УДК 625.855.3

В.Н. ШЕСТАКОВ,И.В.ШЕСТАКОВ
V.N. SHESTAKOV ,I.V. SHESTAKOV
E.mail. ksucta@elcat.kg

ОБ УПРАВЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В ПОДСИСТЕМЕ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ

MANAGEMENT TEMPERATURE INHOMOGENEITIES OF ASPHALT- CONCRETE MIX IN THE SUBSYSTEM TRANSPORT OPERATIONS

Транспорттук операциялардын подсистемасындагы асфальтбетон аралашмасынын бир калыпта эмес температурасынын болжолдуу математикалык модели иштелип чыккан. Модель жол кыртышынын талаптагыдай сапаттык деңгээлин камсыз кылуу максатында каалагандай жасоого көмөк болот.
Ачкыч сөздөр: *асфалтьбетон аралашмасынын бирдей эмес температурасы, транспорттук операциялар, болжолдуу математикалык модель.*

Разработана вероятностная математическая модель температурной неоднородности асфальтобетонных смесей в подсистеме транспортных операций, позволяющая ею управлять, обеспечивая требуемый уровень качества дорожного слоя.
Ключевые слова: *температурная неоднородность асфальтобетонной смеси, транспортные операции, вероятностная математическая модель*.

A probabilistic mathematical model of temperature inhomogeneities-sti asphalt mixes in the subsystem transport operations, allowing it to manage, providing the required level of quality of the road bed.
Keywords: *temperature heterogeneity of bituminous mixture, trans-tailors operation, probabilistic mathematical model.*

Технология строительства асфальтобетонных (АБ) слоев уникальна: в подогретом состоянии смесь перевозится на значительные расстояния, распределяется и уплотняется тонким слоем из условия обеспечения ему заданных свойств.
Качество асфальтобетонного слоя в значительной мере зависит от его неоднородностью, которая определяется равномерностью распределения показателей его свойств во времени и пространстве. Известно, что технологические факторы обуславливают порядка 70% неоднородности слоя.
Являясь термопластичной, АБ смесь чувствительна к температурному состоянию при ее уплотнении. В результате уплотнения температурно-неоднородной (ТН) АБ смеси создается слой, неоднородный по физико-механическим показателям и с пониженной долговечностью.

Повышение срока службы АБ слоя достигается управлением температурной неоднородностью (ТН) смеси в технологическом процессе, которое состоит в целенаправленном влиянии на их нестационарное температурное поле, при котором обеспечивается достижение заданных температурно-технологических параметров. Управление может быть оказано путем подогрева, утепления и перемешивания смеси.

Следует иметь ввиду, что утепление смеси не решает в полной мере проблему ТН, т.к. согласно нулевому началу термодинамики идеальная тепловая изоляция в природе не существует. Тепловая изоляция только увеличивает время протекания процесса релаксации температуры, не предотвращая его полностью.

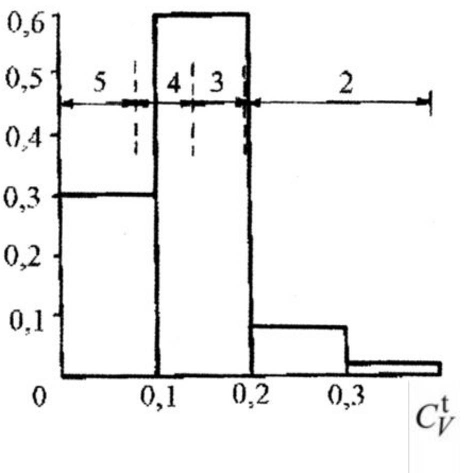
Порция АБ смеси, загружаемая в кузов автосамосвала, может иметь допускаемую ГОСТ 9128 разницу верхнего и нижнего уровней температуры не более 10^0С, что обуславливает коэффициент вариации температуры около 2%.

В процессе выполнения транспортных операций порция АБ смеси охлаждается в зависимости от их продолжительности, погодных условий, степени теплоизоляции и модуля ее поверхности. Продолжительность транспортных операций является случайной величиной.

В конечном итоге, от коэффициента вариации температуры АБ смеси C^t_v при укладке зависит коэффициент вариации плотности слоя C^ρ_v и его качество (рис. 1).

С целью повышения однородности АБ смеси по зерновому составу и температурному состоянию рекомендуется и практикуется перед ее укладкой и уплотнением применение перегружателей смеси. При этом достигается разность температур профиля не более 10^0С [1, 2].

Для управления температурной неоднородностью АБ смеси разработаны соответствующие вероятностные математические модели. Рассмотрим такую модель для подсистемы транспортных операций порции смеси.



