

Учет скорости движения транспортных средств в расчетах нежестких дорожных одежд

А.М. Кириллов

*Автомобильно-дорожный колледж, 354008, Краснодарский край,
г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 26, а/1*

АННОТАЦИЯ: Предмет исследования: взаимодействие движущегося транспортного средства с асфальтобетонным дорожным покрытием.

Цели: анализ влияния динамических нагрузок со стороны движущегося транспортного средства на дорожную одежду с асфальтобетонным покрытием.

Материалы и методы: модели взаимодействия построены на импульсном подходе (импульс динамических сил) и коэффициенте динамичности.

Результаты: математическая модель, базирующаяся на импульсном подходе и позволяющая определять нагрузку на дорожную одежду в зависимости от скорости транспортного средства.

Выводы: 1) по мере увеличения скорости силовое воздействие движущегося транспортного средства на дорожное покрытие при малых скоростях быстро уменьшается, достигая минимума при некоторой скорости, а затем медленно возрастает; 2) наличие оптимального скоростного режима эксплуатации автодороги, при котором силовое воздействие на дорожную одежду минимально и соблюдение которого может увеличить срок эксплуатации дороги.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, прочность, импульс силы, динамическое воздействие, коэффициент динамичности

Благодарности: Автор выражает благодарность доктору технических наук Завьялову Михаилу Александровичу за участие в обсуждении работы и помощь в литературном обзоре по тематике работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кириллов А.М. Учет скорости движения транспортных средств в расчетах нежестких дорожных одежд // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 8 (119). С. 959–972. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.959-972

Design of non-rigid pavements in view of moving vehicles influence

Andrey M. Kirillov

Automotive Road College, 26a/1 Yana Fabritsiusa st., Sochi, Krasnodar region, 354008, Russian Federation

ABSTRACT: Subject: interaction of the moving vehicle with asphalt concrete road pavement.

Research objectives: analysis of influence of dynamic loads from the moving vehicle on the road pavement with asphalt concrete.

Materials and methods: interaction models are based on the impulse approach (impulse of dynamic loads) and dynamic factor.

Results: creation of the mathematical model which is based on the impulse approach and allows us to determine the load on the pavement as a function of vehicle speed.

Conclusions: 1) when the speed increases, the force exerted by the moving vehicle on pavement quickly decreases, reaching a minimum at some speed, and then slowly increases; 2) there exists the optimum vehicle speed for the highway exploitation, at which the impact of the force on the road is minimum; it is possible to increase the pavement longevity if this speed for road exploitation is complied with.

KEY WORDS: asphalt concrete, durability, impulse of force, dynamic influence, dynamic factor

Acknowledgements: The author is grateful to Zavyalov Mikhail Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, for participation in discussion of the work and assistance in review of the literature relevant to the subject of the work.

FOR CITATION: Kirillov A.M. Uchet skorosti dvizheniya transportnykh sredstv v raschetakh nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Design of non-rigid pavements in view of moving vehicles influence]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 8 (119), pp. 959–972. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.959-972

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование методов расчета и проектирования дорожных одежд как с жестким, так и нежестким покрытиями является всегда актуальной задачей дорожной отрасли и возможно только при учете динамики напряженно-деформированного состояния конструкции. Обеспечение прочности, надежности, долговечности, высоких транспортно-эксплуатационных качеств автомобильной дороги зависит от успешного решения этой задачи.

На протяжении многих лет одним из важных направлений исследований в области строительства автомобильных дорог является изучение динамического взаимодействия колеса транспортного средства на дорожное покрытие с целью возможного предсказания степени повреждения покрытия. За рубежом при изучении этого взаимодействия большое распространение получило использование модели конечных элементов, которая позволяет определить напряжения растяжения — сжатия [1], геометрическую форму области контакта колеса [2], распределение давлений от контакта [3, 4], а также предсказать начало усталостного растрескивания, развитие колеиности [5, 6].

Также можно выделить значительное количество публикаций, в которых построена 3D-модель взаимодействия колеса с покрытием [7] с целью предсказания распределения напряжений контакта при анализе поведения покрытия во время критических условий нагрузки [8]. Следует отметить, что характер этих публикаций носит эмпирический характер. При проведении экспериментальных исследований обычно варьируются три параметра: тип шины, давление в шине и вес транспортного средства [9–12]. Основным недостатком применения метода конечных элементов и современных комплексов программ является большой объем используемой информации, необходимой для расчета, и очень высокая чувствительность результатов к незначительным изменениям в расчетной модели.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время регулирование энергии взаимодействия асфальтобетонного покрытия и транспортного средства решается следующими методами [13]:

1. Обеспечение оптимального скоростного режима транспортного средства, который в основном определяется коэффициентом сцепления колеса с дорожным покрытием. Коэффициент сцепления комплексно зависит от целого ряда факторов (скорость движения; параметры шероховатости покрытия; дождевая вода, стекающая с покрытия; температура покрытия и др.) [14–17]. Температура покрытия, зависящая от его типа и температуры окружающей среды, значительно влияет на коэф-

фициент сцепления колеса с покрытием [18, 19]. Однако стоит отметить, что согласно ГОСТ 30413-96, регламентирующего температурные поправки к коэффициенту сцепления, при температурах воздуха 30 °С и выше, влияния температуры на коэффициент сцепления нет или оно незначительно. Данный способ позволяет обеспечить безопасное, комфортное и эргономичное движение [20–22]. Недостатком данного метода являются затратные комплексные исследования дорожного полотна, анализ всех параметров материала, что на практике малоцелесообразно.

2. Оптимальный подбор материалов покрытия с заданными теплофизическими свойствами, что дает возможность уменьшить теплопоглощение и не допустить перегрева асфальта [23–26], что сохраняет вязкопластичные свойства материала. Это позволяет предотвращать образование колеиности и трещин [27–30] сверх нормативных значений [31, 32]. Устранение колеиности и трещин требует значительных затрат и, следовательно, появление таких дефектов дорожного покрытия экономически неоправданно. Поэтому актуальны работы, направленные на обеспечение рационального температурного режима асфальтобетона. Например, в работе [33] дано обоснование предельных значений неровностей и эмпирические формулы прогнозирования глубины колеи в зависимости от температуры покрытия. Отметим, что различают температурные и силовые трещины. Для борьбы с температурными трещинами в асфальтобетоне необходимо учитывать и компенсировать влияние их основных причин: отрицательные температуры и высокие суточные колебания температуры. Для повышения же «силовой» трещиностойкости необходимо избегать больших деформаций, вероятных при чрезмерном нагреве асфальтобетона.

3. Регулирование радиационных свойств дорожного покрытия (например, смещение альбедо и излучаемости [34–39]) для управления температурным градиентом [40, 41] в зависимости от гидрогеологических и климатических условий эксплуатации [42] и с учетом «городского острова тепла» (urban heat island effect) [43–49]. В рамках данного направления возможно также развитие и приложение работ по спектрально управляемым материалам [50–52]. Это может быть одним из шагов к развитию сети умных дорог с возможностью аккумуляции энергии [53, 54].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Динамическая нагрузка (вертикальная и горизонтальная) от колес транспорта относится к техногенным факторам, влияющим на долговечность асфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации [55, 56]. Под колесами движущегося транспорта покрытие испытывает скоротечные вертикальные

напряжения и деформации сжатия — растяжения от вертикальных сил [57], в частности силы тяжести; и горизонтальные напряжения и деформации сдвига от сил тяги и торможения, а также центробежных сил при повороте транспортного средства [58]. Одновременная вертикальная и горизонтальная деформации «сопровождают» транспортное средство, поэтому в работе [59] этот процесс рассматривается как бегущая изгибающая волна.

