DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-6-48-68

*Плеханова С.В., кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Россия,
Виноградова Н.А., * кандидат технических наук, старший преподаватель,
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, Россия*

*Ответственный автор E-mail: VinogradovaNA@mgsu.ru

ЭКСПЕРТИЗА КАЧЕСТВА НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРИМЕНЕНИИ ОБОРОТНЫХ РЕСУРСОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Аннотация: преимуществом показателя равенства является относительная простота определения и возможность периодического контроля. По показателю равенства можно назначать ремонты и прогнозировать срок эксплуатации, оценивать состояние дорожной одежды. Экспериментальными исследованиями доказано, что существует связь между ровностью покрытия и прочностью дорожной одежды, что открывает возможность определения прочности конструкции нежестких дорожных одежд, которая обеспечивает заданную ровность покрытия на последний год эксплуатации перед капитальным ремонтом. Вопрос оценки влияния неровности покрытия автомобильных дорог на процессы развития и накопления деформаций, изменения ровности покрытия в процессе эксплуатации остаются в значительной мере открытыми. Это связано с многофакторностью задачи прогнозирования равенства покрытия, поэтому целесообразно применять подходы, базирующиеся на методах прямых измерений. Большинство существующих моделей взаимодействия пневматического или жесткого колеса с покрытием разработаны для задач механики дорожной одежды или теории автомобиля, поэтому не могут быть однозначно применены для определения величины коэффициента динамичности. Существенным недостатком этих решений является недостаточный учет деформативных свойств (модуля упругости) дорожной одежды.

Ключевые слова: дорога, покрытие, стратегия, оборотный ресурс, транспорт

Введение

Когда транспортное средство движется на низких скоростях (от 20 км/ч до 30 км/ч), движение поддрессоренной массы, то есть кузова с грузом, и неподдрессоренной массы, то есть колес и осей, происходит одновременно и ускорение этих масс имеет одинаковые значения, которые стремятся к нулю, а вертикальное давление соответствует статической нагрузке [2] при увеличении скорости движения (от 40 км/ч до 60 М/Ч), колебания поддрессоренной массы наблюдаются на пружинах с частотой от 1 Гц до 2 Гц, что соответствует собственной частоте колебаний, сопровождается нарушением синхронности колебаний поддрессоренных и неподдрессоренных масс. Подпружиненная масса имеет большую амплитуду колебаний, которая может превышать высоту неровности. Это увеличивает динамическое воздействие [5].

В качестве расчетного коэффициента динамичности эксплуатируемых автомобильных дорог рекомендуется принимать значение максимального коэффициента динамичности заданной вероятности, полученное при моделировании динамического воздействия грузового транспортного средства при движении с заданной скоростью (80 км/ч) [19].

При моделировании динамического воздействия транспортных средств на участках с неудовлетворительной плоскостностью (скорость грузового транспортного средства составляет 80 км/ч, средний коэффициент динамичности превышает 1,1, максимальный коэффициент динамичности равен 1,6) рекомендуется проверять условия непрерывного движения на заданных скоростных режимах. Отрицательное значение силы контакта между колесом и шоссе указывает на нарушение режима непрерывного движения [10]. Если коэффициент динамичности превышает 2,0, то можно отделить колеса транспортного средства от поверхности проезжей части.

Реальные дорожные сооружения состоят из нескольких слоев, которые существенно отличаются по своим свойствам. Поэтому некоторые решения динамики пластин на упругих основаниях представляют интерес [13]. Для описания прогибов и напряжений в асфальтобетонных и цементобетонных покрытиях целесообразно применять теории, изложенные в работах ряда исследователей. В то же время, если ровность покрытий неудовлетворительна, что способствует возникновению вибраций автомобиля, или ухудшается со временем под воздействием воздействий температуры воды, целесообразно вводить коэффициенты динамичности в расчеты напряжений и прогибов [4].

Динамические напряжения имеют экстремальные зоны с увеличением скорости транспортного средства, и коэффициент динамичности напряжений приближается к двум. Это явление объясняется резонансом в

колебаниях автомобиля, что приводит к значительному увеличению динамического давления на покрытие [7].

Прогибы толстых пластин не меняются, так как уменьшение времени нагрузки компенсируется увеличением за счет увеличения значений динамической нагрузки. Это было экспериментально установлено для жестких цементно-бетонных покрытий [11]. В дальнейшем на скоростях более 80 км/ч процесс взаимодействия движущейся нагрузки и покрытия превращается в шок. В то же время отвлекающие факторы и напряженность усиливаются. Исследования установили:

- при движении двухосных транспортных средств по цементно-бетонным поверхностям на рабочих скоростях необходимо рассматривать последовательное ударение осей как единственный процесс удара [9]. На поверхностях с низкой жесткостью (нежесткие дорожные поверхности) влияние осей следует считать независимым;

- Отклонения дорожного покрытия уменьшаются по мере увеличения скорости автомобилей, но когда они достигают 50 км / ч, они немного увеличиваются из-за динамического воздействия автомобиля;

- динамические напряжения изгиба от одного приложения нагрузки 40 КН достигают на плоских поверхностях от 1,0 МПа до 3,6 МПа, на неровных поверхностях - от 1,3 МПа до 5,0 МПа;

- максимальные динамические прогибы покрытий составляют от 0,10 мм до 0,15 мм при нагрузке 40 КН на колесо и скорости 70 км / ч. При скорости 50 км / ч прогибы варьируются от 0,10 мм до 0,35 мм. При этих значениях модуль упругости постоянен, то есть сохраняется непрерывность монолитной пластины и основания [3]. Однако метод расчета учитывает только инерционные свойства пластины и затухание вибраций в пластине. Инерционные характеристики основания не учитываются, что указывает на недостатки базовой модели, характеризующейся только коэффициентом кровати.

Заслуживают внимания результаты численного эксперимента, направленного на установление связи между показателями влияния транспортной нагрузки на дорожную одежду и формой неровностей [8]. В экспериментальных исследованиях форма неровности была принята как гладкая впадина, длина которой изменялась с 0,4 м до 1,5 м с шагом 0,1 м с значениями глубины (для любой фиксированной длины) от 0,01 м до 0,1 м с шагом 0,01 м. Скорость автомобиля была назначена в диапазоне от 10 км/ч до 200 км/ч с шагом 10 км/ч. Проведенный численный анализ позволил нам установить, что даже относительно слабая неровность покрытия (глубина 0,01 м и длина 1 м) при высоких скоростях движения приводит к увеличению пикового давления на покрытие почти в два раза. Максимальное давление в этом случае падает либо на саму неровность, либо на область, расположенную непосредственно за ней. Увеличение глубины неравенства или уменьшение его длины приводит к увеличению амплитуды силового воздействия [14]. Неровности покрытий также приводят к значительному расширению частотного спектра силового импульса, действующего на поверхность конструкции, не только вокруг нее, но и на достаточном расстоянии. По мере увеличения числа осей и усложнения конфигурации неравенства эта тенденция становится еще более выраженной. Поэтому при расчете и проектировании поверхности дороги следует учитывать особенности ее динамического состояния напряжения-деформации при наличии неровностей на поверхности [6].

Таким образом, вопрос о влиянии неровностей дорожного покрытия на процессы развития и накопления деформаций в настоящее время остается в значительной степени открытым [12]. Неровности покрытия приводят к значительному изменению закона распределения давления колеса на его поверхности. При этом наиболее важными факторами являются "пружины" автомобиля, а также параметры, определяемые скоростью движения и количеством осей автомобиля, формой неровностей и частотой их нахождения на поверхности покрытия.

Методы и материалы

С целью определения величины нагрузки на дорожную одежду процесс преодоления неровности транспортным средством предлагается разделить на два этапа:

- первый этап – контакт с неравенством и подъем на неравенство;
- второй этап – съезд с неравенства и «падение» на покрытие.

