

A ROAD ASPHALT CONCRETE PAVEMENT AS A DISSIPATIVE STRUCTURE

B.B. Teltayev

Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Kazakhstan
bagdatbt@yahoo.com

Key words: road asphalt concrete pavement, cooling, thermal crack, strain, stress, entropy, finite element method, temperature sensor, criterion of evaluation for open thermodynamical system

Abstract: The work mainly dedicated to explanation of the phenomenon of road asphalt concrete pavement low temperature cracking on the basis of thermodynamics of irreversible process and synergetics. On analogy with the famous phenomenon of self-organization – convective cells of Benar and ruby laser, increasing of total (relaxation and mechanical) dissipative energy rate in a road asphalt concrete pavement after cracking in process of long cooling in range of negative temperatures has been showed and this fact demonstrates that a road asphalt concrete is a dissipative structure. Taking into account of E. Shrodinger's idea about negative entropy, it has been told about its negative effect at cooling of an asphalt concrete pavement. Confirmation of the Yu. L. Klimontovich's principle of entropy production minimum in processes of self-organization and the P. Glansdorff-I. Prigogine's criterion of evaluation for open thermodynamical systems has been demonstrated. Stresses and strains in the pavement under long time cooling (30 hours) have been defined by the finite element method approach with using isoparametric elements of second order. A simplified method taking into account of thermoviscoelastic properties of an asphalt concrete has been developed. Initial and boundary conditions of the problem have been defined on the basis of results of experimental investigation of temperature in points of pavement structure and subgrade of the highway "Astana-Burabay" by the especially developed sensors.

УДК 625.7/8:691.16

ДОРОЖНОЕ АСФАЛЬТОБЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ КАК ДИССИПАТИВНАЯ СТРУКТУРА

Б.Б. Телтаев

Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Алматы, Казахстан
bagdatbt@yahoo.com

Ключевые слова: Дорожное асфальтобетонное покрытие, охлаждение, температурная трещина, деформация, напряжение, энтропия, метод конечных элементов, датчик температуры, критерий эволюции открытых термодинамических систем.

Аннотация: Работа, главным образом, посвящена объяснению явления низкотемпературного растрескивания дорожного асфальтобетонного покрытия на основе положений термодинамики необратимых процессов и синергетики. По аналогии с известными явлениями самоорганизации – конвективными ячейками Бенара и рубинового лазера, показано повышение скорости суммарной (релаксационной и механической) диссипации энергии в дорожном асфальтобетонном покрытии после образования трещины в процессе длительного охлаждения в области отрицательных температур и тем самым доказывается, что дорожное асфальтобетонное покрытие – диссипативная структура. Учитывая идею Э. Шредингера об

отрицательной энтропии, высказано мнение об её отрицательном эффекте при охлаждении асфальтобетонного покрытия. Продемонстрировано соблюдение принципа минимума производства энтропии в процессе самоорганизации Ю.Л. Климонтовича и универсального критерия эволюции открытых термодинамических систем П. Гленсдорфа-И. Пригожина.

Напряженно-деформированное состояние покрытия при длительном (30 часов) охлаждении определено на основе подхода метода конечных элементов с использованием изопараметрических элементов второго порядка. Для этого разработан упрощенный метод, учитывающий термовязкоупругие свойства асфальтобетона. Начальные и граничные условия задачи заданы на основе данных экспериментального определения температуры в точках конструкции дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги «Астана-Бурабай» с помощью разработанных специально датчиков.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что асфальтобетонное покрытие является одним из основных элементов автомобильной дороги и его поведение в разных эксплуатационных условиях исследуется давно и достаточно многосторонне, до настоящего времени не разработаны надежные модели его деформирования и разрушения. В частности, дорожники до сих пор лишены возможности прогнозировать количество низкотемпературных трещин в асфальтобетонном покрытии автомобильной дороги с достаточной для практического использования точностью [1].

