



Теплофизические модели исследования и контроля дорожного покрытия

И.И. Дмитриев ^{1*}, А.М. Кириллов ²,

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

² Образовательный центр «Сириус», 354349, Краснодарский край, г.Сочи, Олимпийский пр-т, 40

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ИСТОРИЯ	КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА
doi: 10.18720/CUBS.62.3	Подана в редакцию: 29.06.2017	теплофизика; дорожное покрытие; холодный асфальт; городской остров тепла; термофлуктуационная модель; энергоэффективность;

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается теплофизический метод исследования и контроля состояния дорожных покрытий, а также способы повышения энергетической эффективности дорожной сети. Были рассмотрены следующие направления: аппарат термодинамических функций, развиваемый в работах Горячева М.Г. и Завьялова М.А. (с коллегами); термофлуктуационная модель, предлагаемая Кирюхиным Г.Н.; «городской остров тепла» (urban heat island effect) и методы создания «холодного» асфальта; процесс «сопровождения» чашей прогиба движущегося транспортного средства; вопрос о рациональном числе прохождения катком по обустраиваемому покрытию при его уплотнении; способы аккумуляции и использования энергии, циркулирующей вблизи дороги (солнечная, ветровая, кинетическая и тепловая энергия транспорта и др.)

Содержание

1.	Введение	26
2.	Цели и задачи	26
3.	Обзор литературы	26
4.	Методы и направления исследований	26
5.	Заключение	35

Контактная информация:

- 1* +79117587771, dmitriev.ivashka@ya.ru (Дмитриев Иван Игоревич, студент)
2 +79181302257, kirill806@gmail.com (Кириллов Андрей Михайлович, к.ф.м.н., преподаватель физики)

1. Введение

Энергетической характеристикой асфальтобетона, а также все процессов, в нем протекающих, являются его теплофизические параметры. Они показывают степень взаимодействия материала покрытия с внешней средой (теплопроводность), способность аккумулировать энергию (теплоемкость) и др. Эти параметры зависят в первую очередь от структуры вещества, то есть коррелируют с физико-механическими параметрами системы.

Знание методов влияния на характер теплообмена асфальтобетона с внешней средой и транспортными средствами позволит точнее прогнозировать поведение покрытия во время эксплуатации, рассчитать периоды профилактического ремонта, а также даст возможность впоследствии включить дорожную сеть в комплекс интеллектуальной транспортной системы (ИТС).

2. Цель и задачи

Обобщение опыта использования аппарата термодинамики для оценки ресурса асфальтобетонного дорожного покрытия и мониторинга состояния его эксплуатационных характеристик.

Задачи:

- Рассмотреть аппарат термодинамических функций;
- Представить основные выкладки термофлуктуационной модели;
- Исследовать способы борьбы с городскими островами тепла;
- Проанализировать способы смещения альбедо и излучаемости для управления температурным градиентом;
- Осветить основные способы аккумуляции энергии дорожным полотном;

3. Обзор литературы

В настоящее время проблема регулирования энергии взаимодействия асфальтобетонного покрытия и транспортного средства решается тремя основными методами [1]:

1. Обеспечение оптимального скоростного режима транспортного средства в зависимости от температуры окружающей среды, значительно влияющей на коэффициент сцепления колеса с покрытием [2, 3]. Данный способ позволяет обеспечить безопасное, комфортное и эргономичное движение [4-6]. Минусом данного метода являются затратные комплексные исследования дорожного полотна, анализ всех параметров материала, что редко целесообразно в реальной жизни.
2. Первоначальный подбор материалов покрытия с заданными теплофизическими свойствами. Это позволяет уменьшить теплопоглощение и не допустить нагрев асфальта до высоких температур [7-10], что сохраняет вязкопластичные свойства материала. Это предотвращает образование колеи и трещин [11-14], которые в большинстве случаев после появления неустраняемы [15, 16].
3. Регулирование поверхностных радиационных свойств: смещение альбедо и излучаемости для управления температурным градиентом [17, 18] в зависимости от гидрогеологических и климатических условий региона [19] с учетом эффекта «городского острова тепла» (urban heat island effect) [20-26]. Это позволит развить сеть умных дорог с возможностью аккумуляции энергии [27, 28].

4. Методы и направления исследований

Для всех последующих расчетов принимается допущение, что асфальтобетонное покрытие является закрытой неизолированной системой, способной обмениваться с внешней средой энергией, но не веществом [29-31].

4.1 Аппарат термодинамических функций

Механические воздействия, которые испытывает дорожное полотно рационально рассматривать с энергетической точки зрения. М.Г. Горячев [32-34] предлагает разделить движение колеса и рассмотреть его поэтапно (рис. 1):

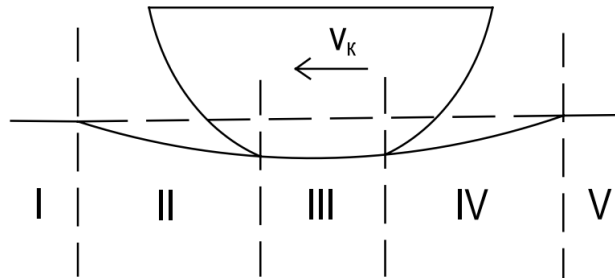


Рисунок 1. Энергетические этапы движения колеса

- I. Опорная поверхность проезжей части до проезда колеса.
Характеризуется полной начальной энергией дорожной одежды.
- II. Раскрытие чаши прогиба до границ колесного штампа.
Происходит рост потенциальной энергии сжатия из-за передачи массы автомобиля через колесо, работа диссипативных сил, работа сил деформации (уплотнение, сдвиг).
- III. Колесо погружено до максимального значения прогиба, зона контакта колеса с покрытием.
Максимальная потенциальная энергия, нет изменения во времени работ диссипативных сил и сил деформации, наибольшая вероятность образования необратимых деформаций.
- IV. Закрытие чаши прогиба.
Высвобождение энергии сжатия, увеличение работы сил трения, рост деформаций.
- V. Опорная поверхность проезжей части после проезда колеса.
Возвращение к первоначальной энергии до сжатия волокон, работа сил трения рассеивается вследствие теплообмена внутри дорожного полотна и снаружи с окружающей средой. Разрывы характеризуются полной работой, затраченной на деформирование полотна.

Таким образом, при проезде колеса некоторый фрагмент дорожной одежды получает дополнительную энергию, которая расходуется на тепловые процессы и на разрушение полотна:

$$\Delta U = U_{\text{ост}}(t) + A_{\text{T}}(t) + (A_{\text{др}} + A_{\text{дн}}(t)) \quad (1)$$

t — время релаксации остаточной энергии $U_{\text{ост}}(t)$;

$A_{\text{T}}(t)$ — работа сил трения;

$A_{\text{др}}$ — работа деформирования дорожной одежды равновесная (не изменяющаяся с течением времени);

$A_{\text{дн}}(t)$ — работа деформирования дорожной одежды неравновесная (изменяющаяся с течением времени вследствие релаксационных процессов в структуре слоев дорожной одежды).

Время релаксации дорожного полотна для упругих напряжений, при теплообмене или частичном разрушении является довольно большим, порядка $10^0 \dots 10^5$ с. Поэтому дорога, находящаяся в эксплуатации, содержит не только энергию равновесных разрушений, но и неравновесных [35]. При построении динамические модели необходимо учитывать градиент деформаций дорожного полотна, что возможно лишь при мощных электронно-вычислительных машинах. Для решения данных задач уже разработаны различные программы, к примеру, в статье [36, 37] представлена программа для инженерных расчетов температурных и градиентных полей дорожных одежд, написанная на языке C++. Также в [38] упоминаются следующие комплексы для решения задач на расчет теплопередачи дорожного покрытия: GeoStudio (Канада); COSMOS/M (Россия); ANSYS (США).

4.1.1. Изгибная волна. Чаша прогиба

Динамическая нагрузка (вертикальная и горизонтальная) от колес транспорта относится к техногенным факторам, влияющим на долговечность асфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации [39, 40]. Под колесами движущегося транспорта покрытие испытывает быстропотекающие вертикальные напряжения и деформации сжатия-растяжения от вертикальных сил [41], в частности силы тяжести; и горизонтальные напряжения и деформации сдвига от сил тяги и торможения, а также центробежных сил при повороте транспортного средства [42]. Одновременная вертикальная и горизонтальная деформации следуют за транспортным средством, «сопровождают» его, поэтому в работе [43] этот процесс рассматривается как бегущая изгибная волна.

Представленная в работе [43] методика расчета дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием базируется на решении дифференциального уравнения изгиба балки на сплошном однородном упругом основании с учетом равномерного движения нагрузки вдоль балки (волновое уравнение). В качестве критерия для оценки влияния движения нагрузки был выбран так называемый коэффициент динамичности μ , равный отношению прогиба балки f при движении нагрузки со скоростью v (динамический прогиб) к статическому прогибу (при $v=0$):

$$\mu = \frac{f}{f_{ст}} \quad (2)$$

Решение упомянутого выше дифференциального уравнения позволило получить автору [43] выражение для коэффициента динамичности в виде:

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

где c – коэффициент, имеющий размерность скорости и зависящий от параметров дорожной конструкции (модулей упругости и толщин слоев, плотности материала и др.), который можно назвать «критической скоростью». Можно видеть, что при стремлении скорости v к критической c , коэффициент динамичности будет стремиться к бесконечности

$$\lim_{v \rightarrow c} \mu = \infty \quad (4)$$

График зависимости (рис. 2), приведенный в работе [43], показывает, что коэффициент динамичности монотонно возрастает от значения $\mu=1$ (при $v=0$) по квадратичному закону. Например, при $v=10$ м/с коэффициент $\mu=1.1$, а при $v=20$ м/с коэффициент $\mu=1.4$. То есть приращение коэффициента динамичности прямо пропорционально квадрату скорости движения нагрузки.

