

В порядке дискуссии

# Теплофизические модели взаимодействия между вальцом катка и дорожным покрытием

**А.В. КОЧЕТКОВ**,  
д-р техн. наук,  
**С.П. АРЖАНУХИНА**,  
канд. техн. наук  
(ФГУП «РОСДОРНИИ»),  
**Ф.Я. БАРАЦ**  
(СГТУ),  
**М.А. БАЖЕНОВ**,  
директор  
(ООО «ПКФ  
«ИнтерКБ»)

*Рассмотрены теплофизические модели взаимодействия между вальцом катка и дорожным покрытием в процессе уплотнения. Представлены близкие аналоги (натурное моделирование) процессов уплотнения полупространства цилиндрическим и сферическим инденторами. Решения теплофизических моделей могут быть получены в конечном виде.*

**Ключевые слова:** теплофизическая модель, уплотнение асфальтобетонных смесей, дорожные покрытия, сфера, цилиндр.

**Для формализации теплофизических моделей взаимодействия между вальцом катка и дорожным покрытием в процессе уплотнения предлагается использовать методы теплофизики, подробно разработанные, например, в технологии машиностроения и для задач применения тепловыделяющих противогололёдных материалов [1, 2].**

**Несмотря на большое влияние тепловых явлений на процесс поверхностного пластического деформирования дорожных покрытий, их исследованию не уделялось должного внимания. Это, видимо, можно объяснить известными трудностями, которые встают перед исследователями при попытке решить аналитически теплофизическую контактную задачу или определить температуру путём эксперимента в области контакта изделия с инструментом и в очаге деформации.**

**В связи с большими трудностями экспериментального измерения температуры важное значение приобретают теоретические методы исследования температур и тепловых потоков в зоне уплотнения.**

**П**о мнению авторов, при аналитическом исследовании теплофизики целесообразно использовать оптимальные варианты построения функций Грина с учётом конкретных размеров и формы взаимодействующих тел, а затем суперпозицией канонических соотношений получить искомые решения краевых задач. Для процессов уплотнения местный источник

теплоты хорошо описывается соотношением

$$q = q_m \exp\left(-K \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R^2}\right),$$

где  $q_m$  – удельная интенсивность  $m$ -го источника;  $K$  – коэффициент сосредоточенности;  $x, y, z$  – соответствующие координаты;  $R$  – радиус вальца дорожного катка.

В такой постановке задачи температура точек тела, расположенных в непосредственной близости к оси его перемещения, рассчитывалась по формуле [2]:

$$\theta(y, z, t) = \frac{q}{2\pi\lambda\nu(t_0 + t)} \exp\left[-\frac{y^2 + z^2}{4a(t_0 - t)}\right],$$

где  $\nu$  – скорость перемещения источника;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $t_0$  – постоянная времени;  $t$  – время, для которого определяется температура точки.

Сравнивая это решение с фундаментальным решением уравнения теплопроводности

$$\theta(x, y, z) = \frac{q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4at}\right),$$

где  $\rho$  – плотность дорожного покрытия, можно отметить их полную аналогию, из которой следует важный вывод: для момента времени  $t = \frac{R^2}{4aK}$  фундаментальное решение даёт такое распределение температур в неограниченном теле, как решение для обычного мгновенного источника в момент времени  $t = 0$ . Следовательно, на основании принципа суперпозиции решений такое же соответствие должно выполняться и для движущихся нормально-сферических источников. Поэтому, например, если в формуле для быстро движущегося точечного источника к параметру  $t$  прибавить величину  $\frac{R^2}{4aK}$ , то получим соотношение для быстро движущегося нормально-сферического источника.

Теоретические и экспериментальные исследования тепловых явлений в приконтактной зоне на уплотняемом дорожном покрытии показывают, что вызванное движущимся источником теплоты (вальцом катка) температурное поле в плоскости главного движения, особенно на небольшом участке поверхности контакта, характеризуется достаточно сильной неравномерностью. Передняя часть площадки контакта практически не изменяет температуры, а в конце её изменение температуры в контакте достигает максимальных значений. Такой высокий градиент температур в контакте определяется сравнительно высокой скоростью перемещения теплового источника (отрицательного или положительного), превышающей скорость выравнивания температуры в дорожном покрытии.

Несколько другой характер имеет температурное поле в вальце. Оно более равномерно во всех направлениях от контакта, так как при установившемся тепловом режиме успевают прогреться задняя и передняя части рабочей поверхности вальца.

