

doi: 10.5862/MCE.57.3

## Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство

*Канд. физ.-мат. наук, доцент А.М. Кириллов,  
д-р техн. наук, профессор М.А. Завьялов,  
Сочинский государственный университет*

**Аннотация.** В системе дорожное покрытие – транспортное средство закон сохранения энергии проявляется, прежде всего, в том, что при любых температурных и эксплуатационных режимах дорожного асфальтобетонного покрытия часть потенциальной энергии силы тяжести и кинетической энергии транспортного средства преобразуется при контакте с дорожным покрытием в энергию упругой деформации и тепловую энергию, часть энергии рассеивается. Эти виды энергии в той или иной степени реализуются во внутреннюю энергию дорожного покрытия, изменяя его энергетический баланс и обуславливая деструктивные процессы.

В процессе эксплуатации автомобильной дороги первоначальный уровень внутренней энергии покрытия изменяется: с одной стороны, из-за регулярной подпитки со стороны транспортных средств и солнечного излучения, с другой стороны, расходуясь на компенсационную работу по восстановлению вязкоупругих деформаций. Понимание этих изменений позволит развить новые, более совершенные методы контроля состояния покрытия и научно обоснованную систему назначения сроков ремонтных работ. В данной публикации авторы оценили уровень и значение вклада работы, совершаемой над покрытием движущимся транспортом, и теплового излучения в прирост внутренней энергии дорожного покрытия.

Построена физическая и математическая модель рассеивания и накопления энергии в системе дорожное покрытие – транспортное средство с учетом вязкоупругого деформирования и теплового излучения. Разработан алгоритм, позволяющий определить научно обоснованный межремонтный срок службы асфальтобетонного покрытия. Показано, что максимальная пластичность в некоторых интервалах скоростей и весов транспорта может служить критерием рекомендуемого режима эксплуатации дороги.

**Ключевые слова:** дорожное покрытие; асфальтобетон; силовые параметры транспорта; энергообмен; рассеивание энергии; вязкоупругость; удельная теплоемкость; деформация

### *Введение*

Теплофизические параметры имеют в основном энергетический характер, отражая, например, способность материала к энергообмену с окружающей средой (теплопроводность) или способность к накоплению энергии (теплоемкость) и др. Эти параметры зависят от структуры вещества на макро-, мезо- и микроуровнях, а также от характера и величины сил межмолекулярного взаимодействия в веществе. Однако от этого же зависят и физико-механические параметры материала: модуль упругости, коэффициент пластичности и др. Следовательно, теплофизические и физико-механические параметры материала имеют глубинные связи между собой, и их выявление является актуальной задачей, так как знание подобных связей позволит заменить или дополнить традиционные «механические» методы мониторинга состояния дорожного покрытия «теплофизическими».

Энергетический обмен присущ любой технической системе. Изменение энергообмена является главной количественной характеристикой изменения состояния физической системы. Знание характеристик энергетического обмена, то есть динамики энергообмена между физической системой и окружающей средой и/или соседними системами, дает возможность прогнозирования свойств систем, а также вмешательства в ход протекающих в них процессов с целью управления ими. Транспорт, дорога и окружающая среда являются частями системы, в которой протекают разнообразные энергетические процессы: превращение механической энергии движущегося вещества в тепловую энергию и энергию деформации, рассеяние (диссипация) энергии и перераспределение между частями системы и др. Система дорожное покрытие – транспортное средство по признаку поведения энергоносителей является нестационарной неравновесной, т.к. количество энергоносителей в ней со временем изменяется, а сами энергоносители подвижны.

## Обзор литературы

В настоящее время решением проблемы диссипации энергии в системе дорожное покрытие – транспортное средство активно занимаются зарубежные научные коллективы. Цели, которые ставятся в научных публикациях, посвященных данной теме, можно условно разбить на три крупные группы. К первой, наиболее представительной, относятся исследования по установлению пределов зависимости коэффициента сцепления колеса с покрытием при различных температурах для обеспечения оптимального скоростного режима транспортного средства [1, 2], безопасности [3] и комфортности движения [4] как следствие экономии топлива [5]. Ко второй – исследования, позволяющие осуществить подбор материалов покрытия, обладающих заданными теплофизическими свойствами, способными смягчить тепловое поглощение и высокие температуры поверхности покрытия [6, 7] с целью поддержания вязкопластических свойств асфальтобетона для предотвращения образования как колеейности [8], так и трещин [9]. В третью группу входят исследования, результаты которых дадут возможность регулирования поверхностных радиационных свойств: смещение альбедо и излучаемости для управления температурным градиентом [10, 11] в зависимости от гидрогеологических и климатических условий региона [12] с учетом эффекта «городского острова тепла» (urban heat island effect) [13]. Это позволит развить сеть умных дорог с возможностью кумуляции энергии [14, 15].

В работе [16] авторы получили соотношение, позволяющее определить величину энергии, получаемую дорожным покрытием от контакта с транспортным потоком в течение суток. Развитие этого направления исследований кажется перспективным. Было бы важным для практического использования выполнить численную оценку таких характеристик системы дорожное покрытие – транспортное средство, как динамические силы, работа одиночного колеса над покрытием. Также актуальными являются получение аналитических зависимостей приращения внутренней энергии, энергии упругой деформации, рассеиваемой энергии и численный анализ этих зависимостей.

