

УДК 625.72

**Саркисян Г.С.**

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

**Ряпухин В.Н.**

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## ВЛИЯНИЕ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ПАРАМЕТРЫ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

*В данной статье рассматривается влияние ровности покрытий нежестких дорожных одежд на параметры транспортного потока. Рассмотрена схема взаимодействия движущегося пневматического колеса автомобиля и неровности на покрытии автомобильной дороги. Проведен анализ существующих неровностей на покрытиях эксплуатируемых дорожных одежд и определены типовые формы неровностей. Предложен подход к определению величины нагрузки на дорожную одежду при преодолении неровностей различной формы и подход к определению параметров транспортного потока в зависимости от ровности покрытия.*

**Ключевые слова:** ровность, надёжность, исходные данные, продольный профиль покрытия, транспортный поток, пропускная способность, скорость транспортного потока.

**Постановка проблемы.** Ровность покрытия обуславливает важнейшие потребительские свойства автомобильной дороги: скорость, удобство и безопасность движения. Скорость, в свою очередь, влияет на пропускную способность автомобильной дороги. В процессе эксплуатации на покрытии автомобильной дороги появляются неровности, которые способствуют появлению дополнительных нагрузок на дорожную одежду. В ряде случаев при соблюдении водителем расчетной скорости снижение ровности приводит к появлению ударных взаимодействий колеса с покрытием, что значительно сокращает срок службы дорожной конструкции, а при снижении скорости водителем перед неровностями падает пропускная способность автомобильной дороги. Поэтому исследование взаимодействия движущегося пневматического колеса автомобиля и неровности на покрытии автомобильной дороги является актуальной задачей в настоящее время.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе А.Г. Малофеева [1] было отмечено, что водители в зависимости от величины и шага неровностей выбирают такую скорость движения, при которой динамическое воздействие характеризуется коэффициентом динамичности 1,30–1,35. Но если водитель не предупрежден о наличии неровностей и придерживается расчетной скорости, то на покрытие воздействуют дополнительные нагрузки, характеризующиеся коэффициентом динамичности больше принятого в нормативных документах значения 1,30.

Изучению процесса взаимодействия колеса и неровности дорожного покрытия уделяли внимание многие отечественные и зарубежные исследователи, которые рассматривали процесс с двух точек зрения:

– с точки зрения эффективности эксплуатации автомобилей (Н.Я. Говоруценко, С.Б. Шухман, С.В. Котович, М.А. Малкин) [2–4].

– с точки зрения увеличения нагрузки на дорожную одежду при прохождении неровности транспортным средством (А.К. Бируля, С.В. Смирнов, Д.С. Беляев, А.В. Кочетков, И.М. Рабинович, И.П. Гамеляк) [5–10].

Работы первой группы исследователей не рассматривают увеличение нагрузки непосредственно на покрытие, так как поставлены другие цели и задачи. Преимущественно в них определяется толкающая сила, необходимая для преодоления препятствия в виде неровности, или энергия, потерянная вследствие преодоления неровности.

Проблему определения дополнительной нагрузки на дорожную одежду при преодолении неровности решал А.К. Бируля. В работе «Эксплуатация автомобильных дорог» [5] неровности классифицированы на впадины в форме вогнутой кривой и возвышения в форме ступени (выбоина). В первом случае колесо падает во впадину с некоторой высоты, которая определяется как общая высота неровности. Но гарантии, что колесо упадет точно в центр впадины с полной ее высоты, нет. Колесо может приземлиться в любую точку впадины в зависимости от скорости движения

транспортного средства и ее параметров. Поэтому точку контакта колеса и впадины необходимо определять дополнительно. Неровность же в форме ступени, которая рассматривается в преимущественном большинстве работ исследователей, встречается на покрытии довольно редко. Более распространенной будет неровность в виде наклонной площадки, распределение усилий на которой будет иным.