Низкотемпературные трещины в асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог в регионах с холодным зимним климатом встречаются часто и их ремонт (заделка) требует не малые средства. Например, ремонт погонного метра трещины в США в зависимости от способа стоит 3,6-3,95 долларов [2, 3], в России – 120-190 рублей [4], в Беларуси – 40 000-45 000 белорусских рублей [5], в Украине – 80-85 гривней и в Казахстане 376-508 тенге. Поэтому правильное понимание механизма низкотемпературного растрескивания асфальтобетонного покрытия имеет не только научный, но и важный практический интерес.

ПОНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Как показывают результаты анализа изменений температуры воздуха в зимний период [6-8], понижения температуры можно считать линейной функцией времени. Подтверждением сказанного могут служить графики понижения температуры воздуха в г. Астане в 2006 году, приведенные на рисунке 1. Поэтому далее рассмотрим понижение температуры воздуха по линейной зависимости.

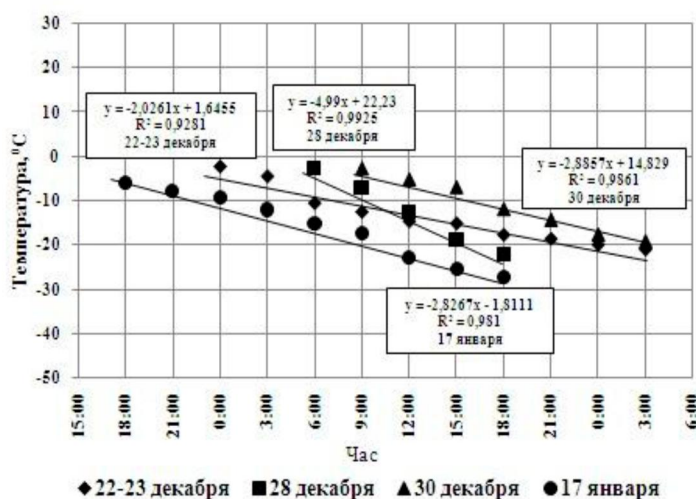


Рисунок 1. Понижения температуры воздуха в г. Астане в 2006 году

Как показано на рисунке 2 (а), заменим непрерывную линию температуры ступенчатым графиком, что справедливо, когда в последовательные моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ происходит мгновенное уменьшение температуры на величину ΔT . Изменение температуры ΔT вызывает в асфальтобетонном покрытии нереализованную температурную деформацию $\Delta \epsilon_T$:

$$\Delta\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α - коэффициент линейного температурного расширения, $1/^\circ\text{C}$.

Нереализованная температурная деформация обуславливает возникновение в покрытии температурного напряжения $\Delta\sigma_T$, которое с течением времени релаксирует.

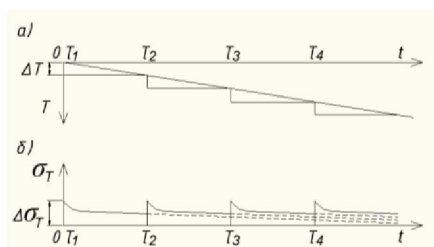


Рисунок 2. Графики понижения температуры (а) и релаксации ступенчатых напряжений (б)

ФУНКЦИЯ РЕЛАКСАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Асфальтобетон является вязкоупругим материалом [9-12] и его деформационные свойства представляются функцией релаксации. В настоящее время известны как чисто экспериментальные, так и экспериментально-корреляционные методы определения функции релаксации асфальтобетона. В нашей работе [13] функция релаксации традиционно используемого в Казахстане горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона, приготовленного с применением битума марки БНД-100/130, была определена с помощью модели М. Витчака [14]. В настоящей статье она определяется по модифицированной формуле Хирша, предложенной Д. Кристенсенем и Р. Бонакисом [15], которая имеет следующий вид:

$$E_{ab}(t) = P_c(t) \cdot [E_{ag} \cdot (1 - VMA) + E_b(t) \cdot VFA \cdot VMA], \quad (2)$$

$$P_c(t) = 0,006 + \frac{0,994}{1 + \exp \left[- \left(0,6628 + 0,5861 \cdot \ln \left(VFA \cdot \frac{E_b(t)}{3} \right) \right) - 12,87 \cdot VMA - 0,1706 \cdot \ln(\varepsilon \cdot 10^6) \right]}, \quad (3)$$