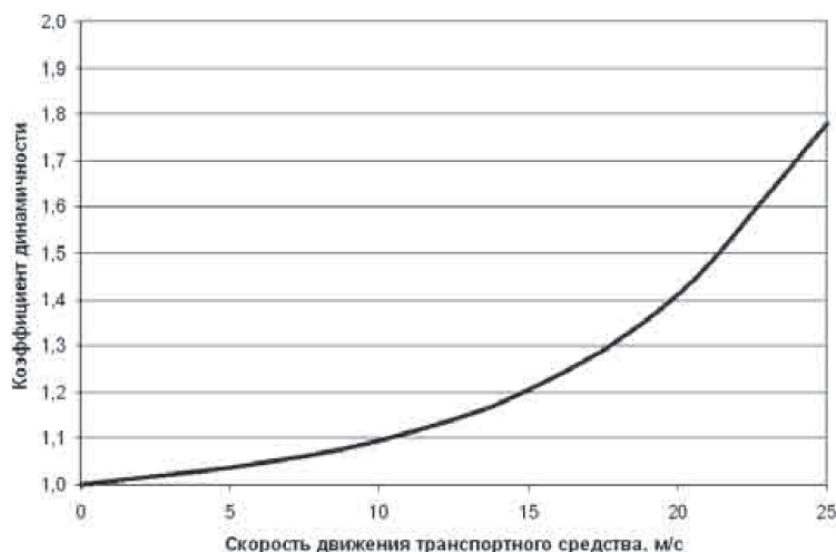


Рисунок 2. График зависимости динамического коэффициента от скорости движения ТС [43]

Если оценить значение «критической скорости» c , то ее значение значительно превышает эксплуатационные скорости v автомобильного транспорта. То есть $v \ll c$ и, если зависимость (3) разложить в ряд Тейлора, то в нем можно учесть первых два члена:

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

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

В работе [1] были получены выражения для оценки динамических вертикальных F_D^B и продольных горизонтальных сил F_D^T , действующих со стороны транспортного средства на дорожное покрытие. В этом случае, если считать прогиб пропорциональным вертикальным силам, то коэффициент динамичности можно записать:

$$\mu = \frac{G_m + F_D^B}{G_m} \quad (6)$$

где $(G_m + F_D^B)$ – вертикальная сила (определяет динамический прогиб),

G_m – сила тяжести (определяет статический прогиб). С учетом выражения для F_D^B , полученного в [5], соотношение (6) можно записать в виде:

$$\mu = 1 + \frac{v^2}{K^2} \quad (7)$$

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

Сходство формул (5) и (7) очевидно, что говорит в пользу моделей, используемых в работах [23] и [1].

4.1.2. Коэффициент пластичности

Как отмечено в работе [1, 44] изменение энергетических критериев нужно рассматривать в их связи с физико-механическими свойствами материала. Одной из величин, характеризующих упругопластические свойства материала, служит коэффициент пластичности ξ . Исследование характера его поведения позволит определить критерии условий эксплуатации дорожного покрытия. Коэффициент пластичности определяется через деформационные зависимости и представляет собой отношение полного прогиба дорожного покрытия ε к его упругой ε_y составляющей

$$\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \quad (8)$$

Однако связь механических свойств с энергетическими зависимостями позволяет оценить коэффициент пластичности, минуя исследования характера деформационных процессов, т.к. энергетические величины совокупно учитывают эти процессы.

Авторы [1] утверждают, что в пренебрежении рассеянием энергии и, считая, что вся совершенная транспортным средством над дорожным покрытием работа A идет только на упругие и пластические деформации, а энергия пропорциональна квадрату смещения, то минимальное значение коэффициента пластичности можно приблизительно оценить как

$$\xi_{\min} = \sqrt{\frac{A}{E_y}} \quad (9)$$

где E_y – энергия упругой деформации.

Так как пластические деформации имеют характер релаксационных и протекающих во времени по экспоненциальному закону, то большинство формул, описывающих остаточную деформацию, содержит в себе логарифм числа нагружений. Логарифмическая зависимость подтверждается и большинством экспериментов.

В работе [45] для нахождения коэффициента пластичности предлагается формула

$$\xi = 1 + \sum_n \frac{b^n}{n!} \quad (10)$$

где b – коэффициент, зависящий от свойств покрытия (лежит в пределах от 0 до 1), n – число реализованных нагружений.

Анализ выражения (10) показывает, что значение коэффициента пластичности при $b=1$ стремится к числу $e=2.71828\dots$, достигая этого значения с точностью до четвертой значащей цифры при числе нагружений $n=6$. Из этого можно сделать вывод, что при уплотнении асфальтобетонного покрытия достаточно шести проходов катком. После этого каток целесообразно менять на более тяжелый, т.к. дальнейшие прохождения будут уже малоэффективными, приводя к необоснованным энергетическим и ресурсным затратам.

В настоящее время для решения задачи о рациональном числе проходов катка могут быть применены модели, связывающие коэффициент уплотнения материала с числом проходов уплотнителя по одному следу. Более того, вывод о том, что в формуле (10) при числе проходов катка по одному следу равно $n=6$ результат стремится к основанию натурального логарифма, из чего следует достаточность 6-ти проходов катка и целесообразность смены режима уплотнения может быть принята специалистами дорожной отрасли «в штыки». Аргументация может быть следующей. Режим уплотнения определяется пробной укаткой. В этом случае могут применяться катки разной массы и/или изменения режима работы одного катка (регулирование давления воздуха в шинах пневматических катков, уплотнение с включенным или выключенным вибратором и т.п.). По результатам этих полевых работ составляется акт уплотнения технологического слоя пробной укаткой, в котором критерием достаточной степени уплотнения служит коэффициент уплотнения, а не коэффициент пластичности. Если же принять зависимость авторов данной статьи (8), то, очевидно, что пластическая составляющая ε включает в себя изменение объема и формы. Для процесса уплотнения смеси или дискретного материала принципиальное значение имеет объемная деформация уплотнения. Поэтому (8)-(10) уступают методикам специалистов дорожной отрасли, которые основаны на экспериментальных данных. Кроме того, современные укладчики асфальтобетонной смеси позволяют укладывать слой с коэффициентом уплотнения 0,95. Поэтому в ряде случаев для достижения требуемого коэффициента уплотнения в подкатке слоя нет необходимости. В таких случаях подкатка и потраченное на нее время приводит к тому, что смесь теряет температуру, и процесс окончательного уплотнения требует больших энергетических затрат.

Тем не менее, по мнению авторов, рассмотренный выше подход с применением коэффициента пластичности может расширить и дополнить существующие современные методы контроля процесса укладки асфальтобетонного дорожного покрытия [46-51].

4.2 Термофлуктуационная модель долговечности асфальтобетона

Напряженно-деформированное состояние и сроки службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог зависят от их температуры [52, 53]. Однако при проектировании дорожных одежд не учитывается в должной степени реологическое состояние асфальтобетона. Г.Н. Кирюхин [54, 55] предложил уточнение зависимости температуры асфальтобетона от условий эксплуатации.

Температура покрытия зависит не только от температуры воздуха, но и от ряда других факторов: солнечной радиации, земляного полотна и др. Эксперименты однозначно показали, что в зимнее время температура асфальтобетонного покрытия выше, чем минимальная температура окружающего воздуха. При этом, чем резче происходит понижение температуры воздуха, тем выше будет разница между температурами покрытия и воздуха из-за тепловой инерции дороги.

Я.Н. Ковалев [56] принимает минимальную температуру асфальтобетонного покрытия (в зимний период эксплуатации):

$$T_{min}^n = 0,7T_{min} \quad (11)$$

T_{min}^n – расчетная минимальная температура поверхности асфальтобетонного покрытия, °С;

T_{min} – минимальная температура окружающей среды, °С.

В летний период на температуру покрытия оказывают дополнительное влияние солнечные лучи, вызывающие дополнительный нагрев поверхности. [57]

$$T_{\Pi} = T_{\text{В}} + T_{\text{ЭКВ}} \quad (12)$$

T_{Π} – температура покрытия, °С;

$T_{\text{В}}$ – температура воздуха, °С;

$T_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентная температура, °С.

Эквивалентная температура является показателем прибавочной теплоты, обусловленной дополнительным нагревом покрытия солнечными лучами. Является функцией от интенсивности солнечного облучения и альбедо поверхности покрытия (характеристики диффузного отражения).

Но помимо максимумов и минимумов температуры (которые действуют в очень ограниченный промежуток времени) необходимо учитывать частотное распределение температур между ними. Эквивалентная температура аппроксимируется исходя из максимальных и среднегодовых температур. Исходя из экспериментальных данных и вышеуказанных соотношений Г.Н. Кирюхин вывел следующие зависимости для расчета температуры на поверхности дорожного полотна.

$$T \leq 0 \quad T_{\Pi} = 0,859T_{\text{В}} + T_{\text{В}}^{\text{ср}} \quad (13)$$

$$T > 0 \quad T_{\Pi} = T_{\text{В}}^{\text{ср}} + T_{\text{В}} \frac{T_{\text{max}}^{\text{н}} - T_{\text{В}}^{\text{ср}}}{T_{\text{max}}}$$

$T_{\text{В}}^{\text{ср}}$ – средняя годовая температура воздуха в регионе, °С;

T_{max} – абсолютная максимальная температура воздуха, °С;

$T_{\text{max}}^{\text{н}}$ – максимальная температура на поверхности асфальтобетонного покрытия, °С.