## Постановка задачи

Помимо вышеуказанных направлений, актуальными являются наблюдение и управление функциональным состоянием покрытия, а также прогнозирование межремонтного срока службы. Возможность учета энергетических изменений, происходящих в системе дорожное покрытие – транспортное средство, и установление закономерностей этих изменений позволит осуществить мониторинг состояния покрытия в любой момент времени, разработать и внедрить датчики учета изменений теплофизических свойств асфальтобетона с целью определения времени проведения ремонтных работ.

Таким образом, целью данной статьи является установление зависимостей между физико-механическими и теплофизическими параметрами системы дорожное покрытие – транспортное средство, а также рассмотрение процессов и закономерностей диссипации механической и тепловой энергии транспортного средства дорожным покрытием. На основании полученных результатов можно будет обосновать оптимальные массо-скоростные режимы транспортного потока, а также предложить алгоритм для определения межремонтного срока службы асфальтобетонного покрытия.

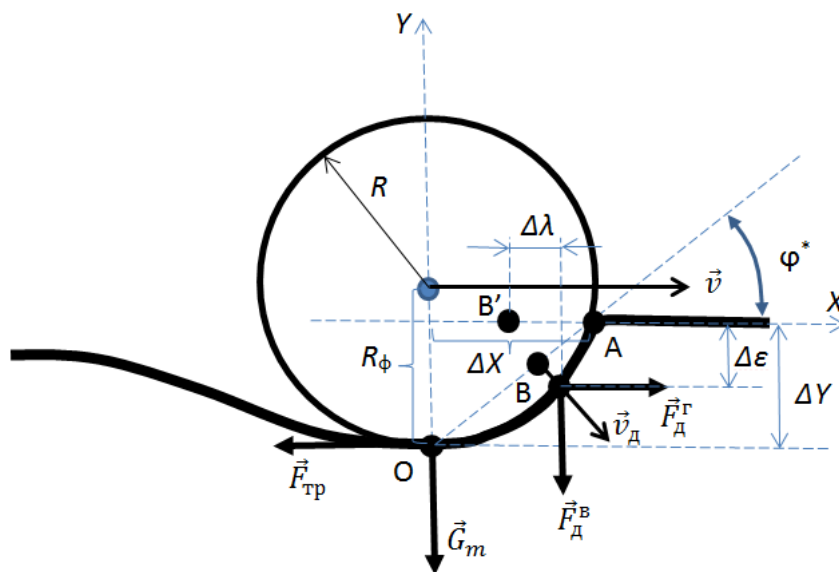
Для последующих работ перспективным является исследование рассматриваемой системы для обоснования направленного структурообразования и формирования заданных свойств материала дорожного покрытия наподобие метаматериала. Также целью дальнейших исследований может быть разработка нанодобавок и композитных составляющих с заданными свойствами, например, обеспечивающих высокое альбедо летом и низкое – зимой.

## Описание исследования

Для получения аналитических зависимостей, характеризующих энергетический баланс в системе дорожное покрытие – транспортное средство, рассмотрим ее силовые параметры. Составим расчетную схему (рис. 1) и охарактеризуем силы, действующие на покрытие со стороны транспортного средства:

- сила тяжести  $\vec{G}_m$  транспортного средства, движущегося со скоростью  $\vec{v}$ , в расчете на одно колесо радиуса  $R$ ;

- сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ , действующая со стороны ведущего колеса на дорожное покрытие и направленная по ходу движения (на ведомое колесо сила трения действует против хода движения);
- проекции  $\vec{F}_{\text{дг}}$  и  $\vec{F}_{\text{дв}}$  динамической силы на горизонталь и вертикаль соответственно;
- $R_{\phi}$  – расстояние от оси колеса до нижней контактной точки, чуть меньше радиуса колеса из-за его деформации под нагрузкой;
- абсолютная деформация покрытия  $\Delta Y$  в вертикальном направлении;
- область контакта  $\Delta X$  поверхностей колеса и дорожного полотна, отсчитываемая от проекции центра тяжести колеса на покрытие в направлении движения (динамический коэффициент сопротивления перекачиванию, называемый коэффициентом трения качения);
- деформации,  $\Delta \lambda$  – тангенциальная и  $\Delta \varepsilon$  – нормальная, имеют место только при движении транспортного средства, то есть являются динамическими деформациями.



**Рисунок 1. Расчетная схема (силы, действующие со стороны колеса на дорожное покрытие)**

Так как профиль эпюры напряжений, возникающих при деформации дорожного полотна при контакте с колесом, приближенно представляет собой треугольник, то будем считать, что линия действия динамической силы  $\vec{F}_{\text{д}}$  проходит через точку В («центр тяжести» динамической силы)

перпендикулярно отрезку АВ, причем  $AB = \frac{1}{3} OA$  [16].

Развивая полученные в работе [16] результаты и учитывая, что модули упругости при сжатии  $E$  и при сдвиге  $G$  связаны между собой через коэффициент Пуассона  $\mu$  как  $\frac{E}{G} = 2(1 + \mu)$ , для динамической скорости  $v_{\text{д}}$  получим следующее выражение:

$$v_{\text{д}} = \frac{2}{3} \frac{\Delta Y \sqrt{1 + \frac{(1 + \mu)^2}{\sin^2 \varphi}}}{R_{\phi}} \cdot v, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения материала дорожного покрытия:

$$\left( \operatorname{tg} \varphi^* = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{F_{\text{дг}}}{F_{\text{дв}}} = \frac{\sin \varphi}{1 + \mu} \right).$$