где $E_{ab}(t)$ - модуль релаксации асфальтобетона в момент времени t ;

$E_b(t)$ - модуль релаксации битума в момент времени t ;

E_{ag} - модуль упругости каменного заполнителя, принятый равным 26 540 МПа;

VMA - пористость минерального материала (в долях единицы);

VFA - доля межзерновых пор, заполненных вяжущим (в долях единицы);

ε - уровень деформации, принятый равным $100 \cdot 10^{-6}$ для низких и средних температур.

Модуль релаксации битума $E_b(t)$ вычисляется по формуле [16]:

$$E_b(t) = Eg \left[1 + \left(\frac{Eg \cdot t}{3 \cdot \eta} \right)^b \right]^{-\left(1 + \frac{1}{b}\right)}, \quad (4)$$

где Eg - мгновенный модуль битума, принятый равным 2 460 МПа;

η - коэффициент вязкости битума, МПа·с.

Коэффициент вязкости η определяется по выражениям:

$$\begin{cases} \eta = a_{TrAhr}(T) \cdot \eta(T_r) & T \leq T_{rb} - 10; \\ \eta = a_{TrWLF}(T) \cdot \eta(T_r) & T > T_{rb} - 10, \end{cases} \quad (5)$$

$$\eta(T_r) = 0,00124 \left[1 + 71 \cdot \exp \left[-\frac{12(20 - PI)}{5(10 + PI)} \right] \right] \cdot \exp \left(\frac{0,2011}{0,11 + 0,0077PI} \right), \quad (6)$$

$$a_{Tr,Abp}(T) = \exp \left[11720 \cdot \frac{3(30 + PI)}{5(10 + PI)} \left[\frac{1}{(T + 273)} - \frac{1}{(T_{rb} + 263)} \right] \right], \quad (7)$$

$$a_{Tr,WLF}(T) = \exp \left[-\frac{2,303 (T - T_{rb} + 10)}{(0,11 + 0,0077PI) (114,5 + T - T_{rb})} \right]. \quad (8)$$

где PI и T_{rb} - индекс пенетрации и температура размягчения битума.

Параметр b вычисляется по выражениям:

$$b = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{\ln(\pi)}{\ln(2)} - 2}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{0,1794}{1 + 0,2084 PI - 0,00524 PI^2}. \quad (10)$$

Построенная по приведенной выше формуле Кристенсена-Бонакиса функция релаксации рассматриваемого асфальтобетона представлена на рисунке 3.

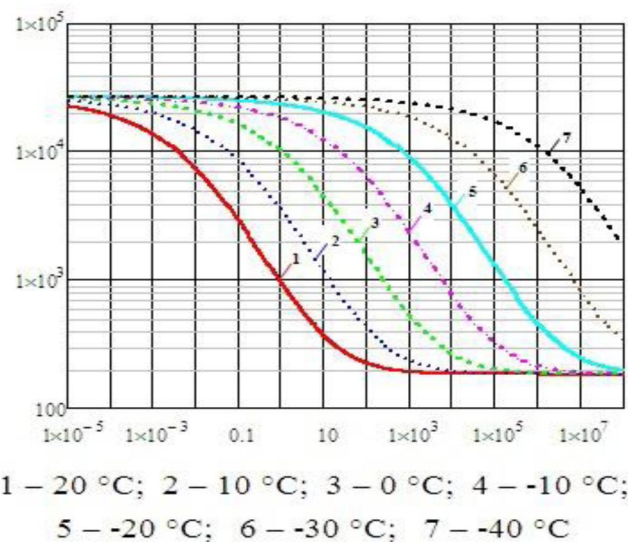


Рисунок 3. Функция релаксации асфальтобетона при разных температурах

ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННАЯ СУПЕРПОЗИЦИЯ

В линейной теории вязкоупругости при учете вязкоупругого поведения материалов в широких пределах изменения температуры и времени пользуются принципом температурно-временной суперпозиции [17], в соответствии с которым эквивалентность температуры и времени представляется в виде:

$$a_T(T) = \frac{t_T}{t_r}, \quad (11)$$

где $a_T(T)$ - функция температурно-временной суперпозиции;

t_T - длительность релаксации при температуре T ;

t_r - длительность релаксации при приведенной температуре T_r .