На первом этапе подъем на неровность предлагается рассматривать как движение по кривой определенного радиуса [15]. Модель продольного профиля покрытия с достаточно высокой точностью можно описать кривой определенного радиуса (рис. 1). Для этого ломаную линию микропрофиля в пределах неровности аппроксимирована полиномом третьей степени. Зная уравнение кривой, описывающей профиль покрытия, можно определить радиус ее кривизны в любой точке. Радиус кривизны профиля покрытия определяется по формуле:

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

где R – радиус кривизны профиля покрытия, м;

$k(x_0)$ – кривизны кривой профиля, m^{-1} .

Рис. 1. Схема подъема колеса на неровность в виде выпуклой неровности

V – скорость движения колеса; R – радиус кривизны профиля покрытия, $F_{ц}$ – центробежная сила

Fig. 1. The scheme of lifting the wheel on an unevenness in the form of a convex unevenness

V – the speed of the wheel; R – the radius of curvature of the coating profile, F_c – the centrifugal force

Тогда кривизна линии профиля любой точки профиля может быть найдена по известной зависимости:

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

где $y''(x_0)$ – вторая производная функции, описывающей продольный профиль;

$y'(x_0)$ – первая производная функции, описывающей продольный профиль.

Дополнительная нагрузка на дорожную одежду равна центробежной силе, которая появляется вследствие движения по криволинейной траектории [1]. Центробежная сила при этом будет равняться:

$$F_{ц} \frac{mV^2}{1000R} = \frac{Q_k V^2}{1000gR} \quad (3)$$

где $F_{ц}$ – центробежная сила, действующая на покрытие, при движении по кривой, кН;

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

V – скорость движения транспортного средства, м/с;

Q_k – вертикальная нагрузка на колесо, кН;

g – ускорение свободного падения, m/s^2 .

Тогда коэффициент динамичности будет равен:

$$K_{\partial} = \frac{Q_k + F_{ц}}{Q_k} = 1 + \frac{V^2}{1000gR} \quad (4)$$

где K_{∂} – коэффициент динамичности нагрузки.

На втором этапе преодоления неравенства (участок «падение») предлагается рассчитывать координату точки «падения» в зависимости от скорости транспортного средства и уклона поверхности (рис. 2). В соответствии с предложенной моделью колесо падает на дно впадины на некотором расстоянии от середины впадины, которая зависит от скорости движения транспортного средства [18]. На силу удара влияет высота падения: чем больше высота падения, тем сильнее удар колеса о покрытие.

Непосредственно отрыва колеса не происходит, поскольку ходовая часть сразу прижимает колесо к поверхности покрытия. Удар о покрытие происходит в процессе разгрузки, возникающий, когда колесо попадает в неравенство, а кузов продолжает движение по параболической кривой, тем самым уменьшая нагрузку на колесо, и на следующий нагрузки, когда вес кузова снова переносится на колесо, падая с

определенной высоты, тем самым образуя динамическую нагрузку [16]. Наибольшая высота падения соответствует середине впадины.

Рис. 2. Схема "падения" колеса после преодоления неравенства
A – вершина неравенства; B – точка «падения»; V – скорость движения колеса;
 y_0 – высота «падения»; x_0 – дальность «падения»

Fig. 2. The scheme of the “fall” of the wheel after overcoming inequality
A – the top of the inequality; B - the point of “fall”; V – the speed of the wheel;
 y_0 – the height of the “fall”; x_0 - the range of the “fall”

В процессе анализа установлено, что место возникновения динамических нагрузок может быть расположено до середины впадины или после [20].

С помощью программного обеспечения Microsoft Excel построены графики траектории движения кузова во впадину, и графики впадин в виде полинома третьей степени (рис. 3).

Рис. 3. Схема "падения" колеса во впадину
Fig. 3. The scheme of the “fall” of the wheel into the hollow

Поскольку угол неровности очень мал, им можно пренебречь при расчетах, а траекторию движения колеса автомобиля на этапе «падения» можно условно рассматривать как траекторию тела, выпущенного горизонтально:

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

где y – координата оси ординат, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

x – координата оси абсцисс, м;

V – скорость движения транспортного средства, м/с.

Чтобы определить место возникновения динамических нагрузок, необходимо решить систему уравнений (6), описывающие траекторию движения колеса и форму неровности, относительно продольной координаты:

$$\begin{cases} y = -\frac{g}{2V^2}x^2; \\ y = ax^3 + bx^2 + cx + d \end{cases} \quad (6)$$

где a, b, c, d – коэффициенты, описывающие профиль покрытия (форму неровности).

Точка пересечения двух функций, описывающих траекторию движения колеса и форму неровности, является местом возникновения максимальных динамических нагрузок – динамического удара [17]. Имея горизонтальную координату, подставим ее в одно из уравнений и найдем величину (y). Вычислив разницу между высотными отметками точки начала неравенства (для случая неравенства в форме впадины) и точки «падения», можно определить высоту «падения» (h). Высота «падения» является определяющим параметром при расчете коэффициента динамичности.

Результаты и обсуждения

Для дальнейшего расчета коэффициента динамичности рассмотрим схему динамической нагрузки на дорожную одежду на этапах подъезда к впадине и «падения» (рис. 4).

Рис. 4. Схема динамической нагрузки: а) этап подъезда к впадине; б) этап «падения»
 Q_k – вертикальная нагрузка на колесо; $V_{гор}$ – горизонтальная скорость движения транспортного средства; h – высота «падения»; $O_{ст}$ – центр колеса в статическом положении; $O_{пад}$ – центр колеса при «падении»; $U_{max} + \Delta_{д.о.}$ – суммарный прогиб покрытия и колеса

Fig. 4. Dynamic load diagram: a) the stage of approach to the hollow; b) the stage of “fall”

Q_k – vertical load on the wheel; V_{hor} – horizontal speed of the vehicle; h – the height of the “fall”; O_{st} – the center of the wheel in a static position; O_{fall} – the center of the wheel at “fall”;

$U_{max} + \Delta_{д.о.}$ – total deflection of the coating and wheel

Согласно расчетной схеме (рисунок 4) колесо общим нагрузкой (Q_k) «падает» во впадину глубиной (h). Рассмотрим основные этапы взаимодействия колеса с покрытием.

На первом этапе колесо деформируется (сжимается) на величину (U_{max}), которая состоит из статической деформации колеса и дополнительной деформации, которая возникает вследствие динамической нагрузки:

$$U_{max} = U_{\delta} + \Delta_{cm} \quad (7)$$

где U_{max} – полная деформация колеса, м;

U_{δ} – дополнительная деформация колеса вследствие динамической нагрузки, м;

c_{cm} – статическая деформация колеса от нагрузки Q_k , м.

Статическая деформация зависит от радиальной жесткости шины и нагрузки на колесо и определяется по формуле:

$$\Delta_{cm} = \frac{Q_k}{c_k} \quad (8)$$

где c_k – радиальная жесткость шины, кН/м.

На втором этапе после деформирования колеса динамическая нагрузка (G_{δ}) передается на дорожное покрытие. Максимальная динамическая нагрузка равна:

$$G_{\delta} = c_k U_{max} = c_k (U_{\delta} + \Delta_{cm}) \quad (9)$$

где G_{δ} – динамическая нагрузка на дорожное покрытие, кН.

От динамической нагрузки дорожная одежда деформируется на величину ($\Delta_{\delta.o.}$), определяемая по формуле теории расчета дорожной одежды:

$$\Delta_{\delta.o.} = \frac{PD(1-\mu^2)}{y_{заг}} \quad (10)$$

где $\Delta_{\delta.o.}$ – деформация дорожной одежды от динамической нагрузки, м;

P – удельное давление от штампа, равновеликого оттиска колеса, МПа;

D – диаметр отпечатка колеса от движущегося автомобиля, м;

μ – коэффициент Пуассона;

Езаг – общий эквивалентный модуль упругости конструкции дорожной одежды, МПа.

Общее перемещение центра тяжести колеса при «падении» во впадину глубиной (h) составляет:

$$H = h + \Delta_{\delta.o.} + U_{max} \quad (11)$$

где H – общее перемещение центра тяжести колеса, м;

h – глубина впадины, м.

Энергия деформирования колеса (W_k) равна работе силы динамической нагрузки (G_{δ}) на пути перемещения (U_{max}):

$$W_k = G_{\delta} U_{max} = c_k (U_{\delta} + \Delta_{cm})^2 \quad (12)$$

где W_k – энергия деформирования колеса, кН м.