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство

С учетом (1) формулы для сил приобретают вид:

$$F_{\text{дв}} = \frac{2 G_m (\Delta Y)^2 v^2}{9 g \Delta \varepsilon R_{\text{ф}}^2} \left[ \frac{1 + \frac{(1 + \mu)^2}{\sin^2 \varphi}}{1 + \frac{2 \sin^2 \varphi}{1 + \mu}} \right]; \quad F_{\text{др}} = \frac{2 G_m (\Delta Y)^2 v^2}{9 g \Delta \varepsilon R_{\text{ф}}^2} \left[ \frac{1 + \frac{(1 + \mu)^2}{\sin^2 \varphi}}{2 \sin \varphi + \frac{1 + \mu}{\sin \varphi}} \right], \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Полученные выражения (2) для сил позволяют определить работу  $A$ , производимую транспортом над дорожным покрытием. Ее, в свою очередь, можно разделить на две составляющие [16]:

$$A = A_{\tau} + A_n. \quad (3)$$

Это работа, производимая над дорожным покрытием горизонтальными силами,

$$A_{\tau} = q j [F_{\text{тр}} \Delta X + F_{\text{др}} \Delta \lambda], \quad (4)$$

и работа, производимая вертикальными силами,

$$A_n = q j [G_m \Delta Y + F_{\text{дв}} \Delta \varepsilon]. \quad (5)$$

В формулах (1)–(5) имеются в виду математические ожидания уже известных величин, а также:  $q$  – математическое ожидание суточной интенсивности транспортных средств ( $\text{сут}^{-1}$ ),  $j$  – математическое ожидание числа колесных осей расчетного транспортного средства.

С учетом того, что сила трения

$$F_{\text{тр}} = [G_m + F_{\text{дв}}] f, \quad (6)$$

где  $f$  – математическое ожидание коэффициента сцепления, а также формул (4) и (5), выражение (3) приобретает вид:

$$A = q j \left\{ \Delta Y \left[ (G_m + F_{\text{дв}}) f \frac{1 + \mu}{\sin \varphi} + G_m \right] + \Delta \varepsilon [F_{\text{дв}} + 2F_{\text{др}} \sin \varphi] \right\}. \quad (7)$$

В выражении (7) можно выделить две части: деформационного характера  $A_{\text{деф}}$  и фрикционного –  $A_{\text{тр}}$  (работа сил трения). Соответствующие выражения имеют вид:

$$A_{\text{деф}} = q j \left\{ \Delta Y G_m + \Delta \varepsilon [F_{\text{дв}} + 2F_{\text{др}} \sin \varphi] \right\}, \quad (8)$$

$$A_{\text{тр}} = q j \Delta Y (G_m + F_{\text{дв}}) f \frac{1 + \mu}{\sin \varphi}. \quad (9)$$

Полученные зависимости работы над покрытием со стороны транспорта позволяют оценить уровень энергии упругой деформации  $E_y$  дорожного покрытия и рассеиваемой энергии  $E_{\text{рас}}$ .

Энергию упругой деформации покрытия можно ориентировочно оценить по следующей формуле:

$$E_y = q j \left( \frac{E (\Delta Y)^2}{2} + \frac{G (\Delta \lambda)^2}{2} \right) h_{\text{эф}}, \quad (10)$$

где  $h_{\text{эф}}$  – некоторый эффективный линейный размер, который можно приблизительно принять равным толщине слоя покрытия.

С учетом отношения модулей упругости на сжатие и сдвиг выражение (10) можно записать в виде:

$$E_y = q j \frac{E}{2} \left( (\Delta Y)^2 + \frac{2(\Delta \varepsilon)^2 \sin^2 \varphi}{1 + \mu} \right) h_{\text{эф}}. \quad (11)$$

Согласно закону сохранения энергии, рассеиваемая энергия

$$E_{\text{рас}} = A - E_y. \quad (12)$$

Очевидно, что часть рассеиваемой энергии  $\Delta E_{\text{рас}}$  уходит в окружающую среду. Сюда входит и энергия, уходящая в виде тепла, и энергия, уносимая колебательными (волновыми) процессами. Однако какая-то часть энергии превращается во внутреннюю энергию  $U_A$  дорожного покрытия. То есть

$$E_{\text{рас}} = U_A + \Delta E_{\text{рас}}. \quad (13)$$

Если предположить, что большая часть работы деформации  $A_{\text{деф}}$  превращается в энергию упругой деформации, и принять  $E_y \approx A_{\text{деф}}$ , то можно оценить эффективную толщину верхнего слоя асфальтобетонного покрытия с помощью выражения:

$$h_{\text{эф}} = \frac{\Delta Y G_m + \Delta \varepsilon [F_{\text{дв}} + 2F_{\text{др}} \sin \varphi]}{\frac{E}{2} \left( (\Delta Y)^2 + \frac{2(\Delta \varepsilon)^2 \sin^2 \varphi}{1 + \mu} \right)}. \quad (14)$$

Внутренняя энергия дорожного покрытия прирастает не только за счет совершения над ней работы движущимся транспортом, но также и за счет теплообмена с транспортным средством  $U_Q$ . Тогда согласно первому закону термодинамики общее приращение внутренней энергии дорожного полотна будет равно:

$$U = U_A + U_Q. \quad (15)$$

Теплообмен включает в себя процесс теплопроводности через контакт колес и дорожного полотна  $U_T$  и процесс передачи энергии от транспортного средства полотну за счет теплового излучения  $U_{\text{и}}$ :

$$U_Q = U_T + U_{\text{и}}. \quad (16)$$

Оценим вклад излучения в прирост внутренней энергии. Согласно закону Стефана – Больцмана можно записать:

$$U_{\text{и}} = q r (T_{\text{т}}^4 - T_{\text{д}}^4) S \cdot t_{\text{т}}, \quad (17)$$

где постоянная Стефана – Больцмана  $r = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{т}}$  и  $T_{\text{д}}$  – математические ожидания термодинамических температур транспорта и поверхности дороги;  $S$  – площадь поверхности дороги, поглощающей излучение;  $t_{\text{т}}$  – время прохождения транспортного средства над участком дороги.