Несмотря на то, что температурные поля в дорожном покрытии и вальце катка имеют различный характер, общие точки на поверхности контакта оказываются нагретыми до одной и той же температуры. Поэтому чтобы обеспечить равенство контактных температур между взаимодействующими телами, должен возникнуть интенсивный переток теплоты, который и в передней, и в задней части площадки контакта будет направлен из дорожного покрытия в валец, но с различной интенсивностью.

*Поверхность контакта в направлении движения источника может быть условно разделена на три характерных участка: центральный*, через который в валец уходит некоторая часть теплоты из пластически деформируемого слоя дорожного покрытия; *передний* с упругим контактом, через который осуществляется переток теплоты из дорожного покрытия в валец; *задний* дорожного покрытия с упругим контактом, через который тепловой поток направлен в валец. Очевидно, что переток теплоты будет более интенсивен в тех местах площадки контакта, где большие градиенты температур, а следовательно, на тех участках площадки контакта, где интенсивность тепловыделения меньше, т.е. где меньше нагружены участки рабочей поверхности вальца.

На теплообмен между инструментом и изделием и локальные тепловые потоки в приконтактной зоне помимо режимов уплотнения заметное влияние может оказать сам характер контакта, соотношение между упругой и пластической зонами в очаге деформации, а также положение малонагруженных поверхностей (МНП) вальца относительно теплового источника. Поскольку это влияние определяется, главным образом, в направлении движения источника, исследование условий, влияющих на переток теплоты, удобнее всего проводить на плоской модели.

**Рассмотрим плоскую теплофизическую контактную задачу**, где дорожное покрытие и валец катка представляют собой полуограниченные тела с адиабатическими плоскостями, соприкасающиеся между собой на участке  $AB$  (рис. 1). В соответствии со схемой на участках длиной  $2l$  действуют следующие теплообразующие источники: движущийся со скоростью  $v$  в поверхностном слое изделия объёмный источник интенсивностью

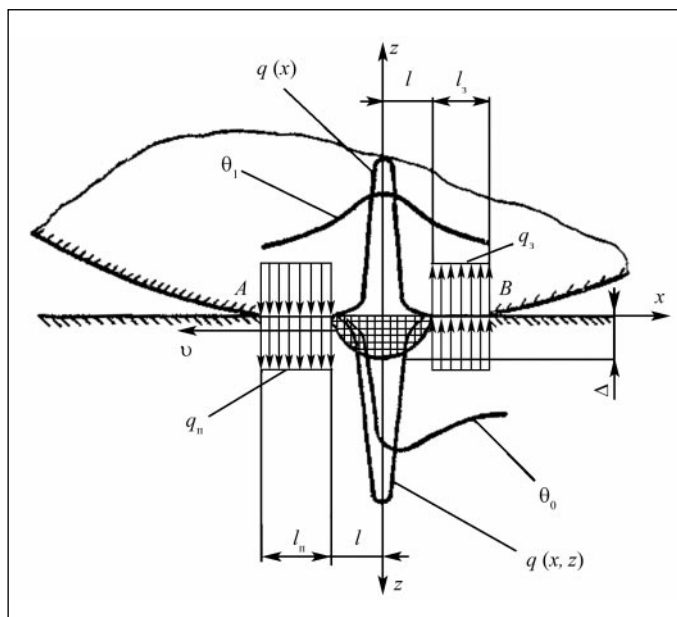
$$q = q_0 \exp \left[ -K_l \left( \frac{x^1}{l} \right)^2 - K_\Delta \left( \frac{z^1}{\Delta} \right)^2 \right]$$

и действующий на поверхности инструмента стационарный источник интенсивностью

$$q = q_1 \exp \left[ -K_l \left( \frac{x^1}{l} \right)^2 \right],$$

где  $q_0$  и  $q_1$  — удельная интенсивность вальца и уплотняемого дорожного покрытия.