Данные расчеты применимы к покрытиям, расположенным над земляным полотном. Для решения задачи анализа уже эксплуатируемого дорожного полотна строят график статического распределения температуры поверхности покрытия (°С) по оси абсцисс и относительной частотности (%) по оси ординат, и исходят уже из этих зависимостей. При проектировании дороги берутся данных ближайшей метеостанции за период не менее 5 лет.

Для расчета на прочность Г.Н. Кирюхин предлагает использовать фрактальную модель: элементов самоподобия в гранулированном составе минералогической части. В основе формирования асфальтобетона лежит образование структуры битумных пленок. При разрушении процессы деформации преобладают над процессами восстановления межмолекулярных связей, так как начинается скольжение слоев с последующим лавинным разрушением.

Эмпирическая модель долговременной прочности асфальтобетона:

$$\tau = C\sigma^{-(b_0 + b_1 \frac{\sigma}{T})} e^{\left(\frac{U}{RT}\right)} \quad (14)$$

τ – время до разрушения, с;

b_0 – начальное значение показателя нелинейности при растягивающем напряжении, близком к нулю;

b_1 – тангенс угла наклона прямой зависимости коэффициента b (показатель степени, характеризующий изменение структуры материала при деформировании) от удельного растягивающего напряжения σ/T к оси абсцисс.

U – энергия активации вязкопластичного разрушения (определяется типом дисперсной структуры применяемого битума), Дж/моль;

C – константа, зависящая от структуры материала;

Показатель степени b_0 рассматривается в качестве как фрактальной размерности поверхностей скольжения частиц дисперсной фазы относительно друг друга. Чем больше величина показателя, тем сильнее взаимодействие частиц и сложнее геометрия. Данный показатель увеличивается с ростом структурированности битума, например, при повышении содержания минерального порошка, применении

добавок полимеров и в результате перехода от битумов структурного типа «золь» к дисперсным битумам типа «золь-гель» и «гель».

При повышении фрактальной размерности структуры асфальтобетона степень пластичности и вероятность вязкопластичного деформирования и разрушения снижаются, а доля обратимых деформаций, наоборот, увеличивается.

Параметры, характеризующие долю вязкой, упругой и пластической деформаций, можно определить на основании значения фрактальной размерности b_0 :

$$\begin{cases} \rho = \frac{1}{b_0(1+b_0)} \\ \gamma = \frac{b_0-1}{b_0} \\ \delta = \frac{1}{(1+b_0)} \end{cases} \quad (15)$$

ρ – вероятность вязкого деформирования;

γ – вероятность необратимого упруго эластического деформирования;

δ – вероятность пластичного деформирования и разрушения.

Пластические деформации приводят к отрыву частиц, а вязкие деформации связаны со сдвигом битумных частиц относительно друг друга.

Отсюда зависимость долговременной прочности при нормированной нагрузке и температуре и времени будет выражаться через вероятности деформации следующим образом:

$$\frac{\tau}{t_0} = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^{b_0} \cdot \exp[\gamma(\sigma_0 - \sigma)] \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^{\delta} \cdot \exp\left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (16)$$

σ_0 – предел прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе;

T_0 – нормированная температура;

t_0 – нормированное время действия нагрузки.

4.3 Эффект «городского острова тепла» (*urban heat island effect*)

Одной из основных мер по борьбе с «городскими островами тепла» является применение холодного асфальта [58, 59]. Это новые материалы, которые сохраняют меньшее количество тепла, и вследствие этого быстрее остывают и имеют меньшую температуру поверхности. Основной причиной появления «городского острова тепла» является нагрев поверхности дороги на 20-30°C больше, чем температура воздуха за счет солнечной энергии. После захода солнца тепло активно отдается обратно в атмосферу, что при большой площади дорожного покрытия, невозможно не учитывать при измерении параметров микроклимата города [60]. Помимо этого, постоянные процессы нагрева/охлаждения покрытия ведут к необратимым пластическим деформациям, что впоследствии ведет к ухудшению качества дороги, уменьшению срока эксплуатации и полному её разрушению. Чтобы точно рассчитать температуру воздуха над поверхностью дороги, можно воспользоваться выкладками в статье [61].

Холодный асфальт потенциально позволяет решить следующие проблемы [67-72]:

- Уменьшить эффект городского острова тепла;
- Снизить энергопотребление и парниковых выбросов;
- Увеличить время жизни покрытия (долговечность);
- Снизить расходы на техническое обслуживание;
- Улучшить комфорт и безопасность вождения;
- Уменьшить шум;
- Увеличить срок эксплуатации дорожного полотна;
- Снизить влияние на окружающую среду.

Способы создания холодного асфальта описаны в таблице 1:

Таблица 1. Способы создания холодного асфальта.

№	Способ	Комментарий
1	Смещение альбедо	подробнее рассмотрено ниже
2	Увеличение теплового эмиттанса	Способность материала излучать тепло определяет скорость охлаждения поверхности. Тепловой эмиттанс является численным показателем данной характеристики. К сожалению, дорожные материалы изначально имеют высокие значения эмиттанса, а потому существенно изменить его значение не получится [62]
3	Конвекция	Воздух, движущийся около поверхности и за счет конвекции захватывающий излишки тепла. Скорость конвекции зависит от температуры, скорости ветра и поверхности дороги. Так на шероховатом покрытии воздух создает зону турбулентности, значительно увеличивающую циркуляцию. [63]
4	Уменьшение теплопроводности	Покрытия с низкой теплопроводностью будет нагреваться лишь на поверхности, не передавая тепло в другие слои дорожной одежды [64, 65].
5	Уменьшение теплоемкости	Теплоемкость определяет, сколько энергии будет поглощено и сохранено, а впоследствии отдано асфальтобетоном. Городские дороги захватывают много больше (до 2х раз) солнечной энергии, чем их сельские аналоги из природных материалов (грунт и песок).
6	Охлаждение испарением	Забор энергии окружающей среды на фазовый переход жидкость-газ как с поверхности дороги (полив полотна).
7	Затенение	Уменьшение прямого солнечного света.
8	Механическое охлаждение	Охлаждение воды, циркулирующей через трубы, встроенные в тротуары, или использование термоэлектрических устройств, встроенных в тротуары [66].

Из минусов в первую очередь стоит отметить стоимость работ, превышающую затраты на строительство обычных покрытий. Однако оценки жизненного цикла и уровень рентабельности могут впоследствии изменить данное мнение на противоположное.

4.4 Смещение альбедо и излучаемости для управления температурным градиентом

Солнечное отражение (альбедо-доля отраженной с поверхности солнечной энергии) является основным фактором, позволяющим снизить максимальную температуру покрытия. Высокое альбедо теоретически способно снизить температуру ниже окружающей среды.

Существует множество возможностей добиться данного эффекта [73-78]:

- Применение светлых тонов покрытия;
- Применение светлоокрашенных связующих веществ: использованием белого цемента, или цемента, смешанного с шлаком светлого цвета;
- Применение светлоокрашенного щебня;
- Использование пигментов;

- Побелка поверхности;
- Использование полимерных смол для ремонта.

4.5 Аккумуляция энергии

Основные способы извлечения энергии подразделяются на две большие категории:

1. Использование природных факторов (солнце, ветер и др.);
2. Опосредованное использование транспортных средств.

К первой категории в первую очередь следует отнести проект, реализуемый в США, под названием Solar Roadways (рис. 3) [79-82]. Американские ученые и инженеры предлагают перекрыть все автотрассы страны солнечными батареями вместо асфальтобетонных покрытий.

Специальные плиты, размещенные на огромных площадях автодорог, позволяют отказаться дорожной инфраструктуре от внешнего питания электроэнергией. Получаемый же избыток электроэнергии будет использоваться в других отраслях (к примеру, сельское хозяйство). Это снизит экологические проблемы путем частичного или полного отказа от других способов получения электроэнергии (тепловые, атомные и др. электростанции).

Дорога, перекрытая такими плитами, подогревается, снижая вероятность обледенения проезжей части в зимний период, подсвечивается в ночное время, выводит как на экран информацию о дорожной обстановке. Разработчики предлагают также дополнительно разместить в «солнечном» покрытии автодороги различные коммуникации: например, электрические сети, связь, кабельное телевидение, высокоскоростной интернет. Это позволит отказаться от столбов и проводов, расположенных вдоль автомобильных дорог.