Для определения функции температурно-временной суперпозиции $a_T(T)$ были найдены 13 значений времен релаксации, соответствующих модулю релаксации 1000 МПа при разных температурах (таблица 1).

Таблица 1 – Время релаксации при модуле релаксации 1000 МПа и разных температурах

Температура T , °С	20	15	10	5	0	-5	-10
Время t , с	0,0037	0,0140	0,0559	0,233	1,029	4,78	23,6
Температура T , °С	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-
Время t , с	124	695	4178	27050	189000	1 438 000	-

Как видно из рисунка 4, функция температурно-временной суперпозиции, построенная по данным приведенной выше таблицы при температуре приведения 20 °С, с высокой достоверностью описывается полиномом второй степени в полулогарифмических координатах:

$$a_T(T) = 0,0005 T^2 - 0,1317 T + 2,4327. \quad (12)$$

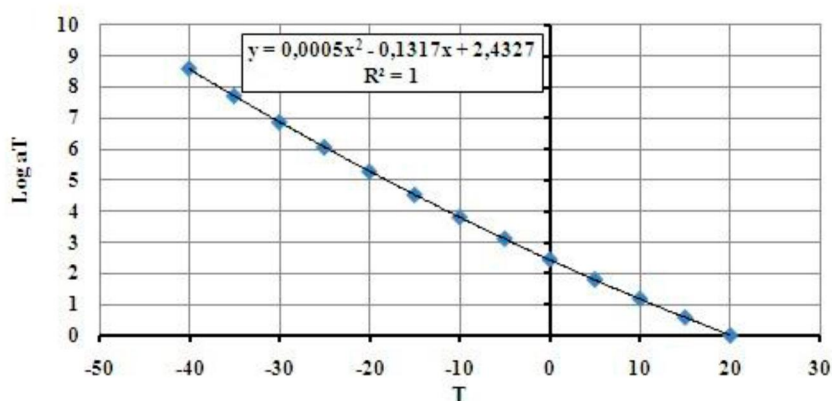


Рисунок 4. Функция температурно-временной суперпозиции

МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО РЕЛАКСАЦИОННОГО МОДУЛЯ

Замена непрерывного графика изменения температуры ступенчатыми линиями позволяет предложить простой приближенный метод определения перемещений, деформаций и напряжений в асфальтобетонном покрытии в дискретные моменты времени.

Если постоянная температура T_1 действовала в течение времени Δt , то в соответствии с выражением (11), приведенная к температуре приведения T_r длительность определяется как

$$\frac{\Delta t}{a_T(T_1)}. \quad (13)$$

Аналогично, для двух последовательных длительностей Δt и Δt при соответствующих температурах T_1 и T_2 имеем:

$$\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_2)}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta t}{a_T(T_2)}.$$

Для трех отрезков времени каждый с Δt можно написать:

$$\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_3)}, \quad (15)$$

$$\frac{\Delta t}{a_T(T_2)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_3)},$$

$$\frac{\Delta t}{a_T(T_3)}.$$

Представленное выше приведенное время можно объединить в одну матрицу:

$$[t_r] = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{a_T(T_1)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_4)} & \dots & \frac{\Delta t}{a_T(T_n)} \\ 0 & \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_4)} & \dots & \frac{\Delta t}{a_T(T_n)} \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_4)} & \dots & \frac{\Delta t}{a_T(T_n)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta t}{a_T(T_4)} & \dots & \frac{\Delta t}{a_T(T_n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\Delta t}{a_T(T_n)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Назовем матрицу $[t_r]$ матрицей приведенных времен. Она представляет собой квадратную матрицу порядка n (n – число дискретных времен), которая имеет следующие особенности:

1. Элементы, расположенные ниже главной диагонали, равны нулю.
2. Ненулевые элементы, расположенные в одном столбце, имеют одинаковые значения.
3. Элементы, расположенные в одной строке, представляют собой приведенные длительности отрезков времени, отсчитываемые с моментов τ_i до момента времени t .