Рис. 1. К расчёту тепловых потоков



При расчёте температурного поля в каждом из взаимодействующих тел распределение контактной температуры на поверхности дорожного покрытия будет характеризоваться кривой  $\theta_0$  (см. рис. 1), а на рабочей поверхности вальца – кривой  $\theta_1$ . В связи с этим выравнивание температур на поверхности контакта представим равномерным стоком теплоты с участка  $l_{\Pi}$  вальца  $-q_{\Pi}$  (Дж/м<sup>2</sup>) и на этом же участке поверхности дорожного покрытия – действием источника  $+q_{\Pi}$  (Дж/см<sup>2</sup>), а с задней части поверхности контакта – действием на участке  $l_3$  изделия стока теплоты мощностью  $-q_3$  (Дж/см<sup>2</sup>) и на участке  $l_3$  вальца – источника мощностью  $+q_3$  (Дж/м<sup>2</sup>). Путём сравнения температур в средней части всех трёх участков контактной поверхности определим интенсивность тепловых потоков и влияние на них размеров зоны контакта и соотношения внутри контакта участков  $l_{\Pi}$  и  $l_3$ .

Для решения поставленной задачи определим в каждом из взаимодействующих тел температурное поле, вызванное действием соответствующих тепловых источников.

**Рассмотрим температурное поле в уплотняемой среде, вызванное действием движущегося объёмно-полосового источника мощностью**

$$q = q_0 \exp \left[ -K_l \left( \frac{x^1}{l} \right)^2 - K_{\Delta} \left( \frac{z^1}{\Delta} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Температура в полуограниченном теле с точечным быстро движущимся по адиабатической плоскости источником определяется выражением

$$\theta = \frac{q}{2\pi\lambda_0(x-x^1)} \exp \left[ -v \frac{(y-y^1)^2 + (z-z^1)^2}{4a(x-x^1)} \right].$$

Для быстро движущегося объёмного нормально-полосового теплоисточника можно записать

$$\theta = \int_{-l}^x \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\Delta} \frac{q_0 \exp \left[ -K_l \left( \frac{x^1}{l} \right)^2 - K_{\Delta} \left( \frac{z^1}{\Delta} \right)^2 \right]}{2\pi\lambda_0(x-x^1)} \times \exp \left[ -v \frac{(y-y^1)^2 + (z-z^1)^2}{4a(x-x^1)} \right] dx^1 dy^1 dz^1.$$

Введём обозначения

$$\chi = \frac{x}{l}; \varepsilon = \frac{y}{l}; \psi = \frac{z}{l}; K_{\chi} = \sqrt{K_l}; K_{\psi} = \frac{l}{\Delta} \sqrt{K_{\Delta}}; P_e = \frac{2vl}{a}.$$

Тогда в безразмерных параметрах

$$\theta = \frac{q_0 l^2}{2\pi\lambda_0} \int_{-1}^{\chi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\Delta} \frac{\exp \left[ -K_{\chi}^2 (\chi^1)^2 - K_{\psi}^2 (\psi^1)^2 \right]}{\chi - \chi^1} \times \exp \left[ -P_e \frac{(\varepsilon - \varepsilon^1)^2 + (\psi - \psi^1)^2}{8(\chi - \chi^1)} \right] d\chi^1 d\varepsilon^1 d\psi^1.$$

После вычисления интегралов получим:

$$\theta = \frac{2q_0 l^2}{\lambda_0 P_e} \int_{-1}^{\chi} \frac{\exp \left[ -K_{\chi}^2 (\chi^1)^2 \right] d\chi^1}{1 + \frac{8K_{\psi}^2}{P_e} (\chi - \chi^1)}. \quad (2)$$

При этом общая тепловая мощность объёмного нормально-полосового источника может быть определена путём интегрирования уравнения (1) по всему объёму тепловыделения:

$$Q_0 = \int_{-l}^l \int_0^{\Delta} q_0 \exp \left[ -K_l \left( \frac{x^1}{l} \right)^2 - K_{\Delta} \left( \frac{z^1}{\Delta} \right)^2 \right] dx^1 dy^1 = \frac{\pi q_0 l \Delta}{2\sqrt{K_l K_{\Delta}}}$$

$$\text{или } Q_0 = \frac{\pi q_0 l^2}{2K_{\chi} K_{\psi}}.$$

Подставив  $q_0$  в выражение (2), получим

$$\theta = \frac{4Q_0 K_{\chi} K_{\psi}}{\pi\lambda_0 P_e} \int_{-1}^{\chi} \frac{\exp \left[ -K_{\chi}^2 (\chi^1)^2 \right] d\chi^1}{\sqrt{1 - \frac{8K_{\psi}^2}{P_e} \chi^1}}.$$

**Рассмотрим температурное поле в изделии, вызванное действием полосового быстро движущегося со скоростью  $v$  источника мощностью  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>).**

Решив эту задачу, получим:

температуру в пределах площадки контакта  $l_{\Pi}$  и  $l_3$

$$\theta(x, 0) = \frac{2q\sqrt{al_*}}{\lambda_0\sqrt{\pi v}} \sqrt{\psi_*}$$

и температуру за пределами площадки контакта

$$\theta(x, 0) = \frac{2q\sqrt{al_*}}{\lambda_0\sqrt{\pi v}} \left( \sqrt{\psi_*} - \sqrt{\psi_* - 1} \right),$$

где  $\psi_* = \frac{\chi}{l_*}$ .