Энергия деформирования дорожной одежды равна:

$$W_{\delta.o.} = G_{\delta} \Delta_{\delta.o.} = c_k (U_{\delta} + \Delta_{cm}) \Delta_{\delta.o.} \quad (13)$$

где $W_{\delta.o.}$ – энергия деформирования дорожной одежды, кН м.

Энергия "падения" колеса во впадину глубиной (h) с деформированием колеса и дорожной одежды на величину ($W_{max} + \Delta_{\delta.o.}$) составляет:

$$W_{пад} = Q_k (h + U_{max} + \Delta_{\delta.o.}) = Q_k (h + U_{\delta} + \Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}) \quad (14)$$

где $W_{пад}$ – энергия "падения" колеса, кН м.

По закону сохранения энергии:

$$W_{пад} = W_k + W_{\delta.o.} \quad (15)$$

$$Q_k (h + U_{\delta} + \Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}) = c_k (U_{\delta} + \Delta_{cm}) \Delta_{\delta.o.} (U_{\delta} + \Delta_{cm})^2 \quad (16)$$

Выразив (Q_κ) с (8) после преобразований (16) получим уравнение:

$$c_\kappa (U_\delta^2 + U_\delta \Delta_{cm} + U_\delta \Delta_{\delta.o.} - h \Delta_{cm}) = 0 \quad (17)$$

Поскольку у (17) $c_\kappa \neq 0$, то:

$$U_\delta^2 + U_\delta (\Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}) - h \Delta_{cm} = 0 \quad (18)$$

Решив квадратное уравнение (18) относительно (U_δ) , получаем:

$$U_\delta = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}}{2}\right)^2 + h \Delta_{cm}} - \frac{\Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}}{2} \quad (19)$$

Коэффициент динамичности на участке «падение» определяется по формуле:

$$K_\delta = \frac{G_\delta}{Q_\kappa} = \frac{G_\delta}{c_\kappa \Delta_{cm}} = \frac{U_\delta = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}}{2}\right)^2 + h \Delta_{cm}} - \frac{\Delta_{cm} + \Delta_{\delta.o.}}{2} + \Delta_{cm}}{\Delta_{cm}} \quad (20)$$

При ударе не вся энергия «падения» расходуется на деформирование колеса и дорожной одежды. Мерой потери энергии является коэффициент восстановления (e) . Если давление в шине находится в диапазоне от 0,8 МПа до 0,9 МПа, то величина коэффициента восстановления составляет от 0,86 до 0,88 соответственно.

Как известно из теории удара, на значение коэффициента динамичности влияет коэффициент приведения массы системы до точки удара, поэтому, учитывая разницу между массой транспортного средства и массой дорожной одежды, что вовлекается в процесс деформирования, модель (20) должна учитывать коэффициент приведения массы системы к точке удара.

Для расчета коэффициента уменьшения массы системы до точки удара мы используем решение задачи расчета давлений, передаваемых слоями друг другу при воздействии покрытия транспортной нагрузки, используем схему проектирования в виде пятислойной системы (рис. 5).

Слои покрытия воспринимают давление (p_0) переданное колесом на площадку диаметром (D_0) , и перераспределяют давление по поверхности верхнего слоя основания. В результате основа воспринимает давление интенсивностью (p_1) , что передается покрытием по площадке диаметром (D_1) . По глубине покрытия происходит рассеивание напряжений вертикального сжатия от величины (p_0) до значения (p_1) на контакте покрытия и основы. Причиной уменьшения напряжений вертикального сжатия является увеличение по глубине диаметра площадки от величины (D_0) на поверхности до значения (D_1) на контакте покрытия и основы. Увеличение диаметра объясняется разрешением слоев покрытия, которая характеризуется углом рассеивания (α_1) .

Рис. 5. Схема проектирования для определения давления, передаваемого от структурных слоев дорожного покрытия к нижним слоям и поверхности первого этажа

θ – вектор скорости движения, м/с; p_0 – давление, передаваемое колесом автомобиля на покрытие, Па; D_0 – диаметр круга, равновеликого по площади отпечатку недвижимого колеса на покрытии, м; p_1, p_2, p_3 – давления, которые передаются слоями на нижний слой или почвенный подлог, Па; D_1, D_2, D_3 – диаметры окружностей, по которым давление распределено по поверхности конструктивных слоев и земляного полотна, м; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы распределения давления между слоями конструкции или вертикальные углы рассеивания напряжения давления в слое; 1 и 2 – соответственно верхний и нижний монолитные слои покрытия с имеющимся контактом; 3 и 4 – соответственно верхний и нижний базовые слои, которые распределяют давление по поверхности нижележащего слоя; 5 – дно дорожного полотна)

Fig. 5. Design scheme for determining the pressure transmitted from the structural layers of the pavement to the lower layers and the surface of the first floor

θ – motion velocity vector, m/s; p_0 – the pressure transmitted by the car wheel to the coating, давление, Pa; D_0 – the diameter of a circle equal in area to the imprint of an immovable wheel on the coating, m; p_1, p_2, p_3 – pressures that are transmitted by layers to the lower layer or soil forger, Pa; D_1, D_2, D_3 – the diameters of the circles along which the pressure is distributed over the surface of the structural layers and the roadbed, m; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – angles of pressure distribution between layers of the structure or vertical angles of pressure stress dissipation in the layer; 1 and 2 – the upper and lower monolithic layers of the coating with the existing contact, respectively; 3 and 4 – respectively, the upper and lower base layers, which distribute pressure over the surface of the underlying layer; 5 – the bottom of the roadway

Рассмотрим определение угла α_1 в монолитных слоях, работающих на сгиб. В случае если контакт между слоями обеспечен (D_1) (рис. 5), напряжение рассчитывают, как в одной плите. Поскольку монолитные слои работают на изгиб, то угол рассеивания напряжений α_1 должна зависеть от жесткости плиты. Тогда тангенс угла α_1 можно выразить отношением радиуса жесткости слоя (L) к толщине слоя (h_u). Отсюда угол рассеивания напряжений в монолитном слое определяется по формуле:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{L}{h_u} = \arctg \left[\sqrt[3]{\frac{E_s (1 - \mu_{оч}^2)}{6 E_{оч} (1 - \mu_d^2)}} \right] \quad (21)$$

где L – радиус жесткости слоя, м;

$h_{ш}$ – толщина слоя, м;

E_v и $E_{осн}$ – модуль упругости материала монолитного слоя (пакета слоев в случае обеспеченного контакта между ними) и общий модуль упругости слоистой основания, подстилающего монолитный слой, МПа;

μ_v и $\mu_{осн}$ – коэффициент Пуассона материала слоя и средневзвешенный по глубине конструкции коэффициент Пуассона.

Из-за перераспределения нагрузки по глубине на большую площадь вертикальные напряжения сжатия уменьшаются. На глубине (Z) полупространства или слоя диаметр распределения напряжения определяется:

$$D_z = D_x + 2Ztg\alpha = D_x + \left(1 + \frac{2Z}{D_x}tg\alpha\right) \quad (22)$$

где D_z – диаметр распределения напряжений на глубине Z от поверхности рассматриваемого слоя дорожной конструкции, м;

D_x – диаметр распределения нагрузки на поверхности рассматриваемого слоя дорожной конструкции, м;

Z – расстояние от поверхности рассматриваемого слоя дорожной конструкции до сечения, в котором определяется напряжение, м;

α – угол распределения напряжений в слое или полупространстве, град.

Для пакета монолитных слоев (рис. 5) угол (α) в (22) определяется как угол (α_1) по формуле (21).

Определим диаметр распределения давления в нижней части пола. Динамическая нагрузка, действующая на дорожную одежду, перемещается по поверхности. Верхний слой конструкции представляет собой пластину цилиндрической жесткости:

$$C_1 = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)} \quad (23)$$

где C_1 – цилиндрическая жесткость верхнего слоя, МПа·м;

E_1 – модуль упругости верхнего слоя, МПа;

h_1 – толщина верхнего слоя, м;

μ_1 – коэффициент Пуассона верхнего слоя.