Напишем выражения для температурного напряжения в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 :

$$\sigma_T(t_1) = E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} \right] \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (17)$$

$$\sigma_T(t_2) = \left\{ E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} \right] + E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_2)} \right] \right\} \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (18)$$

$$\sigma_T(t_3) = \left\{ E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \right] + E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_2)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \right] + E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \right] \right\} \alpha \cdot \Delta T. \quad (19)$$

Видно, что моменту времени t_1 (концу первого временного шага Δt) соответствует время $\frac{\Delta t}{a_T(T_1)}$, а моменту времени t_2 (концу второго временного шага $2\Delta t$) соответствует следующая матрица второго порядка в матрице (16):

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{a_T(T_1)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} \\ 0 & \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Аналогично можно написать матрицу третьего порядка, соответствующую времени t_3 :

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{a_T(T_1)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \\ 0 & \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} & \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Теперь становится понятным, что в общем случае для момента времени t_i соответствует матрица приведенных времен порядка i ($i = 1 \dots n$).

С учетом (17)-(19) выражения для температурного напряжения в разные моменты времени можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \sigma_T(t_1) &= E_{ef}(t_1) \cdot \alpha \cdot \Delta T, \\
 \sigma_T(t_2) &= E_{ef}(t_2) \cdot \alpha \cdot \Delta T, \\
 \sigma_T(t_3) &= E_{ef}(t_3) \cdot \alpha \cdot \Delta T, \\
 &\dots\dots\dots \\
 \sigma_T(t_n) &= E_{ef}(t_n) \cdot \alpha \cdot \Delta T.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Выражение (22) удобно записать в матричной форме:

$$\{\sigma_T(t_i)\} = \{E_{ef}(t_i)\} \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad i = 1 \dots n
 \tag{23}$$

где $\{E_{ef}(t_i)\}$ - вектор эффективных релаксационных модулей.

Компоненты вектора $\{E_{ef}(t_i)\}$ определяются по выражениям:

$$E_{ef}(t_1) = E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} \right],
 \tag{24}$$

$$E_{ef}(t_2) = E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} \right] + E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_2)} \right],
 \tag{25}$$

$$E_{ef}(t_3) = E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_1)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_2)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \right] + E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_2)} + \frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \right] + E \left[\frac{\Delta t}{a_T(T_3)} \right].
 \tag{26}$$

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время метод конечных элементов широко используется в определении напряженно-деформированного состояния конструкций дорожных одежд автомобильных дорог. Особенности применения метода конечных элементов в различных практически важных задачах механики дорожных одежд можно найти, например, в монографии [18].

Изложенный в предыдущем разделе метод эффективного релаксационного модуля в сочетании с методом конечных элементов дает возможность относительно просто и достаточно точно определять напряженно-деформированное состояние дорожного асфальтобетонного покрытия при его охлаждении в области отрицательных температур.

Систему разрешающих уравнений метода конечных элементов в нашем случае можно написать в следующем виде:

$$[K_{ef}(t)] \cdot \{U(t)\} = \{F_{ef}(t)\},
 \tag{27}$$

где $[K_{ef}(t)]$ - эффективная матрица жесткости системы конечных элементов в момент времени t ;

$\{F_{ef}(t)\}$ - вектор эффективных узловых сил в момент времени t ;

$\{U(t)\}$ - вектор узловых перемещений.

Чтобы обеспечить высокую точность в расчетах перемещений, деформаций и напряжений в точках асфальтобетонного покрытия, используем изопараметрические восьмиузловые конечные элементы второго порядка (рисунок 5).

