и режимом, влияющим на изменение свойств тел. Режим, в основном зависит от контактной температуры, развивающейся при трении и соответственно от температурного градиента. Влияние давления и скорости важно не только само по себе, но и потому, что оно влияет на температуру в контакте. При низком давлении в шинах увеличивается трение в покрышке, она быстрее нагревается, иногда до опасного уровня. При увеличении температуры резины протектора увеличивается ее мягкость. Горячая шина лучше цепляется к асфальту. Однако, если шина нагреется слишком сильно, она начнет терять свои свойства и сцепление с дорогой ухудшится. Далее из резины начнет выделяться смазка и она начнет отделяться от корда. Однако холодная резина также не может с достаточной эффективностью цепляться к асфальту, поэтому сила трения уменьшается.

2. Дискретность контакта тел. Шероховатость и волнистость твердых тел приводят к возникновению контакта в отдельных пятнах, возникающих в местах на вершинах волн и выступов.

3. Практическое постоянство фактического давления при увеличении нагрузки. Рост площади контакта с увеличением нагрузки при контакте тел, в основном, за счет увеличения количества пятен при незначительном увеличении их диаметра. В результате этого фактическое давление на одном пятне растет слабо, в то время как номинальное давление растет. В ряде случаев рассмотрение контакта двух шероховатых поверхностей может быть заменено рассмотрением контакта шероховатой и гладкой поверхностей.

4. Суммирование тангенциальных сопротивлений используют в связи с дискретной природой твердых тел, обусловленной шероховатостью и волнистостью описывает формула 1.

$$T_{\text{сум}} = \sum_1^n T_i, \quad (1)$$

где T_i – тангенциальное сопротивление возникающее между телом и поверхностью в i -том фрикционном контакте; $T_{\text{сум}}$ – суммарное тангенциальное сопротивление возникающее между телом и поверхностью во фрикционном контакте.

Рассеивание энергии при возникновении и разрушении единичной фрикционной связи обусловлено, в основном, двумя видами сопротивления: преодолением молекулярного взаимодействия в точках реального контакта и преодолением механического сопротивления к «пропахиванию». Диссипация энергии проявляется в том, что происходит переход части энергии упорядоченных процессов (кинетическая энергия движущегося тела) в энергию неупорядоченных процессов, в конечном счете – в теплоту.

5. Для осуществления внешнего трения необходима локализация всех процессов взаимодействия и разрушения в тонком поверхностном слое, поэтому сопротивление сдвига должно быть меньше.

6. Формирование третьего тела при трении. Необходимость соблюдения правила градиента сопротивления сдвигу требует для осуществления внешнего трения формирования ослабленного поверхностного слоя основного материала или формирования на поверхности трения пленок, с меньшим сопротивлением сдвига, чем основание.

7. Стационарное состояние пары трения. На фрикционном контакте при неизменных внешних параметрах (нагрузка, скорость, окружающая среда) протекают самопроизвольно процессы приработки, что приводят к минимальному значению трения износа, температуре и формированию воссозданной шероховатости. Это находится в соответствии с принципом минимального производства энтропии, который формулируется неравновесной термодинамикой.

Для полного изучения процессов, протекающих в контакте шины с поверхностью проезжей части необходимо полное исследование факторов, влияющих на величину пятна контакта шины с дорогой. Необходимо учитывать, что на площадь контакта влияет наличие прослойки из грязи, смазки, влаги между шиной и дорогой. Все вышеупомянутые факторы влияют на площадь контакта, и косвенно на сцепные качества покрытия, а таким образом и на безопасность движения транспортных средств.

Закономерности образования пятна контакта шины с дорогой

Среди вышеупомянутых закономерностей следует выделить несколько тех, на которые организациям по ремонту автомобильных дорог следует обратить особое внимание, таким как преодоление волнистости и ямочности покрытия, обеспечение сдвигоустойчивости покрытия. Эти параметры поддержат необходимый уровень сцепления. Что касается состояния шин транспортных средств, то дорожные организации, конечно, не имеют на этот параметр влияния. Поэтому каждый автомобилист должен

добросовестно относиться к состоянию своего транспортного средства в целом, и состоянию шин в том числе. Поддержание нормативного давления в шинах и обеспечение необходимой высоты рисунка протектора поможет сохранить сцепление с дорогой и обеспечить собственную безопасность и других участников дорожного движения.

Что касается закономерностей процесса износа покрытия, стирания битумной пленки, то эти процессы требуют более глубокого анализа и изучения.

Поверхность дорожного покрытия всегда имеет неровности различной случайного размера и формы. Неровности принято делить на три вида: макронеровности, микронеровности, шероховатость. Шероховатости присущи неровности с длиной волны до 0,1 м, которые не вызывают низкочастотных колебаний автомобиля на подвеске и не влияют на работу двигателя. Именно шероховатость обеспечивает контакт протектора шины с дорожной поверхностью. В свою очередь, шероховатость по характеру происхождения разделяют на две группы (Shapiro, Stokman 2006): макрошероховатость (неровности длиной волны более 2–3 мм и высотой более 0,2–0,3 мм – формируются выступающими частями каменного материала), микрошероховатость (неровности поверхности длиной волны менее 2–3 мм и высотой менее 0,2–0,3 мм, которые являются собственной шероховатостью частиц каменного материала).