Стоит отметить, что рассматриваемый случай является частным случаем режима работы покрытия. Если покрытие небольшой толщины, то оно работает как пластина, или тонкая плита, и в этом случае вертикальных компонент тензора напряжений не возникает. Фотографии поперечных разрезов дорожной одежды, сделанные в траншеях, это убедительно подтверждают [60]. Если покрытие сравнительно большой толщины, то тогда имеет место изгиб толстых плит. В этом случае тензоры напряжений содержат все компоненты. Если покрытие достаточной толщины нагрето до высокой температуры, то свойства работать на изгиб утрачиваются, и асфальтобетон испытывает деформации сдвига и работает в условиях трехосного сжатия. Вязкость в этом случае настолько мала, что асфальтобетон становится подобен зернистому материалу. В асфальтобетоне в этом случае происходит выпор по краям колеи, что можно увидеть, например, на фотографиях, представленных в работах [33, 61].

Представленная в работе [59] методика расчета дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием базируется на решении дифференциального уравнения изгиба балки на сплошном однородном упругом основании с учетом равномерного движения нагрузки вдоль балки (волновое уравнение). В качестве критерия для оценки влияния движения нагрузки был выбран так называемый коэффициент динамичности μ , равный отношению прогиба балки f при движении нагрузки со скоростью v (динамический прогиб) к статическому прогибу (при $v = 0$):

$$\mu = \frac{f}{f_{\text{ст}}}. \quad (1)$$

Решение упомянутого выше дифференциального уравнения позволило получить автору [59] выражение для коэффициента динамичности в виде:

$$\mu(v) = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

где c — коэффициент, имеющий размерность скорости и зависящий от параметров дорожной конструкции (модулей упругости и толщин слоев, плотности материала и др.), который можно назвать «критической скоростью». Можно видеть, что при стремлении скорости v к критической c , коэффициент динамичности будет стремиться к бесконечности $\lim_{v \rightarrow c} \mu = \infty$. График зависимости (2), приведенный

в работе [59], показывает, что коэффициент динамичности монотонно возрастает от значения $\mu = 1$ (при $v = 0$) по квадратичному закону. Например, при $v = 10$ м/с коэффициент $\mu = 1.1$, а при $v = 20$ м/с коэффициент $\mu = 1.4$. То есть приращение коэффициента динамичности прямо пропорционально квадрату скорости движения нагрузки: $\Delta\mu(v) \sim v^2$.

Если оценить значение «критической скорости» c , то ее значение значительно превышает эксплуатационные скорости v автомобильного транспорта. То есть $v \ll c$ и, если зависимость (2) разложить в ряд Тейлора, то в нем можно учесть первых два члена:

$$\mu(v) = 1 + \frac{v^2}{2c^2}. \quad (3)$$

Таким образом, зависимость $\mu(v)$ действительно имеет квадратичный характер.

В работе [13] были получены выражения для оценки динамических вертикальных F_d^B и продольных горизонтальных сил F_d^T , действующих со стороны транспортного средства на дорожное покрытие. В этом случае, если считать прогиб пропорциональным вертикальным силам, то коэффициент динамичности можно записать:

$$\mu = \frac{G_m + F_d^B}{G_m}, \quad (4)$$

где $G_m + F_d^B$ — вертикальная сила (определяет динамический прогиб); G_m — сила тяжести (определяет статический прогиб). С учетом выражения для F_d^B , полученного в [13], соотношение (4) можно записать в виде:

$$\mu = 1 + \frac{v^2}{K^2}, \quad (5)$$

где K — коэффициент, имеющий размерность скорости и определяемый параметрами системы, дорожное покрытие — транспортное средство (ускорение свободного падения, коэффициент Пуассона материала покрытия, коэффициент сцепления, радиус колеса транспортного средства и др.).

Сходство формул (3) и (5) очевидно, что говорит в пользу моделей, используемых в работах [59] и [13]. Однако, на взгляд автора, вывод, который можно сделать в результате анализа формул (3) и (5), что с увеличением скорости растет нагрузка на дорожное покрытие, не столь безусловен и категоричен. При выводе формул (2) – (5) не учтено время воздействия транспортного средства на дорожное покрытие, а оно, например, естественно уменьшается с увеличением скорости. Известно, что результат действия силы на тело зависит не только от модуля силы, но и от длительности ее действия (т.е. от произведения $F \cdot t$, так называемого импульса силы). Так как с увеличением скорости транспортного средства время его воздействия на дорожное покрытие уменьшается (обратно пропорционально скорости), то это должно приводить к уменьшению

импульса силы (если $F = \text{const}$) и, следовательно, к уменьшению величины прогиба покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Если принять, что вертикальная сила F равна силе тяжести $G_m = \text{const}$, то зависимость импульса силы (отклика дорожного покрытия) от скорости транспортного средства будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Таким образом, данный результат находится в противоречии с интерпретацией, даваемой в исследовании [59] и следующей из соотношений (3) и (5).

В публикации [13] показано, что динамические силы F_d^b и F_d^r не являются постоянными и растут с увеличением скорости. С учетом этого вертикальный отклик дорожного покрытия, будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что вначале, с ростом скорости транспортного средства, силовое воздействие на полотно уменьшается, затем, достигая минимума (при скоростях 150–200 км/ч), начинает возрастать. Подобное поведение, на взгляд автора, более адекватно реальному эксплуатационному режиму работы системы дорожная одежда — транспортное средство.

Для сравнения на рис. 3 приведены графики импульса силы без учета динамической силы и с ее учетом. Можно видеть, что при малых скоростях движения влияние динамической составляющей F_d^b общей вертикальной нагрузки мало влияет на от-

клик дорожного покрытия на силовое воздействие со стороны транспортного средства. Влияние становится существенным при скоростях более 100 км/ч.

Если вертикальная составляющая силы приводит к деформациям сжатия — растяжения в вертикальном направлении, то горизонтальная составляющая силы — к деформациям сдвига. На рис. 4 для сравнения приведены зависимости вертикального и горизонтального воздействий транспортного средства на дорожное покрытие.

В отличие от влияния на покрытие вертикальной составляющей нагрузки, отклик на продольные горизонтальные сдвиговые силы в зависимости от скорости возрастает линейно от нуля (при $v = 0$), оставаясь при этом существенно меньше «вертикального отклика». В работе [13] было рассмотрено также поведение коэффициента пластичности дорожного покрытия, определяемого через деформационные зависимости и представляющего собой отношение полного прогиба дорожного покрытия ϵ к его упругой ϵ_y составляющей: $\xi = \frac{\epsilon}{\epsilon_y}$.

Было показано, что коэффициент пластичности имеет наибольшие значения для скоростей близких к 100 км/ч. Этот факт предложено учитывать при определении оптимального эксплуатационного (скоростного) режима дороги. Результаты анализа, проведенного в данной работе, в свою очередь, показывают, что скорости порядка 100 км/ч также можно считать оптимальными (наиболее «щадящими» дорожное покрытие). В этом случае мы имеем минимальное воздействие на дорогу в вертикальном

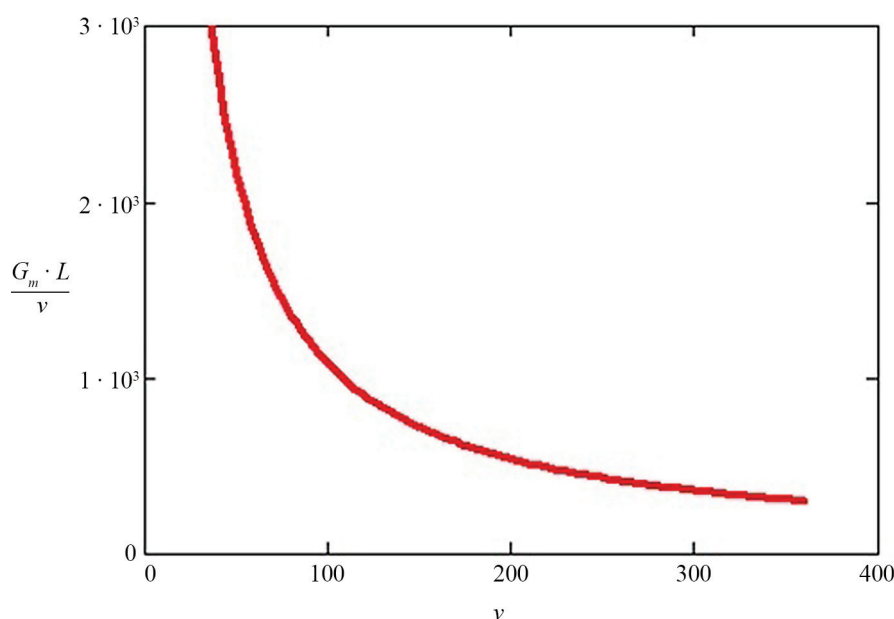


Рис. 1. Импульс вертикальной силы $H \cdot s$, действующей со стороны автомобиля на дорожное покрытие, в зависимости от скорости движения автомобиля, км/ч, с учетом только его силы тяжести ($L = 3$ м — база автомобиля, $G_m = 10$ кН)