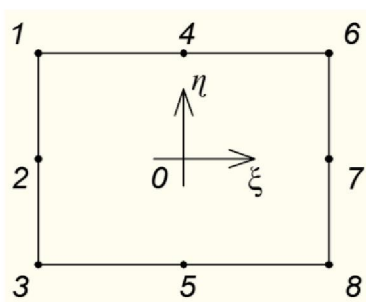


Рисунок 5. Конечный элемент второго порядка

Функции формы принятого типа конечного элемента имеют вид [19]:
угловые узлы:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi_0) (1 + \eta_0) (\xi_0 + \eta_0 - 1), \quad (28)$$

узлы на сторонах:

$$\xi_i = 0, \quad N_i = \frac{1}{2} (1 - \xi^2) (1 + \eta_0), \quad (29)$$

$$\eta_i = 0, \quad N_i = \frac{1}{2} (1 + \xi_0) (1 - \eta^2), \quad (30)$$

где $\xi_0 = \xi \xi_i$, $\eta_0 = \eta \eta_i$.

Эффективная матрица жесткости системы в момент времени t $[K_{ef}(t)]$ формируется из эффективных матриц жесткости конечных элементов в момент времени t $[k_{ef}(t)]$ одним из известных способов [19-21].

Эффективная матрица жесткости конечного элемента в момент времени t вычисляется по формуле:

$$[k_{ef}(t)] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B(\xi, \eta)]^T [D_{ef}(\eta, t)] [B(\xi, \eta)] |\det [J(\xi, \eta)]| d\eta d\xi, \quad (31)$$

где $[B(\xi, \eta)]$ - матрица связи между векторами перемещений и деформаций конечного элемента;

$D_{ef}(\eta, t)$ - матрица эффективных вязкоупругих характеристик конечного элемента в момент времени t ;

$\det [J(\xi, \eta)]$ - матрица Якоби.

Матрица $[D_{ef}(\eta, t)]$ изотропного конечного элемента в условиях плоской деформации определяется по выражению:

$$[D_{ef}(\eta, t)] = \frac{E_{ef}(\eta, t)}{[1 + \nu_{ef}(\eta, t)][1 - 2 \cdot \nu_{ef}(\eta, t)]} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu_{ef}(\eta, t)}{1 - \nu_{ef}(\eta, t)} & 0 \\ \frac{\nu_{ef}(\eta, t)}{1 - \nu_{ef}(\eta, t)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2 \cdot \nu_{ef}(\eta, t)}{2[1 - \nu_{ef}(\eta, t)]} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Численное интегрирование выражения (32) выполняется по квадратурной формуле Гаусса-Лежандра. При этом для интегрирования принимаются четыре точки внутри каждого элемента (рисунок 6). Тогда выражение (31) примет следующий вид:

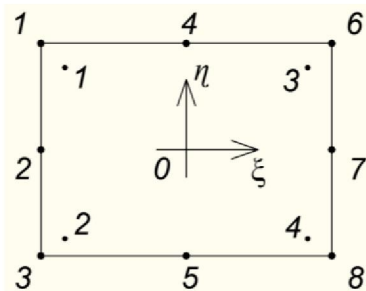


Рисунок 6. Точки численного интегрирования внутри конечного элемента

$$[k_{ef}(t)] = t \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_i \cdot H_j [B(\xi_i, \eta_i)]^T [D_{ef}(\eta_i, t)] [B(\xi_i, \eta_i)] [\det[J(\xi_i, \eta_i)]] \quad (33)$$

где t – толщина конечного элемента, равная в плоской задаче 1;

n – число точек численного интегрирования в направлении каждой координатной оси, $n = 2$;

H_i, H_j – весовые коэффициенты, $H_i = H_j = 1$;

ξ_i, η_i – координаты точек интегрирования, $\xi_i = \eta_i = \pm 0,577350$.

Следует отметить, что вязкоупругие характеристики $[E_{ef}(\eta, t)$ и $\nu_{ef}(\eta, t)]$ материала конечного элемента, следовательно, и матрица эффективных вязкоупругих характеристик $[D_{ef}(\eta, t)]$ зависят от вертикальной координаты η . Это дает возможность для учета изменения в вертикальном направлении вязкоупругих свойств асфальтобетонного покрытия, вызванного вертикальным температурным градиентом.