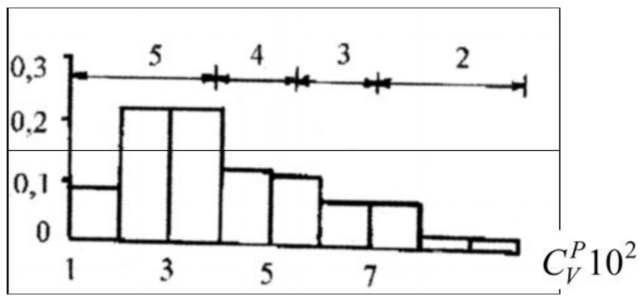


Рис. 1. Гистограммы распределения коэффициентов вариации температуры смеси C^t_v при укладке (слева) и плотности АБ слоя C^ρ_v (справа) с оценкой в баллах: 5 – отлично; 4 – хорошо; 3 – удовлетворительно; 2 – неудовлетворительно.

Задача о температурном поле порции АБ смеси t(М, τ) с объемом V и поверхностью S сводится к решению краевой задачи с граничными условиями III рода и постоянным начальным условием:

$$\partial t/\partial\tau = a\left(\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2\right), \qquad M \in V; \tag{1}$$

$$-\lambda\left[\partial t / \partial n\right]\Big|_{S\alpha} = k_\alpha\left[t_П\left(M_S, \tau\right) - t_в\right];\ k_\alpha = k_\alpha\left(M_S,\right) M_S \in S; \tag{2}$$

$$t(M,0) = t_H \qquad (3)$$

в которой a, λ, k_α – соответственно коэффициенты температуропроводности, теплопроводности АБ смеси и теплопередачи утепленной смеси воздуху с температурой $t_в$; τ – время; x, y, z – координаты.

Для упрощения аналитического решения задачи (1)-(3) будем рассматривать в объеме транспортируемой смеси V *активно* охлаждающийся объем V_A и *инертный* $V_И$, $V=V_A+V_И$. Тогда объем V_A будет иметь две граничные поверхности: фиксированную поверхность S и переменную изотермическую поверхность $S_0(\tau)$, являющуюся границей между частями V_A и $V_И$, для которой выполняются условия:

$$t(M,\tau)\Big|_{S_0} \equiv t_H; \; \left[\partial t / \partial n\right]\Big|_{S_0} \equiv 0. \qquad (4)$$

Разбиение сложной поверхности теплопередачи S на простые части S_i классической формы, для каждой из которых имеют место практически однородные по координатам граничные условия типа (2), порождает аналогичное разбиение активного объема :

$$S_1 : S_2 : \ldots : S_n \cong V_{A_1} : V_{A_2} : \ldots : V_{A_n} .$$

Известные объемные доли $p_i^V = V_{A_i}/V \cong S_i/S$ позволяют аналитически решить задачу описания сложного температурного поля порции АБ смеси.

Для решения использован метод А.И. Вейника [3], сущность которого состоит в следующем:

- температурное поле $t\ (M,\tau)$, как функция координаты z, описывается степенной функцией $t\ (z,\tau) \cong t\ (M,\tau)$, $0 \le z \le z_0\ (\tau)$, в которой $z_0\ (\tau)$ является координатой *фронта возмущения* начального распределения температурного поля;
- дифференциальное уравнение теплового баланса составляется для нахождения переменных взаимосвязанных параметров аппроксимирующей функции $t(z,\tau)$ – температуры поверхности $t(0,\tau) = t_П(\tau)$ и координаты $z_0\ (\tau)$ – и является среднеинтегральным (по z) вариантом уравнения теплопроводности. При этом осреднение осуществляется по объему $V_A \subset V$;
- краевая задача (1) – (3) сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка для $z_0(\tau)$ с начальным условием $z_0(0)=0$, т. е. к задаче Коши.

С учетом сущности изложенного метода расчетные формулы решаемой задачи имеют вид:

$$t(z,\tau) = t_H - (t_H - t_П)\left(1 - z \cdot z_0^{-1}\right), \; 0 \le z \le z_0(\tau); \qquad (5)$$

$$z = z_0(\tau) \equiv k_y\sqrt{a\tau}\,; \qquad (6)$$

$$k_y = k_y(B) \equiv 2n(n+1)/\varphi(B); \qquad (7)$$

$$\varphi(B) = 1 + 2B^{-1} - 2B^{-2}\ln(1+B); \qquad (8)$$

$$t_П(\tau) = t_H - (t_H - t_в)\left(1 + B^{-1}\right)^{-1}, \qquad (9)$$

где $B \equiv z_0 k_\alpha (\lambda n)^{-1}$, $k_\alpha^{-1} = \alpha_y^{-1} + R_y$; $R_y = h_y \lambda_y$; n – показатель степенной функции $t(z,\tau)$; λ_a, a_a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности АБ смеси; λ_y, α_y – коэффициенты теплопроводности утеплителя и теплоотдачи с его поверхности; h_y – толщина утеплителя.

