

Анализ формул для расчета коэффициента динамичности дорожного покрытия

Analysis of formulas for calculating the road dynamic factor

А.М. Кириллов ^{1*}

¹Автомобильно-дорожный колледж

A. Kirillov ^{1*}

¹Automotive-road college

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

прочность;
подрессоренная и неподрессоренная массы;
динамическое воздействие;
ровность дорожного покрытия;
коэффициент динамичности

KEYWORDS

durability;
sprung and unsprung masses;
dynamic influence;
evenness of road pavement;
dynamic factor

АННОТАЦИЯ

Объектом исследования является динамическое взаимодействие транспортного средства с дорожным покрытием. Проанализированы различные модели расчета коэффициента динамичности дорожного покрытия. Необходимость этого связана с тем, что существующие формулы используют различные входные данные, и, следовательно, несут различные прогностические функции. Метод исследования – сравнительный критический анализ различных моделей с учетом влияния конструктивных параметров дороги и транспортного средства, материальных параметров элементов дороги, а также скорости движения транспортного средства. В результате анализа выявлены достоинства и недостатки различных формул, а также определены области их применения. Сделаны следующие выводы. Во-первых, необходимо совершенствование существующих формул для расчета коэффициента динамичности с целью более полного учета всех факторов, влияющих на него (геометрические и материальные параметры дорожной конструкции, конструктивные параметры транспортного средства, состояние дорожного покрытия, геометрию неровностей и др. Во-вторых, часть формул для расчета коэффициента динамичности дают некоторое усредненное для определенного однородного по показателям участка дороги его значение. Поэтому, полученные с помощью этих выражений данные позволяют проводить сравнительный анализ разных участков автомобильных дорог по уровню динамического воздействия. С помощью других формул, которые учитывают геометрию неровностей, можно определять локальные динамические перегрузки, и, соответственно, прогнозировать развитие и накопление деформаций дорожного покрытия.

ABSTRACT

Subject: dynamic interaction of the vehicle with the road pavement. Research objectives: analysis of various models for calculating the dynamic factor of pavement. Materials and methods: a) the research material is the formulas published in the open press and regulatory documents for calculating the dynamic factor of the road pavement; b) the main research method is a comparative critical analysis of various models of road dynamic factor. Results: various formulas for calculating the dynamic factor are analyzed, their advantages and disadvantages are revealed. Conclusions: 1) The need to improve existing formulas for calculating the dynamic factor in order to more fully take into account all the factors influencing it (geometric and material parameters of the road construction, constructive parameters of the vehicle, condition of the road pavement, geometry of roughness, etc. 2) Some formulas for calculating the dynamic factor give a average value for a some uniform road section. Therefore, the data obtained using these formulas make it possible to carry out a comparative analysis of different sections of roads according to the level of dynamic impact. Using other formulas that take into account the geometry of unevenness, one can determine local dynamic overloads, and, accordingly, predict the development and accumulation of deformations of the road pavement.

Содержание

1.	Введение	8
2.	Методы	8
3.	Результаты и обсуждение	9

1. Введение

Разработка новых и усовершенствование существующих методов расчета и проектирования дорожных одежд всегда является актуальной задачей дорожной отрасли. Показатели прочности, надежности, долговечности, высоких транспортно-эксплуатационных качеств автомобильной дороги зависят от того насколько точно в этих методах учтена динамика напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции.

Важным направлением исследований в области строительства автомобильных дорог является изучение динамического воздействия колеса транспортного средства на дорожное покрытие с целью определения состояния покрытия. Большое распространение при изучении этого взаимодействия получило использование модели конечных элементов, позволяющей анализировать реакцию асфальтобетонного покрытия на транспортные нагрузки [1], например, распределение контактных напряжений на границе шина-покрытие [2 – 4], а также предсказать начало усталостного растрескивания и развитие колейности [5, 6].

Значительно число с 3D-моделированием взаимодействия колеса с покрытием [7]. Это позволяет, например, при анализе поведения покрытия при критических условиях нагрузки прогнозировать распределения контактных напряжений [8]. При проведении экспериментальных исследований и математическом моделировании в качестве переменных величин обычно используют тип шины, давление в шине и вес транспортного средства [9 – 12]. Несмотря на хорошие результаты, получаемые с помощью этих методов (реализованных в современных программных комплексах), они имеют существенные недостатки: большой объем необходимой для расчета информации и значительные изменения результатов при незначительных изменениях в расчетной модели.

Задача регулирования взаимодействия дорожного покрытия и транспортного средства в настоящее время решается следующими методами [13]:

1. Оптимизация скоростного режима транспортного средства. Основное влияние здесь имеет коэффициент сцепления колеса с дорожным покрытием, комплексно зависящий от множества факторов (скорость движения; параметры шероховатости покрытия; атмосферные осадки; температурный режим и др.) [14-22]. Применение данного метода на практике малоцелесообразно, т.к. в этом случае требуются дорогостоящие комплексные исследования дорожной конструкции и анализ многих параметров материала дорожного покрытия.