Шероховатость влияет на величину коэффициента сцепления. Его можно выразить через площадь контакта шины с покрытием:

$$\varphi = \frac{F_{\max}}{G_k} = \frac{\int_0^s f ds}{kpS}, \quad (2)$$

где G_k – вертикальная нагрузка на ось автомобиля; k – коэффициент пропорциональности, который зависит от конструкции шины; p – давление воздуха в шине; S – площадь контакта шины с покрытием дороги; F_{\max} – суммарная реакция в площади зоны контакта шины с покрытием.

Различают контурную и фактическую площади контакта шин с покрытием дороги. Контурная площадь не зависит от шероховатости, а определяется только конструкцией шины, давлением воздуха в ней и нагрузкой на колесо автомобиля. Фактическая площадь контакта зависит от шероховатости покрытия. Через выступы макрошероховатости резина протектора шины в пределах контурной площади контакта не везде прикасается к материалу покрытия. По этой причине фактическая площадь контакта шины меньше контурной: чем больше неровности, тем меньше площадь контакта. Зависимость фактической площади контакта от контурной можно описать известной зависимостью (Katargin, Knyazkov 2000).

$$\frac{S_\phi}{S_k} = 32,88R_{cep}^{0,8}, \quad (3)$$

где S_ϕ – фактическая площадь контакта; S_k – контурная площадь контакта; R_{cep} – средний радиус шероховатости.

Размер фактической площади контакта определяется геометрическими параметрами выступов макрошероховатости – высотой, шагом и углом при вершине. Первые два параметра определяют количество пятен контакта, то есть количество мест непосредственного контакта материала покрытия с протектором шины. Это влияет на глубину проникновения выступов в резину протектора, то есть на площадь контакта.

При изучении фактической площади контакта, из-за наличия большого количества форм макрошероховатости каменного материала в первом приближении принята модель поверхности дорожного покрытия, состоящего из сферических элементов радиуса R на жесткой основе. В большинстве ситуаций контакт шины упругий, поэтому радиус круговой площадки пятна можно определить по модели Герцена:

$$r_i = \left(\frac{3}{4} G_k R \theta \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где G_k – нормальное напряжение на неровность макрошероховатости; θ – упругая постоянная резины протектора, $\theta = \frac{1-\mu^2}{E}$; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости резины.

Площадь одного пятна контакта, которая образована неровностью может быть определена по формуле:

$$S_0 = \pi \left(\frac{3}{4} G_k R \theta \right)^{2/3} = \pi \left(\frac{3}{4} G_k (\varepsilon - x) R \theta \right)^{2/3}, \quad (5)$$

где ε – относительное сближение покрытие и колеса шины, $\varepsilon = \frac{h_{em}}{R}$; h_{em} – глубина вдавливания выступа макрошероховатости в протектор шины.

При многократном контакте общая фактическая площадь контакта может быть определена:

$$dS_\phi = \pi n \left(\frac{3}{4} G_k (\varepsilon - x) R \theta \right)^{2/3} f'(x) dx, \quad (6)$$

где n – число неровностей макрошероховатости в границах контурной площадки контакта; x – уровень, на котором лежит вершина выступа;

Из выражений (1) и (2) видно, что площадь пятна контакта, а следовательно и полная фактическая площадь контакта шины зависит от глубины вдавливания неровностей макрошероховатости в резину протектора. Согласно относительное сближение резины протектора и неровностей макрошероховатости покрытия можно оценить по выражению:

$$\varepsilon = \frac{h_{BT}}{R} = \left(\frac{2\sqrt{\pi p_C \theta}}{K_V} \left(\frac{r}{R b_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{2}{2V+1}}, \quad (7)$$

где p_C – контурное давление; V – параметры обработки профиллограмм; R – радиус при вершине неровностей макрошероховатости.

Оператор Кенни

Для практической оценки пятна контакта шины непосредственно в местах соприкосновения ее протектора с каменным материалом необходимо прибегнуть к обработке снимка пятна контакта. Для решения подобных задач существует отдельная технология создания машин и систем, которая называется компьютерным зрением. Ее основная задача в обработке изображений – это определение содержит тот или иной файл, изображение отдельные объекты, группы объектов. В данной области существует различные методы. Они основаны на выделении границ объекта. В этих точках резко меняется контрастность, яркость. Все методы делятся на два вида: основанные на поиске нулей и максимумов. Самый оптимальный из них – алгоритм Кенни. Он реагирует на грани, но при этом игнорирует ложные, точно определяет линию границы и реагирует на каждую границу один раз, что позволяет предотвратить восприятие широких полос изменения яркости как совокупности границ.