Радиус жесткости плиты, расположенной на упругой основе, определяется в соответствии с зависимостью:

$$l = \sqrt[4]{\frac{C_1}{k}} \quad (24)$$

где l – радиус жесткости плиты, лежащей на упругой основе;

k – коэффициент постели.

Величина коэффициента постели для конструкции пола может определяться условием, что эластичное полупространство практически не сжимается. В этом случае, если вы знаете модуль упругости на поверхности дорожной кровати, вы можете определить коэффициент кровати следующим образом:

$$k = \frac{E_2}{h_2(1 - \mu_2^2)} \quad (25)$$

где E – модуль упругости почвенного основания, МПа;

h_2 – мощность сжатой толщи основания, м;

μ_2 – коэффициент Пуассона почвенного основания.

Радиус зоны деформирования в плане равен:

$$R = 4\sqrt[4]{\frac{E_1 h_1^3 h_2 (1 - \mu_2^2)}{12 E_2 (1 - \mu_1^2)}} \quad (26)$$

где R – радиус зоны деформирования в плане, м;

Матрица конструкции дороги представляет собой конусный пень (рис. 6). Верхняя часть конуса ограничена поверхностью покрытия, которая в плоскости имеет площадь окружности с радиусом (R) (26). Нижнее основание конуса имеет форму круга. Радиус нижней базовой окружности равен:

$$R_1 = R + h_2 \operatorname{tg} \varphi \quad (27)$$

где R_1 – радиус окружности нижнего основания, м;

φ – угол распределения давления с учетом угла внутреннего трения грунта насыпи, который для песков, из которых возводится насыпь, составляет от 10° до 45° , град.

Рис. 6. Схема определения размеров массива дорожной конструкции, вовлеченная в колебания
 h_1 – толщина дорожной одежды, а h_2 – рабочий слой земляного полотна

Fig. 6. The scheme for determining the dimensions of an array of road structures involved in fluctuations
 h_1 – the thickness of the pavement, and h_2 – the working layer of the roadway

Согласно теории динамической нагрузки коэффициент приведения массы системы дорожной одежды до точки удара определяется по формуле:

$$\beta = \frac{\int_0^h \gamma \lambda_c^2(x) F(x) dx}{\lambda_c Q} \quad (28)$$

где β – коэффициент приведения массы системы к точке удара;

h – толщина дорожной одежды, см;

γ – средняя плотность дорожной одежды, кН/см³;

λ_c – статическое перемещение в точке удара, см:

$$\lambda_c = P \left(\frac{h_1}{E_1 F_1} + \frac{h_2}{E_2 F_2} + \frac{h_3}{E_3 F_3} \right) \quad (29)$$

где P – нагрузка на дорожное полотно, что передается через колесо транспортного средства, кН;

h_1, h_2, h_3 – толщины слоев системы дорожной одежды, см;

E_1, E_2, E_3 – средневзвешенные модули упругости слоев системы дорожной одежды, МПа;

F_1, F_2, F_3 – площади поперечного сечения слоев системы дорожной одежды, см²;

Q – собственный вес слоев дорожного воспринимают нагрузки от колеса транспортного средства, кН:

$$Q = \gamma_1 h_1 F_1 + \gamma_2 h_2 F_2 + \gamma_3 h_3 F_3 \quad (30)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – плотность слоев системы дорожной одежды, кН/см³.

Статическое перемещение произвольного сечения слоя земляного полотна равно:

$$u_c(x_1) = \frac{Px_1}{E_1F_1} \quad (31)$$

где $u_c(x_1)$ – статическое перемещение произвольного сечения слоя земляного полотна, см.

Статическое перемещение произвольного сечения слоев основания равно:

$$u_c(x_2) = \frac{Ph_1}{E_1F_1} + \frac{Px_2}{E_2F_2} \quad (32)$$

где $u_c(x_2)$ – статическое перемещение произвольного сечения слоев основания, см.

Статическое перемещение произвольного сечения слоев покрытия равно:

$$u_c(x_3) = \frac{Ph_1}{E_1F_1} + \frac{Ph_2}{E_2F_2} + \frac{Px_3}{E_3F_3} \quad (33)$$

где $u_c(x_3)$ – статическое перемещение произвольного сечения слоев покрытия, см.

После преобразований с учетом полученных соотношений (31-33) числитель у (29) будет равен:

$$\begin{aligned} \int_0^h \gamma \lambda_c^2(x) F(x) dx &= \gamma_1 \int_0^{h_1} u_c^2(x_1) F(x_1) dx_1 + \gamma_{1-2} \int_0^{h_2} u_c^2(x_2) F(x_2) dx_2 + \\ &+ \gamma_{1-2-3} \int_0^{h_3} u_c^2(x_3) F(x_3) dx_3 = \frac{\gamma_1 P^2 h_1^3}{3E_1^2 F_1} + \frac{\gamma_{1-2} P^2 F_2 h_1^2 h_2}{E_1^2 F_1^2} + \\ &+ \frac{\gamma_{1-2} P^2 h_1 h_2^2}{E_1 E_2 F_1} + \frac{\gamma_{1-2} P^2 h_2^3}{3E_2^2 F_2} + \frac{\gamma_{1-2-3} P^2 F_3 h_1^2 h_3}{E_1^2 F_1^2} + \\ &+ \frac{\gamma_{1-2-3} P^2 F_3 h_2^2 h_3}{E_2^2 F_2^2} + \frac{\gamma_{1-2-3} P^2 h_3^3}{3E_3^2 F_3} + \frac{\gamma_{1-2-3} P^2 F_3 h_1 h_2 h_3}{E_1 E_2 F_1 F_2} + \\ &+ \frac{2\gamma_{1-2-3} P^2 h_1 h_2^2}{E_1 F_1 E_3} + \frac{2\gamma_{1-2-3} P^2 h_2 h_3^2}{E_2 F_2 E_3} \end{aligned} \quad (34)$$

Запишем уравнение (20) с учетом коэффициента приведенной массы системы к точке удара:

$$K_\partial = \frac{G_\partial}{Q_\kappa \left(1 + \frac{Q_{\partial.o.}}{Q_\kappa} \beta \right)} = 1 + \frac{\sqrt{0,25(\Delta_{cm} + \Delta_{\partial.o.})^2 + h\Delta_{cm}} - 0,5(\Delta_{cm} + \Delta_{\partial.o.})}{\left(1 + \frac{Q_{\partial.o.}}{Q_\kappa} \beta \right) \Delta_{cm}} \quad (35)$$

где β – коэффициент приведения массы системы к точке удара, определяемый по решениям (28-34) и колеблющийся в диапазоне от 0,34 до 0,54 ($\beta_{сер} \approx 0,44$).

Равенство покрытия автомобильных дорог меняется во времени. Интенсивность изменения ровности покрытия зависит от многих параметров, в том числе от конструкции и материалов слоев дорожной одежды, их прочности и деформативности, интенсивности и состава транспортного потока, начальной ровности покрытия, наличия и величины неровностей, срока эксплуатации дорожной одежды, погодноклиматических условий района расположения автомобильной дороги. Этот перечень не является исчерпывающим, но охватывает наиболее весомые факторы.

Вопросу прогнозирования ровности покрытия посвящено много научных исследований по совершенствованию методов расчета дорожной одежды по критериям равенства и прогнозирования деформирования поверхности покрытия. Вторым не менее важным направлением исследований является расчет дорожной одежды по критериям равенства и обоснования предельных значений неравенств или показателей равенства покрытия. Существующие методы расчета дорожных одежд по критериям равенства опираются на расчет остаточной деформации в грунте земляного полотна и в слоях дорожной одежды из дискретных материалов или в слоях из монолитных материалов. Переход от этих деформаций к деформации, накапливающейся на поверхности покрытия, выполняется с помощью коэффициентов, определяемых по результатам лабораторных или полевых испытаний. Согласно исследованиям, более рациональным является применение эмпирических методов и методик, основанных на экспериментальных данных.