2. Подбор материалов покрытия на основании их теплофизических свойств для минимизации теплопоглощения и недопущения перегрева покрытия [23-26], что позволяет сохранять необходимые вязкопластичные свойства материала. В результате предотвращается образование колеи и трещин [27-30] с характеристиками сверх нормативных значений [31-33]. Актуальность работ, направленных на обеспечение оптимального температурного режима дорожного покрытия, связана с тем, что устранение колейности и трещин требуют значительных затрат и, следовательно, появление таких дефектов экономически недопустимо. Известно, что различают температурные и силовые трещины. Для повышения «температурной» трещиностойкости покрытия необходимо минимизировать влияние основных причин температурных трещин: отрицательные температуры и высокая амплитуда колебаний температуры в течении суток. При чрезмерном же нагреве покрытия вероятны его большие деформации, которых для повышения «силовой» трещиностойкости необходимо избегать.

3. Управление оптическими свойствами дорожного покрытия (например, альбедо и излучаемость [34-39]) для контроля температуры [40, 41] с учетом гидрогеологических и климатических условий [42], а также влияния «городского острова тепла» (urban heat island effect) [43-49]. Поэтому работы по спектрально управляемым материалам [50-52] необходимо развивать и для приложений в дорожной отрасли. Это направление исследований перспективно в рамках концепции «умных дорог» [53] и может обеспечить, например, возможность аккумулирования энергии и дальнейшего ее использования [54, 55].

2. Методы

Движение транспортных средств сопровождается касательными и вертикальными воздействиями на дорожную конструкцию. Динамическая нагрузка от колес транспорта, относясь к техногенным факторам, влияет на долговечность дорожных покрытий [56, 57]. Динамический характер этих воздействий означает их переменность как по величине, так и по направлению, а их количественные характеристики зависят от «транспортных» (масса и скорость транспортного средства, соотношение поддрессоренной и неподдрессоренной масс) и «дорожных» параметров (например, показатели ровности и др.). Под колесами движущегося транспорта покрытие испытывает быстротечные напряжения и деформации: сжатия-растяжения от вертикальных сил [58]; и сдвига (горизонтальные) от сил тяги, торможения и центробежных

сил [59], возникающих при поворотах. Сопровождающие транспортное средство деформации рассматриваются в работе [60] как бегущая поперечная (изгибная) волна.

Кроме того, движение по неровной дорожной поверхности сопровождается ударами и колебаниями колес и кузова и, соответственно, увеличивает динамическую нагрузку на нее.

Влияние движения нагрузки часто оценивается с помощью коэффициента динамичности μ [61-67]. В работе [60] он определяется как отношение прогиба f дорожного покрытия под движущейся со скоростью v нагрузкой (динамический прогиб) к статическому прогибу $f_{ст}$ (при $v=0$):

$$\mu = \frac{f}{f_{ст}}. \quad (1)$$

Согласно ОДМ 218.11.001-2015 коэффициент динамичности рекомендуется определять по формуле:

$$\mu_i(t) = \frac{p_i(t) + M_i g}{M_i g}, \quad (2)$$

где $p_i(t)$ – динамическая составляющая нагрузки i -ой оси (произведение вертикального ускорения на распределенную на i -ую ось массу транспортного средства); M_i – масса транспортного средства, приходящаяся на i -ую ось (сумма подрессоренной и неподрессоренной масс); g – ускорение свободного падения.

Одним из результатов работ Е.В. Угловой с коллегами [68-70] по данной тематике стал рекомендуемый порядок статистического анализа коэффициента динамичности. Методика В.В. Столярова [71, 72] позволяет определять вероятность появления неровностей на дорожном покрытии в связи с ростом коэффициента динамичности. Для ровных вновь устраиваемых дорожных покрытий существуют рекомендованные значения коэффициента динамичности, базирующиеся на исследованиях А.В. Смирнова [73] и Б.С. Радовского [74].

3. Результаты и обсуждение

Сравнивая формулы (1) и (2), можно видеть очевидное, что динамический прогиб f пропорционален динамической составляющей силы $p_i(t) + M_i g$, а статический прогиб $f_{ст}$ пропорционален силе тяжести транспортного средства $M_i g$, приходящейся на i -ую ось.

В работе [60] формула для расчета коэффициента динамичности получена в результате решения дифференциального уравнения, описывающего изгиб бесконечно длинной балки на сплошном однородном упругом основании и учитывающего равномерное движение нагрузки вдоль балки (волновое уравнение). Результирующая формула содержит в себе параметры дорожной конструкции:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\rho_6 v^2}{\sqrt{\frac{E_{пс} E_6 H_6}{3 H_{пс}}}}}} \quad (3)$$

где ρ_6 – плотность бетонного слоя, v – скорость движения транспортного средства, $E_{пс}$ и E_6 – модули упругости, $H_{пс}$ и H_6 – толщины (подстилающего и бетонного слоев, соответственно).

В отраслевом дорожном методическом документе ОДМ 218.11.001-2015 сообщается, что коэффициент динамичности зависит от размеров и формы (геометрии) неровностей покрытия, квадрата скорости движения и механических свойств транспортного средства. Результаты работы [60] (см. формулу (3)) подтверждают зависимость от квадрата скорости, однако никак не отражают зависимости от геометрии неровностей и механических свойств транспортного средства. Полученное автором [60] выражение для расчета коэффициента динамичности учитывает только конструктивные и материальные параметры дороги: отношение толщин бетонного и подстилающего слоев ($H_6/H_{пс}$), произведение модулей упругости слоев ($E_6 E_{пс}$) и плотность бетонного слоя ρ_6 .