Нахождение прироста внутренней энергии за счет теплопроводности в данной работе проводить не будем по двум причинам: во-первых, с точки зрения математики это очень непростая задача, требующая решения уравнения теплопроводности (дифференциальное уравнение в частных производных); во-вторых, теплопроводность – процесс инерционный, и можно предположить, что при тех временах контакта колес транспортного средства, которые имеют место на перегонных участках дорог, вклад этого механизма теплопередачи в общий теплообмен будет относительно невелик. Решение данной задачи может быть проведено в дальнейших исследованиях.

Немаловажную роль в тепловых процессах, происходящих в дорожной конструкции и, в особенности, в ее верхнем слое, играет солнечное излучение. Известно, например, что в городе Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство

Сочи суточное значение энергии (усредненное за год), падающей на  $1 \text{ м}^2$  площади земной поверхности, равно  $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ . В этом случае значение энергии, приходящейся на площадь, равную площади колесного пятна транспортного средства ( $\sim 0,025 \text{ м}^2$ ), составит  $360 \text{ кДж}$ . Если сравнить полученное значение энергии солнечной радиации с «транспортным» вкладом в энергетический баланс, то можно видеть, что оно существенно превышает величину энергии, получаемой дорожным покрытием от транспорта. Однако здесь, конечно, необходимо учитывать, что не вся солнечная энергия поглощается покрытием, значительная ее часть отражается. Согласно [17] солнечная абсорбция для асфальтобетонного покрытия составляет порядка 90 %. Тогда поглощаемая солнечная энергия будет равна  $360 \cdot 0.9 = 324 \text{ кДж}$ , что, впрочем, все равно является значительно превышающей «транспортный вклад» величиной. Яркостью (отражающей способностью) дорожного покрытия можно управлять: например, увеличивать ее, применяя осветляющие материалы, вводимые в асфальтобетонную смесь [18].

Следует отметить, что изменение энергетических критериев нужно рассматривать в совокупности с механическими свойствами материала. Величиной, характеризующей упругопластические свойства, служит коэффициент пластичности, и исследование характера его поведения позволит определить критерии условий эксплуатации покрытия. Коэффициент пластичности определяется через деформационные зависимости, однако полученные выше энергетические зависимости позволяют оценить коэффициент пластичности, минуя исследования характера деформационных процессов, так как энергетические величины уже интегрально учитывают эти процессы.

По определению коэффициент пластичности  $\xi$  представляет собой отношение полного прогиба дорожного покрытия  $\varepsilon$  к его упругой составляющей  $\varepsilon_y$ :

$$\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}. \quad (18)$$

Если пренебречь рассеянием энергии и считать, что вся совершенная транспортным средством над покрытием работа идет только на упругие и пластические деформации, а энергия пропорциональна квадрату смещения, то минимальное значение коэффициента пластичности можно приблизительно оценить как

$$\xi_{\min} = \sqrt{\frac{A}{E_y}}. \quad (19)$$

Также связь между теплофизическими и механическими свойствами можно выразить через корреляцию теплоемкости  $C$  с модулем упругости  $E$ .

В работе [19] исходя из соотношений между термодинамическими потенциалами (свободная энергия Гельмгольца, потенциал Гиббса и др.) была установлена связь между теплоемкостью и модулем упругости материала. Эта связь показывает, что модуль упругости зависит от температуры материала, и учитывает изменение теплоемкости материала за некоторый рассматриваемый промежуток времени. Однако очевидно, что теплоемкость зависит также и от плотности материала, а она, как известно, меняется в процессе эксплуатации покрытия.

На функциональном уровне связь между модулем упругости, плотностью и теплоемкостью материала можно установить следующим образом. В адиабатическом приближении можно записать пропорцию:

$$C m dT \sim p dV. \quad (20)$$

Из (20) следует:

$$C \sim \frac{p dV}{m dT} = \frac{E \varepsilon \frac{dV}{dT}}{\rho V}, \quad (21)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация покрытия,  $\rho$  – плотность материала покрытия.

Отношение  $\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT}$ , входящее в (21), имеет смысл коэффициента температурного расширения  $\alpha$ . Тогда выражение (21) можно представить в виде:

$$C \sim \frac{E \varepsilon \alpha}{\rho}. \quad (22)$$

Соотношение (22) верно объясняет корреляцию плотности материала  $\rho$  и его теплоемкости  $C$ , поскольку известно, что за время эксплуатации асфальтобетонного дорожного покрытия его плотность уменьшается, а теплоемкость, наоборот, растет [20]. Однако корреляцию между модулем упругости  $E$  и теплоемкостью  $C$  соотношение (22) не отражает, так как с течением времени модуль упругости уменьшается, в отличие от теплоемкости.

Решить эту проблему на качественном уровне можно с помощью пропорции

$$C m dT \sim \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (23)$$

Правая часть (23) представляет собой удельную (рассчитанную на единицу объема) потенциальную энергию упругой деформации, где  $\sigma$  – нормальное напряжение.