Аналогично решаются задачи для:

- полосового непрерывно действующего источника равномерной интенсивности  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>) на рабочей поверхности инструмента;
- температурного поля, вызванного действием на адиабатической плоскости полуограниченного тела линейного непрерывно действующего источника интенсивностью  $q$  (Вт);
- температурного поля на рабочей поверхности инструмента, вызванного действием поверхностного нормально-полосового источника.

Если приравнять определённые выражения для температур  $\theta_{\text{п}}$ ,  $\theta_3$  и  $\theta_0$  в соответствующих точках контакта площадок шириной  $l_{\text{п}}$ ,  $l_3$  и  $2l$  со стороны вальца и дорожного покрытия, то можно получить систему линейных уравнений с неизвестными  $q_{\text{п}}$ ,  $q_3$  и  $Q_0$ . Получив каноническую форму системы линейных уравнений, по формуле Крамера определяют неизвестные интенсивности тепловых потоков как отношения детерминантов.

Рассмотрим влияние условий процесса упрочнения дорожного покрытия на мощность тепловых потоков  $Q_{\text{п}} = q_{\text{п}} l_{\text{п}}$  и  $Q_3 = q_3 l_3$  (рис. 2, 3) и МНП на теплообмен в приконтактной зоне (рис. 4).

Зависимости мощности  $Q_{\text{п}}$  теплового потока от размеров упругих участков контакта и критерия  $P_e$  приведены на рис. 2, откуда следует, что при увеличении  $\psi_{\text{п}}$  и  $\psi_3$  в диапазоне 0...1,0 происходит резкое возрастание мощности теплового потока, причём тем больше, чем меньше значения  $P_e$ . Дальнейшее увеличение  $\psi_{\text{п}}$  и  $\psi_3$  практически не сказывается на теплообмене.

Влияние теплофизических характеристик взаимодействующих тел (вальца катка и дорожного покрытия) и коэффициента сосредоточенности источника на мощность теплового потока  $Q_{\text{п}}$  приведено на рис. 3. Расчёты показывают, что более мощные тепловые потоки соответствуют большей сосредоточенности тепловых источников и лучшей теплопроводности материала вальца. Такая задача вполне актуальна, особенно для режима подогревания вальца катка.

Значительное влияние на мощность тепловых потоков  $Q_{\text{п}}$  и  $Q_3$  через МНП оказывает критерий  $P_e$  (см. рис. 4). Для больших значений  $P_e$   $Q_3$  больше, чем  $Q_{\text{п}}$ , но по мере уменьшения критерия  $P_e$  более интенсивно увеличивается  $Q_{\text{п}}$ .

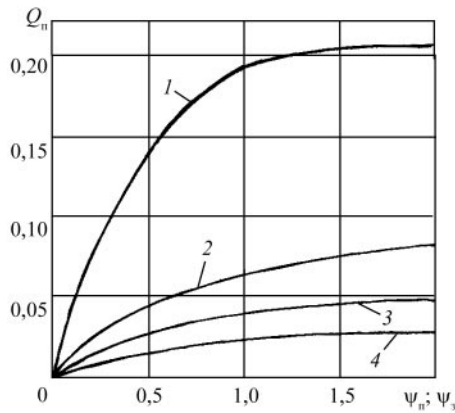


Рис. 2. Влияние размеров упругих участков контакта на мощность теплового потока  $Q_{\text{п}}$  ( $K_{\chi} = K_{\psi} = \sqrt{2\pi}$ ) при  $P_e = 25$  (1), 100 (2), 200 (3) и 300 (4)