Формулу для коэффициента динамичности (3) можно представить в виде:

$$\mu(v) = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (4)$$

где

$$c = \sqrt[4]{\frac{E_{пс} E_6 H_6}{3 H_{пс} \rho_6^2}} \quad (5)$$

- величина, имеющая размерность скорости, и зависящая от параметров дорожной конструкции (модулей упругости и толщин слоев, плотности материала и др.). Значение скорости $v = c$ можно назвать «критической скоростью», т.к. при стремлении к ней, коэффициент динамичности будет стремиться к бесконечности.

Если оценить значение «критической скорости» c , то она значительно превышает эксплуатационные скорости v автомобильного транспорта (типичные числовые значения материальных параметров, входящих в выражение (5) дают значение критической скорости c порядка 200 м/с.). Таким образом $v \ll c$ и упрощение зависимости (4) можно выполнить, проведя разложение в ряд Тейлора, с учетом только первых двух членов ряда:

$$\mu(v) = 1 + \frac{v^2}{2c^2}. \quad (6)$$

С учетом (5) формулу (6) можно записать в виде:

$$\mu(v) = 1 + \frac{\rho_6 v^2}{2 \cdot \sqrt{\frac{E_{nc} E_6 H_6}{z H_{nc}}}}. \quad (7)$$

Проиллюстрировать совпадение значений коэффициента динамичности (при «обычных» эксплуатационных скоростях) рассчитанных по формулам (4) и (6) можно с помощью следующего графика (рис. 1).

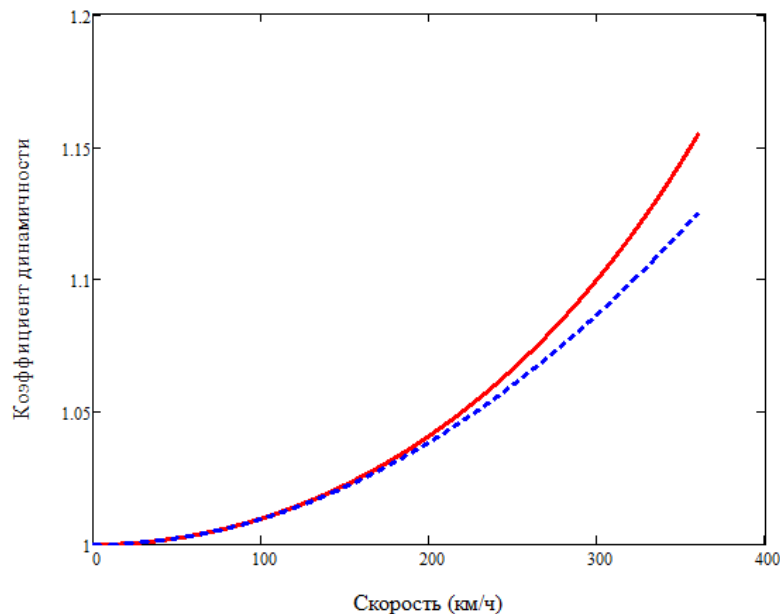


Рис. 1. Коэффициент динамичности (сплошная линия – расчет по формуле (4), пунктирная линия – расчет по формуле (6))

К достоинствам выражений (3) и (7) можно отнести, то что они учитывают конструктивные параметры дорожной одежды (толщины слоев) и материальные параметры слоев (модули упругости и плотности). Это позволяет на стадии строительства дороги производить подбор материалов и толщин слоев «дорожного пирога» для обеспечения нормативного значения коэффициента динамичности. Главные недостатки в том, что совершенно не учитываются параметры транспортного средства, например, масса, радиус колеса и др.; а также состояние дорожного покрытия, например, ровность.

В работе [13] авторами были получены выражения для оценки динамических вертикальных (нормальных) F_d^B и продольных горизонтальных (касательных) сил F_d^T , действующих со стороны транспортного средства на дорожное покрытие. Считая прогиб пропорциональным нормальным силам, коэффициент динамичности можно записать:

$$\mu = \frac{F_d^B + Mg}{Mg}, \quad (8)$$

где вертикальная сила $(F_d^B + Mg)$ определяет динамический прогиб, а сила тяжести Mg определяет статический прогиб. Учитывая выражение для F_d^B , полученное в [13], формулу (8) можно записать в виде [64]:

$$\mu = 1 + \frac{v^2}{K' r^2}, \quad (9)$$

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

Логично записать выражение (9) в форме, подобной выражению (6):

$$\mu = 1 + \frac{v^2}{2K^2}, \quad (10)$$

где $K = K' / \sqrt{2}$.

Используя результаты работы [13] получим

$$K = \sqrt{\frac{9}{4} \cdot \frac{g \cdot \Delta \varepsilon \cdot R_{\phi}^2}{\Delta Y^2} \cdot \frac{1 + \frac{2 \sin^2 \varphi}{1 + \mu'}}{1 + \frac{(1 + \mu')^2}{\sin^2 \varphi}}}, \quad (11)$$

где $\Delta \varepsilon$ – нормальная (вертикальная) динамическая деформация дорожного покрытия (имеет место только при движении транспортного средства), ΔY – полная деформация покрытия в вертикальном направлении, R_{ϕ} – расстояние от оси колеса до дорожного покрытия (из-за деформации колеса под нагрузкой немного меньше его радиуса), φ – угол внутреннего трения материала дорожного покрытия, μ' – коэффициент Пуассона (выражается через модули упругости при сжатии и сдвиге).