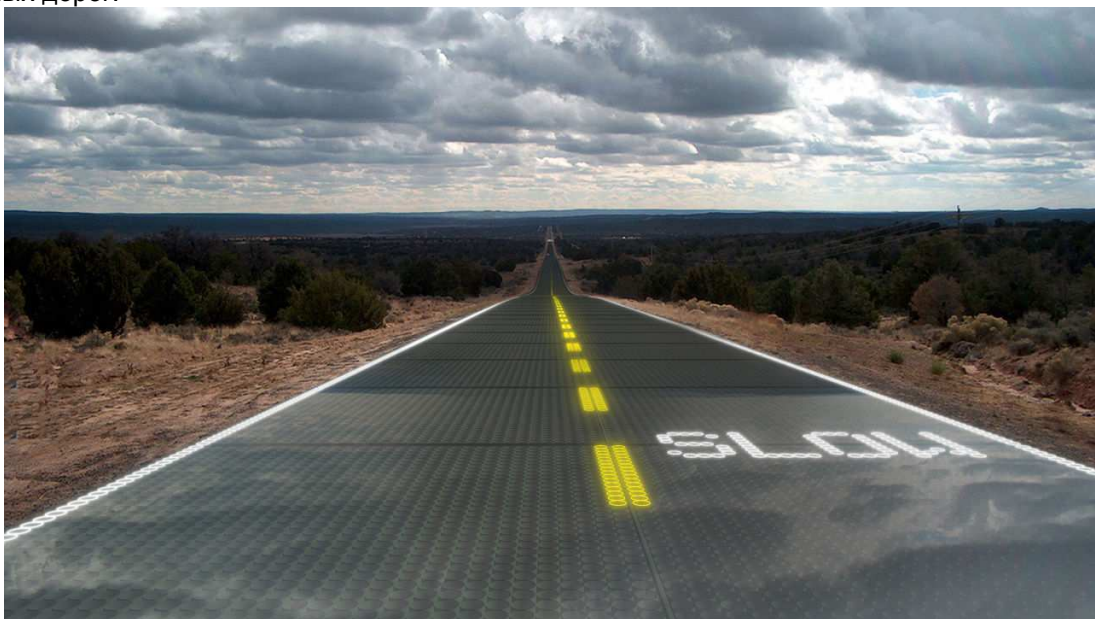


Рисунок 3. Пример использования «умных «солнечных батарей. Проект Solar Roadways

Вторая категория описывает способы извлечения энергии движущегося транспорта. На данный момент ученые активно продвигаются в создании пьезоэлектрических генераторов.

Примером, иллюстрирующим данное направление науки, может послужить «Умный» лежачий полицейский. Компания New Energy Technologies штата Мэриленд, США, разработала устройство, предназначенное для сбора кинетической энергии движущегося транспорта и преобразования ее в электроэнергию. Принцип работы аналогичного устройства описывается в статье [83]. Пьезоэлектрический генератор, выполненный в виде «лежачего полицейского» (рис. 4), не только справляется с нехитрыми обязанностями последнего, но и дает возможность извлекать из них вполне ощутимую пользу.



Рисунок 4. Пьезоэлектрический генератор, выполненный в виде «лежачего полицейского»

Другой пример использования кинетической энергии автомобиля предлагается и в статьях [84-87]. Исследователи предлагают использовать накладные полосы электрогенерирующего дорожного покрытия, которые при помощи пьезопреобразователей давления колес автомобиля, вмонтированных в покрытие (Рис. 5), позволяют генерировать достаточное количество электрической энергии для обеспечения автономного освещения трассы. Эта технология также имеет исключительную экономическую целесообразность, так как нет необходимости в разрушении дорожного полотна для установки оборудования.

Один километр дорожного полотна может дать до 500 киловатт-часов [88, 89]. Автотрасса, как мини-электростанция, обеспечивающая электричеством себя и все вокруг, питающая фонарные столбы, дорожные табло и заодно близлежащие поселки. Этим вопросом занимаются многие ученые мира [90].

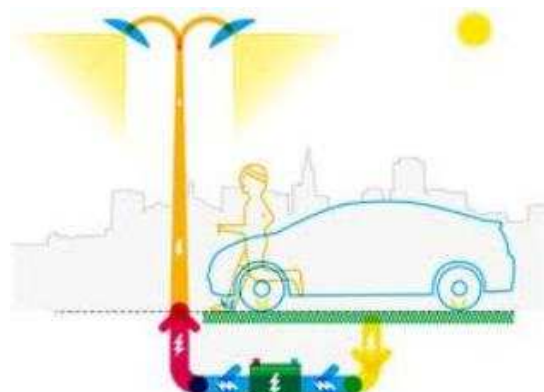
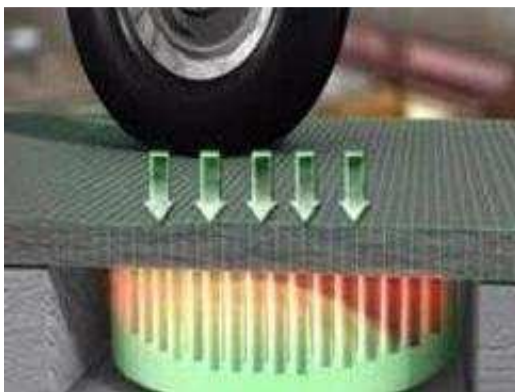


Рисунок 5. Пьезоэлектрический генератор, выполненный в виде автодорожных полос

Более подробно с выше приведенными способами аккумуляции энергии можно ознакомиться в статье [91].

5. Заключение

Целью настоящей статьи являлось рассмотрение направлений исследований в дорожной отрасли, которые альтернативны традиционным «механическим» методам исследований и мониторинга (контроля) состояния дорожных покрытий (как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации). В рамках поставленной цели рассмотрены (проанализированы):

- 1) аппарат термодинамических функций, развиваемый в работах Горячева М.Г. и Завьялова М.А. (с коллегами);
- 2) термофлуктуационная модель, предлагаемая Кириюхиным Г.Н.;
- 3) вопросы, связанные с наличием «городского острова тепла» (urban heat island effect), и методы создания «холодного» асфальта (в том числе управление альбедо покрытия для управления его температурным режимом);

4) процесс «сопровождения» чашей прогиба движущегося транспортного средства (в работах Корочкина А.В. данный процесс интерпретируется как бегущая изгибная волна);

5) вопрос о рациональном числе прохождения катком по обустраиваемому покрытию при его уплотнении;

6) способы аккумуляции и использования энергии, циркулирующей вблизи дороги (солнечная, ветровая, кинетическая и тепловая энергия транспорта и др.).

На основании проведенного обзора и анализа можно сделать следующие выводы.

1. Так как энергетический обмен имеет место для любой физической системы (в том числе для системы автомобиль-дорога), то знание характеристик энергетического обмена, т.е. динамики энергообмена, дает возможность прогнозирования свойств систем, а также вмешательства в ход протекающих в них процессов с целью управления ими. С этой точки зрения аппарат термодинамических функции представляется авторам очень перспективным направлением исследований.

2. Известно, что прочностные и реологические характеристики асфальтобетона (как битумного материала) зависят от напряженно-деформированного состояния, температуры, времени и режима нагружения. Прочность твердых тел имеет молекулярно-кинетическую природу и непосредственно зависит от теплового движения атомов и молекул. В результате со временем под воздействием транспортных нагрузок и природно-климатических факторов в асфальтобетонном дорожном покрытии происходит постепенное накопление остаточных деформаций и дефектов, которые необходимо учитывать при прогнозировании эксплуатационных свойств и долговечности дорожных конструкций. Все вышесказанное находит свое совокупное отражение в модели, раскрывающей термофлуктуационную природу деформирования и разрушения битумных материалов.

3. Такой феномен, как «городской остров тепла», вызван в первую очередь такими причинами: антропогенные источники тепла (машины, промышленность и др.), увеличенная теплоемкость городской среды (огромное количество строительных материалов), уменьшение испарения (меньше растительности и водоемов), парниковый эффект и снижение турбулентного переноса (низкая скорость ветра). Очевидно, что игнорировать подобный эффект в городском дорожном хозяйстве нельзя. Более высокие температуры покрытия будут приводить к его повышенной пластичности и, как следствие, к повышенному колебанию и поперечному волнообразованию асфальтобетонного дорожного покрытия. Основным способом уменьшения негативного влияния на дорожные покрытия в городской черте является создание «холодного асфальта». В настоящее время широко используется такая мера как охлаждение испарением (полив полотна). Мера действенная, но достаточно высокочувствительная (вода, спецтранспорт, топливо и др) и не позволяющая производить одновременную обработку больших площадей. Более перспективными научными направлениями в этой области, на взгляд авторов, являются «материаловедческие»: 1) теплофизического характера (направленные на уменьшение теплоемкости и/или теплопроводности дорожных покрытий); 2) оптического характера (управление альбедо покрытия: спектрально- и/или термоуправляемые материалы) [92]. А также устройство так называемого «механического охлаждения» с помощью воды (или другого жидкого теплоносителя) циркулирующей по трубам, встроенным в дорожные покрытия и тротуары.

4. Так как характеристики энергообмена между дорогой и транспортным средством, очевидно, зависят от скорости движения, то исследования и расчеты с применением, так называемого, коэффициента динамичности являются востребованными. Проведенный в работе сравнительный анализ выражений для расчета коэффициента динамичности, основанного на решении волнового уравнения (Корочкин А.В) и предложенного авторами (с помощью выражений для динамических сил со стороны колеса на покрытие), показывает качественное их совпадение. Таким образом, предложенный авторами способ расчета коэффициента динамичности дополнит существующие способы его оценки.

5. При уплотнении устраиваемого асфальтобетонного дорожного покрытия встает задача рационального числа проходов уплотнителя (катка) по одному следу. Для решения этой задачи в настоящее время используются модели с применением коэффициента уплотнения. Авторами предложен способ расчета рационального числа проходов с использованием коэффициента пластичности асфальтобетонного покрытия. Предложенный способ может расширить и дополнить существующие современные методы контроля.

6. Рассмотренные способы аккумуляции и использования энергии дорог показывают перспективы развития сети умных дорог в направлении их энергонезависимости.

Литература

- [1]. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство // Инженерно-строительный журнал, №5, 2015. с 34-33
- [2]. 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.