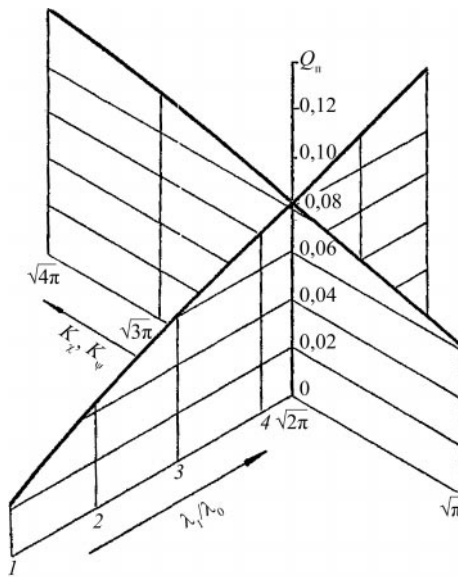


Рис. 3. Влияние теплофизических характеристик материалов рабочего органа и дорожного покрытия  $\lambda_1/\lambda_0$  и коэффициентов сосредоточенности  $K_{\chi}$  и  $K_{\psi}$  на тепловой поток  $Q_{\text{п}}$

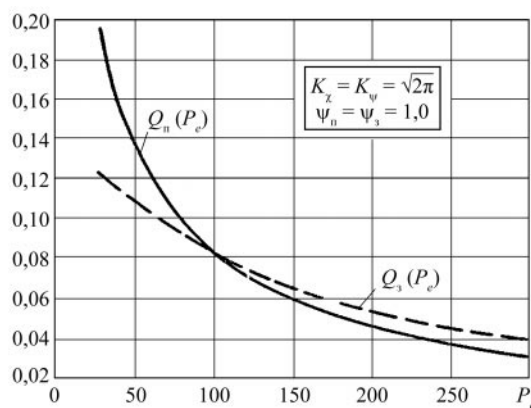


Рис. 4. Зависимости мощностей тепловых потоков  $Q_{\text{п}}$  и  $Q_3$  от критерия  $P_e$

Приведённые результаты подтверждают исключительную роль МНП в теплообмене при уплотнении дорожного покрытия. Наличие таких участков поверхности спереди и сзади теплоисточника приводит к значительному перетоку теплоты из дорожного покрытия в инструмент. При этом происходит охлаждение наиболее нагретой области дорожного покрытия, что дости-

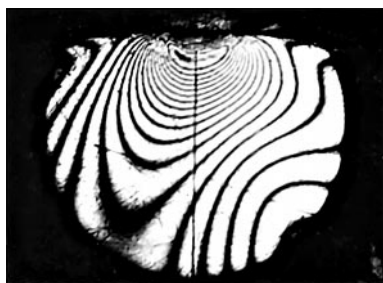


Рис. 5. Картина изохром при деформации роликом

гается привлечением дополнительных объёмов рабочего материала перед движущимся источником для выравнивания температурного поля.

Так создаётся непрерывный вихревой тепловой поток, движущийся вместе с его источником. Естественно предположить, что такой катящийся термодинамический вихрь, способствующий непрерывному и более интенсивному рассеиванию тепловой энергии источника, может оказать существенное влияние на качество упрочнённой поверхности.

Приведённые данные свидетельствуют о том, что наиболее благоприятное распределение внутренних напряжений возникает при большем радиусе вальца дорожного катка или в том случае, когда при обработке большая кривизна рабочей поверхности инструмента располагается в направлении скорости обработки. В этих условиях возникает упругопластический контакт с увеличенными размерами упругих участков в плоскости, где наиболее сильно деформировано температурное поле, что создаёт благоприятные условия для перетока теплоты в приконтактной зоне и определяет характер эпюры остаточных напряжений, т.е. существенным образом влияет на распределение внутренних сил в упрочнённом слое.

Остаточные напряжения в упрочнённом слое являются результатом совместного действия силовой и тепловой сторон процесса. Чтобы определить, хотя бы качественно, степень влияния каждой из них, обратимся к исследованиям, объясняющим механизм формирования напряжённого слоя.

Известно, что для напряжённо-деформированного состояния в упругой полуплоскости, нагруженной сосредоточенной силой  $P$  (задача Фламана), в любой точке окружности произвольного диаметра  $D$ , касающейся граничной линии в точке приложения силы, нормальное и главное ка-

сательное напряжения соответственно рав-

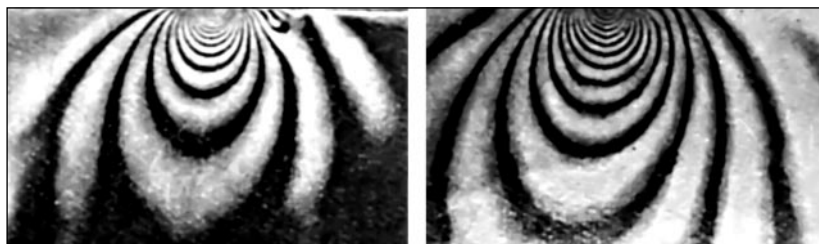
$$\sigma = -\frac{2P}{\pi D} \text{ и } \tau = \frac{P}{\pi D}.$$

Если же дорожное покрытие нагружено цилиндрическим рабочим органом и радиальная нагрузка распределена на линии контакта, то линии равных напряжений будут представлять собой огибающую системы окружностей диаметром  $D$  для каждой из распределённых удельных сил в контакте.