Коэффициенту K также можно придать смысл некоторой «критической» скорости. Проведенные оценки показывают, что ее значение значительно выше «нормальных» значений скоростей транспортных средств. Используемые в работе [13] значения параметров, входящих в (11) дают величину критической скорости K порядка 185 м/с, что хорошо согласуется со значением критической скорости (согласно выражению (6)) c порядка 200 м/с.

Выражение (10) с учетом (11), как и модель А.В. Корочкина [60], учитывает материальные параметры дорожного покрытия (угол внутреннего трения, коэффициент Пуассона). Однако, отличие в том, что она учитывает также и массу транспортного средства, т.к. полная деформация покрытия в вертикальном направлении ΔY зависит от массы, а также через R_{ϕ} учтен и радиус колеса. Недостаток же в том, что она не учитывает конструктивных параметров дорожной одежды (например, толщины слоев).

Сравнить расчеты коэффициента динамичности по двум вышерассмотренным моделям можно с помощью графика, представленного на рисунке 2. Можно видеть, что в пределах эксплуатационных скоростей значения коэффициента практически совпадают.

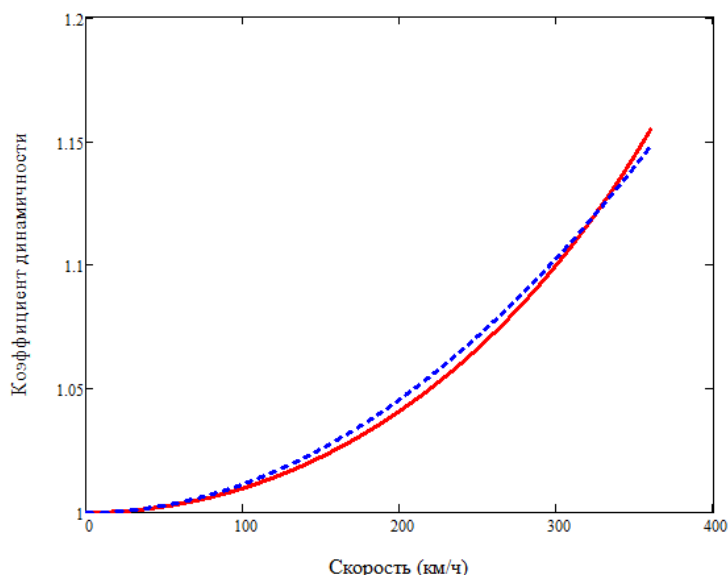


Рис. 2. Коэффициент динамичности, рассчитанный а) по формуле (7) – сплошная кривая и б) по формуле (10) – пунктирная кривая

Общим недостатком обеих представленных моделей – неучет степени поврежденности дорожного покрытия (впадины, выбоины, ямы и проч.). т.е. показателя ровности.

Проведем теперь анализ выражения (2). Будем считать, что динамическое воздействие на дорожное покрытие, определяемое силой p , в большей степени связано с колебательным движением неподдрессоренной массы m транспортного средства:

$$p = ma, \quad (12)$$

где a – вертикальное ускорение.

Максимальное значение ускорения:

$$a = 4\pi^2 n^2 A, \quad (13)$$

где n – частота колебаний, A – амплитуда колебаний.

Очевидно, что частота и амплитуда колебаний связаны со степенью ровности дороги. Оценим частоту колебаний, опираясь на значение ровности k по вертикали (согласно нормативным документам, допустимое значение $k \leq 2,5$ м/км). Пусть в пределах участка дороги l укладывается N пятен контакта шины. Тогда частоту и амплитуду колебаний можно оценить, соответственно:

$$n = \frac{N/2}{t} = \frac{N/2}{l/v} = \frac{Nv}{2l}. \quad (14)$$

$$A = \frac{k}{N}. \quad (15)$$

Таким образом получим, что

$$p = \frac{\pi^2 N k m v^2}{l^2}. \quad (16)$$

Отметим, что приведенная формула учитывает степень ровности дороги (через значение k) и конструктивную особенность транспортного средства – число пятен контакта шины N .

С учетом (16) формула для коэффициента динамичности (2) приобретает вид:

$$\mu = 1 + \frac{\pi^2 N k m}{g l^2 M} v^2, \quad (17)$$

где $\frac{m}{M}$ – отношение неподрессоренной и полной массы транспортного средства (например, для грузового транспортного средства для задней оси отношение $\frac{m}{M} = 0.02 \div 0.03$).

Приведенная в ОДМ 218.11.001-2015 на стр. 52 типовая формула (6.25) для расчета коэффициента динамичности:

$$K_d = 1 + \frac{2\pi^2 v^2 \delta}{g l} \cdot \frac{Q_k}{Q_{пр} + Q_k}, \quad (18)$$

где δ – вертикальный размер неровности; l – длина участка неровности; $Q_{пр}$, Q_k – поддрессоренная и неподрессоренная массы транспортного средства.