- [3]. Louhghalam A., Akbarian M., Ulm F. J. Flüggé's conjecture: dissipation-versus deflection-induced pavement–vehicle interactions // *Journal of Engineering Mechanics*. 2013. Vol. 140. No. 8. Pp. 171–179.
- [4]. Anupam K. [et al.] Influence of Temperature on tire-pavement friction // *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 2013. Vol. 2369. No. 1. Pp. 114–124.
- [5]. 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.
- [6]. Pouget S. [et al.] 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.
- [7]. Gui J. [et al.] Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007. Vol. 19. No. 8. Pp. 683–690.
- [8]. Feng D. [et al.] 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.
- [9]. Завьялов М.А. Термодинамическая теория жизненного цикла дорожного асфальтобетонного покрытия // *Издательство: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ) (Омск)*. 283 с.
- [10]. Zoorob S. E., Collop A. C., Brown S. F. Performance of bituminous and hydraulic materials in pavements. -Published by Taylor & Francis, 2002. 416 p.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. Щепетева Л.С., Агапитов Д.А., Тюрюханов К.Ю. Устойчивость асфальтобетона к колееобразованию // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. 2016. Т. 1. С. 319-323.
- [14]. Ядыкина В.В., Ашыров О., Хороших А.С. Повышение устойчивости асфальтобетона к колееобразованию // *В сборнике: Эффективные строительные композиты Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*. 2015. С. 771-774.
- [15]. Яковлева, М.И. Испытание колеей / М.И. Яковлева, В.А. Золотарев // *Автомобильные дороги*. 2011. №1. С. 89-90.
- [16]. 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.
- [17]. Graczyk M. [et al.] Analytical solution for the heat propagation with infinite speed in the multilayer pavement system // *ARRB Conference, 26th, 2014, Sydney, New South Wales, Australia*. 2014. No. 6.1.
- [18]. 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.
- [19]. Hall M.R. [et al.] 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.
- [20]. 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.
- [21]. 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.
- [22]. Katzschner L. Urban climatology and town planning // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2008. № 2. С. 95-100.
- [23]. 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. № S1. С. 38-42.
- [24]. Li Yang, Feng Qian, De-Xuan Song, Ke-Jia Zheng. Research on Urban Heat-Island Effect. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 169. Pp. 11-18
- [25]. 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.
- [26]. Исаков С.В., Шкляев В.А. Применение карт дифференциального альбедо для оценки теплового эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // *В сборнике: Геоинформационное*

обеспечение пространственного развития Пермского края Сборник научных трудов. Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2011. С. 59-63.

- [27]. Mallick R.B. [et al.] Capturing solar energy from asphalt pavements // International symposium on asphalt pavements and environment, international society for asphalt pavements, Zurich, Switzerland. 2008. Pp. 161–172.
- [28]. Loomans M. [et al.] Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements // Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands. 2003. Pp. 745–752.
- [29]. Белицкий В. Д., Катунин А. В. Анализ состояния дорожного асфальтобетонного покрытия средствами термодинамики // Омский научный вестник. Машиностроение и машиноведение. 2014 № 1 (127) с. 93-95.
- [30]. Завьялов, М. А. Термодинамические аспекты устройства и старения асфальтобетонных покрытий / М. А. Завьялов // Вестник СибАДИ. - 2005. - № 2. - С. 61-62.
- [31]. Завьялов, М. А. Зависимость межремонтных сроков службы асфальтобетонного покрытия от вариации энтропии в процессе строительства / М. А. Завьялов, А. М. Завьялов // Известия вузов. Строительство. - 2004. - № 9. - С. 70-73
- [32]. Горячев, М.Г. Структура понятия «работоспособность нежестких дорожных одежд»: свойства, показатели, критерии оценки / М.Г. Горячев // Вестник МАДИ. – 2012. – Вып. 3(30). – С.101-108. 2.
- [33]. Горячев, М.Г. Энергетические состояния нежестких дорожных одежд при имитационном моделировании автотранспортным воздействием / М.Г. Горячев // Сейсмостойкое стр- во. Безопасность сооружений. – 2014. – №1. – Рр.60-62.
- [34]. Горячев М.Г. Энергетические критерии оценки работоспособности нежестких дорожных одежд // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 2 (37). С. 99-101.
- [35]. Завьялов М. А., Завьялов А. М. Закономерности распределения тепловой энергии в процессе деформирования дорожного покрытия//Транспортное строительство. -2007. -№2. -С.18-19.
- [36]. Пшембаев, М. К. и др. Расчет полей температур и их градиентов в дорожных бетонных покрытиях / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев, В. Д. Акельев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 4. - С. 54-63.
- [37]. Пшембаев М.К., Акельев В.Д. Определение расчетных температур в дорожных бетонных покрытиях // Вестник КГУСТА. 2016. № 2 (52). С. 55-58.
- [38]. Бургунудинов А.М., Косолапов О.А. Изменение теплофизических свойств автомобильных дорог в местах перехода выемки в насыпь // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 489-494.
- [39]. Смирнов А.В., Александров А.С. Механика дорожных конструкций. Омск: Изд-во СибАДИ. 2009. 211 с.
- [40]. Завьялов М. А. Некоторые закономерности процесса деформирования дорожного покрытия//Известия вузов. Строительство. -2007. -№1. -С.94-97.
- [41]. 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.
- [42]. Khavassefat P., Jelagin D., Birgisson B. Dynamic response of flexible pavements at vehicle–road interaction // Road Materials and Pavement Design. – 2015. – Vol. 16. – No. 2. – Pp. 256-276.
- [43]. Корочкин А.В. Расчет жесткой дорожной одежды с учетом воздействия движущегося транспортного средства // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 2. – С. 8-10.
- [44]. Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 70-76
- [45]. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Определение значения коэффициента пластичности дорожной одежды // Известия вузов. Строительство. 2006. №. 1. С. 76-79.
- [46]. Милюшенко С.А. К вопросу моделирования рабочего процесса укладки асфальтобетонного покрытия асфальтоукладчиком // В сборнике: Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 280-282.
- [47]. Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: труды 3-й междуна. научн.-техн. конф., 5-8 июня 2007/под ред. В. П Горелова, С. В. Журавлева, В. А. Глушеч. -Омск: Иртышский филиал ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 2007. -Ч. 1. -265 с.
- [48]. Зубков А.Ф., Андрианов К.А., Куприянов Р.В. Влияние условий производства работ на длину полосы укладки асфальтобетонных смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий // Научный журнал строительства и архитектуры. 2016. № 3 (43). С. 43-55.

- [49]. Зубков А.Ф. Определение возможной продолжительности уплотнения покрытий нежесткого типа при строительстве автомобильных дорог // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2006. Т. 12. № 3-2. С. 806-817.
- [50]. Зубков А.Ф. Анализ методов разработки технологических процессов уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2006. Т. 12. № 4-2. С. 1158-1161.
- [51]. Потеряев И.К., Суковин М.В., Алешков Д.С. Методика вероятностной оценки интенсивности использования дорожно-строительной машины - асфальтоукладчика - в сменное время // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 2 (33). С. 126.
- [52]. Завьялов М. А. Функциональное состояние дорожного асфальтобетонного покрытия // Известия вузов. Строительство. -2007. -№6. С.92-97.
- [53]. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцев, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев / под ред. Л.Б. Гезенцева. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Транспорт, 1985. -350 с.
- [54]. Кирюхин Г.Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2013. 2(30). С. 309–328.
- [55]. Кирюхин Г.Н. Термофлуктуационная и фрактальная модель долговечности асфальтобетона // Дороги и мосты. 2014. № 1 (31). С. 247-268.
- [56]. Ковалев Я.Н. Дорожно-климатическое районирование территории БССР для строительства асфальтобетонных покрытий / Я.Н. Ковалев // Применение местных материалов в дорожном строительстве БССР: сб. статей. – М.: Транспорт, 1966. – С. 64-71.
- [57]. Горецкий Л.И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия / Л.И. Горецкий. – М.: Транспорт, 1965. – 284 с.
- [58]. J. Gui, P.E. Phelan, K.E. Kaloush, and J. S. Golden, "Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 683-690, 2007.
- [59]. Abbas Mohajerani, Jason Bakaric, Tristan Jeffrey-Bailey The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 15 July 2017. Vol. 197. Pp. 522-538
- [60]. Youpei Hu, Marcus White, Wowo Ding. An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 169, Pp. 166-174
- [61]. Сайлаубекова Н.С., Абеева А.А. Теория изменения температуры воздуха в трассовой зоне от теплоотдачи с поверхности дорожного покрытия // Наука и Мир. 2014. Т. 1. № 6 (10). С. 71-75.
- [62]. Levinson, R., H. Akbari, S. Konopacki, and S. Bretz. 2005. Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy* 33 (2), pp. 151- 170.
- [63]. Chiarelli A., Dawson A.R., García A. Pavement temperature mitigation by the means of geothermally and solar heated air. *Geothermics*, Volume 68, July 2017, Pp. 9-19
- [64]. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Математическая модель изменения объемной теплоемкости дорожной одежды с асфальтобетонными покрытиями в процессе эксплуатации // Омский научный вестник. 2006. №1. С. 51–52.
- [65]. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Теплоемкость асфальтобетона // Строительные материалы. 2009. №7. С. 6–9.
- [66]. Николаев В.Г. Обогрев и охлаждение дорог // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2007. № 11. С. 34-37.
- [67]. Nam Tran, Buzz Powell, Howard Marks, Randy West, Andrea Kvasnak Strategies for design and construction of high-reflectance asphalt pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2009/9/3 Pp. 124-130
- [68]. Aimin Sha, Zhuangzhuang Liu, Kun Tang, Pinyi Li. Solar heating reflective coating layer (SHRCL) to cool the asphalt pavement surface. *Construction and Building Materials*, Volume 139, 15 May 2017, Pages 355-364.
- [69]. Лебедев П.П., Хорошко С.Е., Шведова С.А., Комарова Н.Д. Холодный асфальт // Университетская наука. 2016. № 2. С. 63-66.
- [70]. Андронов С.Ю. Снижение шума дорожными покрытиями из холодного вибролитого регенерированного асфальта // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 1 (20). С. 42.
- [71]. R. B. Mallick, B.-L. Chen, and S. Bhowmick, "Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 2, no. 3, 2009. pp. 214–228.