Fig. 1. Impulse of vertical force $N \cdot s$, exerted by the car on the road pavement, as a function of the car speed, km/h, taking into account only car's gravity ($L = 3$ m — car base, $G_m = 10$ kN)

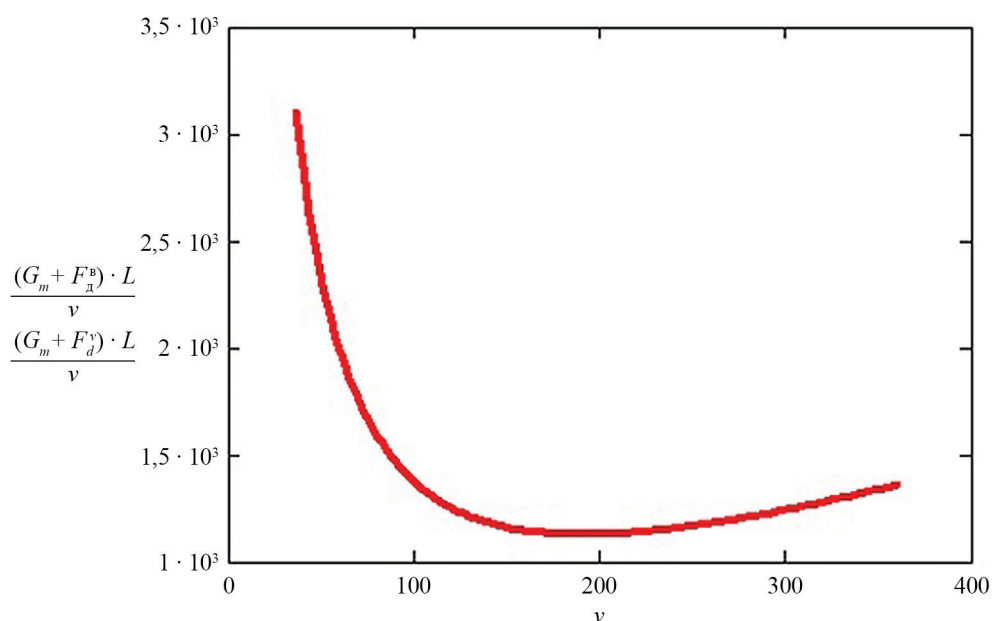


Рис. 2. Импульс вертикальной силы $H \cdot s$, действующей со стороны автомобиля на дорожное покрытие, в зависимости от скорости движения автомобиля, км/ч, с учетом динамической вертикальной силы ($L = 3$ м — база автомобиля, $G_m = 10$ кН)

Fig. 2. Impulse of vertical force $N \cdot s$, exerted by the car on the road pavement, as a function of the car speed, km/h, taking into account dynamic vertical force F_d^v ($L = 3$ m — car base, $G_m = 10$ kN)

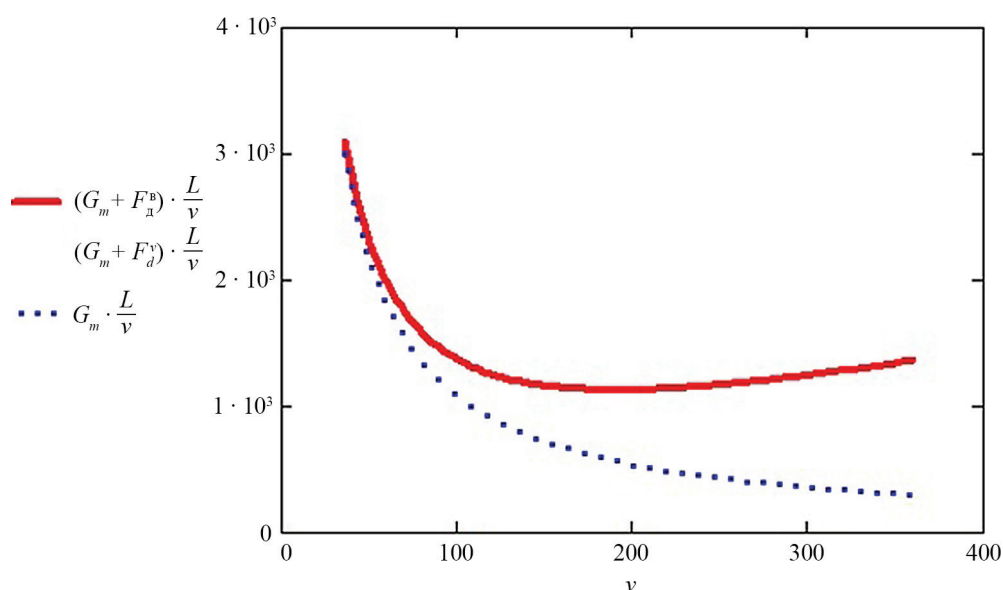


Рис. 3. Импульс вертикальной силы $H \cdot s$, действующей со стороны автомобиля на дорожное покрытие, в зависимости от скорости движения автомобиля, км/ч: пунктирная линия — без учета динамической силы; сплошная линия — с учетом динамической силы ($L = 3$ м — база автомобиля, $G_m = 10$ кН)

Fig. 3. Impulse of vertical force $N \cdot s$, exerted by the car on the road pavement, as a function of the car speed, km/h: dotted line — dynamic force is ignored; solid line — dynamic force is taken into account ($L = 3$ m — car base, $G_m = 10$ kN)

направлении (уменьшается глубина чаши прогиба, что влечет уменьшение сжимающих и изгибающих деформаций покрытия). На рис. 5 для сравнения приведен график зависимостей вертикальной нагрузки и коэффициента пластичности от скорости.

Отметим также, что в исследовании [62] была показана связь коэффициента пластичности с числом прохождения дорожного катка по одному следу (в процессе укладки асфальтобетонного дорожного покрытия). И, по мнению авторов, рассмотренный