Основными этапами алгоритма являются: сглаживание, поиск градиентов, подавление не максимумов, двойная пороговая фильтрация, трассировка области неоднозначности.

Сглаживание – размытие для удаления шума. Оператор Кенни использует фильтр, который может быть хорошо приближен к первой производной гауссиана, $\sigma = 1,4$:

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \cdot A. \quad (8)$$

Поиск градиентов – границы отмечаются там, где градиент изображения приобретает максимальное значение. Они могут иметь различное направление, поэтому алгоритм Кенни использует четыре фильтра для обнаружения горизонтальных, вертикальных и диагональных ребер в размытом изображении, рис. 1.

Подавление не максимумов – только локальные максимумы отмечаются, как границы. Двойная пороговая фильтрация – потенциальные границы определяются порогами, рис. 2.

Литература

Katargin, V. N.; Knyazkov, A. N. 2000. Problemy avtomatizirovannogo proektirovaniya normativiv sistemy tehničeskogo obslyživaniya I remonta // Vestnik KGTU. Vup. 20. Transport. Krasnoyarsk: KGTU, s. 16–21.

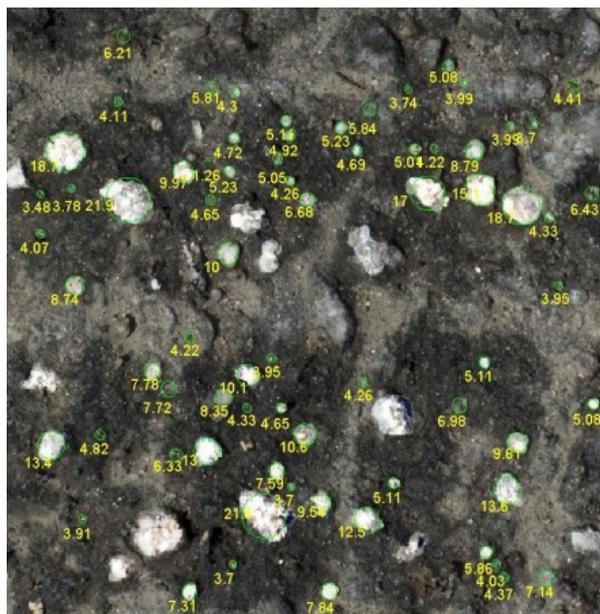


Рис. 1. Выделенные программой участки соприкосновения щебня с резиной протектора размером 10 на 10 см

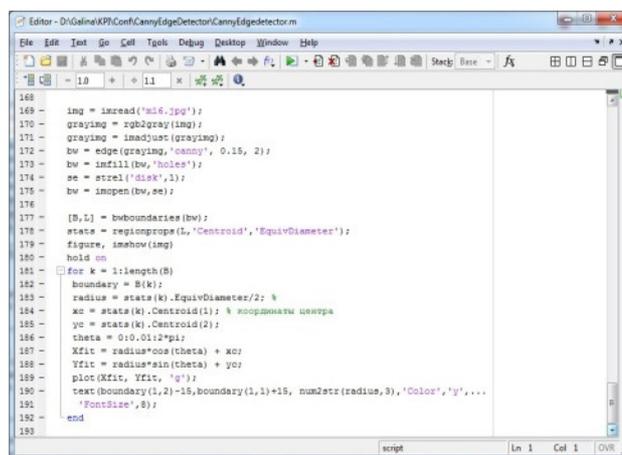


Рис. 2. Часть кода для поиска градиентов

Трассировка области неоднозначности – итоговые пределы определяются путем подавления всех сторон, несвязанных с определенными (сильными) границами.

Выводы

Для точной оценки состояния дорожного покрытия необходимо прибегать к более точным математическим методам оценки реального состояния покрытия автомобильной дороги. При этом учитывая, современные шины и возможные состояния покрытия, например, наличие грязи, дорожной пыли и прочего. Метод компьютерного зрения позволит максимально точно оценить реальную площадь контакта шины с поверхностью дорожного покрытия.

Kragelski, I. V. 1968. *Trenie i iznos* 2-e izd., pererab. i dop. - M.: Mashinostroenie. 480 s.

Nanghinov, M. V. 1985. *Scypnie kachestva doroznyh pokrytyi i bezopasnost dvujenia avtomobyla* M.: Transport. 231 s.

Popov, V. L. 2013. Method of reduction of dimensionality in contact and friction mechanics: A linkage between micro and macro scales, *Friction* 1(1): 41–62.

Shapiro, L.; Stokman, J. 2006. *Kompyternoe zrenie = Computer Vision*. – M.: Binom. Laboratoriya znanyj. 752 s.

Vasiliev, A. P.; Sidenko, V. M. 1990. *Ekspluayatsya avtomobilnyh dorog I organizatsya dorojnogo dvujenya: Ychebnyk dlya vyzov*; Pod. red. A. P. Vasylieva. – M.: Transport. 304 s.