- [72]. Hasebe M, Kamikawa Y, Meiarashi S. Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement. In: Proceedings of the 2006 International Conference on Thermoelectrics; 6–10 August 2006; Vienna, Austria. pp. 697–700.
- [73]. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Энергетический баланс дорожного покрытия // Известия вузов. Строительство. 2005. №6. С. 61–64.
- [74]. Степанов А.В., Корягин О.Г. Осветленные асфальтобетонные покрытия и возможности энергосбережения в наружном освещении // Энергосбережение. 2001. №2. С. 10–11.
- [75]. Paul Coseo, Larissa Larsen Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The Effectiveness of Chicago's Green Alley Program. *Procedia Engineering*, Volume 118, 2015, Pages 691-710.
- [76]. M. Pomerantz, H. Akbari, S.-C. Chang, R. Levinson, and B. Pon, "Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals," Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [77]. D. J. Sailor, and H. Fan, "Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities," *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 4, pp. 713-725, 2002.
- [78]. L. Doulos, M. Santamouris, and I. Livada, "Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials," *Solar energy*, vol. 77, no. 2, pp. 231-249, 2004.
- [79]. Kulkarni A.A.. "Solar roadways" – rebuilding our infrastructure and economy // *International journal of engineering research and applications (IJERA)*, vol. 3, issue 3, 2013, pp. 1429-1436.
- [80]. Azin Sadeghi Dezfooli, Fereidoon Moghadas Nejad, Hamzeh Zakeri, Sholeh Kazemifard. Solar pavement: A new emerging technology. *Solar Energy*, Volume 149, June 2017, Pages 272-284
- [81]. Xu G Solar roadways // В сборнике: Расширенное воспроизводство инновационной экономики и интенсификация спроса на инновации в России Сборник научных статей. ФГБОУ ВПО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»; Под редакцией Л.П. Гончаренко, С.А. Филина; Составители Е.Е. Налесная, Л.А. Куранова. 2016. С. 128-130.
- [82]. Derbenev I.V., Lymar Yu.A. Solar energy potential and its application in the form of solar roadways // В сборнике: Достижения и перспективы инноваций и технологий Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Под редакцией Т.Г. Клепиковой, А.Г. Михайловой. 2017. С. 67-73.
- [83]. McCabe Francis J. Gyro/Inertial Propulsion & Gyro Particles Forces Systems // *Physics Procedia*, Volume 38, 2012, Pp 198-221
- [84]. Герасимов Е.М., Третьяк Л.Н Новые подходы к проектированию систем освещения автострад. // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 3-1. С. 22-27.
- [85]. Wei Jiang, Dongdong Yuan, Shudong Xu, Huitao Hu, Yue Huang. Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. *Applied Energy*, Volume 205, 1 November 2017, Pages 941-950
- [86]. Chan Ho Yang, Yewon Song, Min Sik Woo, Jong Hyuk Eom, Tae Hyun Sung. Feasibility study of impact-based piezoelectric road energy harvester for wireless sensor networks in smart highways. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 261, 1 July 2017, Pages 317-324
- [87]. Xiaochen Xu, Dongwei Cao, Hailu Yang, Ming He. Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, In press, accepted manuscript, Available online 20 September 2017
- [88]. Hossein Roshani, Samer Dessouky, Arturo Montoya, A.T. Papagiannakis Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study // *Applied Energy*, Volume 182, 15 November 2016, Pp 210-218
- [89]. Wu M.S, Huang H.H., Huang B.J., Tang C.W., Cheng C.W Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting // *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 8, August 2009, Pp 1934-1938
- [90]. Haocheng Xiong, Linbing Wang Piezoelectric energy harvester for public roadway: On-site installation and evaluation // *Applied Energy*, Volume 174, 15 July 2016, Pp 101-107
- [91]. Дмитриев И.И., Кириллов А.М., Умные дороги и Интеллектуальная транспортная система, *Строительство уникальных зданий и сооружений*, 2017, №2 (53). С. 7-28.
- [92]. Adamov G.Ye., Grebennikov Ye.P., Kurbangaleyev V.R., Levchenko K.S., Malyshev P.B., Poroshin N.O. Spektralnopravlyayemyye materialy na osnove gibridnykh nanostruktur [Spectral-controlled materials based on hybrid nanostructures] // *Tekhnologii i materialy dlya ekstremalnykh usloviy (sozdaniye i primeneniye «umnykh» materialov) tezisy dokladov 7-y vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. 2012. Pp. 30-31.

Thermophysical models of pavement research and control

I.I. Dmitriev ^{1*}, A.M. Kirillov ²,

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

² Educational Center "Sirius", 40, Olympic Ave, Sochi, Krasnodar Region, 354349

Article info

review article

doi: 10.18720/CUBS.62.3

Article history

Received 29.06.2017

Keywords

thermophysics;
pavement;
cool asphalt;
urban heat island effect;
thermal fluctuation model;
energy efficiency;

ABSTRACT

This article deals with a thermophysical method for studying and monitoring the condition of pavements, as well as ways to improve the energy efficiency of the road network. The following directions were considered: the apparatus of thermodynamic functions, developed in the works of Goryachev M.G.; And Zavyalov M.A. (with colleagues); the thermofluuation model proposed by Kiryukhin G.N.; "urban heat island effect" and methods of creating "cool" asphalt; the process of "escorting" the bowls of the bending motion of a moving vehicle; the question of the rational number of passage by the roller on the surface to be repaired during its compaction; ways of accumulation and use of energy circulating near the road (solar, wind, kinetic and thermal energy of transport, etc.).

Contact information:

1 * +79117587771, dmitriev.ivashka@ya.ru (Ivan Dmitriev, Student)

2 +79181302257, kirill806@gmail.com (Andrey Kirillov, Ph.D., Physics Lecturer)

References

- [1]. Kirillov A.M., Zavyalov M.A. Modelirovaniye protsessov energoobmena v sisteme dorozhnoye pokrytiye – transportnoye sredstvo [Modeling of energy exchange processes in the system pavement – vehicle]. Magazine of Civil Engineering, No. 5, 2015. Pp. 34-33 (rus)
- [2]. 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.
- [3]. Louhghalam A., Akbarian M., Ulm F. J. Flügge’s conjecture: dissipation-versus deflection-induced pavement–vehicle interactions. Journal of Engineering Mechanics. 2013. Vol. 140. No. 8. Pp. 171–179.
- [4]. Anupam K. [et al.] Influence of Temperature on tire-pavement friction. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. 2013. Vol. 2369. No. 1. Pp. 114–124.
- [5]. 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.
- [6]. Pouget S. [et al.] 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.
- [7]. Gui J. [et al.] Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures. Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. Vol. 19. No. 8. Pp. 683–690.
- [8]. Feng D. [et al.] 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.
- [9]. Zavyalov M.A. Termodinamicheskaya teoriya zhiznennogo tsikla dorozhnogo asfaltobetonogo pokrytiya [thermodynamic theory of the life cycle of road asphalt concrete pavement]. Izdatelstvo: Sibirskaya gosudarstvennaya avtomobilno-dorozhnaya akademiya (SibADI) (Omsk). 283 p. (rus)
- [10]. Zoorob S. E., Collop A. C., Brown S. F. Performance of bituminous and hydraulic materials in pavements. -Published by Taylor & Francis, 2002. 416 p.
- [11]. 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.
- [12]. 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.
- [13]. Shchepeteva L.S., Agapitov D.A., Tyuryukhanov K.Yu. Ustoychivost asfaltobetona k koleyeobrazovaniyu [Stability of asphaltic concrete to the rutting]. Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse. 2016. Vol. 1. Pp. 319-323. (rus)
- [14]. Yadykina V.V., Ashyrov O., Khoroshikh A.S. Povysheniye ustoychivosti asfaltobetona k koleyeobrazovaniyu [Increasing the resistance of asphalt concrete to the rutting]. V sbornike: Effektivnyye stroitelnyye kompozity Nauchno-prakticheskaya konferentsiya k 85-letiyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk Bazhenova Yuriya Mikhaylovicha. Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova. 2015. Pp. 771-774. (rus)
- [15]. Yakovleva, M.I. Ispytaniye koleyey [Test track]. M.I. Yakovleva, V.A. Zolotarev. Avtomobilnyye dorogi. – 2011. - №1. - Pp. 89-90. (rus)
- [16]. Khafizov E.R., Vdovin Ye.A., Fomin A.Yu., Mavliyev L.F., Bulanov N.Ye. Sovremennyye metody otsenki ekspluatatsionnykh svoystv dorozhnykh asfaltobetonov [Modern methods for assessing the performance of road asphalt concretes]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. No. 1 (39). Pp. 279-285. (rus)
- [17]. Graczyk M. [et al.] Analytical solution for the heat propagation with infinite speed in the multilayer pavement system. ARRB Conference, 26th, 2014, Sydney, New South Wales, Australia. 2014. No. 6.1.
- [18]. 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.
- [19]. Hall M.R. [et al.] 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.
- [20]. 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.
- [21]. 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. 2004. No. 1. Pp. 28-31. (rus)