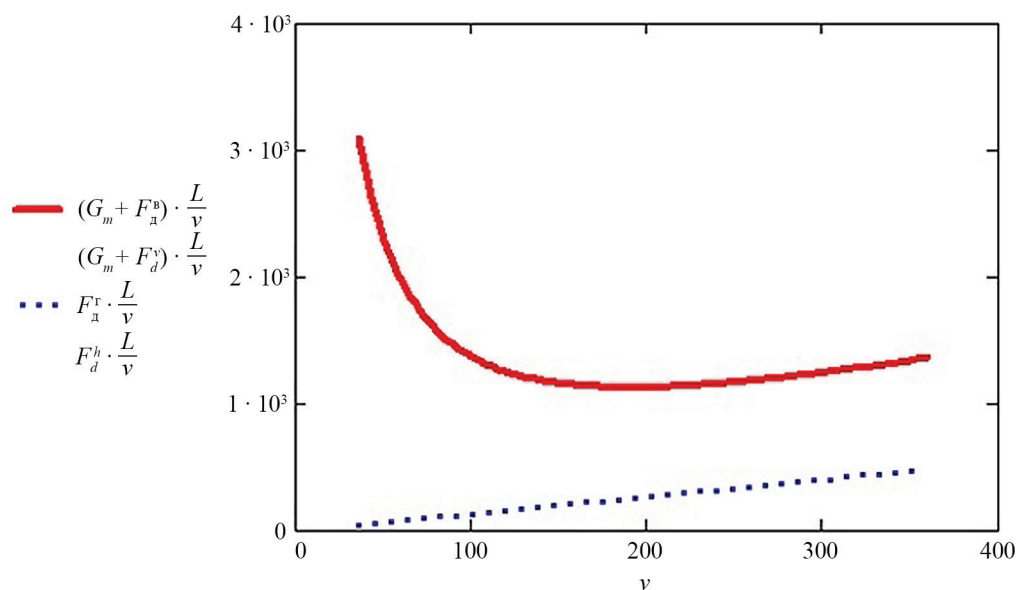


Рис. 4. Импульс силы $H \cdot s$, действующей со стороны автомобиля на дорожное покрытие, в зависимости от скорости движения автомобиля, км/ч: пунктирная линия — в горизонтальном направлении; сплошная линия — в вертикальном направлении ($L = 3$ м — база автомобиля, $G_m = 10$ кН)

Fig. 4. Impulse of the force $N \cdot s$, exerted by the car on the road pavement, as a function of the car speed, km/h: dotted line — in horizontal direction; solid line — in vertical direction ($L = 3$ m — car base, $G_m = 10$ kN)

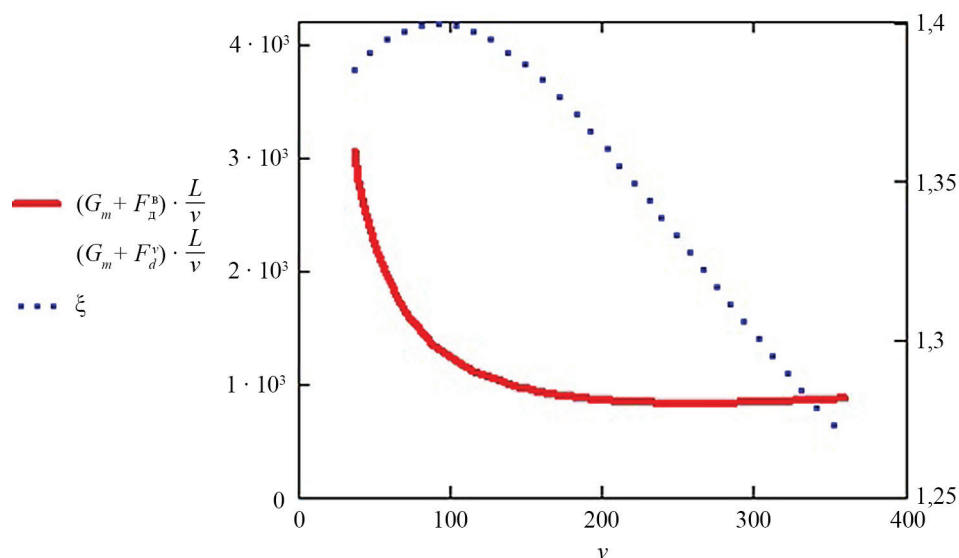


Рис. 5. Зависимости от скорости, км/ч, динамического воздействия автомобиля $H \cdot s$ на дорожное покрытие (сплошная линия) и коэффициента пластичности асфальтобетонного дорожного покрытия (пунктирная линия)

Fig. 5. Dynamic impact of the car $N \cdot s$ on the road pavement (solid line) and plasticity coefficient of the asphalt concrete road pavement (dotted line) as a function of the car speed, km/h

выше подход с применением коэффициента пластичности может расширить и дополнить существующие современные методы контроля процесса укладки асфальтобетонного дорожного покрытия [63–67]. Можно добавить, что для специалистов дорожной отрасли может представлять практический интерес связь коэффициента пластичности с коэффициентом уплотнения. Оба коэффициента зависят от

числа проходов катка. Решив обе зависимости, относительно числа проходов катка можно получить зависимость между коэффициентами пластичности и уплотнения. Эта зависимость при требуемых коэффициентах уплотнения позволит определить требуемые коэффициенты пластичности. Таким образом, наряду с коэффициентом уплотнения и водонасыщением по объему, можно получить еще один

параметр качества уплотнения, а именно минимальный требуемый коэффициент пластичности.

ВЫВОДЫ

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. По мере увеличения скорости силовое воздействие движущегося транспортного средства на дорожное покрытие при малых скоростях быстро уменьшается, достигая минимума при некоторой скорости, а затем медленно возрастает (см. рис. 2–5). Такое поведение указанной зависимости позволяет сделать вывод о наличии оптимального скоростного режима эксплуатации автодороги, при котором силовое воздействие на дорожную одежду минимально. При соблюдении такого скоростного режима можно увеличить срок эксплуатации дороги, т.е. увеличить межремонтный срок ее службы.

2. Оптимальный скоростной режим с точки зрения силового транспортного воздействия на

дорожное покрытие совпадает с таковым с точки зрения пластических свойств дорожного покрытия (см. рис. 5). Таким образом, соблюдение указанного скоростного режима положительно скажется на эксплуатационных свойствах автодороги.

Отметим, что результаты работы несколько противоречат основополагающим принципам теории расчета конструкций дорожных одежд автомобильных дорог. Принято считать, что с увеличением скорости нагрузка на покрытие возрастает. Связано это с возрастанием амплитуды вертикальных колебаний транспортного средства, возникающих при движении по неровной поверхности. В модели, представленной в данной работе, не учитываются имеющиеся на поверхности дорожных покрытий неровности, вызывающие вертикальные колебания автомобилей и, соответственно, увеличивающие нагрузку на покрытие. В перспективе автор предполагает совершенствование модели и учет колебательных процессов, возникающих в системе «дорога — транспортное средство».

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang G., Roque R., Morian D. Effects of surface rutting on near-surface pavement responses based on a two-dimensional axle-tire-pavement interaction finite-element model // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. Vol. 24. No. 11. Pp. 1388–1395. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000526.
2. Liu Q., Shalaby A. Simulation of pavement response to tire pressure and shape of contact area // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 40. No. 3. Pp. 236–242. DOI: 10.1139/cjce-2011-0567.
3. Wang H., Al-Qadi I.L., Stanciulescu I. Simulation of tyre-pavement interaction for predicting contact stresses at static and various rolling conditions // *International Journal of Pavement Engineering*. 2012. Vol. 13. No. 4. Pp. 310–321. DOI: 10.1080/10298436.2011.565767.
4. Liu P., Wang D., Oeser M. Application of semi-analytical finite element method coupled with infinite element for analysis of asphalt pavement structural response // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2. No. 1. Pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.01.005.
5. Xia K. Finite element modelling for tire/pavement interaction: application to predicting pavement damage // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2010. Vol. 3. No. 3. Pp. 135–141.
6. Vaitkus A., Paliukaitė M. Evaluation of time loading influence on asphalt pavement rutting // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 1205–1212. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.152.
7. Siddharthan R.V., Yao J., Sebaaly P.E. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution // *Journal of Transportation Engineering*. 1998. Vol. 124. No. 6. Pp. 557–566. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1998)124:6(557).
8. Pascale P., Doré G., Prophète F. Characterization of tire impact on the pavement behaviour // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2004. Vol. 31. No. 5. Pp. 860–869. DOI: 10.1139/104-038.
9. Weissman S. Influence of tire-pavement contact stress distribution on development of distress mechanisms in pavements // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999. No. 1655. Pp. 161–167. DOI: 10.3141/1655-21.
10. Kim D. Super-single tire loadings and their impacts on pavement design // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2008. Vol. 35. No. 2. Pp. 119–128. DOI: 10.1139/107-090.
11. El-Kholy S.A., Galal S.A. A study on the effects of non-uniform tyre inflation pressure distribution on rigid pavement responses // *International Journal of Pavement Engineering*. 2012. Vol. 13. No. 3. Pp. 244–258. DOI: 10.1080/10298436.2011.623780.
12. Vaiana R., Capiluppi G.F., Gallelli V., Iuele T., Minani V. Pavement surface performances evolution: an experimental application // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 53. Pp. 1149–1160. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.964.
13. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное

покрытие — транспортное средство // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5. С. 34–44. DOI: 10.5862/MCE.57.3.