Сходство формул (17) и (18) очевидно. Но, однако, формула (18) не выдерживает проверки по размерности, т.к. получится, что K_d не безразмерная величина, а измеряется в метрах. Скорее всего, это просто опечатка и для l пропущена степень 2. Достоинством же формулы (18) по сравнению с вышерассмотренными, то что она учитывает геометрию неровности дорожного покрытия (длину и вертикальный размер).

На дорожных покрытиях могут встречаться локальные неровности со средней глубиной порядка $\delta = 8$ мм и продольным размером порядка $l = 0.5$ м. Расчеты по формуле (18) (с исправленным l^2) показывают, что при скоростях более 50 км/ч коэффициент динамичности принимает значения более 1.3 (нормативное значение). Формулу (18) можно рекомендовать для расчета динамических перегрузок на локальных неровностях.

Значения коэффициента динамичности, рассчитанные по формуле (17) приведем на графике (рис. 3).

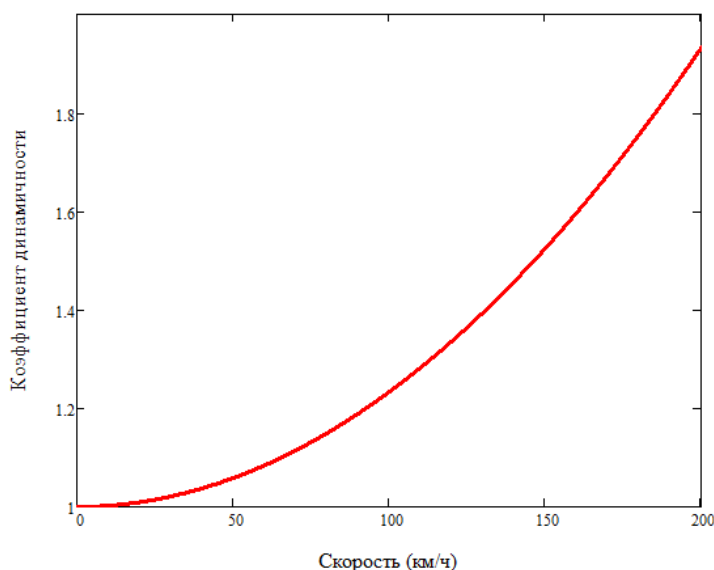


Рис. 3. Коэффициент динамичности, вычисленный по формуле (17) (рассчитано для $m/M = 0.03$)

В расчетах нагрузки на дорожную конструкцию в отечественных документах нормативным считается коэффициент динамичности равный 1.3. Из (17) можно видеть, что при увеличении загрузки транспортного средства коэффициент динамичности уменьшается, что связано с уменьшением отношения $\frac{m}{M}$. Значение коэффициента динамичности $\mu = 1.3$ для $\frac{m}{M} = 0.03$ достигается при скорости порядка 110 км/ч, а для $\frac{m}{M} = 0.02$ – при скорости порядка 140 км/ч.

В ОДМ 218.11.001-2015 отмечается, что при увеличении скорости движения вначале наблюдается быстрый рост коэффициента динамичности, переходящий постепенно в замедленный (см. рис. 4).

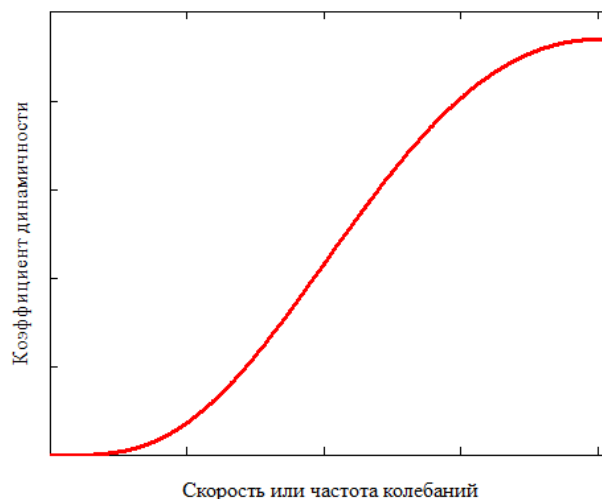


Рис. 4. Характер зависимости коэффициента динамичности от скорости (частоты колебаний неподрессоренной массы) транспортного средства (согласно ОДМ 218.11.001-2015)

Модель, отраженная формулами (17) и (18), может давать только параболический рост коэффициента, т.к. для заданных условий (конкретной дороги) переменной величиной является только квадрат скорости. Т.е. с увеличением скорости будет происходить все ускоряющийся рост коэффициента динамичности. Это не согласуется с отмеченным в ОДМ 218.11.001-2015 характером поведения коэффициента динамичности в зависимости от скорости.

Модели, отраженные в формулах (7) и (10), тоже явно не дают такого результата. Однако, известно, что с увеличением скорости модуль упругости дорожного покрытия растет [75], а деформация в силу меньшего времени воздействия уменьшается [64]. Тогда модели (7) и (10) в качестве переменных уже имеют не только квадрат скорости и, соответственно, зависимость коэффициента динамичности от скорости уже не будет «однозначно параболической».