Перейдем к рассмотрению вероятностных закономерностей температурного поля в объеме V порции АБ смеси, которые описываются интегральным F и дифференциальным f законами распределения температур $t(z,\tau)<t_Н$ в процессе транспортирования:

$$F(t,\tau) \equiv P(t_П \le t_* < t) = \frac{z(t)}{z_0(\tau)} \cdot \frac{V_A(\tau)}{V}; \qquad (10)$$

$V_a\, t_в$

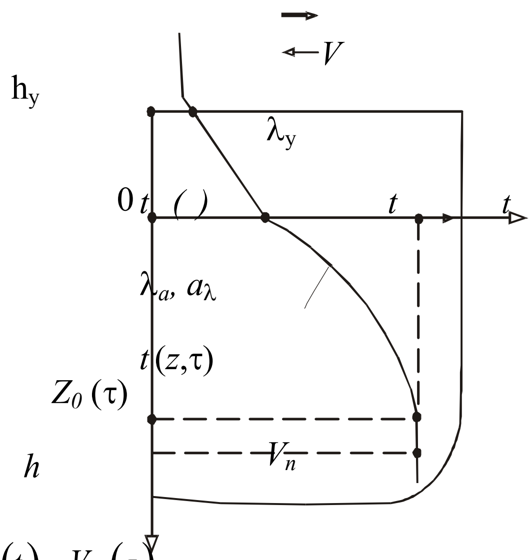


Рис. 2. Расчетная схема температурного поля элементарной площадки АБ смеси под утеплителем:

$R_y = h_y \cdot \lambda_y^{-1}$ термическое сопротивление утеплителя; V_a, $V_в$ –

$$f(t,\tau) \equiv [F(t,\tau)]'_t = \frac{z'_t(t)}{z_0(\tau)} \cdot \frac{V_A(\tau)}{V}. \qquad (11)$$

Вероятностное содержание (10) и (11) сводится к использованию формулы полной вероятности:

$$P(A) = P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2); \qquad (12)$$

$$A = \{t_П \le t_* < t\},\ P(A) = F(t,\tau); \qquad (13)$$

$$P(H_1) = V_A \cdot V^{-1};\ P(H_2) = V_И \cdot V^{-1}; \qquad (14)$$

$$P(A/H_1) = z(t)z_0^{-1}(\tau);\ P(A/H_2) = 0. \qquad (15)$$

Вероятности гипотез равны относительным объемным долям активного V_A и инертного $V_И$ объемов. Условная геометрическая вероятность $P(A/H_1)$ равна отношению отрезка $z(t)$, на котором реализуется температурный интервал $(t_П \le t_* < t)$, ко всему отрезку z_0 (τ), на котором реализуется интервал ($t_П$, $t_Н$). Использование формулы геометрической вероятности основано на принципе равновероятности выбора точек $M \in V$. Условная вероятность $P(A/H_2)$ равна нулю для всех температур $t<t_Н$. Формула $z(t)$ длины отрезка, на котором реализуется событие A, получается из уравнения (5) (рис. 2).

Конкретизация формул (10) и (11) с учетом (5)–(9) имеет вид:

$$F(t,\tau) = z(t)S \cdot V^{-1}; \qquad (16)$$

$$z(t)/z_0(\tau) = 1 - \left[(t_Н - t)/(t_Н - t_П)\right]^{1/n}; \qquad (17)$$

$$V_A(\tau) \cdot V^{-1} = S\left[z_0(\tau)\right]V^{-1}; \qquad (18)$$

$$f(t,\tau) = z'(t) S V^{-1}; \tag{19}$$

$$z'(t) = z_0(\tau)\left[n(t_H - t)\right]^{-1} \cdot \left[(t_H - t)/(t_H - t_П)\right]^{1/n} \tag{20}$$