14. Семенова Т.В. Обеспечение сцепных качеств мокрых шероховатых асфальтобетонных покрытий на улицах городов и сельских поселений // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2009. № 11. С. 36–42.

15. Семенова Т.В., Герасимова С.А., Корончевская Е.В. Требования к расстояниям между дождеприемниками ливневой канализации городских дорог и улиц // Молодой ученый. 2016. № 6 (110). С. 184–191. URL: <https://moluch.ru/archive/110/27067/>.

16. Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Критерии проектирования шероховатых асфальтобетонных покрытий из условия обеспечения безопасности движения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 2. С. 66–73.

17. Александров А.С., Семенова Т.В. Обеспечение сцепных качеств асфальтобетонных покрытий городских дорог и улиц при проектировании сети дождевой канализации // Вестник Московского государственного автомобильно-дорожного университета (МАДИ). 2009. № 2. С. 29–32.

18. Chupin O., Piau J., Chabot A. Effect of bituminous pavement structures on the rolling resistance // Proceeding the 11th International Conference on Asphalt Pavements. 2010. Pp. 73–82.

19. Louhghalam A., Akbarian M., Ulm F.-J. Flüge's conjecture: dissipation-versus deflection-induced pavement-vehicle interactions // Journal of Engineering Mechanics. 2014. Vol. 140. No. 8. Pp. 171–179. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000754.

20. Anupam K., Srirangam S.K., Scarpas A., Kasbergen C. Influence of temperature on tire-pavement friction // Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. 2013. Vol. 2369. No. 1. Pp. 114–124. DOI: 10.3141/2369-13.

21. Lu T., Thom N.H., Parry T. Numerical simulation of the influence of pavement stiffness on energy dissipation // Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings of the International Conference. 2010. Vol. 30. Pp. 4830.

22. Pouget S., Sauzéat C., Di Benedetto H., Olard F. Viscous energy dissipation in asphalt pavement structures and implication for vehicle fuel consumption // Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. Vol. 24. No. 5. Pp. 568–576. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000414.

23. Gui J., Phelan P.E., Kaloush K.E., Golden J.S. Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures // Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. Vol. 19. No. 8. Pp. 683–690. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:8(683).

24. Feng D., Hu W., Yu F., Cao P., Zhang X. Impact of asphalt pavement thermophysical property on temperature field and sensitivity analysis // Journal

of Highway and Transportation Research and Development. 2011. Vol. 11. Pp. 12–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.11.003.

25. Завьялов М.А. Термодинамическая теория жизненного цикла дорожного асфальтобетонного покрытия. Омск : СибАДИ, 2007. 283 с.

26. Zoorob S.E., Collop A.C., Brown S.F. Performance of bituminous and hydraulic materials in pavements : Proceedings of the Fourth European Symposium, Bitmat4, Nottingham, UK, 11–12 April 2002. Netherlands : CRC Press, 2002. 416 p.

27. Hansson J., Lenngren C.A. Using deflection energy dissipation for predicting rutting // 10th International Conference on Asphalt Pavements, August 12 To 17, 2006, Quebec City, Canada. 2006. Pp. 112–123.

28. Zhang Q., Lu Y., Jia X. The Deformation characteristics of asphalt mixture based on dissipation energy // International Conference on Transportation Engineering 2009. ASCE, 2009. Pp. 1250–1255. DOI: 10.1061/41039(345)207.

29. Щенетева Л.С., Агапатов Д.А., Тюрюханов К.Ю. Устойчивость асфальтобетона к колееобразованию // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2016. Т. 1. С. 319–323.

30. Ядыкина В.В., Ашыров О., Хороших А.С. Повышение устойчивости асфальтобетона к колееобразованию // Эффективные строительные композиты : науч.-практ. конф. к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 771–774.

31. Яковлева М.И. Испытание колес // Автомобильные дороги. 2011. № 1. С. 89–90.

32. Хафизов Э.Р., Вдовин Е.А., Фомин А.Ю., Мавлиев Л.Ф., Буланов Н.Е. Современные методы оценки эксплуатационных свойств дорожных асфальтобетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (39). С. 279–285.

33. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 45–57. DOI: 10.5862/MCE.57.4.

34. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Энергетический баланс дорожного покрытия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 6. С. 61–64.

35. Степанов А.В., Корягин О.Г. Осветленные асфальтобетонные покрытия и возможности энергосбережения в наружном освещении // Энергосбережение. 2001. № 2. С. 10–11.

36. Coseo P., Larsen L. Cooling the heat island in compact urban environments: the effectiveness of Chicago's Green Alley Program // Procedia Engineering. 2015. Vol. 118. Pp. 691–710. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.504.

37. *Pomerantz M., Akbari H., Chang S.-C., Levinson R., Pon B.* Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals // Lawrence Berkeley National Laboratory. 2003. DOI: 10.2172/816205.
38. *Sailor D.J., Fan H.* Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities // *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. No. 4. Pp. 713–725. DOI:10.1016/s1352-2310(01)00452-6.
39. *Doulos L., Santamouris M., Livada I.* Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials // *Solar Energy*. 2004. Vol. 77. No. 2. Pp. 231–249. DOI:10.1016/j.solener.2004.04.005.
40. *Graczyk M., Zofka A., Urbanik A.* Analytical solution for the heat propagation with infinite speed in the multilayer pavement system // ARRB Conference, 26th, 2014, Sydney, New South Wales, Australia. 2014.
41. *Marc P., Belc F., Lucaci G.* Modeling road pavements taking into consideration the thermo-physical characteristics of the layers // *Energy and Clean Technologies, Proceedings of the 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM*. 2013. Pp. 709–716.
42. *Hall M.R., Dehdezi P.K., Dawson A.R., Grenfell J., Isola R.* Influence of the thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 24. No. 1. Pp. 32–47. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000357.
43. *Chen B.L., Bhowmick S., Mallick R.B.* A laboratory study on reduction of the heat island effect of asphalt pavements // *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2009. Vol. 78. Pp. 209–248.
44. *Айталиев Ш.М., Телтаев Б.Б., Киялбаев А.К.* Теплообменные процессы в слоях дорожной одежды и их влияние на тепловой баланс в городах // *Экология промышленного производства*. 2004. № 1. С. 28–31.
45. *Katzschner L.* Urban climatology and town planning // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: География. Геоэкология*. 2008. № 2. С. 95–100.
46. *Балдина Е.А., Константинов П., Грищенко М., Варенцов М.* Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения*. 2015. № 1. С. 38–42.
47. *Yang L., Qian F., Song De-X., Zheng Ke-J.* Research on Urban Heat-Island Effect // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 169. Pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.10.002.
48. *Исаков С.В., Шкляев В.А.* Определение суммарного влияния антропогенноизмененных поверхностей на возникновение эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. № 1 (162). С. 178–182.
49. *Исаков С.В., Шкляев В.А.* Применение карт дифференциального альбеда для оценки теплового эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // *Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края : сб. науч. тр. Пермь, Пермский государственный университет, 2011. С. 59–63.*
50. *Адамов Г.Е., Гребенников Е.П., Курбангалев В.Р., Левченко К.С., Малышев П.Б., Порошин Н.О.* Спектрально-управляемые материалы на основе гибридных наноструктур // *Технологии и материалы для экстремальных условий (создание и применение «умных» материалов) : тезисы докладов 7-й Всероссийской научной конференции*. М. : МЦАИ РАН, 2012. С. 30–31.
51. *Шмелин П.С., Порошин Н.О., Адамов Г.Е., Гребенников Е.П.* Новые спектрально управляемые материалы с рекордными функциональными возможностями / *Технологии и материалы для экстремальных условий : тез. докл. Всеросс. науч. конф.* М. : МЦАИ РАН, 2011. С. 48–53.
52. *Гребенников Е.П., Малышев П.Б., Шмелин П.С., Адамов Г.Е.* Гибридные наноструктуры как основа спектрально управляемых материалов / *Наноинженерия*. 2011. № 6. С. 29–34.
53. *Mallick R.B., Chen B.-L., Bhowmick S., Hulén M.S.* Capturing solar energy from asphalt pavements // *International symposium on asphalt pavements and environment, international society for asphalt pavements*. Zurich, Switzerland. 2008. Pp. 161–172.
54. *Loomans M., Oversloot H., De Bondt A., Jansen R., Van Rij H.* Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements // *Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands*. 2003. Pp. 745–752.
55. *Смирнов А.В., Александров А.С.* Механика дорожных конструкций. Омск : СибАДИ, 2009. 211 с.
56. *Завьялов М.А.* Некоторые закономерности процесса деформирования дорожного покрытия // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2007. № 1. С. 94–97.
57. *Wu J., Liang J., Adhikari S.* Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2014. Vol. 1. No. 6. Pp. 439–447. DOI: 10.1016/s2095-7564(15)30294-4.
58. *Khavassefat P., Jelagin D., Birgisson B.* Dynamic response of flexible pavements at vehicle–road interaction // *Road Materials and Pavement Design*. 2014. Vol. 16. No. 2. Pp. 256–276. DOI: 10.1080/14680629.2014.990402.
59. *Корочкин А.В.* Расчет жесткой дорожной одежды с учетом воздействия движущегося транс-