В случае изменения температуры по толщине покрытия по линейной зависимости эффективные вязкоупругие характеристики асфальтобетона в точках интегрирования ($E_{ef}^i(t)$ и $\nu_{ef}^i(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$) записываются через эффективные вязкоупругие характеристики на верхней ($E_{ef}^0(t)$ и $\nu_{ef}^0(t)$) и нижней ($E_{ef}^h(t)$ и $\nu_{ef}^h(t)$) поверхностях покрытия:

$$E_{ef}^1(t) = E_{ef}^3(t) = 0,7887 \cdot E_{ef}^0(t) + 0,2113 \cdot E_{ef}^h(t), \quad (34)$$

$$E_{ef}^2(t) = E_{ef}^4(t) = 0,2113 \cdot E_{ef}^0(t) + 0,7887 \cdot E_{ef}^h(t), \quad (35)$$

$$\nu_{ef}^1(t) = \nu_{ef}^3(t) = 0,7887 \cdot \nu_{ef}^0(t) + 0,2113 \cdot \nu_{ef}^h(t), \quad (36)$$

$$\nu_{ef}^2(t) = \nu_{ef}^4(t) = 0,2113 \cdot \nu_{ef}^0(t) + 0,7887 \cdot \nu_{ef}^h(t). \quad (37)$$

Узловые напряжения, обусловленные нереализованной температурной деформацией, вычисляются по выражениям (рисунок 7):

$$\sigma_{T6}(t) = E_{ef}^0(t) \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (38)$$

$$\sigma_{T8}(t) = E_{ef}^h(t) \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (39)$$

$$\sigma_{T7}(t) = \frac{\sigma_{T6}(t) + \sigma_{T8}(t)}{2} = \frac{E_{ef}^0(t) + E_{ef}^h(t)}{2} \cdot \alpha \cdot \Delta T. \quad (40)$$

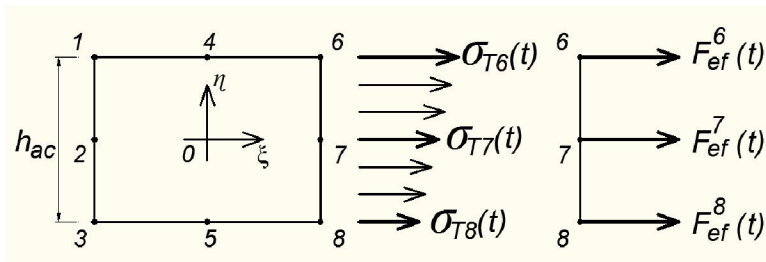


Рисунок 7. К определению эффективных узловых сил

Эффективные (эквивалентные) узловые силы в момент времени t определяются по выражениям:

$$F_{ef}^6(t) = [5E_{ef}^0(t) + E_{ef}^h(t)] \frac{h_{ac} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{24}, \quad (41)$$

$$F_{ef}^7(t) = [E_{ef}^0(t) + E_{ef}^h(t)] \frac{h_{ac} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{4}, \quad (42)$$

$$F_{ef}^s(t) = \left[E_{ef}^0(t) + 3E_{ef}^h(t) \right] \frac{h_{ac} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{24}, \quad (43)$$

где h_{ac} - толщина асфальтобетонного покрытия.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЯ

В дальнейшем определим изменяемые в течение длительного времени температуры верхней и нижней поверхностей асфальтобетонного покрытия в определенный зимний период. Для решения поставленной задачи используем процедуру моделирования нестационарного температурного переноса в конструкции дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги методом конечных элементов [7, 8]. Как известно, расчет нестационарного температурного поля требует задание начальных значений температуры, т.е. в момент времени $t=0$ и значений температуры на граничных поверхностях моделируемой конструкции. Чтобы обеспечить высокую точность задаваемых начальных и граничных значений температуры, будем использовать результаты экспериментального определения температуры в точках конструкции дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги «Астана-Бурабай» с помощью специально разработанного измерительного комплекса.