Из (23) можно сделать вывод, что при уменьшении модуля упругости  $E$  теплоемкость  $C$  будет расти. Такая корреляция между указанными величинами в действительности имеет место при эксплуатации асфальтобетонного дорожного покрытия.

Рост теплоемкости асфальтобетонного дорожного покрытия в основной период эксплуатации связан со многими факторами, в том числе и со старением битумного вяжущего. Распад межмолекулярных связей, распад «длинных» молекул на более «короткие» приводит к уменьшению молярной массы  $M$  асфальтобетона. Удельная теплоемкость твердого тела

$$C = \frac{3R}{M}, \quad (24)$$

где  $R = 8.31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Если представить асфальтобетон как смесь двух веществ – минерала и битума – с молярными массами  $M_1$  и  $M_2$ , то его молярная масса будет определяться выражением:

$$M = \frac{(1+k)M_1M_2}{kM_1 + M_2}, \quad (25)$$

где  $k = m_2/m_1$  – отношение масс соответствующих компонент в смеси.

Если предположить, что скорость распада связей и молекул в битумном вяжущем пропорциональна их числу, то молярная масса битума будет убывать по экспоненциальному закону:

$$M_2 = M_{20} e^{-\frac{t}{t^*}}, \quad (26)$$

где  $M_{20}$  – начальная молярная масса «молодого» битума,  $t^*$  – постоянная времени, то есть промежуток времени, в течение которого молярная масса уменьшается в  $e$  раз.

Зависимость (24) с учетом (25), (26) позволяет установить характер изменения теплоемкости асфальтобетона во времени.

### Численный анализ

Для численной оценки и анализа рассмотренных выше величин необходимо задать исходные параметры, характеризующие асфальтобетонное покрытие, транспортное средство и эксплуатационные режимы работы системы дорожное покрытие – транспортное средство. Выберем следующие значения исходных параметров: коэффициент Пуассона  $\mu = 0,1$ ; синус угла внутреннего трения материала дорожного покрытия  $\sin\varphi = 0,65$ ; динамический радиус колеса

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство

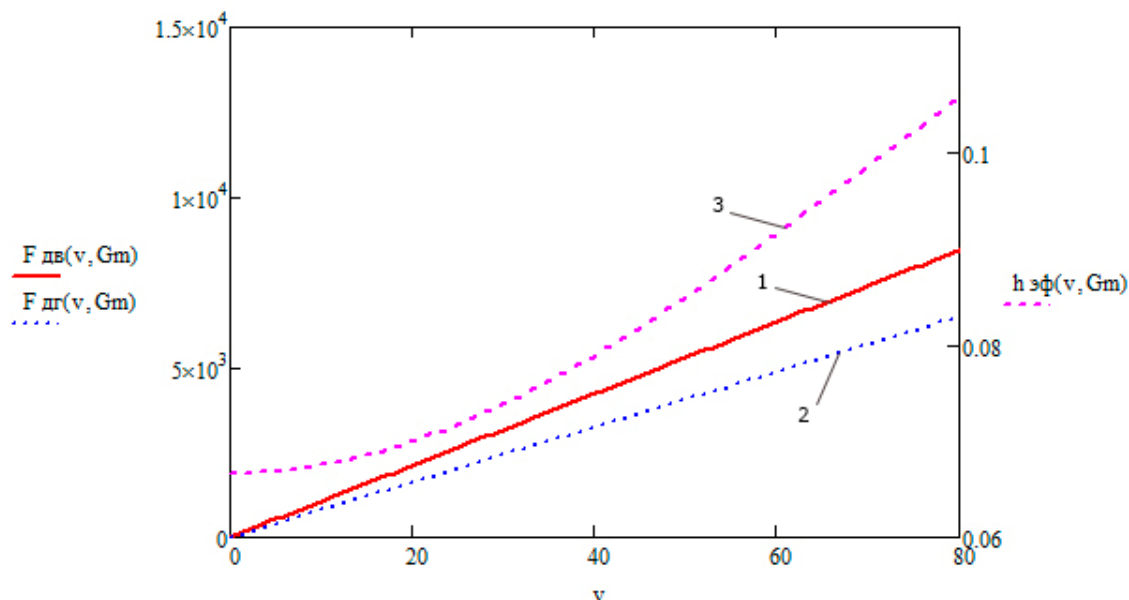
$R_{\phi} = 40$  см; коэффициент сцепления  $f = 0,5$ ; модуль упругости  $E = 1000$  МПа; суточная интенсивность движения транспортных средств  $q = 5000$  авт./сут.; математические ожидания термодинамических температур транспорта и поверхности дороги, соответственно,  $T_T = 300$  К,  $T_d = 280$  К; площадь поверхности дороги, поглощающей излучение,  $S = 0,25$  м<sup>2</sup>; время прохождения транспортного средства над участком дороги  $t_T = 0,5$  с; число колесных осей расчетного транспортного средства  $j = 2,5$ ; коэффициент пропорциональности между силами ( $G_m$ ,  $F_{дв}$  и  $F_{дг}$ ) и деформациями ( $\Delta Y$  и  $\Delta \epsilon$ ) –  $4 \cdot 10^7$  Н/м.

Значения рассчитанных величин приведены в таблице для скорости движения  $v = 20$  м/с и веса, приходящегося на одно колесо транспортного средства,  $G_m = 10$  кН.