портного средства // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 2. С. 8–10.

60. Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона — Мора // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 7 (59). С. 4–17. DOI: 10.5862/MCE.59.1.

61. Александрова Н.П., Чусов В.В. Особенности расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу с учетом накапливания повреждений // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 3 (49). С. 42–50. DOI: 10.26518/2071-7296-2016-3(49)-42-50.

62. Дмитриев И.И., Кириллов А.М. Теплофизические модели исследования и контроля дорожного покрытия // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 11 (62). С. 25–46. DOI: 10.18720/CUBS.62.3.

63. Милушенко С.А. К вопросу моделирования рабочего процесса укладки асфальтобетонного покрытия асфальтоукладчиком // Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск : СибАДИ, 2016. С. 280–282.

Поступила в редакцию 21 июня 2018 г.

Принята в доработанном виде 9 июля 2018 г.

Одобрена для публикации 27 июля 2018 г.

ОБ АВТОРЕ: **Кириллов Андрей Михайлович** — кандидат физико-математических наук, преподаватель физики и астрономии, **Автомобильно-дорожный колледж**, 354008, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 26, а/1, kirill806@gmail.com.

REFERENCES

1. Wang G., Roque R., Morian D. Effects of surface rutting on near-surface pavement responses based on a two-dimensional axle-tire-pavement interaction finite-element model. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012, vol. 24, no. 11, pp. 1388–1395. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000526.

2. Liu Q., Shalaby A. Simulation of pavement response to tire pressure and shape of contact area. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2013, vol. 40, no. 3, pp. 236–242. DOI:10.1139/cjce-2011-0567.

3. Wang H., Al-Qadi I.L., Stanciulescu I. Simulation of tyre-pavement interaction for predicting contact stresses at static and various rolling conditions. *International Journal of Pavement Engineering*. 2012, vol. 13, no. 4, pp. 310–321. DOI: 10.1080/10298436.2011.565767.

4. Liu P., Wang D., Oeser M. Application of semi-analytical finite element method coupled with infinite

64. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Куприянов Р.В. Влияние условий производства работ на длину полосы укладки асфальтобетонных смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий // Научный журнал строительства и архитектуры. 2016. № 3 (43). С. 43–55.

65. Зубков А.Ф. Определение возможной продолжительности уплотнения покрытий нежесткого типа при строительстве автомобильных дорог // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2006. Т. 12. № 3–2. С. 806–817.

66. Зубков А.Ф. Анализ методов разработки технологических процессов уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2006. Т. 12. № 4–2. С. 1158–1161.

67. Потеряев И.К., Суковин М.В., Алешиков Д.С. Методика вероятностной оценки интенсивности использования дорожно-строительной машины — асфальтоукладчика — в сменное время // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 2 (33). С. 126. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/42TVN216.pdf>. DOI: 10.15862/42TVN216.

element for analysis of asphalt pavement structural response. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015, vol. 2, no. 1, pp. 48–58. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.01.005.

5. Xia K. A finite element model for tire/pavement interaction: application to predicting pavement damage. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2010, vol. 3, no. 3, pp. 135–141.

6. Vaitkus A., Paliukaitė M. Evaluation of time loading influence on asphalt pavement rutting. *Procedia Engineering*. 2013, vol. 57, pp. 1205–1212. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.152.

7. Siddharthan R.V., Yao J., Sebaaly P.E. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution. *Journal of Transportation Engineering*. 1998, vol. 124, no. 6, pp. 557–566. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(1998)124:6(557).

8. Pascale P., Doré G., Prophète F. Characterization of tire impact on the pavement behaviour. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2004, vol. 31, no. 5, pp. 860–869. DOI:10.1139/104-038.
9. Weissman S. Influence of tire-pavement contact stress distribution on development of distress mechanisms in pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999, no. 1655, pp. 161–167. DOI: 10.3141/1655-21.
10. Kim D. Super-single tire loadings and their impacts on pavement design. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2008, vol. 35, no. 2, pp. 119–128. DOI:10.1139/107-090.
11. El-Kholy S.A., Galal S.A. A study on the effects of non-uniform tyre inflation pressure distribution on rigid pavement responses. *International Journal of Pavement Engineering*. 2012, vol. 13, no. 3, pp. 244–258. DOI:10.1080/10298436.2011.623780.
12. Vaiana R., Capiluppi G.F., Gallelli V., Iuele T., Minani V. Pavement surface performances evolution: an experimental application. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2012, vol. 53, pp. 1149–1160. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.964.
13. Kirillov A.M., Zavyalov M.A. Modelirovanie protsessov energoobmena v sisteme dorozhnoe pokrytie — transportnoe sredstvo [Modeling of energy dissipation processes in a pavement — vehicle system]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2015, no. 5, pp. 34–44. DOI: 10.5862/MCE.57.3. (In Russian)
14. Semenova T.V. Obespechenie stepnykh kachestv mokrykh sherokhovatykh asfal'tobetonnykh pokrytiy na ulitsakh gorodov i sel'skikh poseleniy [Providing traction of wet asphalt-concrete pavements of city and country roads]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii* [Bulletin of the Siberian state automobile and road Academy]. 2009, no. 11, pp. 36–42. (In Russian)
15. Semenova T.V., Gerasimova S.A., Koronchevskaya E.V. Trebovaniya k rasstoyaniyam mezhdu dozhdopriemnikami livnevoy kanalizatsii gorodskikh dorog i ulits [Requirements for distances between rainwater drainage systems of city roads and streets]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016, no. 6, pp. 184–191. URL: <https://moluch.ru/archive/110/27067/>. (In Russian)
16. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Kriterii proektirovaniya sherokhovatykh asfal'tobetonnykh pokrytiy iz usloviya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya [Criteria for the design of rough asphalt concrete pavement from the condition of traffic safety]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2009, no. 2, pp. 66–73. (In Russian)
17. Aleksandrov A.S., Semenova T.V. Obespechenie stepnykh kachestv asfal'tobetonnykh pokrytiy gorodskikh dorog i ulits pri proektirovanii seti dozhdovoy kanalizatsii [Providing asphalt-concrete pavement traction while designing storm drain system]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow state automobile and road University (MADI)]. 2009, no. 2, pp. 29–32. (In Russian)
18. Chupin O., Piau J.M., Chabot A. Effect of bituminous pavement structures on the rolling resistance. *Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements*. 2010, pp. 73–82.
19. Louhghalam A., Akbarian M., Ulm F.J. Flüge's conjecture: dissipation-versus deflection-induced pavement-vehicle interactions. *Journal of Engineering Mechanics*. 2014, vol. 140, no. 8, pp. 171–179. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000754.
20. Anupam K., Srirangam S.K., Scarpas A., Kasbergen C. Influence of temperature on tire-pavement friction. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 2013, vol. 2369, no. 1, pp. 114–124. DOI: 10.3141/2369-13.
21. Lu T., Thom N.H., Parry T. Numerical simulation of the influence of pavement stiffness on energy dissipation. *Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings of the International Conference*. 2010, vol. 30, pp. 483.
22. Pouget S., Sauzéat C., Di Benedetto H., Olard F. Viscous energy dissipation in asphalt pavement structures and implication for vehicle fuel consumption. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011, vol. 24, no. 5, pp. 568–576. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000414.
23. Gui J., Phelan P.E., Kaloush K.E., Golden J.S. Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007, vol. 19, no. 8, pp. 683–690. DOI:10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:8(683).
24. Feng D., Hu W., Yu F., Cao P., Zhang X. Impact of asphalt pavement thermophysical property on temperature field and sensitivity analysis. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2011, vol. 11, pp. 12–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.11.003.
25. Zavyalov M.A. Termodinamicheskaya teoriya zhiznennogo tsikla dorozhnogo asfal'tobetonnoy pokrytiya [Asphalt concrete pavement functional condition during its life-cycle on the basis of thermodynamics]. *Omsk, SibADI*, 2007, 283 p. (In Russian)
26. Zoorob S.E., Collop A.C., Brown S.F. Performance of bituminous and hydraulic materials in pavements: Proceedings of the Fourth European Symposium, Bitmat4, Nottingham, UK, 11–12 April 2002. Netherlands, CRC Press, 2002, 416 p.
27. Hansson J., Lenngren C.A. Using deflection energy dissipation for predicting rutting. *10th International Conference on Asphalt Pavements*, August 12 to 17, 2006, Quebec City, Canada. 2006, pp. 112–123.
28. Zhang Q., Lu Y., Jia X. The Deformation characteristics of asphalt mixture based on dissipation energy. *International Conference on Transporta-*