Как показали эксперименты физического моделирования поверхностно-пластического деформирования алмазным индектором (наиболее близкого аналога), при нагружении полупластины из оптически активного материала ЭД-5М цилиндрическим роликом картина изохром представляет собой систему линий, каждая из которых является огибающей трёх окружностей: двух, примерно равных диаметром, на краях контакта и одной несколько большего диаметра в центре контакта (рис. 5). Примерно такая же картина получается в нормальном сечении, проходящем через центр площадки контакта при нагружении полуограниченного тела шариком (рис. 6). Очевидно, что линии равных напряжений для объёмного напряжённо-деформированного состояния в радиальных сечениях качественно совпадают с аналогичными при плоской деформации.

Анализ теплофизических особенностей протекания процесса уплотнения в приконтактной зоне очага деформации позволил выявить эффективность МНП. Уже одно то, что при наличии МНП увеличивается размер контактной поверхности, приводит к более интенсивному отводу теплоты в валец. Второе, не менее важное обстоятельство, состоит в том, что МНП позволяют соединить через валец области дорожного покрытия с наибольшим перепадом температур и использовать таким образом для охлаждения и снижения градиента температур объёмы материала дорожного покрытия в передней части источника. Возникающие при этом перетоки теплоты создают непрерывный движущийся вместе с источником вихревой тепловой поток, в результате чего используются большие объёмы взаимодействующих тел для рассеивания тепловой энергии, и обеспечивается непрерывное охлаждение очага деформации. Всё это благоприятно сказывается на качестве упрочнённой поверхности дорожного покрытия.

Рис. 6. Картина изохром при деформации шариком



Основываясь на результатах исследований теплофизических особенностей процесса уплотнения дорожных покрытий и их близких аналогов, можно выделить следующие факторы, оказывающие существенное влияние на кинетику формирования остаточных напряжений:

- с силовым фактором связаны оптимальные условия происхождения пластического течения в очаге деформации уплотняемого материала дорожного полотна с одновременным упрочнением поверхностного слоя и возникновение сжимающих напряжений в нём. Силовой фактор оказывает также доминирующее влияние на усиление анизотропных свойств упрочнённого слоя. Увеличение удельного объёма упрочнённого слоя подтверждается значительной величиной остаточных напряжений, фиксируемых в направлении движения подачи;

- температурный фактор связан с термопластическими деформациями в поверхностном слое уплотняемого материала, в результате чего формируются растягивающие напряжения на поверхности дорожного покрытия, которые при взаимодействии со сжимающими напряжениями, вызванными силовыми факторами, формируют, как правило, петлевидный характер остаточных напряжений в направлении главного движения и движения подачи;

- цилиндрические вальцы катков упрочняют поверхностный слой, а сферические – подповерхностный, поэтому так важна оптимизация компоновок катков для решения задачи более равномерного уплотнения дорожного покрытия по его глубине.

Список литературы

1. Аржанухина С.П. Совершенствование применения противогололёдных материалов при зимнем содержании автомобильных дорог: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград. 2009. 186 с.
2. Аржанухина С.П., Барац Ф. Я., Кочетков А.В. Теплофизические модели взаимодействия между вальцом катка и дорожным покрытием в процессе уплотнения / Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве: материалы науч.-практ. конф. Т. 1. Пермь: изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2011. С. 11–13.

### A.V. Kochetkov, S.P. Arzhanuhina, F.J. Barats Thermal models of interaction between the skating rink and the road covering in the course of consolidation

*Thermal models of interaction between a skating rink and a road covering in the course of consolidation are considered. Close analogs (natural modeling) processes of consolidation of semispace cylindrical and spherical working bodies are presented. Decisions of such models can be received in a final form.*

**Keywords:** thermal model, consolidation of asphalt mixes, road coverings, sphere, the cylinder.

СДМ