Закономерности зарождения, развития и накопления во времени деформаций и разрушений покрытия дорожной одежды существенно отличаются по комплексу значимых факторов. В общем виде каждая модель развития деформаций и разрушений имеет вид:

$$R, D = f(t, \Sigma(N + S)) \quad (36)$$

где R, D – количественный критерии оценки степени развития деформаций и разрушений покрытия дорожной одежды;

t – время от введения дороги в эксплуатацию после строительства, реконструкции или капитального ремонта, лет;

N – количественная оценка воздействия транспортных нагрузок;

S – количественная оценка влияния погодных-климатических факторов.

В связи с тем, что часть моделей прогнозирования равенства покрытия построена по результатам измерения торщиномером (ПКРС-2У и ТХК-2), а остальная часть моделей основывается на методике измерения международного индекса равенства (ИРИ), результаты измерений равенства покрытия по разным моделям должны быть приведены к индексу равенства (ИРИ), м/км.

По исследованиям приняты зависимости между результатами измерений равенства по толчкам (ТХК-2, ТЭД, ПКРС-2У) и по индексу ровности (ИРИ):

$$S_{NEL} = 3,45 S_{ТХК-2}^{0,7937} \quad (37)$$

$$IRI = 0,0831 S_{ТЭД} + 0,8253 \quad (38)$$

$$IRI = 0,0831 S_{ТХК}^{0,7937} + 0,8253 \quad (39)$$

где STЭД и STХК – 2-ровность дорожного покрытия, определенная толчком ТЭД и ТХК-2 соответственно, см / км;

ИРИ – равенство дорожного покрытия по международному индексу равенства ИРИ, м / км;

$$S_{ТХК-2} = \left(\frac{S_{ПКРС-100}}{4,4} \right)^{0,7937} + 0,8253 \quad (40)$$

$$IRI = 0,0831 \left(\frac{S_{ПКРС} - 100}{4,4} \right)^{0,7937} + 0,8253 \quad (41)$$

где S_{ПКРС} – ровность дорожного покрытия, определенная прибором ПКРС-2У, см/км.

Анализируя структуру приведенных выше эмпирических уравнений следует отметить, что они построены по общей логически оправданной модели:

$$IRI_t = IRI_0 + \Delta IRI_t \quad (42)$$

где IRI_t – показатель равенства покрытия через (t) лет эксплуатации, м/км;

IRI₀ – начальный показатель равенства покрытия, м/км;

ΔIRI_t – прирост показателя равенства покрытия за (t) лет эксплуатации, м/км.

После преобразований модели получена формула:

$$S_t = S_0 + \Delta S_t = S_0 + S_0 \left[1,0066 K_{мц}^{-0,33} \exp(0,08t) - 1 \right] \quad (43)$$

где S_t, S₀ – показатель ровности покрытия по толчком через (t) лет эксплуатации и начальный показатель ровности покрытия соответственно, см/км;

ΔS_t – прирост показателя ровности покрытия по толщине покрытия за (t) лет эксплуатации, см/км;

K_{мц} – коэффициент запаса прочности дорожной одежды;

Прирост показателя равенства за всеми моделями зависит от общего модуля упругости дорожной одежды или коэффициента запаса прочности по критерию предельного упругого прогиба. Эта связь имеет экспоненциальный характер или может быть аппроксимирована полиномом второй степени.

Если рассматривать коэффициент запаса прочности как производную от фактического и требуемого модуля упругости, то модуль упругости во всех моделях есть параметр степенной функции, а интенсивность движения имеет пропорциональное влияние, близок к линейной зависимости:

$$K_{мц} = \frac{E_{\phi}}{Y_{нотр}} = \frac{E_{\phi}}{A + B \ln \sum N} \quad (44)$$

где E_{ϕ} – фактический модуль упругости дорожной одежды, МПа;

$E_{нотр}$ – нужный модуль упругости дорожной одежды, МПа;

A, B – коэффициенты, зависящие от группы расчетной нагрузки;

$\sum N$ – количество циклов приложений расчетной нагрузки за t лет, ед.;

По результатам расчета определена весомотность отдельных параметров моделей (с помощью MS Excel в среде программирования Delfi). Чувствительность показателя равенства к изменению параметров оценивалась с помощью итерационной процедуры (табл. 1), что позволило установить коэффициенты весомотности факторов воздействия:

- начальное равенство $K_{сер} = 0,980$;
- интенсивность движения и срок эксплуатации $K_{сер} = 0,54 \div 0,55$;
- коэффициент запаса прочности $K_{сер} = 0,467$;
- модуль упругости изменяется в диапазоне от $K_{сер} = 0,4$ до $K_{сер} = 0,54$ в зависимости от интенсивности движения.

Таблица 1

Определение весомотности параметров моделей в зависимости от коэффициента изменения ($K_{зм}$) параметра

Table 1

Determination of the weighting of model parameters depending on the coefficient of change (K_{ch}) of the parameter

Наименование параметра	Диапазон измене- ния		$K_{эм}$	По модели:												
				1				2				3				
	от	до		IRI_t		$K_{эм}$	$\bar{K}$	IRI_t		$K_{эм}$	$\bar{K}$	IRI_t		$K_{эм}$	$\bar{K}$	
				от	до			о т	д о			о т	д о			
IRI _о , м/км	1,70	5,00	2,94	2,22	6.72	3.03	1,03	2,44	6.80	2,79	0,95	1.94	5,70	2,94	1,00	
E_{min} , МПа	100	200	2,00				-					2.48	1,96	0,79	0,40	
K _{мц}	0,50	1,00	2,00	2,45	2.18	0.89	0,44	2,66	2,60	0,98	0,49	-	-	-	-	
t, лет	5	11	2,20	2,04	2.60	1.27	0,58	2,44	3,29	1,35	0,61	1,94	2.00	1,03	0,47	
N, авт/сутки	258	576	2,00				-					2,00	2.10	1.05	0,53	
Наименование параметра	Диапазон измене- ния		Азм	По модели:												$F_{ср}$
	от	до		ООО" Автодор Ин- жиниринг»				О. В. Смирнова				Д. А. Скоробогатченко				
				IRI_t		$K_{эм}$	$\bar{K}$	IRI_t		$K_{эм}$	$\bar{K}$	IRI_t		$K_{эм}$	$\bar{K}$	
от	до	от	до	от	до			от	до							
IRI _о , м/км	1,70	5,00	2,94	1,87	5.17	2.76	0,94	10.47	29,00	2,77	0,94	-	-	-	-	0,97
E_{min} , МПа	100	200	2,00							-						0,40
K _{мц}	0,50	1,00	2,00							-						0,47
t, лет	5	11	2,20	1,87	2.07	1.11	0,50	10,41	13,30	1,28	0,58	4,43	7,75	1,75	0,80	0,59
N, авт/сутки	258	576	2,00	2,07	2,38	1.15	0,57	-	-	-	-	7,75	7,97	1,03	0,51	0,54

Среди факторов влияния срок эксплуатации имеет максимальную весомость. Темп изменения показателя ровности в течение срока эксплуатации характеризуется этапом низкого темпа изменения равенства, что приближается к линейному (от 1 года до 4 лет) и этапом стремительного накопления деформаций (более 5 лет), что согласуется с результатами исследований.

Статистический анализ результатов определения ровности покрытия при различной интенсивности движения, или общего количества циклов нагрузки доказывает лучшую корреляцию с последним фактором. Следует отметить также, что процесс ухудшения эксплуатационного состояния покрытия существенно отличается для различных типов транспортных средств и зависит от их грузоподъемности и распределения массы по осям.

С применением факторного анализа установлены наиболее значимые параметры (факторы) модели изменения ровности покрытия во времени. Это дает возможность ограничиться наиболее информативными параметрами.

Основой модели прогнозирования ровности покрытия является общепринятое утверждение, что ровность покрытия в любой момент времени увеличивается относительно ровности покрытия в начале эксплуатации на некоторую величину, равную увеличению показателя равенства под влиянием комплекса факторов:

$$IRI_t = IRI_0 + \Delta IRI_t \quad (45)$$

или

$$IRI_t = IRI_0 (1 + \Delta_t) \quad (46)$$

где IRI_t – индекс равенства для срока службы t лет после ввода дороги в эксплуатацию (или после капитального ремонта), м / км;

IRI_0 – начальный индекс равенства при вводе дороги в эксплуатацию (или после капитального ремонта), м / км;

ΔIRI_t – прирост индекса равенства за t лет, м / км;

Δ_t – коэффициент прироста показателя равенства.