Поведение коэффициента динамичности в зависимости от скорости, проиллюстрированное на рисунке 4, на качественном уровне можно объяснить ее резонансным характером воздействия транспортного средства на дорогу при колебаниях его неподрессоренной массы, возникающих в результате движения по неровному дорожному покрытию. Вначале при увеличении скорости амплитуда вынужденных колебаний неподрессоренной массы относительно поддрессоренной быстро растет. При дальнейшем увеличении скорости и, соответственно, при увеличении частоты колебаний и приближении ее значения к резонансной скорость роста амплитуды начинает уменьшаться. Такая зависимость амплитуды колебаний от скорости и отражается на характере зависимости от нее коэффициента динамичности (рис. 4).

4. Заключение

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Существующие на данный момент формулы для расчета коэффициента динамичности не учитывают комплексно всех факторов, влияющих на него (геометрические и материальные параметры дорожной конструкции, конструктивные параметры транспортного средства, состояние дорожного покрытия, геометрию неровностей и др.). Поэтому необходимо совершенствование существующих моделей. Например, возможно тривиальное объединение существующих формул (7), (10), (17) и (18) путем нахождения среднего геометрического.

2. Формулы для расчета коэффициента динамичности (7), (10) и (17) дают некоторое усредненное для определенного однородного по показателям участка дороги значение коэффициента. Соответственно данные, полученные с помощью этих выражений позволяют проводить сравнительный анализ разных участков автомобильных дорог по уровню динамического воздействия. Динамические перегрузки, связанные с локальными неровностями, лучше оценивать с помощью формулы (18), которая учитывает геометрию неровностей и, таким образом, позволяет прогнозировать развитие и накопление деформаций дорожного покрытия.

Литература

- [1]. Liu P., Wang D., Oeser M. Application of semi-analytical finite element method to analyze asphalt pavement response under heavy traffic loads //

References

- [1]. Liu P., Wang D., Oeser M. Application of semi-analytical finite element method to analyze asphalt pavement response under heavy traffic loads. Journal of traffic and transportation engineering

- Journal of traffic and transportation engineering (english edition). 2017. Vol. 4. No. 2. Pp. 206-214. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.03.003.
- [2]. Yang W., Tiecheng S., Yongjie L., Chundi S. Prediction for Tire-Pavement Contact Stress under Steady-State Conditions based on 3D Finite Element Method // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2016. Vol. 9. No. 4. Pp. 17-25.
 - [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. 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]. Cao P., Zhou C., Feng D., Zhao Y., Huang B. A 3D Direct Vehicle-Pavement Coupling Dynamic Model and Its Application on Analysis of Asphalt Pavement Dynamic Response // Mathematical Problems in Engineering, vol. 2013, Article ID 394704, 8 pages, 2013. DOI: 10.1155/2013/394704.
 - [8]. Pascale P., Doré G., Prophète F. Characterization of tire impact on the pavement behavior. 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., luele 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- (english edition). 2017, vol. 4. no. 2, pp. 206-214. DOI: 10.1016/j.jtte.2017.03.003.
 - [2]. Yang W., Tiecheng S., Yongjie L., Chundi S. Prediction for Tire-Pavement Contact Stress under Steady-State Conditions based on 3D Finite Element Method. Journal of Engineering Science and Technology Review. 2016, vol. 9, no. 4, pp. 17-25.
 - [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. 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]. Cao P., Zhou C., Feng D., Zhao Y., Huang B. A 3D Direct Vehicle-Pavement Coupling Dynamic Model and Its Application on Analysis of Asphalt Pavement Dynamic Response. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2013, Article ID 394704, 8 pages, 2013. DOI: 10.1155/2013/394704.
 - [8]. Pascale P., Doré G., Prophète F. Characterization of tire impact on the pavement behavior. 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., luele 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 ulicakh gorodov i sel'skikh poseleniy [Providing traction of wet asphalt-concrete pavements of city and country roads]. Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-doroznoy 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 mezhdz dozhdepriemnikami livnevoy kanalizacii gorodskikh dorog i ulitc [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

- 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.M., Chabot A. Effect of bituminous pavement structures on the rolling resistance // Proc., 11th Int. Conf. on Asphalt Pavements. 2010. Pp. 73–82.
- [19]. Louhghalam A., Akbarian M., Ulm F. J. Flügge'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. Sauzérat 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]. Shchepeteva L.S., Agapitov D.A., Tyurykhanov K.Yu. Ustoychivost' asfal'tobetona k koleebrazovaniyu [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 koleebrazovaniyu [Increasing the resistance of asphalt concrete to the rutting]. Effektivnye stroitel'nye kompozity: nauch.-prakt. konf. k 85-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora 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)

- 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]. Щелетева Л.С., Агапитов Д.А., Трюханов 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., Золотарев В.А. Испытание колеей // 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., 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. BGTU im. V.G. Shukhova. 2015, pp. 771-774. (In Russian)
- [31]. Yakovleva M.I., Zolotarev V.A. Ispytaniye koleey [Test track]. Avtomobil'nyye 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. Sovremennyye 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 [Magazine of Civil Engineering]. 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 zavedeniy. 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., 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