**Изложение основного материала исследования.** Нами предлагается иной подход к определению величины нагрузки на дорожную одежду при преодолении неровности. Предлагается разделить процесс прохождения неровности на два этапа:

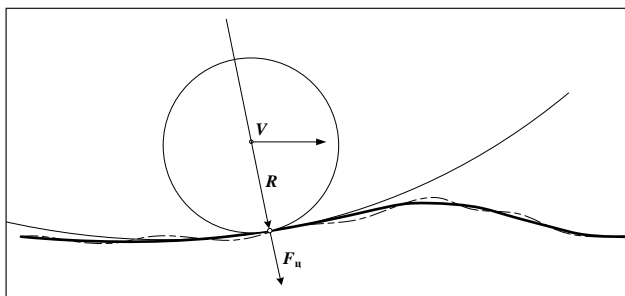
- контакт с неровностью и подъем на возвышение;
- съезд с неровности и «падение» на покрытие.

Момент подъема предлагается рассматривать как движение по кривой некоторого радиуса. Профиль покрытия при этом описывается с помощью кривой, уравнение которой необходимо найти (рисунок 1). При этом пренебрегаются неровности высотой до 5 мм, так как неровности до 5 мм считаются шероховатостью. Неровности до 5 мм полностью поглощаются демпфирующей способностью шины, существенного влияния на колебания автомобиля не вызывают.

Имея уравнение кривой, описывающей профиль покрытия, можно определить радиус ее кривизны в любой ее точке. Радиус кривизны профиля покрытия рассчитывается по формуле [11]:

$$R = \frac{1}{k(x_0)}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кривизны профиля покрытия, м;  
 $k(x_0)$  – кривизна кривой профиля, м<sup>-1</sup>.



**Рис. 1. Схема подъема колеса на неровность в виде возвышения**

— — — фактический профиль покрытия; — — — кривая, описывающая профиль покрытия без учета шероховатости;  $V$  – скорость движения колеса;  $R$  – радиус кривизны профиля покрытия,  $F_u$  – центробежная сила

Кривизна кривой профиля при этом находится из выражения [11]:

$$k(x_0) = -\frac{y''(x_0)}{(1 + (y'(x_0))^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где  $y''(x_0)$  – вторая производная уравнения кривой;

$y'(x_0)$  – первая производная уравнения кривой.

Вследствие движения по кривой траектории появляется центробежная сила, которая и будет являться дополнительной нагрузкой на дорожную одежду. Центробежная сила определяется по формуле:

$$F_u = \frac{m \cdot V^2}{1000 \cdot R}, \quad (3)$$

где  $F_u$  – центробежная сила, действующая на покрытие при движении транспортного средства по кривой, кН;

$m$  – масса транспортного средства, приходящаяся на колесо, кг;

$V$  – скорость движения транспортного средства, м/с.

Если принять, что водитель подбирает скорость движения такую, которая будет соответствовать коэффициенту динамичности 1,30, то скорость в этом случае будет зависеть от радиуса кривизны неровности и определяться по зависимости (4), выходящей из формулы (3):

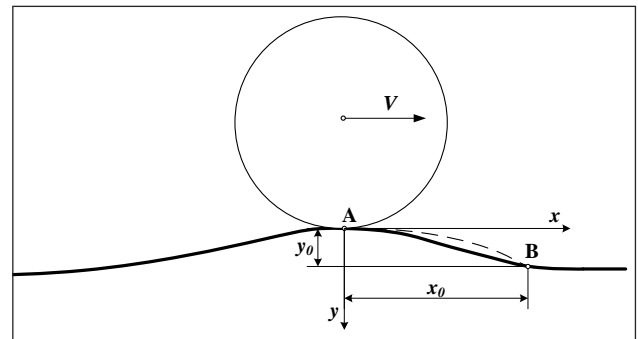
$$V = \sqrt{\frac{300 \cdot F_p \cdot R}{m}}, \quad (4)$$

где  $F_p$  – расчётная нагрузка на колесо, кН.

На втором участке преодоления неровности (участок «падения») предлагается рассчитывать точку «падения» в зависимости от скорости транспортного средства и уклона поверхности, на которую автомобиль приземляется (рисунок 2). Уравнение траектории, по которой будет двигаться колесо, представим как траекторию тела, брошенного горизонтально с определенной скоростью [12]:

$$y(x) = -\frac{g \cdot x^2}{2 \cdot V^2}, \quad (5)$$

где  $x$  – горизонтальная координата, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.