- [22]. Katzschner L. Urban climatology and town planning. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2008. № 2. Pp. 95-100. (rus)
- [23]. Baldina Ye.A., Konstantinov P., Grishchenko M., Varentsov M. Issledovaniye gorodskikh ostrovov tepla s pomoshchyu dannykh distantsionnogo zondirovaniya v infrakrasnom teplovom diapazone // Zemlya iz kosmosa: naiboleye effektivnyye resheniya. 2015. № S1. S. 38-42. (rus)
- [24]. Li Yang, Feng Qian, De-Xuan Song, Ke-Jia Zheng. Research on Urban Heat-Island Effect. Procedia Engineering, 2016. Vol. 169. Pp.. 11-18
- [25]. Isakov S.V., V Shklyayev.A. Opredeleniye summarnogo vliyaniya antropogennnoizmennykh 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. 2014. № 1 (162). S. 178-182. (rus)
- [26]. 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]. V sbornike: Geoinformatsionnoye obespecheniye prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraya Sbornik nauchnykh trudov. Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet. Perm, 2011. S. 59-63. (rus)
- [27]. Mallick R.B. [et al.] Capturing solar energy from asphalt pavements. International symposium on asphalt pavements and environment, international society for asphalt pavements, Zurich, Switzerland. 2008. Pp. 161–172.
- [28]. Loomans M. [et al.] Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements. Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands. 2003. Pp. 745–752.
- [29]. Belitskiy V. D., Katunin A. V. Analiz sostoyaniya dorozhnogo asfal'tobetonnoy pokrytiya sredstvami termodinamiki [Analysis of the state of road asphalt-concrete coating by means of thermodynamics]. Omskiy nauchnyy vestnik. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye. 2014 № 1 (127). Pp. 93-95. (rus)
- [30]. Zav'yalov, M. A. Termodinamicheskiye aspekty ustroystva i stareniya asfal'tobetonnykh pokrytiy / M. A. Zav'yalov [Thermodynamic Aspects of the Device and Aging of Asphalt Concrete Coatings]. Vestnik SibADI. 2005. № 2. Pp. 61-62. (rus)
- [31]. Zav'yalov, M. A. Zavisimost' mezhremontnykh srokov sluzhby asfal'tobetonnoy pokrytiya ot variatsii entropii v protsesse stroitel'stva [Dependence of the overhaul lifetimes of the asphalt-concrete cover on the variation of entropy in the process of construction]. M. A. Zav'yalov, A. M. Zav'yalov. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2004. № 9. Pp. 70-73 (rus)
- [32]. Goryachev, M.G. Struktura ponyatiya «rabotosposobnost nezhestkikh dorozhnykh odezhd»: svoystva, pokazateli, kriterii otsenki [Structure of the concept of "working capacity of non-rigid road clothes": properties, indicators, evaluation criteria] M.G. Goryachev. Vestnik MADI. – 2012. – Vyp. 3(30). – Pp.101-108. 2.
- [33]. Goryachev, M.G. Energeticheskiye sostoyaniya nezhestkikh dorozhnykh odezhd pri imitatsionnom modelirovani avtotransportnym vozdeystviyem [Energy states of non-rigid road clothes during imitation modeling by motor transport] / M.G. Goryachev. Seysmostoykoye str- vo. Bezopasnost sooruzheniy. – 2014. – No. 1. – PP.60-62. (rus)
- [34]. 34. Goryachev M.G. Energeticheskiye kriterii otsenki rabotosposobnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Energy criteria for assessing the performance of non-rigid pavements]. Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI). 2014. No. 2 (37). PP. 99-101. (rus)
- [35]. Zav'yalov M. A., Zav'yalov A. M. Zakonomernosti raspredeleniya teplovoy energii v protsesse deformirovaniya dorozhnogo pokrytiya [Regularities of thermal energy distribution in the process of deformation of the road surface].Transportnoye stroitel'stvo. -2007. -No. 2. -Pp.18-19. (rus)
- [36]. Pshembayev, M. K. i dr. Raschet poley temperatur i ikh gradiyentov v dorozhnykh betonnykh pokrytiyakh [Calculation of the temperature fields and their gradients in road concrete coverings]. M. K. Pshembayev, YA. N. Kovalev, V. D. Akel'yev. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. Energetika. – 2015. – No. 4. - Pp. 54-63. (rus)
- [37]. Pshembayev M.K., Akel'yev V.D. Opredeleniye raschetnykh temperatur v dorozhnykh betonnykh pokrytiyakh [Determination of design temperatures in road concrete coatings]. Vestnik KGUSTA. 2016. No. 2 (52). Pp. 55-58. (rus)
- [38]. Burgonutdinov A.M., Kosolapov O.A. Izmeneniye teplofizicheskikh svoystv avtomobil'nykh dorog v mestakh perekhoda vyemki v nasyp' [The change in the thermophysical properties of highways in the areas of transition of the excavation to the embankment].Fundamental'nyye issledovaniya. 2016. No. 11-3. Pp. 489-494. (rus)
- [39]. Smirnov A.V., Aleksandrov A.S. Mekhanika dorozhnykh konstruksiy [Mechanics of road structures]. – Omsk: Izd-vo SibADI. – 2009. – 211 p. (rus)
- [40]. Zav'yalov M. A. Nekotoryye zakonomernosti protsessa deformirovaniya dorozhnogo pokrytiya [Some regularities of the process of deformation of the road surface]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. -2007. -No. 1. -Pp.94-97. (rus)

- [41]. 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.
- [42]. Khavassefat P., Jelagin D., Birgisson B. Dynamic response of flexible pavements at vehicle–road interaction. *Road Materials and Pavement Design*. – 2015. – Vol. 16. – No. 2. – Pp. 256-276.
- [43]. Korochkin A.V. Raschet zhestkoy dorozhnoy odezhdy s uchetom vozdeystviya dvizhushchegosya transportnogo sredstva [Calculation of rigid pavement taking into account the impact of a moving vehicle]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. – 2011. –No. 2. – Pp. 8-10. (rus)
- [44]. Kirillov A.M., Zav'yalov M.A. Modelirovaniye izmeneniya modulya uprugosti asfal'tobetona pri nagruzhении [Modeling the change in the modulus of elasticity of asphalt concrete under loading]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2015. No. 2 (54). Pp. 70-76. (rus)
- [45]. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Opredeleniye znacheniya koeffitsiyenta plastichnosti dorozhnoy odezhdy [Determination of the value of the coefficient of plasticity of pavement]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2006. No. 1. Pp. 76-79. (rus)
- [46]. Milyushenko S.A. K voprosu modelirovaniya rabocheho protsessa ukladki asfal'tobetonnoy pokrytiya asfal'toukladchikom [To the issue of modeling the working process of paving of asphalt concrete pavement asphalt paver]. V sbornike: Aktual'nyye problemy nauki i tekhniki glazami molodykh uchenykh materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2016. Pp. 280-282. (rus)
- [47]. Energetika, ekologiya, energosberezheniye, transport: trudy 3-y mezhdun. nauchn.-tekhn. konf., 5-8 iyunya 2007 [Energy, ecology, energy saving, transport: works 3rd international. scientific-techn. Conf., 5-8 June 2007] /pod red. V. P Gorelova, S. V. Zhuravleva, V. A. Glushets. -Omsk: Irtyshskiy filial FGOU VPO «Novosibirskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta», 2007. -CH. 1. -265 p. (rus)
- [48]. Zubkov A.F., Andrianov K.A., Kupriyanov R.V. Vliyaniye usloviy proizvodstva rabot na dlinu polosy ukladki asfal'tobetonnykh smesey pri ustroystve mnogopolosnykh dorozhnykh pokrytiy [Influence of working conditions on the length of the strip of laying of asphalt-concrete mixtures in the construction of multilane road surfaces]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2016. No. 3 (43). Pp. 43-55. (rus)
- [49]. Zubkov A.F. Opredeleniye vozmozhnoy prodolzhitel'nosti uplotneniya pokrytiy nezhestkogo tipa pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog [Determination of the possible duration of compaction of non-rigid type coatings during road construction]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. Vol. 12. No. 3-2. Pp. 806-817. (rus)
- [50]. Zubkov A.F. Analiz metodov razrabotki tekhnologicheskikh protsessov uplotneniya dorozhnykh pokrytiy iz goryachikh asfal'tobetonnykh smesey [Analysis of methods for the development of technological processes of compaction of road surfaces from hot asphalt mixes]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. Vol. 12. No. 4-2. Pp. 1158-1161. (rus)
- [51]. Poteryayev I.K., Sukovin M.V., Aleshkov D.S. Metodika veroyatnostnoy otsenki intensivnosti ispol'zovaniya dorozhno-stroitel'noy mashiny - asfal'toukladchika - v smennoye vremya [A technique for probabilistic estimation of the intensity of the use of a road-building machine - an asphalt spreader - in shift times]. *Internet-zhurnal Naukovedeniye*. 2016. Vol. 8. No. 2 (33). P. 126. (rus)
- [52]. Zav'yalov M. A. Funktsional'noye sostoyaniye dorozhnogo asfal'tobetonnoy pokrytiya. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. - 2007. -№6. Pp.92-97. (rus)
- [53]. Dorozhnyy asfal'tobeton [Road asphalt concrete]. L.B. Gezentsvey, N.V. Gorelyshev, A.M. Boguslavskiy, I.V. Korolev/pod red. L.B. Gezentsveya. -2-ye izd., pererab.i dop. -M.: Transport, 1985. -350 p.
- [54]. Kiryukhin G.N. Temperaturnyye rezhimy raboty asfal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog [Temperature conditions of asphalt-concrete road surface coverings]. *Dorogi i mosty*. 2013. 2(30). Pp. 309–328. (rus)
- [55]. Kiryukhin G.N. Termoflukuatsionnaya i fraktalnaya model dolgovechnosti asfal'tobetona [Thermo Fluctuation and Fractal Durability Model of Asphalt Concrete]. *Dorogi i mosty*. 2014. No 1 (31). Pp. 247-268. (rus)
- [56]. Kovalev Ya.N. Dorozhno-klimaticheskoye rayonirovaniye territorii BSSR dlya stroitel'stva asfal'tobetonnykh pokrytiy [Road-climatic zoning of the territory of the BSSR for the construction of asphalt-concrete coatings] / Ya.N. Kovalev. *Primeneniye mestnykh materialov v dorozhnom stroitel'stve BSSR: sb. statey*. – M.: Transport, 1966. – Pp. 64-71. (rus)
- [57]. Goretskiy L.I. Teoriya i raschet tsementobetonnykh pokrytiy na temperaturnyye vozdeystviya [Theory and calculation of cement-concrete coatings for temperature effects] / L.I. Goretskiy. – M.: Transport, 1965. – 284 p.(rus)
- [58]. J. Gui, P.E. Phelan, K.E. Kaloush, and J. S. Golden, "Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 683-690, 2007.
- [59]. Abbas Mohajerani, Jason Bakaric, Tristan Jeffrey-Bailey The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 15 July 2017. Vol. 197. Pp. 522-538