Прирост индекса равенства ΔIRI_t рассматривается как функция параметров:

- общего эквивалентного модуля упругости дорожной одежды, фактического или нужного (E , МПа);
- количества циклов приложения нагрузки за t лет службы дорожной одежды;
- доли грузовых автомобилей в транспортном потоке;

- коэффициента запаса прочности дорожной одежды $K_{мц} = \frac{E_{\phi}}{E_{номр}}$

Тогда основная задача заключается в определении прироста показателя равенства.

Статистический и графический анализ влияния общего модуля упругости дорожной одежды на начальную смену равенства позволил установить корреляционную зависимость в виде:

$$\Delta IRI_E = 1,51374 \exp\left(-\frac{E}{50}\right) \quad (47)$$

где ΔIRI_E – коэффициент прироста показателя равенства покрытия в зависимости от модуля упругости, м / км;

E – общий модуль упругости дорожной одежды, МПа.

Модель (47), полученная по результатам статистической обработки экспериментальных и расчетных данных, учитывает результаты экспериментальных исследований и лишена большинства недостатков моделей, где модуль упругости конструкции дорожной одежды не превышает 300 МПа. В предложенной модели (47) предельное значение общего эквивалентного модуля упругости конструкции дорожной одежды составляет 600 МПа, что соответствует реальным значениям несущей способности конструкции дорожной одежды на автомобильных дорогах общего пользования II-IV категорий.

Вторым фактором, влияющим на изменение ровности покрытия, интенсивность движения (количество циклов приложения расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды).

Таблица 2

Интенсивность изменения показателя равенства во времени

Table 2

The intensity of the change in the equality indicator over time

Год эксплуатации	Отношение перспективного показателя равенства покрытия к исходному по модели:				
	1	2	3	4	
2	1,06	1,11	1,20	1,14	
4	1,09	1,21	1,33	1,30	
6	1,13	1,34	1,49	1,49	
7	1,15	1,41	1,58	1,59	
8	1,17	1,48	1,68	1,70	
9	1,20	1,56	1,78	1,80	
10	1,23	1,64	1,89	1,94	
12	1,30	1,83	2,13	2,22	

Согласно данным табл. 2 только модель 2 имеет минимальную интенсивность роста показателя равенства во времени. В моделях (табл. 2) время учитывается: количество циклов приложений расчетной нагрузки за период (t) лет согласно:

$$\sum \bar{N}_p = 365 N_p \frac{q^t - 1}{q - 1} 10^{-6} \quad (48)$$

где $\sum \bar{N}_p$ – количество циклов приложений расчетной нагрузки за период (t) лет, ед.;

N_p – интенсивность движения на полосу, приведенная к расчетному нагрузке в первый год эксплуатации, авт./сутки;

q – коэффициент роста интенсивности движения;

t – время с начала эксплуатации или капитального ремонта, лет;

– как экспоненциальная функция согласно:

$$\bar{t} = \exp(0,08t) \quad (49)$$

или согласно:

$$\bar{t} = \exp(0,089t) \quad (50)$$

где $\bar{t}$ – коэффициент влияния времени эксплуатации дорожной одежды на общий показатель ровности покрытия.

Сравнивая коэффициент влияния времени на общий показатель ровности (48-50) установлено, что при равных условиях по (50) коэффициент влияния суммарного количества приложений расчетной нагрузки составляет от 0,15 до 0,88, тогда как по экспериментальным данным, этот коэффициент находится в пределах от 1,17 до 2,43. Этим объясняется незначительная интенсивность роста показателя равенства во времени в моделях на основе суммарного количества циклов приложений расчетной нагрузки.

По результатам аппроксимации экспериментальных и теоретических данных по ровности покрытия методом наименьших квадратов получена корреляционная зависимость:

$$K_t = 0,82543 + 0,020896t + 0,004742t^2 \quad (51)$$

где K_t – коэффициент согласования влияния времени эксплуатации на показатель равенства;

t – время эксплуатации дорожной одежды, годы.

Отметим, что большинство теоретических моделей и экспериментальных данных основываются на расчетной нагрузке 115 кН или 100 кН на ось транспортного средства. Агрессивность воздействия каждой группы расчетной нагрузки различна. Поэтому на следующем этапе исследования по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды под нагрузку группы A1 – 130 кН, A2 – 115 кН, A3 – 100 кН с учетом влияния цикличности нагружения получена корреляционная зависимость:

$$A_Q = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2 \quad (52)$$

где A_Q – коэффициент, учитывающий влияние группы расчетной нагрузки;
 A_1, A_2, x, x_0, dx – коэффициенты, равные $A_1 = 0,27174$; $A_2 = 1,13032$;
 $x_0 = 0,91646$; $dx = 0,04855$;

$$x = \frac{Q}{115} \quad (53)$$

где Q – расчетная нагрузка на ось, кН.

Тогда уравнение (52) может быть представлено в виде:

$$A_Q = \frac{-0,85858}{1 + e^{\left(\frac{Q}{5,583} - 18,8766\right)}} + 1,13032 \quad (54)$$

Численные значения A_Q приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значение экспериментальных коэффициентов A_Q

Table 3

The value of the experimental coefficients A_Q

Тип нагрузки	Расчетная нагрузка на ось, кН	Значение коэффициента A_Q
A_1	130	1,13
A_2	115	1,00
A_3	100	0,51

Проведенные исследования позволили представить модель прогнозирования равенства покрытия в виде:

$$IRI_t = IRI_0 \left(1 + \Delta IRI_E + \Delta_2 IRI_E \sum N 10^{-6} A_Q \right) K_t \bar{K}_{мц} + \Delta IRI_{P_{6.a.}} \quad (55)$$

где IRI_t – ровность покрытия на t -й год эксплуатации дорожной одежды, м/км;

IRI_0 – начальное равенство покрытия, м / км;

ΔIRI_E – коэффициент прироста показателя равенства в зависимости от общего модуля упругости дорожной одежды;

$\Delta_2 IRI_E$ – коэффициент влияния модуля упругости на прирост показателя равенства в зависимости от количества циклов расчетной нагрузки за t лет определяется по формуле:

$$\Delta_2 IRI_E = 0,0394 - 0,0524810^{-4} E \quad (56)$$

$\sum N$ – количество циклов расчетной нагрузки за t лет, ед.;

A_Q – коэффициент, учитывающий влияние группы расчетной нагрузки;

K_t – коэффициент согласования влияния времени эксплуатации на показатель равенства;

$\Delta IRI_{P_{6.a.}}$ – прирост показателя равенства в зависимости от доли грузовых автомобилей в транспортном потоке;

$\bar{K}_{мц.}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное влияние отношения минимального модуля упругости дорожной одежды к нужному. Определяется по формуле:

$$\bar{K}_{мц.} = 1,23 \left(\frac{K_{мц}}{0,67} \right)^{-0,25} \quad (57)$$

Требуемый модуль упругости дорожной одежды при определении коэффициента прочности зависит от интенсивности движения и состава транспортного потока.

Моделирование равенства при разных значениях количества приложений расчетной нагрузки и средневзвешенного коэффициента приведения расчетной нагрузки доказали необходимость учета доли грузовых автомобилей, в том числе большегрузных транспортных средств. Это положение находит подтверждение при анализе измеренного равенства покрытия и состава транспортного потока на

автомобильных дорогах Московской области. Установление влияния доли грузовых транспортных средств в составе транспортного потока на изменение показателя равенства во времени осуществлено по результатам статистической обработки данных по интенсивности и состава транспортного потока на автомобильных дорогах государственного значения Московской области за период с 2012 года по 2021 год.

В процессе исследования для каждого участка автомобильной дороги, по данным Минтранспорта, паспортов автомобильных дорог и результатами непосредственных измерений были установлены: ровность покрытия; общий эквивалентный модуль упругости конструкции дорожной одежды; доля деформаций и разрушений покрытия; время проведения последних ремонтных мероприятий. К исходным данным были привлечены результаты моделирования равенства покрытия и результаты анализа интенсивности и состава транспортного потока.