**Рис. 2. Схема «падения» колеса после преодоления неровности**

— — — траектория «падения» колеса;  $A$  – вершина неровности;  $B$  – точка «падения»;  $V$  – скорость движения колеса;  $y_0$  – высота «падения»;  $x_0$  – дальность «падения»

Таблица 1

Расчетная нагрузка на колесо, F, кН	Масса, приходящаяся на колесо, т, кг	Центробежная сила, Fц, кН	Радиус неровности, R, м	Скорость автомобиля, V, км/ч
II категория дороги, нагрузка A2, общий модуль упругости E = 235 МПа				
115	5750	17,3	30,00	90,00
115	5750	17,3	25,00	75,00
115	5750	17,3	20,00	60,00
115	5750	17,3	15,00	45,00
115	5750	17,3	10,00	30,00
115	5750	17,3	5,00	15,00
III категория дороги, нагрузка A3, общий модуль упругости E = 225 МПа				
100	5000	15,0	30,00	90,00
100	5000	15,0	25,00	75,00
100	5000	15,0	20,00	60,00
100	5000	15,0	15,00	45,00
100	5000	15,0	10,00	30,00
100	5000	15,0	5,00	15,00

Таблица 2

Высота падения, h, мм	Шаг неровностей, S, м	Удельное давление, p, МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Общий модуль упругости, E, МПа	Диаметр отпечатка колеса, D, см	Упругий прогиб покрытия, U, м	Скорость автомобиля, V, км/ч
II категория дороги, нагрузка A2, общий модуль упругости E = 235 МПа							
6,1	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	90,00
6,5	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	85,07
7,0	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	78,99
7,5	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	73,72
8,0	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	69,12
8,5	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	65,05
9,0	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	61,44
9,5	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	58,20
10,0	10	0,8	0,30	235,00	34,5	0,00107	55,29
III категория дороги, нагрузка A3, общий модуль упругости E = 225 МПа							
5,6	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	90,00
6,0	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	84,58
6,5	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	78,07
7,0	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	72,50
7,5	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	67,66
8,0	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	63,44
8,5	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	59,70
9,0	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	56,39
9,5	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	53,42
10,0	10	0,6	0,30	225,00	37,1	0,00090	50,75

Зная уравнение кривой профиля, можем решить систему уравнений совместно с уравнением траектории движения колеса (5). Решением системы уравнений будет горизонтальная координата точки приземления колеса, где и будет наибольший динамический удар. Имея горизонтальную координату, подставим ее в любое из уравнений и найдем величину  $y$ , которая соответ-

ствует высоте «падения». Эта высота «падения» и будет определяющим параметром при расчете коэффициента динамичности.

Коэффициент динамичности можно определить по формуле С.В. Смирнова [7]:

$$K_d = 1 + \sqrt{\frac{1}{g \cdot U} \left( \frac{2 \cdot h \cdot V}{S} \right)^2}, \quad (6)$$

где  $K_d$  – коэффициент динамичности;

$U$  – прогиб шины, м;  
 $h$  – высота «падения», м;  
 $V$  – скорость движения транспортного средства, м/с;  
 $S$  – шаг неровностей, м.

Если принять, что водитель подбирает скорость движения такую, которая будет соответствовать коэффициенту динамичности 1,30, то скорость в этом случае будет определяться по зависимости (7), выходящей из формулы (6):

$$V = \frac{0,15 \cdot S}{h} \sqrt{g \cdot U}. \quad (7)$$

Для апробации зависимостей были рассмотрены две конструкции дорожной одежды:

- с общим модулем упругости 235 МПа на автомобильной дороге II категории с группой нагружения А2;
- с общим модулем упругости 225 МПа на автомобильной дороге III категории с группой нагружения А3.

Параметры нагружения принимались в соответствии с ДБН В.2.3-4:2015 [13]. Используя формулы (4) и (7), были рассчитаны значения скоростей при различных параметрах неровности. Расчетную скорость в соответствии с ДБН В.2.3-4:2015 приняли

равной 90 км/ч. Шаг неровностей приняли равным 10 м. Результаты расчетов приведены в таблицах 1–2.