- 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., В Шкляев.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 альbedo 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., Курбангалеев 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]. Дмитриев И.И., Кириллов А.М. Умные дороги и Интеллектуальная транспортная система // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. №2 (53). С. 7-28.
- [54]. Mallick R.B., Chen B.-L., Bhowmick S., Hulen M.S. Capturing solar energy from asphalt pavements // *International symposium on asphalt pavements and 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: 10.1016/j.proeng.2016.10.002.
- [48]. Isakov S.V., V Shklyayev.A. Opredeleniye summarnogo vliyaniya antropogennozmennykh poverkhnostey na vozniknoveniye effekta «gorodskogo ostrova 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 kraja: sb. nauch. tr. Perm, PSU, 2011, pp. 59-63. (In Russian)*
- [50]. Adamov G.E., Grebennikov E.P., Kurbangaleev 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 primenenie «umnykh» materialov): tezisы 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 ehkstrema'l'nykh usloviy (sozdanie i primenenie «umnykh» materialov): tezisы 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 basis for spectrally controlled materials]. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering]. 2011, no. 6, pp. 29-34. (In Russian)
- [53]. Dmitriyev I.I., Kirillov A.M., Umnyye dorogi i Intellekturnaya transportnaya sistema [Smart roads and Intelligent transport system]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2017, no. 2 (53), pp. 7-28. (In Russian)
- [54]. 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.
- [55]. 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.
- [56]. Smirnov A.V., Aleksandrov A.S. Mekhanika dorozhnykh konstruksiy [Mechanics of road structures]. Omsk, SibADI, 2009,

- environment, international society for asphalt pavements. Zurich, Switzerland. 2008. Pp. 161–172.
- [55]. 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.
- [56]. Смирнов А.В., Александров А.С. Механика дорожных конструкций. Омск: СИБАДИ, 2009. 211 с.
- [57]. Завьялов М.А. Некоторые закономерности процесса деформирования дорожного покрытия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. №1. С.94-97.
- [58]. 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.
- [59]. 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.
- [60]. Корочкин А.В. Расчет жесткой дорожной одежды с учетом воздействия движущегося транспортного средства // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 2. С. 8-10.
- [61]. Васильев Ю.Э., Понарин Г.А., Рассохин М.В. Определение коэффициента динамичности при взаимодействии шипа с дорожным асфальтобетонным покрытием // Ассоциация исследователей асфальтобетона: сб. статей и докладов Ежегодной научной сессии. 2017. С. 79-84.
- [62]. Питухин А.В., Петров А.Н. Влияние ровности покрытий на работоспособность автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 5. С. 71-75.
- [63]. Конорев А.С. Определение величины динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию для расчета значений коэффициентов приведения // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 4 (24). С. 118-127.
- [64]. Кириллов А.М. Учет скорости движения транспортных средств в расчетах нежестких дорожных одежд // Вестник МГСУ. - 2018. - Т. 13. - № 8 (119). С. 959-972. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.959-972.
- [65]. Кокоева Н.Е., Кочетков А.В., Янковский Л.В., Волков Г.Н. // Прямой метод расчета ускорения колеса транспортного средства с учетом геометрии неровности автомобильной дороги (метод И.П. Рабиновича) // Грузовик. 2014. № 3. С. 17-22.
- [66]. Elallak Ja.M., Ahmed T.M.M., Demeschkin V. Climatic conditions and traffic loads operation of highways in the Republic of Iraq // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2015. № 1 (111). С. 74-78.
- [67]. Лушников Н.А., Лушников П.А., Волков А.Б., Абулкасимов А.О., Кондрашин Д.И. Об оценке коэффициента динамичности // Дороги и мосты. 2016. № 2 (36). С. 8.
- [68]. Углова Е.В., Конорев А.С., Акулов В.В. 211 p. (In Russian)
- [57]. Zavyalov M. A. Nekotoryye zakonomernosti protsessa deformirovaniya dorozhnogo pokrytiya [Some regularities of the process of deformation of the road surface]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News universities. Construction]. 2007. no. 1, pp. 94-97. (In Russian)
- [58]. 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.
- [59]. 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.
- [60]. Korochkin A.V. Raschet zhestkoy dorozhnoy odezhdy s uchetoм 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)
- [61]. Vasil'yev Yu.E., Ponarin G.A., Rassokhin M.V. Opredeleniye koefitsiyenta dinamichnosti pri vzaimodeystvii shipa s dorozhnym asfal'tobetonnyм pokrytiem [Determination of the dynamic factor in the interaction of a spike with a road asphalt pavement]. Assotsiatsiya issledovatelye asfal'tobetona. Sbornik statey i dokladov Yezhegodnoy nauchnoy sessii [Association of Asphalt Concrete Researchers. Collection of articles and reports of the Annual Scientific Session]. 2017, pp. 79-84. (In Russian)
- [62]. Pitukhin A.V., Petrov A.N. Vliyaniye rovnogo pokrytiya na rabotosposobnost' avtomobil'nykh dorog [The effect of evenness of coatings on the performance of roads]. Transportnoye delo Rossii [Transport business of Russia]. 2010, no. 5, pp. 71-75. (In Russian)
- [63]. Konorev A.S. Opredeleniye velichiny dinamicheskogo vozdeystviya transportnykh sredstv na dorozhnyuyu konstruktsiyu dlya rascheta znacheniy koefitsiyentov privedeniya [Determination of the dynamic impact of vehicles on the road structure for calculating the values of the adduction factors]. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture]. 2011, no. 4 (24), pp. 118-127. (In Russian)
- [64]. 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, no. 8 (119), pp. 959-972. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.959-972.
- [65]. Kokodeeva N.E., Kochetkov A.V., Yankovskiy L.V., Volkov G.N. Pryamoy metod rascheta uskoreniya koleasa transportnogo sredstva s uchetoм geometrii nerovnosti avtomobil'noy dorogi (metod I.P. Rabinovicha) [Direct method for calculating the acceleration of a vehicle's wheel, taking into account the geometry of roughness of the road (IP Rabinovich's method)]. Gruzovik [Truck]. 2014, no. 3, pp. 17-22. (In Russia)
- [66]. Elallak Ja.M., Ahmed T.M.M., Demeschkin V. Climatic conditions and traffic loads operation of highways in the Republic of Iraq. Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury [Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture]. 2015. no. 1 (111), pp. 74-78. (In Russian)
- [67]. Lushnikov N.A., Lushnikov P.A., Volkov A.B., Abulkasimov A.O., Kondrashin D.I. Ob otsenke koefitsiyenta dinamichnosti [About the estimation of the dynamic factor]. Dorogi i mosty [Roads and bridges]. 2016, no. 2 (36), pp. 8.
- [68]. Uglova E.V., Konorev A.S., Akulov V.V. Opredeleniye summarnykh koefitsiyentov privedeniya transportnykh sredstv k raschetnoy nagruzke s uchetoм ровnosti pokrytiya, skorosti dvizheniya i osevoy nagruzki transportnykh sredstv [Determination