**Таблица. Механико-энергетические показатели системы дорожное покрытие – транспортное средство**

Показатель	Значение
Горизонтальная составляющая динамической силы	$F_{дг} = 1,6$ кН
Вертикальная составляющая динамической силы	$F_{дв} = 2,1$ кН
Работа, производимая одиночным расчетным колесом над дорожным покрытием	$A_1 = 6,3$ Дж
Деформационная составляющая работы одиночного колеса	$A_{деф1} = 3,2$ Дж
Фрикционная составляющая работы одиночного колеса	$A_{тр1} = 3,1$ Дж
Суточная работа, производимая над дорожным покрытием	$A = 78,7$ кДж
Приращение внутренней энергии покрытия за счет теплового излучения в процессе передачи энергии от транспортного средства	$U_i = 71$ кДж
Суточная деформационная работа (энергия упругой деформации)	$A_{деф} = 40,3$ кДж $E_v \approx 40,3$ кДж
Суточная фрикционная работа (рассеиваемая энергия)	$A_{тр} = 38,4$ кДж $E_{рас} \approx 38,4$ кДж

Значения в таблице получены при наиболее вероятных значениях скорости и массы транспортного средства. В реальном режиме эксплуатации дорожного покрытия эти характеристики могут варьироваться в достаточно широких пределах; для оценки их влияния на механико-энергетические показатели исследуемой системы построим графики зависимостей указанных величин. Анализ графической интерпретации полученных зависимостей может позволить найти оптимальные эксплуатационные режимы дорожного покрытия.

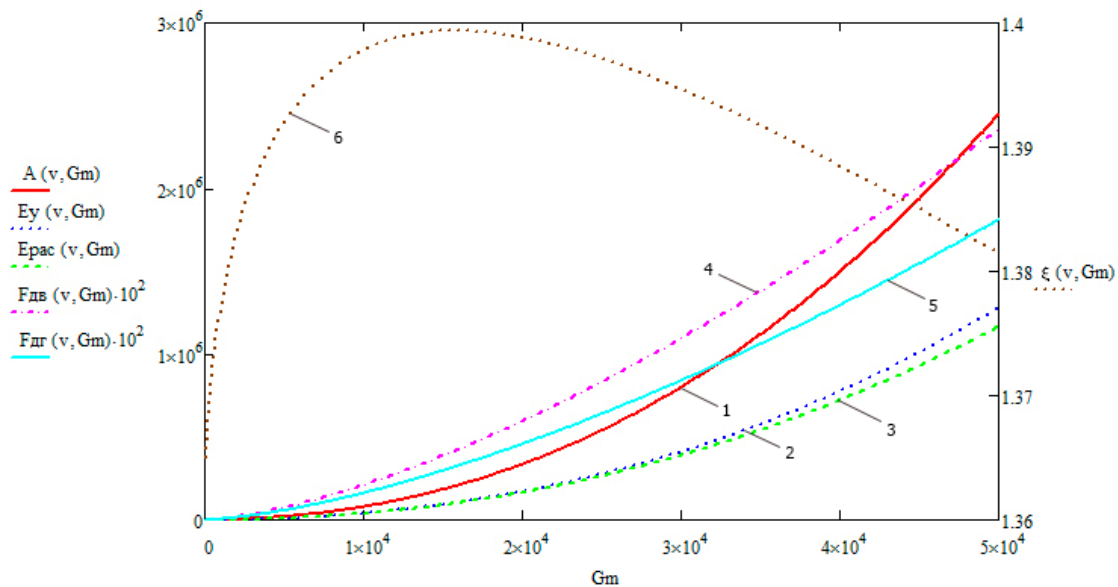


**Рисунок 2. Зависимости вертикальной  $F_{дв}$ , Н (1) и горизонтальной  $F_{дг}$ , Н (2) компонент динамической силы ( $G_m = 10$  кН на колесо) и эффективной толщины  $h_{эф}$ , м, (3) дорожного покрытия от скорости  $v$ , м/с, движения транспортного средства**

Из построенных выше зависимостей (рис. 2) видно, что динамическая сила линейно зависит от скорости и при скоростях до 150 км/ч не превышает 50 % от веса транспортного средства.

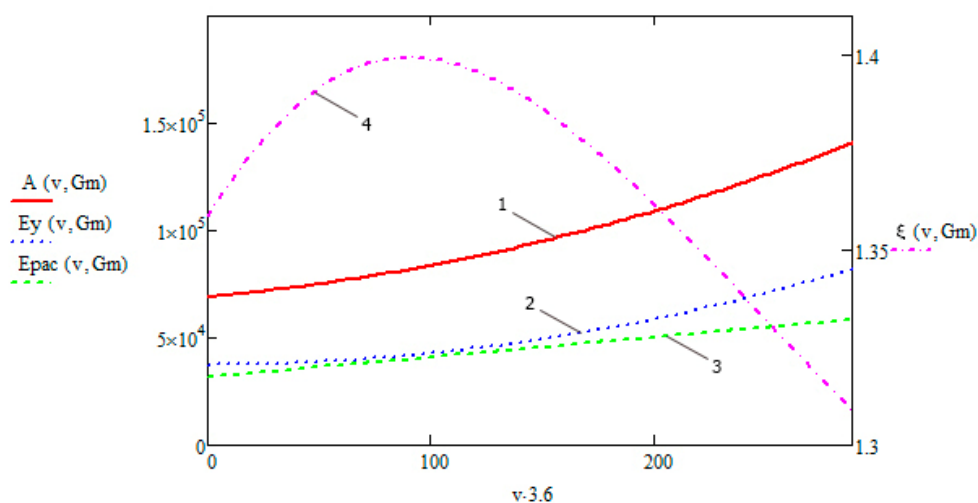
Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство





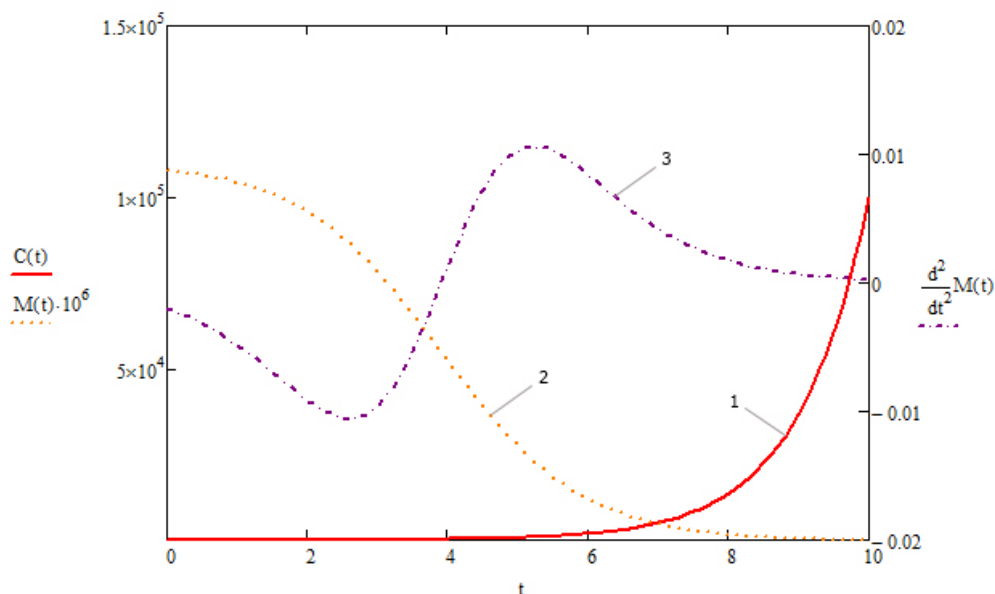
**Рисунок 3. Зависимости работы  $A$ , Н·м, (1) совершаемой транспортом над дорожным покрытием, энергии упругой деформации  $E_y$ , Н·м, дорожного покрытия (2), рассеиваемой энергии  $E_{рас}$ , Н·м (3), вертикальной  $F_{дв}$ , Н, (4) и горизонтальной  $F_{др}$ , Н, (5) компонент динамической силы, а также коэффициента пластичности  $\xi$  (6) дорожного покрытия от веса транспортного средства ( $t = 1$  сут.,  $v = 20$  м/с,  $q = 5000$  авт./сут.)**

Построенные выше зависимости  $A$ ,  $E_y$ ,  $E_{рас}$  от веса транспортного средства имеют параболический характер (с показателем степени, равным 2). На рисунке 3 видно, что коэффициент пластичности  $\xi$  дорожного покрытия достигает максимального значения при некотором значении веса (для рассматриваемого случая  $\sim 15$  кН на одно колесо), а далее убывает, асимптотически стремясь к единице. На дополнительно построенном графике коэффициент пластичности (рис. 4) также имеет максимальное значение при некоторой скорости (для рассмотренного случая  $\sim 100$  км/ч), а далее убывает, асимптотически стремясь к единице. Анализ зависимостей вертикальной  $F_{дв}$  и горизонтальной  $F_{др}$  компонент динамической силы, действующей со стороны транспортного средства на дорожное покрытие, от веса транспортного средства показывает, что они носят нелинейный характер (анализ соответствующих выражений показывает, что это зависимости степени  $3/2$ , то есть  $F_{дв}, F_{др} \sim G_m^{3/2}$ ). Динамическая сила при реальных весах транспортных средств не превышает 50 % от веса.



**Рисунок 4. Зависимости работы  $A$ , Н·м (1), совершаемой транспортом над дорожным покрытием, энергии упругой деформации  $E_y$ , Н·м, дорожного покрытия (2), рассеиваемой энергии  $E_{рас}$ , Н·м (3), коэффициента пластичности  $\xi$  (4) дорожного покрытия от скорости (км/ч) транспортного средства ( $t = 1$  сут.,  $G_m = 10$  кН,  $q = 5000$  авт./сут.)**

Анализ зависимостей на рисунке 4 показывает, что рассеиваемая энергия на всем интервале скоростей меньше энергии упругой деформации. Однако в интервале скоростей от нуля до 150 км/ч, то есть в обычном режиме эксплуатации дороги, энергия упругой деформации и рассеиваемая энергия имеют близкие значения.



**Рисунок 5. График зависимости удельной теплоемкости  $C$  асфальтобетона (1), Дж/(кг·К), молярной массы  $M$  асфальтобетона (2), г/моль, и второй производной  $M$  от времени  $t$  (3), годы**

В расчете теплоемкости асфальтобетона (рис. 5) использованы следующие данные:  $M_1 = 100$  г/моль,  $M_{20} = 500$  г/моль,  $k = 0,1$ ,  $t^* = 1$  год. Используя условие равенства второй производной нулю выражения (25) с учетом (26), находим точки перегиба и значение

$$t = t^* \cdot \ln\left(\frac{M_{20}}{k M_1}\right) \approx 3.9 \text{ года, которое можно интерпретировать как эксплуатационное время}$$

дорожного асфальтобетонного покрытия до момента проведения ремонтных работ.