**Выводы.** В результате проведенного исследования были выявлены недостатки существующих теорий взаимодействия колеса с покрытием при преодолении неровностей. Предложен другой подход к определению дополнительной нагрузки на дорожную одежду с учетом формы неровности. Предложенный подход позволяет более полно охарактеризовать взаимодействие колеса и покрытия. Принимая во внимание, что водитель зачастую выбирает скорость движения, которая соответствует коэффициенту динамичности 1,3, были рассчитаны соответствующие параметры неровностей. Определили, что расчетная скорость 90 км/ч будет обеспечиваться при радиусе неровности 30 м. При уменьшении радиуса на каждые 5 м скорость автомобиля, соответствующая коэффициенту динамичности 1,3, падает на 15 км/ч.

При анализе зависимости скорости от высоты «падения» получили, что расчетная скорость обеспечивается при высоте «падения» 6,1 мм для первого варианта дорожной конструкции и при 5,6 мм – для второго. А при высоте «падения» 10 мм скорость будет уже менее 60 км/ч.

#### Список литературы:

1. Малофеев А.Г. Исследование динамического воздействия автомобиля на нежесткие дорожные одежды в процессе эксплуатации дорог: автореф. дис... канд. техн. наук: 12.08.78. Омск, 1978. 22 с.
2. Говорущенко Н.Я. Основы теории эксплуатации автомобилей: учеб. пособие для вузов. К.: Вища школа, 1971. 232 с.
3. Шухман С.Б., Соловьев В.И., Малкин М.А. Расчетное исследование профильной проходимости полноприводного автомобиля. Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы междунар. науч.-техн. конф. ААИ, посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». Москва, 2009. С. 343–350.
4. Котович С.В. Движители транспортных средств: учебное пособие. М.: МАДИ (ГТУ), 2008. 161 с.
5. Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 324 с.
6. Бируля А.К., Говорущенко Н.Я., Ермакович Д.В. Эксплуатационные качества автомобильных дорог. М.: Автотрансиздат, 1961. 185 с.
7. Смирнов А.В. Александров А.С. Механика дорожных конструкций: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2009. 212 с.
8. Кочетков А.В., Беляев Д.С., Шашков И.Г. Прямой метод оценки взаимодействия колеса транспортного средства и неровностей дорожного покрытия. Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 4 (17). С. 38–55.
9. Рабинович И.М. Действие пехоты, кавалерии и артиллерии на мосту. Действие нагрузки на мосты под обыкновенную дорогу. Институт инженерных исследований. Выпуск № 1/91. М.: СССР-ТРАНСПЕЧАТЬ-НКПС, 1929. № 23. С. 8–34.
10. Гамеляк І.П. Оцінка руйнування доріг від руху транспортних засобів з врахуванням нерівностей покриття. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К.: НТУ, 2004. № 70. С. 70–82.
11. Аминов Ю.А. Дифференциальная геометрия и топология кривых. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 160 с.
12. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.
13. ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. К.: Мінрегіонбуд України, 2015. 101 с.

## ВПЛИВ РІВНОСТІ ПОКРИТТІВ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ НА ПАРАМЕТРИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

*У цій статті розглядається вплив рівності покриттів нежорстких дорожніх одягів на параметри транспортного потоку. Розглянуто схему взаємодії рухомого пневматичного колеса автомобіля і нерівності на покритті автомобільної дороги. Проведено аналіз наявних нерівностей на покриттях експлуатованих дорожніх одягів та визначено типові форми нерівностей. Запропоновано підхід до визначення величини навантаження на дорожній одяг у подоланні нерівностей різної форми і підхід до визначення параметрів транспортного потоку залежно від рівності покриття.*

**Ключові слова:** рівність, надійність, вихідні дані, поздовжній профіль покриття, транспортний потік, пропускна здатність, швидкість транспортного потоку.

## INFLUENCE OF NON-RIGID ROAD COATING COVERING SMOOTHNESS ON THE PARAMETERS OF THE TRAFFIC FLOW

*This article considers the smoothness influence of non-rigid road coating coverings on the parameters of the traffic flow. The scheme of interaction of a moving pneumatic car wheel and unevenness on a road covering is considered. The analysis of existing unevennesses on the coverings of the used road coatings has been carried out and typical shapes of unevenness have been determined. An approach is proposed for determining the value of the load on pavement when overcoming unevennesses in various shapes and the approach to determining the parameters of the transport flow, depending on the smoothness of the road covering.*

**Key words:** smoothness, reliability, input data, longitudinal covering profile, traffic flow, flow capacity, traffic flow speed.