- Определение суммарных коэффициентов приведения транспортных средств к расчетной нагрузке с учетом ровности покрытия, скорости движения и осевой нагрузки транспортных средств // Интернет-журнал Науковедение. 2012. № 4 (13). С. 215.
- [69]. Углова Е.В., Конорев А.С., Конорева О.В. Учет воздействия транспортного потока при расчете дорожной конструкции на стадии проектирования и определения остаточного ресурса дорожных одежд на стадии эксплуатации // Интернет-журнал Науковедение. 2012. № 4 (13). С. 220.
- [70]. Углова Е.В., Конорев А.С. Учет динамического воздействия транспортных средств на нежесткие дорожные покрытия // Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 1 (56). С. 21-24.
- [71]. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска. В 2-х ч. Ч. 1,2. Саратов: СГТУ, 1994. 184 с., 232 с.
- [72]. Столяров В.В. Теория риска в проектировании плана дороги и организации движения. Саратов: СГТУ, 1995. 84 с.
- [73]. Смирнов А.В. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. Западно-Сибирское книжное издательство, 1975. 184 с.
- [74]. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.03. Москва, 1982. 535 с.
- [75]. Кириллов А.М. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 70-76. DOI: 10.5862/MCE.54.8.
- of the total coefficients of bringing vehicles to the calculated load, taking into account the evenness of the coverage, speed and axial load of vehicles]. *Internet-zhurnal Naukovedeniye* [Internet Journal Science of science]. 2012, no. 4 (13), pp. 215. (In Russian)
- [69]. Uglova E.V., Konorev A.S., Konoreva O.V. Uchet vozdeystviya transportnogo potoka pri raschete dorozhnoy konstruksii na stadii proyektirovaniya i opredeleniya ostatochnogo resursa dorozhnykh odezhd na stadii ekspluatatsii [Consideration of the impact of traffic flow when calculating the road structure at the design stage and determining the residual resource of pavement at the operation stage]. *Internet-zhurnal Naukovedeniye* [Internet Journal Science of science]. 2012, no. 4 (13), pp. 220. (In Russian)
- [70]. Uglova E.V., Konorev A.S. Uchet dinamicheskogo vozdeystviya transportnykh sredstv na nezhestkiye dorozhnyye pokrytiya [Account the dynamic impact of vehicles on non-rigid road surfaces]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli* [Science and technology in the road industry]. 2011. no. 1 (56), pp. 21-24.
- [71]. Stolyarov V.V. Proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog s uchetoм teorii riska. Chasti 1 i 2 [Design highways with using the risk theory. Parts 1 and 2]. *Saratov, SGTU*, 1994, 184 p., 232 p. (In Russian)
- [72]. Stolyarov V.V. Teoriya riska v proyektirovanii plana dorogi i organizatsii dvizheniya [Risk theory in road design and traffic management]. *Saratov, SGTU*, 1995, 84 p. (In Russian)
- [73]. Smirnov A.V. Dinamika dorozhnykh odezhd avtomobil'nykh dorog [Dynamics of road pavement]. *Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo*, 1975, 184 p. (In Russian)
- [74]. Radovskij B.S. Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i rascheta nezhestkih dorozhnykh odezhd na vozdejstvie podvizhnykh nagruzok. diss... d-r tehn. nauk [Theoretical foundations of the design and calculation of non-rigid pavements on the impact of moving loads. Dissertation]. *Kiev*, 1982, 535 p. (In Russian)
- [75]. Kirillov A.M. Modelirovaniye izmeneniya modulya uprugosti asfal'tobetona pri nagruzhenii [Modeling of change in asphalt concrete dynamic modulus]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering]. 2015, no. 2 (54), pp. 70–76. (In Russian). avtopeDOI:10.5862/MCE.54.8.

Контактная информация

1.* kirill806@gmail.com (Кириллов Андрей Михайлович, старший преподаватель)

Contact information

1.* kirill806@gmail.com (Kirillov Andrey, Senior Lecturer)

© Кириллов А.М., 2020