### Выводы

Оценка уровней вклада в прирост внутренней энергии дорожного покрытия за счет работы, совершаемой над покрытием движущимся транспортом, и за счет теплового излучения позволяет сделать вывод об их равноценности. Однако здесь следует различать значение вклада во внутреннюю энергию. Вклад теплообмена в большей степени идет на повышение температуры покрытия, которая будет, таким образом, выше, чем температура окружающей среды. А вклад работы обуславливает реструктуризацию, деструкцию покрытия.

Анализ зависимостей коэффициента пластичности покрытия от скорости и веса транспортного средства показывает, что максимальная пластичность в некоторых интервалах скоростей и весов транспорта может служить критерием рекомендуемого режима эксплуатации дороги. Численные значения границ оптимальных интервалов зависят от параметров дорожного покрытия, например, модуля упругости, угла внутреннего трения, коэффициента Пуассона и др.

Разработан алгоритм, позволяющий определить момент начала катастрофического уменьшения молярной массы асфальтобетона в покрытии. Интервал времени от ввода покрытия в эксплуатацию до полученного момента можно интерпретировать как межремонтный срок службы дорожного покрытия.

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Loomans M. [et al.] Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements // Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands. 2003. Pp. 745–752.
16. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Энергетический баланс дорожного покрытия // Известия вузов. Строительство. 2005. №6. С. 61–64.
17. Кирюхин Г.Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2013. 2(30). С. 309–328.
18. Степанов А.В., Корягин О.Г. Осветленные асфальтобетонные покрытия и возможности энергосбережения в наружном освещении // Энергосбережение. 2001. №2. С. 10–11.
19. 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.
20. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Теплоемкость асфальтобетона // Строительные материалы. 2009. №7. С. 6–9.

*Андрей Михайлович Кириллов, г. Сочи, Россия  
+7(918)1302257; эл. почта: kirill806@gmail.com*

*Михаил Александрович Завьялов, г. Сочи, Россия  
+79676468875; эл. почта: zavyalov.m.a@gmail.com*

© Кириллов А.М., Завьялов М.А., 2015

Кириллов А.М., Завьялов М.А. Моделирование процессов энергообмена в системе дорожное покрытие – транспортное средство

doi: 10.5862/MCE.57.3

## Modeling of energy dissipation processes in a pavement – vehicle system

**A.M. Kirillov,**

Sochi State University

+7(918)1302257; e-mail: kirill806@gmail.com

**M.A. Zavalov,**

Sochi State University

+79676468875; e-mail: zavyalov.m.a@gmail.com

### Key words

asphalt pavement; energy dissipation; vehicle power parameters; viscoelasticity; specific heat capacity; deformation

### Abstract

The law of conservation of energy for a 'pavement – vehicle' system manifests itself primarily in the fact that for any temperature and operating conditions of a road asphalt concrete pavement the potential energy of gravity and the kinetic energy of a vehicle are partially transformed upon contact with the road pavement into elastic deformation energy or thermal energy, while a part of the energy dissipates. These types of energy are to some extent transformed into the internal energy of the road pavement, altering its energy balance and causing destructive processes.

The initial level of the internal pavement energy changes while the road is used, on the one hand, through regular contributions from vehicles and from solar radiation, and, on the other hand, from compensating for viscoelastic deformation. Understanding these changes will allow to develop new and more efficient methods for monitoring the pavement condition, as well as a scientifically valid system of scheduling the repairs. In this article, we have assessed the level and the significance of the contribution of the work done by the moving vehicles over the pavement, and of the thermal radiation to the internal pavement energy gain.

We have constructed a physical and mathematical model of energy dissipation and storage in the 'pavement – vehicle' system accounting for viscoelastic deformation and thermal radiation. We have designed an algorithm allowing to determine a scientifically based repair interval for asphalt concrete pavement. It is shown that the maximum plasticity for some ranges of speeds and transport weights may serve as a criterion of the recommended operating conditions of the road.

### References

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Loomans M. et al. Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements. *Eighth International IBPSA Conference*. Eindhoven, Netherlands. 2003. Pp. 745–752.
16. Zavialov M.A., Zavialov A.M. Energetichesky balans dorojnogo pokritiya [Pavement energy balance]. *News of Higher Education Institutions. Construction*. 2005. No. 6. Pp. 61–64. (rus)
17. Kiryukhin G. N. Temperaturnie rezhimi raboti asfaltobetonnikh pokritiy avtomobilnikh dorog [Temperature conditions of work of asphalt concrete pavements]. *Roads and Bridges*. 2013. No. 2(30). Pp. 309–328. (rus)
18. Stepanov A.V., Koryagin O.G. Osvetlennye asfaltobetonnye pokritiya i vozmozhnosti energosberezheniya v naruzhnom osveshenii [The clarified asphalt concrete pavements and possibilities of energy saving in external lighting]. *Energy Saving*. 2001. No. 2. Pp. 10–11. (rus)
19. Zavialov M.A., Zavialov A.M. Matematicheskaya model izmeneniya obyemnoy teploemkosti dorozhnoy odezhdi s asfaltobetonnyimi pokritiyami v processe ekspluatatsii [Mathematical model of volume thermal capacity change of asphalt pavement layers during exploitation]. *The Omsk Scientific Bulletin*. 2006. No. 1. Pp. 51–52. (rus)
20. Zavialov M.A., Zavialov A.M. Teployemkost asfaltobetona [Heat capacity of asphalt concrete]. *Construction Materials*. 2009. No. 7. Pp. 6–9. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 34–44**