tion Engineering, 2009. ASCE, 2009, pp. 1250–1255. DOI:10.1061/41039(345)207.

29. Shchepeteva L.S., Agapitov D.A., Tyuryukhanov K.Yu. Ustoychivost' asfal'tobetona k koleeobrazovaniyu [Stability of asphaltic concrete to the rutting]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and research in the transport sector]. 2016, vol. 1, pp. 319–323. (In Russian)

30. Yadykina V.V., Ashyrov O., Khoroshikh A.S. Povyshenie ustoychivosti asfal'tobetona k koleeobrazovaniyu [Increasing the resistance of asphalt concrete to the rutting]. *Effektivnye stroitel'nye kompozity: nauch.-prakt. konf. k 85-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova Yuriya Mikhaylovicha* [Effective building composites: scientific.-prakt. conf. on the 85th anniversary of honored scientist of Russia, academician of RAASN, doctor of technical Sciences Bazhenov Yuri Mikhailovich. Belgorod, BG TU im. V.G. Shukhova. 2015, pp. 771–774. (In Russian)

31. Yakovleva M.I. Ispytanie koleey [Test track]. *Avtomobil'nye dorogi* [Automobile road]. 2011, no. 1, pp. 89–90. (In Russian)

32. Khafizov E.R., Vdovin E.A., Fomin A.Yu., Mavliev L.F., Bulanov N.E. Sovremennye metody otsenki ekspluatatsionnykh svoystv dorozhnykh asfal'tobetonov [Modern methods for assessing the performance of road asphalt concretes]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of Kazan state University of architecture and construction]. 2017, no. 1 (39), pp. 279–285. (In Russian)

33. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin N.V. Raschet dorozhnykh odezhd po kriteriyam rovnosti. Chast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnykh pokrytiy [Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1: substantiating the flatness standards of asphalt concrete pavement]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and construction journal]. 2015, no. 5 (57), pp. 45–57. (In Russian). DOI: 10.5862/MCE.57.4.

34. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Energeticheskiy balans dorozhnogo pokrytiya [Energy balance of the road surface]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniyuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2005, no. 6, pp. 61–64. (In Russian)

35. Stepanov A.V., Koryagin O.G. Osvetlennyye asfal'tobetonnyye pokrytiya i vozmozhnosti energosberezheniya v naruzhnom osveshchenii [Lightened asphalt concrete pavement and energy-saving possibilities in outdoor lighting]. *Energosberezhenie* [Energy saving]. 2001, no. 2, pp. 10–11. (In Russian)

36. Coseo P., Larsen L. Cooling the heat island in compact urban environments: the effectiveness of Chicago's green alley program. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 118, pp. 691–710. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.504.

37. Pomerantz M., Akbari H., Chang S.-C., Levinson R., Pon B. Examples of cooler reflective streets for

urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. 2003. DOI: 10.2172/816205.

38. Sailor D.J., Fan H. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*. 2002, vol. 36, no. 4, pp. 713–725. DOI: 10.1016/s1352-2310(01)00452-6.

39. Doulos L., Santamouris M., Livada I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*. 2004, vol. 77, no. 2, pp. 231–249. DOI: 10.1016/j.solener.2004.04.005.

40. Graczyk M., Zofka A., Urbanik A. Analytical solution for the heat propagation with infinite speed in the multilayer pavement system. *ARRB Conference*, 26th, 2014, Sydney, New South Wales, Australia. 2014.

41. Marc P., Belc F., Lucaci G. Modeling road pavements taking into consideration the thermo-physical characteristics of the layers. *Energy and Clean Technologies, Proceedings of the 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference*, SGEM. 2013, pp. 709–716.

42. Hall M.R., Dehdezi P.K., Dawson A.R., Grenfell J., Isola R. Influence of the thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011, vol. 24, no. 1, pp. 32–47. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000357.

43. Chen B.L., Bhowmick S., Mallick R.B. A laboratory study on reduction of the heat island effect of asphalt pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2009, vol. 78, pp. 209–248.

44. Aytaliyev Sh.M., Teltayev B.B., Kiyalbayev A.K. Teploobmennyye protsessy v sloyakh dorozhnoy odezhdy i ikh vliyaniye na teplovoy balans v gorodakh [Heat exchange processes in layers of pavement and their influence on the heat balance in cities]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of industrial production]. 2004, no. 1, pp. 28–31. (In Russian)

45. Katzschner L. Urban climatology and town planning. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geografiya. Geoekologiya*. 2008, no. 2, pp. 95–100. (In Russian)

46. Baldina E.A., Konstantinov P., Grishchenko M., Varentsov M. Issledovaniye gorodskikh ostrovov tepla s pomoshchyu dannykh distantsionnogo zondirovaniya v infrakrasnom teplovom diapazone [Research of urban heat Islands using remote sensing data in the infrared thermal range]. *Zemlya iz kosmosa: naiboleye effektivnyye resheniya* [Earth from space: the most effective solutions]. 2015, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)

47. Yang L., Qian F., Song De-X., Zheng Ke-J. Research on Urban Heat-Island Effect. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 169, pp. 11–18. DOI:org/10.1016/j.proeng.2016.10.002.