- [60]. Youpei Hu, Marcus White, Wowo Ding. An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 169, Pp. 166-174
- [61]. Saylaubekova N.S., Abeyeva A.A. Teoriya izmeneniya temperatury vozdukh v trassovoy zone ot teplootdachi s poverkhnosti dorozhnogo pokrytiya [Theory of the variation of air temperature in the route zone from heat transfer from the pavement surface]. *Nauka i Mir*. 2014. Vol. 1. No 6 (10). Pp. 71-75. (rus)
- [62]. Levinson, R., H. Akbari, S. Konopacki, and S. Bretz. 2005. Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy* 33 (2), pp. 151- 170.
- [63]. Chiarelli A., Dawson A.R., García A. Pavement temperature mitigation by the means of geothermally and solar heated air. *Geothermics*, Volume 68, July 2017, Pp. 9-19
- [64]. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Matematicheskaya model izmeneniya obyemnoy teployemkosti dorozhnoy odezhdy s asfaltobetonnyimi pokrytiyami v protsesse ekspluatatsii [Mathematical model of the change in the volumetric heat capacity of pavement with asphalt-concrete coatings during operation]. *Omskiy nauchnyy vestnik*. 2006. No 1. Pp. 51-52.
- [65]. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Teployemkost asfaltobetona [Heat capacity of asphalt concrete]. *Stroitelnyye materialy*. 2009. No 7. Pp. 6–9. (rus)
- [66]. Nikolayev V.G. Obogrev i okhlazhdeniye dorog [Heating and cooling of roads]. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2007. № 11. Pp. 34-37. (rus)
- [67]. Nam Tran, Buzz Powell, Howard Marks, Randy West, Andrea Kvasnak Strategies for design and construction of high-reflectance asphalt pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2009/9/3 Pp. 124-130
- [68]. Aimin Sha, Zhuangzhuang Liu, Kun Tang, Pinyi Li. Solar heating reflective coating layer (SHRCL) to cool the asphalt pavement surface. *Construction and Building Materials*, Volume 139, 15 May 2017, Pages 355-364.
- [69]. Lebedev P.P., Khoroshko S.Ye., Shvedova S.A., Komarova N.D. Kholodnyy asfal't [Cold asphalt]. *Universitetskaya nauka*. 2016. No. 2. Pp. 63-66. (rus)
- [70]. Andronov S.YU. Snizheniye shuma dorozhnymi pokrytiyami iz kholodnogo vibrolitogo regenerirovannogo asfal'ta [Reduction of noise by road coverings from cold vibrated recovered asphalt]. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2012. No. 1 (20). P. 42. (rus)
- [71]. R. B. Mallick, B.-L. Chen, and S. Bhowmick, "Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 2, no. 3, 2009. pp. 214–228.
- [72]. Hasebe M, Kamikawa Y, Meiarashi S. Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement. In: *Proceedings of the 2006 International Conference on Thermoelectrics*; 6–10 August 2006; Vienna, Austria. pp. 697-700.
- [73]. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Energeticheskiy balans dorozhnogo pokrytiya [Energy balance of the road surface]. *Izvestiya vuzov.Stroitelstvo*. 2005. №6. Pp. 61–64. (rus)
- [74]. Stepanov A.V., Koryagin O.G. Osvetlennyye asfaltobetonnyye pokrytiya i vozmozhnosti energosberezheniya v naruzhnom osveshchenii [Clarified asphalt pavements and energy saving in outdoor lighting]. *Energosberezheniye*. 2001. No. 2. Pp. 10–11. (rus)
- [75]. Paul Coseo, Larissa Larsen Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The Effectiveness of Chicago's Green Alley Program. *Procedia Engineering*, Volume 118, 2015, Pages 691-710.
- [76]. M. Pomerantz, H. Akbari, S.-C. Chang, R. Levinson, and B. Pon, "Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals," *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2003.
- [77]. D. J. Sailor, and H. Fan, "Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities," *Atmospheric Environment*, vol. 36, no. 4, pp. 713-725, 2002.
- [78]. L. Doulos, M. Santamouris, and I. Livada, "Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials," *Solar energy*, vol. 77, no. 2, pp. 231-249, 2004.
- [79]. Kulkarni A.A.. "Solar roadways" – rebuilding our infrastructure and economy. *International journal of engineering research and applications (IJERA)*, vol. 3, issue 3, 2013, pp. 1429-1436.
- [80]. Mallick R. B. et al. Capturing solar energy from asphalt pavements. *International symposium on asphalt pavements and environment, international society for asphalt pavements, Zurich, Switzerland*. 2008.
- [81]. Xu G. Solar roadways. V sbornike: *Rasshirennoye vosproizvodstvo innovatsionnoy ekonomiki i intensivatsiya sprosna na innovatsii v Rossii Sbornik nauchnykh statey*. FGBOU VPO «Rossiyskiy ekonomicheskiy universitet imeni G.V. Plekhanova»; Pod redaktsiyey L.P. Goncharenko, S.A. Filina; Sostaviteli Ye.Ye. Nalesnaya, L.A. Kuranova. 2016. Pp. 128-130.

- [82]. Derbenev I.V., Lyamar Yu.A. Solar energy potential and its application in the form of solar roadways. V sbornike: Dostizheniya i perspektivy innovatsiy i tekhnologiy Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh. Pod redaktsiyey T.G. Klepikovoy, A.G. Mikhaylovoy. 2017. Pp. 67-73.
- [83]. McCabe Francis J. Gyro/Inertial Propulsion & Gyro Particles Forces Systems. Physics Procedia, Volume 38, 2012, Pp 198-221
- [84]. Gerasimov Ye.M., Tretyak L.N. Novyye podkhody k proyektirovaniyu sistem osveshcheniya avtostrad. [New approaches to designing motorway lighting systems]. Fundamentalnyye issledovaniya. 2014. № 3-1. Pp. 22-27. (rus)
- [85]. Wei Jiang, Dongdong Yuan, Shudong Xu, Huitao Hu, Yue Huang. Energy harvesting from asphalt pavement using thermoelectric technology. Applied Energy, Volume 205, 1 November 2017, Pages 941-950
- [86]. Chan Ho Yang, Yewon Song, Min Sik Woo, Jong Hyuk Eom, Tae Hyun Sung. Feasibility study of impact-based piezoelectric road energy harvester for wireless sensor networks in smart highways. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 261, 1 July 2017, Pages 317-324
- [87]. Xiaochen Xu, Dongwei Cao, Hailu Yang, Ming He. Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. International Journal of Pavement Research and Technology, In press, accepted manuscript, Available online 20 September 2017
- [88]. Hossein Roshani, Samer Dessouky, Arturo Montoya, A.T. Papagiannakis Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study. Applied Energy, Volume 182, 15 November 2016, Pp 210-218
- [89]. Wu M.S, Huang H.H., Huang B.J., Tang C.W., Cheng C.W Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting. Renewable Energy, Volume 34, Issue 8, August 2009, Pp 1934-1938
- [90]. Haocheng Xiong, Linbing Wang Piezoelectric energy harvester for public roadway: On-site installation and evaluation. Applied Energy, Volume 174, 15 July 2016, Pp 101-107
- [91]. Dmitriyev I.I., Kirillov A.M., Umnyye dorogi i Intelktualnaya transportnaya sistema [Smart roads and Intelligent transport system], Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy, 2017, №2 (53). Pp. 7-28. (rus)
- [92]. Adamov G.Ye., Grebennikov Ye.P., Kurbangaleyev V.R., Levchenko K.S., Malyshev P.B., Poroshin N.O. Spektralnouravlyayemye materialy na osnove gibridnykh nanostruktur [Spectral-controlled materials based on hybrid nanostructures]. Tekhnologii i materialy dlya ekstremalnykh usloviy (sozdaniye i primeneniye «umnykh» materialov) tezisy dokladov 7-y vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. 2012. Pp. 30-31. (rus)

Дмитриев И.И., Кириллов А.М., Теплофизические модели исследования и контроля дорожного покрытия, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №11(62). С.25-46.

Dmitriev I.I., Kirillov A.M. Thermophysical models of pavement research and control, Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 11 (62). Pp. 25-46. (rus)