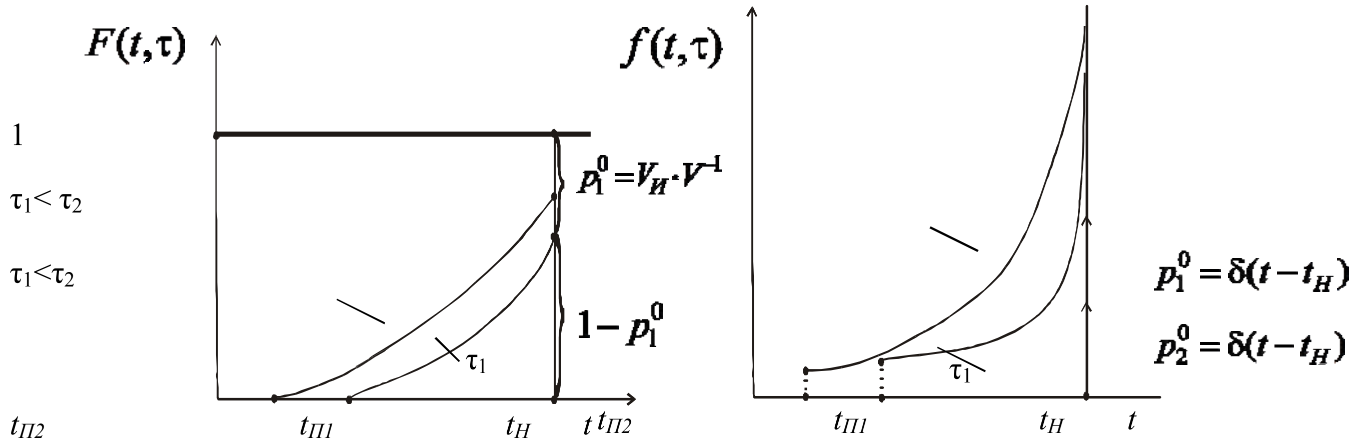


Рис. 3. Интегральный *F(t, τ)* и дифференциальный *f(t, τ)* законы распределения температур порции смеси в моменты времени τ_1 и τ_2: p_2^0, p_1^0 – объёмные доли инертного объёма смеси $V_И(\tau)$

Полные выражения законов распределений F и f складываются из непрерывных компонент F_S в виде (16) и f_S в виде (19), описывающих температурное поле в активном объеме V_A $(t<t_П)$, и дискретных компонент, учитывающих инертный объем $V_И$ $(t=t_H)$:

$$F(t,\tau) = F_S(t,\tau) + \Theta(t - t_H); \tag{21}$$

$$f(t,\tau) = f_S(t,\tau) + p_0\delta(t - t_H), \tag{22}$$

где $\Theta(t - t_H)$ – единичная ступенчатая функция Хевисайда, которая равна нулю при $t<t_H$ и единице при $t \ge t_H$; δ – дельта-функция Дирака; $p_0 = V_И \cdot V^{-1}$ – относительная объемная доля инертной части порции смеси или вероятность гипотезы $t=t_H$.

Выделив на поверхности АБ смеси элементарную площадку dS и рассматривая полуограниченную среду с граничным условием III рода на ее поверхности при n=2 получим выражения для:

– математического ожидания:

$$M_t(\tau) = (t_H - t_П) M(\tilde{\Theta}) + t_П; \quad \tilde{\Theta} \equiv \frac{t - t_П}{t_H - t_П}; \tag{23}$$

$$M(\tilde{\Theta}) = \varphi = \begin{cases} \varphi_1(\Delta) = 1 - (1/3)\Delta, & 0 \le \Delta \le 1; \\ \varphi_2(\Delta) = \Delta^{-1} - (1/3)\Delta^{-2}, & \Delta \ge 1; \\ \varphi_1(1) = \varphi_2(1) = 2/3; \end{cases}$$

– дисперсии:

$$D_t(\tau) = \left[\frac{H_t}{1 + B_t \, t/\theta_1} \right]^2 \cdot D(\tilde{\Theta}); \qquad (24)$$

$$D(\tilde{\Theta}) = \psi_1(\Delta) = (1/5)\Delta - (1/9)\Delta^2,\ 0 \le \Delta \le 1;$$

$$D(\tilde{\Theta}) = \psi_2(\Delta) = (1/3)\Delta^{-2} - (1/3)\Delta^{-3} + (4/45)\Delta^{-5},\ \Delta \ge 1;$$

$$\Psi(1) = \psi_1(1) = \psi_2(1) = 4/45 = 0{,}089;$$

$\max D(\tilde{\Theta})$=0,09 при Δ= 0,9, где $\Delta \equiv z_0/h$. При этом $h=V/S$ – эквивалентная толщина порции смеси объемом Vи поверхностью S.

Предложенная вероятностная математическая модель температурной неоднородности АБ смеси в подсистеме транспортных операций позволяет рассчитать их требуемые температурно-технологические параметры, а на их основе ею управлять.

Список литературы

1. ОДМ 218.5.002-2009. Методические рекомендации по устройству асфальтобетонных слоев с применением перегружателей смеси [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/902180152

2. Шестаков В.Н. Методы теории теплопроводности в транспортном строительстве [Текст]: учебное пособие / В.Н. Шестаков, А.Н. Шестаков. – Омск: СибАДИ, 2011. – 68 с.