48. Isakov S.V., Shklyayev V.A. Opredeleniye summarnogo vliyaniya antropogennnoizmennykh poverkhnostey na vozniknoveniye effekta «gorodskogo os-

trova tepla» s ispolzovaniyem geoinformatsionnykh sistem [Determination of the total influence of anthropogenically changeable surfaces on the occurrence of the effect of “urban heat island” using geoinformation systems]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Orenburg state University]. 2014, no. 1 (162), pp. 178–182. (In Russian)

49. Isakov S.V., Shklyayev V.A. Primeneniye kart differentsialnogo albedo dlya otsenki teplovogo effekta «gorodskogo ostrova tepla» s ispolzovaniyem geoinformatsionnykh sistem [Application of differential albedo maps for the estimation of the thermal effect of “urban heat island” using geoinformation systems]. *Geoinformatsionnoye obespecheniye prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraya : sb. nauch. tr.* Perm, PSU, 2011, pp. 59–63. (In Russian)

50. Adamov G.E., Grebennikov E.P., Kurban-galeev V.R., Levchenko K.S., Malyshev P.B., Poroshin N.O. Spektral’no-upravlyaemye materialy na osnove gibridnykh nanostruktur [Spectral-controlled materials based on hybrid nanostructures]. *Tekhnologii i materialy dlya ekstremal’nykh usloviy (sozdanie i primeneniye «umnykh» materialov) : tezisy dokladov 7-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Technologies and materials for extreme conditions (creation and application of “smart” materials): abstracts of the 7th all-Russian scientific conference]. Moscow, MTsAI RAN, 2012, pp. 30–31. (In Russian)

51. Shmelin P.S., Poroshin N.O., Adamov G.E., Grebennikov E.P. Novye spektral’no upravlyaemye materialy s rekordnymi funkcional’nymi vozmozhnostyami [New spectrally driven materials with record-breaking functionality]. *Tekhnologii i materialy dlya ekstremal’nykh usloviy (sozdanie i primeneniye «umnykh» materialov) : tezisy dokladov 7-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Technologies and materials for extreme conditions: abstracts of all-Russian scientific conferences]. Moscow, MTsAI RAN, 2011, pp. 48–53. (In Russian)

52. Grebennikov E.P., Malyshev P.B., Shmelin P.S., Adamov G.E. Gibridnye nanostrukturny kak osnova spektral’no upravlyaemykh materialov [Hybrid nanostructures as a basis for spectrally controlled materials]. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering]. 2011, no. 6, pp. 29–34. (In Russian)

53. Mallick R.B., Chen B.-L., Bhowmick S., Hulen M.S. Capturing solar energy from asphalt pavements. *International symposium on asphalt pavements and environment, international society for asphalt pavements*, Zurich, Switzerland. 2008, pp. 161–172.

54. Loomans M., Oversloot H., De Bondt A., Jansen R., Van Rij H. Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements. *Eighth International IBPSA Conference*, Eindhoven, Netherlands. 2003, pp. 745–752.

55. Smirnov A.V., Aleksandrov A.S. *Mekhanika dorozhnykh konstruksiy* [Mechanics of road structures]. Omsk, SibADI, 2009, 211 p. (In Russian)

56. Zavyalov M.A. Nekotoryye zakonomernosti protsessa deformirovaniya dorozhnogo pokrytiya [Some regularities of the process of deformation of the road surface]. *Izvestiya vuzov. Stroitel’sтво* [News universities. Construction]. 2007, no. 1, pp. 94–97. (In Russian)

57. Wu J., Liang J., Adhikari S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2014, vol. 1, no. 6, pp. 439–447. DOI:10.1016/s2095-7564(15)30294-4.

58. Khavassefat P., Jelagin D., Birgisson B. Dynamic response of flexible pavements at vehicle–road interaction. *Road Materials and Pavement Design*. 2014, vol. 16, no. 2, pp. 256–276. DOI: 10.1080/14680629.2014.990402.

59. Korochkin A.V. Raschet zhestkoy dorozhnoy odezhdy s uchetom vozdeystviya dvizhushchegosya transportnogo sredstva [Design of rigid pavements in view of influence of a moving vehicle]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli* [Science and technology in the road industry]. 2011, no. 2, pp. 8–10. (In Russian)

60. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Sovershenstvovanie rascheta dorozhnykh konstruksiy po soprotivleniyu sdvigu. Chast’ 1. Uchet deformatsiy v uslovii plastichnosti Kulona — Mora [Improvement of shear strength design of a road structure. Part 1. Deformations in the Mohr — Coulomb plasticity condition]. *Inzhenerno-stroitel’nyy zhurnal* [Engineering and construction magazine]. 2014, no. 7 (59), pp. 4–17. DOI: 10.5862/MCE.59.1. (In Russian)

61. Aleksandrova N.P., Chusov V.V. Osobennosti rascheta asfal’tobetonnykh pokrytiy po soprotivleniyu sdvigu s uchetom nakaplivaniya povrezhdeniy [Calculation of asphalt concrete pavements on shear strength taking into account the accumulation of microdamage]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil’no-dorozhnoy akademii* [Bulletin of the Siberian state automobile and road Academy]. 2016, no. 3 (49), pp. 42–50. DOI: 10.26518/2071-7296-2016-3(49)-42-50. (In Russian)

62. Dmitriev I.I., Kirillov A.M., Teplofizicheskie modeli issledovaniya i kontrolya dorozhnogo pokrytiya [Thermophysical models of pavement research and control]. *Stroitel’sтво unikal’nykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of unique buildings and structures]. 2017, no. 11 (62), pp. 25–46. DOI: 10.18720/CUBS.62.3. (In Russian)

63. Milyushenko S.A. K voprosu modelirovaniya rabocheho protsessa ukladki asfal’tobetonnoy pokrytiya asfal’toukladchikom [To the issue of modeling the working process of paving of asphalt concrete pavement asphalt paver]. *Aktual’nye problemy nauki i tekhniki glazami molodykh uchenykh : mat. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of science and technology through the eyes of young scientists: materials of the International scientific-practical conference]. 2016, pp. 280–282. (In Russian)

64. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Kupriyanov R.V. Vliyaniye usloviy proizvodstva rabot na dlinu

polosy ukladki asfal'tobetonnykh smesey pri ustroystve mnogopolosnykh dorozhnykh pokrytiy [Influence of working conditions on the length of the strip of laying of asphalt-concrete mixtures in the construction of multilane road surfaces]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury* [Scientific journal of civil engineering and architecture]. 2016, no. 3 (43), pp. 43–55. (In Russian)

65. Zubkov A.F. Opredeleeniye vozmozhnoy prodolzhitel'nosti uplotneniya pokrytiy nezhestkogo tipa pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog [Determination of the possible duration of compaction of non-rigid type coatings during road construction]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State technical University]. 2006, vol. 12, no. 3–2, pp. 806–817. (In Russian)

66. Zubkov A.F. Analiz metodov razrabotki tekhnologicheskikh protsessov uplotneniya dorozhnykh

pokrytiy iz goryachikh asfal'tobetonnykh smesey [Analysis of methods for the development of technological processes of compaction of road surfaces from hot asphalt mixes]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State technical University]. 2006, vol. 12, no. 4–2, pp. 1158–1161. (In Russian)

67. Poteryayev I.K., Sukovin M.V., Aleshkov D.S. Metodika veroyatnostnoy otsenki intensivnosti ispol'zovaniya dorozhno-stroitel'noy mashiny — asfal'toukladchika — v smennoe vremya [Methods of probabilistic estimation of the intensity of use of road construction machines — asphalt paver — to change time]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»* [Online journal of Science]. 2016, vol. 8, no. 2 (33), paper 126. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/42TVN216.pdf>. DOI: 10.15862/42TVN216. (In Russian)

Received June 21, 2018.

Adopted in final form on July 9, 2018.

Approved for publication on July 27, 2018.

ABOUT THE AUTHOR: **Andrey M. Kirillov** — candidate of physical and mathematical sciences, teacher of physics and astronomy, **Automotive Road College**, 26 a/1 Ya. Fabriciusa st., Sochi, Krasnodar region, 354008, Russian Federation, kirill806@gmail.com.