Аппроксимация методом наименьших квадратов исходных данных позволила получить корреляционную зависимость (коэффициент корреляции 0,965) в виде:

$$\Delta IRI_{P_{в.а.}} = \sum N 10^{-6} c S_{сеп.-зв.} P_{в.а.} \quad (58)$$

где $P_{в.а.}$ – общая доля грузовых автомобилей в транспортном потоке;

$S_{сеп.-зв.}$ – средневзвешенный коэффициент приведения транспортного потока до расчетной нагрузки, определяемой по формуле:

$$S_{сеп.-зв.} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{icum} P_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i)} \quad (59)$$

где S_{icum} – суммарный коэффициент приведения действия на дорожную одежду транспортного средства i -ой марки к расчетной нагрузке ($Q_{розр}$);

P_i – доля транспортных средств i -ой марки в составе транспортного потока; n – количество марок транспортных средств в составе транспортного потока;

$P_{в.а.}$ – доля грузовых автомобилей в составе транспортного потока;

c – коэффициент, определяемый экспериментально и зависит от группы расчетной нагрузки (табл. 4.).

Таблица 4

Коэффициент (с), что зависит от группы расчетной нагрузки

Table 4

Coefficient (c), which depends on the design load group

Группа расчетной нагрузки	Расчетная нагрузка на ось, кН	Значение коэффициента c
A ₁	130	0,33
A ₂	115	0,65
A ₃	100	0,75

Обобщение отчужденных результатов позволил разработать модель изменения ровности покрытия во времени, учебы др. интенсивность движения и состав транспортного потока, общий эквивалентный модуль упругости конструкции дорожной одежды, коэффициент запаса прочности:

$$IRI_t = IRI_0 \left[1 + 1,51374 \exp\left(-\frac{E}{50}\right) + (0,0394 - 0,0524810^{-4} E) \times \right. \\ \left. \times 365 N \frac{q^t - 1}{q - 1} 10^{-6} \left(\frac{-0,85858}{1 + \exp\left(\frac{Q}{5,583} - 18,8766\right)} + 1,13032 \right) \right] \times \\ \times (0,82543 + 0,020896t + 0,004742t^2) 1,23 \left(\frac{K_{ми}}{0,67} \right)^{-0,26} + \\ + c S_{сеп.-зв.} P_{в.а.} \sum N 10^{-6} \quad (60)$$

Выводы

Усовершенствована модель прогнозирования ровности покрытия, где прирост индекса равенства ΔIRI_t во времени рассматривается как функция следующих параметров: модуль упругости дорожной одежды (фактический или нужный); количество циклов нагрузки за t лет эксплуатации дорожной одежды; доля грузовых автомобилей в транспортном потоке; коэффициент запаса прочности конструкции дорожной одежды. Модель учитывает:

- влияние общего эквивалентного модуля упругости конструкции дорожной одежды на начальную смену равенства, что описывается корреляционной зависимостью, полученной по результатам статистического анализа экспериментальных данных;
- закономерности изменения показателя равенства во времени, предложено учитывать коэффициентом влияния срока эксплуатации дорожной одежды;
- воздействие расчетной нагрузки на ось транспортного средства, определяется коэффициентом воздействия расчетной нагрузки, который установлен по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды с учетом цикличности нагружения;
- общую долю грузовых автомобилей в транспортном потоке.

Адекватность разработанной модели прогнозирования ровности покрытия подтверждена путем статистической обработки экспериментальных данных, полученных на автомобильных дорогах общего пользования с разным сроком эксплуатации, и расчетных данных с теоретической моделью. Коэффициент корреляции Пирсона между экспериментальными и расчетными данными составляет более 0,95, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Литература

1. Belitskaya M. Dendrophages *Ulmus* spp. in the forest plantation of the Volga region. *World Ecology Journal*. 2019. № 9 (1). P. 24 – 39. <https://doi.org/https://doi.org/10.25726/NM.2019.77.24.002>
2. Diémoz H., Magri T., Pession G., Tarricone C., Tombolato I.K.F., Fasano G., Zublena M. Air quality in the Italian northwestern alps during year 2020: Assessment of the covid-19 «lockdown effect» from multi-technique observations and models. *Atmosphere*. 2021. № 12 (8). <https://doi.org/10.3390/atmos12081006>
3. Kamara A.A., Harrison R.M. Analysis of the air pollution climate of a central urban roadside supersite: London, Marylebone Road // *Atmospheric Environment*. 2021. № 258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.118479>
4. Kruzhilin S., Baranova T., Ishhenko O., Pisarenko Ju. The adaptive potential of the pedunculate oak in the geographical cultures of the Lower Don // *Greening Review*. 2021. № 11 (1). <https://doi.org/10.25726/d9840-1483-1345-i>
5. Mo Y., Booker D., Zhao S., Tang J., Jiang H., Shen J., ... Zhang G. The application of land use regression model to investigate spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Guangzhou, China: Implications for the public health benefits of PM_{2.5} reduction // *Science of the Total Environment*. 2021. № 778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146305>
6. Moitra S., Foraster M., Arbilla-Etxarri A., Marín A., Barberan-Garcia A., Rodríguez-Chiaradia D.A., ... Garcia-Aymerich J. Roles of the physical environment in health-related quality of life in patients with chronic obstructive pulmonary disease // *Environmental Research*. 2021. № 203. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111828>
7. Qiao Y., Guo Q., Wu X., Wu H., Zhu L., He Y. Environmental risk analysis of surface water based on multi-source data in Tianjin Binhai New Area, China // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. № 193 (8). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09273-x>
8. Rith M., Woo Lee S. Evaluation of Asphalt Overlay Pretreatments against Reflective Crack Using Association Rule Mining // *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*. 2021. № 147 (3). <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000302>
9. Saluja S., Gaur A., Abbas S. Assessment of Pavement Surface Quality using TOPSIS Method // In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 796. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012015>
10. Sérodes J.-B., Behmel S., Simard S., Laflamme O., Grondin A., Beaulieu C., ... Rodriguez M.J. Tracking domestic wastewater and road de-icing salt in a municipal drinking water reservoir: Acesulfame and chloride as co-tracers // *Water Research*. 2021. № 203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117493>
11. Singh L., Saravanan S., Jennifer J.J., Abijith D. Application of multi-influence factor (MIF) technique for the identification of suitable sites for urban settlement in Tiruchirappalli City, Tamil Nadu, India // *Asia-Pacific Journal of Regional Science*. 2021. № 5 (3). P. 797 – 823. <https://doi.org/10.1007/s41685-021-00194-8>

12. Sun H., Heng C.K., Tay S.E.R., Chen T., Reindl T. Comprehensive feasibility assessment of building integrated photovoltaics (BIPV) on building surfaces in high-density urban environments // *Solar Energy*. 2021. № 225. P. 734 – 746. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.060>
13. Surfleet C.G., Marks S.J. Hydrologic and suspended sediment effects of forest roads using field and DHSVM modelling studies // *Forest Ecology and Management*. 2021. № 499. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119632>
14. Szklarek S., Górecka A., Wojtal-Frankiewicz A. The effects of road salt on freshwater ecosystems and solutions for mitigating chloride pollution – A review // *Science of the Total Environment*. 2021. № 805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150289>
15. Szmagliński J., Nawrot N., Pazdro K., Walkusz-Miotk J., Wojciechowska E. The fate and contamination of trace metals in soils exposed to a railroad used by Diesel Multiple Units: Assessment of the railroad contribution with multi-tool source tracking // *Science of the Total Environment*. 2021. № 798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149300>
16. Tang B., Yeboah M., Cheng H., Tang Y., Yao Z., Wang C., ... Liu Q. Numerical study and field performance of rockbolt support schemes in TBM-excavated coal mine roadways: A case study // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. № 115. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104053>
17. Tella A., Balogun A.-L., Adebisi N., Abdullah S. Spatial assessment of PM10 hotspots using Random Forest, K-Nearest Neighbour and Naïve Bayes // *Atmospheric Pollution Research*. 2021. № 12 (10). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101202>
18. van Laaten N., von Tümpling W., Merten D., Bro R., Schäfer T., Pirrung M. Spider web biomonitoring: A cost-effective source apportionment approach for urban particulate matter // *Environmental Pollution*. 2021. № 286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117328>
19. Wang C., Liu H., Li Y., Dong B., Qiu C., Yang J., ... Zhang Y.. Study on habitat suitability and environmental variable thresholds of rare waterbirds // *Science of the Total Environment*. 2021. № 785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147316>
20. Yang S.-Q., Xing J., Chen W.-Y., Li F., Zhu Y. Rapid evaluation of the effects of policies corresponding to air quality, carbon emissions and energy consumption: An example from Shenzhen, China // *Atmosphere*. 2021. № 12 (9). <https://doi.org/10.3390/atmos12091221>

References

1. Belitskaya M. Dendrophages *Ulmus* spp. in the forest plantation of the Volga region. *World Ecology Journal*. 2019. 9 (1). P. 24 – 39. <https://doi.org/https://doi.org/10.25726/NM.2019.77.24.002>
2. Diémoz H., Magri T., Pession G., Tarricone C., Tombolato I.K.F., Fasano G., Zublena M. Air quality in the Italian northwestern alps during year 2020: Assessment of the covid-19 «lockdown effect» from multi-technique observations and models. *Atmosphere*. 2021. 12 (8). <https://doi.org/10.3390/atmos12081006>
3. Kamara A.A., Harrison R.M. Analysis of the air pollution climate of a central urban roadside supersite: London, Marylebone Road. *Atmospheric Environment*. 2021. 258. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.118479>
4. Kruzhilin S., Baranova T., Ishchenko O., Pisarenko Ju. The adaptive potential of the pedunculate oak in the geographical cultures of the Lower Don. *Greening Review*. 2021. 11 (1). <https://doi.org/10.25726/d9840-1483-1345-i>
5. Mo Y., Booker D., Zhao S., Tang J., Jiang H., Shen J., ... Zhang G. The application of land use regression model to investigate spatiotemporal variations of PM2.5 in Guangzhou, China: Implications for the public health benefits of PM2.5 reduction. *Science of the Total Environment*. 2021. 778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146305>
6. Moitra S., Foraster M., Arbilla-Etxarri A., Marín A., Barberan-Garcia A., Rodríguez-Chiaradia D.A., ... Garcia-Aymerich J. Roles of the physical environment in health-related quality of life in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Environmental Research*. 2021. 203. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111828>
7. Qiao Y., Guo Q., Wu X., Wu H., Zhu L., He Y. Environmental risk analysis of surface water based on multi-source data in Tianjin Binhai New Area, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. 193 (8). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09273-x>
8. Rith M., Woo Lee S. Evaluation of Asphalt Overlay Pretreatments against Reflective Crack Using Association Rule Mining. *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*. 2021. 147 (3). <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000302>
9. Saluja S., Gaur A., Abbas S. Assessment of Pavement Surface Quality using TOPSIS Method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 796. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012015>

10. Sérodes J.-B., Behmel S., Simard S., Laflamme O., Grondin A., Beaulieu C., ... Rodriguez M.J. Tracking domestic wastewater and road de-icing salt in a municipal drinking water reservoir: Acesulfame and chloride as co-tracers. *Water Research*. 2021. 203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117493>
11. Singh L., Saravanan S., Jennifer J.J., Abijith D. Application of multi-influence factor (MIF) technique for the identification of suitable sites for urban settlement in Tiruchirappalli City, Tamil Nadu, India. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*. 2021. 5 (3). P. 797 – 823. <https://doi.org/10.1007/s41685-021-00194-8>
12. Sun H., Heng C.K., Tay S.E.R., Chen T., Reindl T. Comprehensive feasibility assessment of building integrated photovoltaics (BIPV) on building surfaces in high-density urban environments. *Solar Energy*. 2021. 225. P. 734 – 746. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.060>
13. Surfleet C.G., Marks S.J. Hydrologic and suspended sediment effects of forest roads using field and DHSVM modelling studies. *Forest Ecology and Management*. 2021. 499. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119632>
14. Szklarek S., Górecka A., Wojtal-Frankiewicz A. The effects of road salt on freshwater ecosystems and solutions for mitigating chloride pollution – A review. *Science of the Total Environment*. 2021. 805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150289>
15. Szmagliński J., Nawrot N., Pazdro K., Walkusz-Miotk J., Wojciechowska E. The fate and contamination of trace metals in soils exposed to a railroad used by Diesel Multiple Units: Assessment of the railroad contribution with multi-tool source tracking. *Science of the Total Environment*. 2021. 798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149300>
16. Tang B., Yeboah M., Cheng H., Tang Y., Yao Z., Wang C., ... Liu Q. Numerical study and field performance of rockbolt support schemes in TBM-excavated coal mine roadways: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. 115. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104053>
17. Tella A., Balogun A.-L., Adebisi N., Abdullah S. Spatial assessment of PM10 hotspots using Random Forest, K-Nearest Neighbour and Naïve Bayes. *Atmospheric Pollution Research*. 2021. 12 (10). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101202>
18. van Laaten N., von Tümpling W., Merten D., Bro R., Schäfer T., Pirrung M. Spider web biomonitoring: A cost-effective source apportionment approach for urban particulate matter. *Environmental Pollution*. 2021. 286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117328>
19. Wang C., Liu H., Li Y., Dong B., Qiu C., Yang J., ... Zhang Y.. Study on habitat suitability and environmental variable thresholds of rare waterbirds. *Science of the Total Environment*. 2021. 785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147316>
20. Yang S.-Q., Xing J., Chen W.-Y., Li F., Zhu Y. Rapid evaluation of the effects of policies corresponding to air quality, carbon emissions and energy consumption: An example from Shenzhen, China. *Atmosphere*. 2021. 12 (9). <https://doi.org/10.3390/atmos12091221>

**Plekhanova S.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Russian State University named after A.N. Kosygin, Russia,
Vinogradova N.A.,* Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Senior Lecturer,
National Research Moscow State University
of Civil Engineering, Russia**

* Corresponding author E-mail: VinogradovaNA@mgsu.ru

EXAMINATION OF THE QUALITY OF NANOMATERIALS IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF CIRCULATING RESOURCES IN CONSTRUCTION

Abstract: the advantage of the equality indicator is the relative simplicity of definition and the possibility of periodic monitoring. According to the equality indicator, it is possible to assign repairs and predict the service life, assess the condition of the road surface. Experimental studies have proved that there is a connection between the evenness of the coating and the strength of the pavement, which opens up the possibility of determining the structural strength of non-rigid pavement, which provides a given evenness of the coating for the last year of operation before major repairs. The question of assessing the impact of the unevenness of the road surface on the processes of development and accumulation of deformations, changes in the evenness of the coating during operation remain largely open. This is due to the multifactorial nature of the problem of predicting the equality of coverage, so it is advisable to use approaches based on direct measurement methods. Most of the existing models of interaction of a pneumatic or rigid wheel with a coating are designed for problems of pavement mechanics or car theory, therefore they cannot be unambiguously applied to determine the value of the dynamism coefficient. A significant disadvantage of these solutions is insufficient consideration of the deformative properties (modulus of elasticity) of the pavement.

Keywords: road, coverage, strategy, working resource, transport

Для цитирования: Плеханова С.В., Виноградова Н.А. Экспертиза качества наноматериалов при разработке и применении оборотных ресурсов в строительстве // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 6. С. 48 – 68. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-6-48-68

For citation: Plekhanova S.V., Vinogradova N.A. Examination of the quality of nanomaterials in the development and application of circulating resources in construction. Construction Materials and Products. 2021. 4 (6). P. 48 – 68. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-6-48-68

Поступила в редакцию 13 сентября 2021 г.

Принята в доработанном виде 21 октября 2021 г.

Одобрена для публикации 3 декабря 2021 г.

Received: September 13, 2021.

Revised: October 21, 2021.

Accepted: December 3, 2021.