Опытный участок автомобильной дороги

Для осуществления длительного мониторинга температурного и влажностного режима в слоях конструкции дорожной одежды и точках земляного полотна в климатических условиях северного региона Казахстана был выбран участок (км 76+030) магистральной автомобильной дороги «Астана-Бурабай» с асфальтобетонным покрытием. Общий вид опытного участка дороги показан на рисунке 8. Участок дороги имеет 6 полос движения шириной 3,75 м каждый. На этой автомобильной дороге легковым автомобилям разрешено двигаться со скоростью 140 км/ч, а грузовым – 110 км/ч. Реконструкция дороги была завершена в ноябре 2009 года.



Рисунок 8. Общий вид участка (км 76+030) автомобильной дороги «Астана-Бурабай»

Дорожная конструкция

Конструкция дорожной одежды на опытном участке дороги включает: щебеночно-мастичный асфальтобетон, 6 см; крупнозернистый пористый асфальтобетон, 9 см; черный щебень, 12 см; щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом 7 %, 18 см; щебеночно-песчаная смесь, 15 см и песок (отсев дробления), 20 см. Между двумя асфальтобетонными слоями расположена геосетка.

Земляное полотно состоит из суглинка тяжелого песчанистого: влажность на границе раскатывания $W_p = 18,7$ %; влажность на границе текучести $W_T = 34,8$ %. Грунтовые воды залегают глубоко (ниже 3 м от поверхности земли).

Датчики температуры и влажности

В 2010 году были разработаны специальный датчик и способ экспериментального определения температуры и влажности дорожной конструкции и её грунтового основания, которые в последующем были признаны как изобретение и выданы патенты [22, 23]. Датчики были изготовлены компанией «Интерприбор» (г. Челябинск, Россия) по заказу Казахстанского

дорожного научно-исследовательского института (КаздорНИИ). Научно-исследовательская программа финансировалась Комитетом автомобильных дорог Министерства транспорта и коммуникаций Республики Казахстан.

Датчик, изготовленный в виде металлической капсулы, включает в себя рабочий элемент для измерения температуры, основанный на эффект термосопротивления и рабочий элемент для измерения влажности через магнитную проницаемость. Такое конструктивное решение позволяет осуществить одновременное измерение температуры и влажности в точках дорожной одежды и земляного полотна.

Для наглядности общий вид одного комплекта датчиков показан на рисунке 9.



Рисунок 9. Один комплект датчиков температуры и влажности

Температурные части датчиков были откалиброваны изготовителем, а влажностные части – в лаборатории КаздорНИИ. Калибровка датчиков была выполнена с использованием грунта, отобранного с места их закладки.

Закладка датчиков (рисунок 10) в слои дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги осуществлялась специалистами КаздорНИИ в первой декаде ноября 2010 года. Схема расположения датчиков представлена на рисунке 11. Измерительные концы датчиков выведены на поверхность дороги и собраны в измерительной камере надземного блока комплекта (рисунок 12).



Рисунок 10. Закладка датчика в дорожную конструкцию



Рисунок 11. Схема расположения датчиков в дорожной конструкции



Рисунок 12. Измерительный (надземный) блок комплекта датчиков температуры и влажности

С момента закладки комплекта датчиков до настоящего времени периодически выполняются измерения температуры и влажности в точках дорожной конструкции, результаты которых опубликованы в работах [24-28].

Начальные и граничные условия

Анализ результатов изучения изменения температуры в точках дорожной конструкции в течение длительного периода (более 5 лет) показал, что:

- продолжительные понижения температуры (охлаждения) воздуха в районе г. Астаны имеют место в январе и феврале месяцев;
- температура на поверхности земляного полотна равна $-6...-8$ °С, а в холодную зиму может опускаться до -11 °С;
- на глубине 220 см от поверхности дорожного покрытия температура находится в пределах $0,2-0,1$ °С;
- бывают сутки, в которых температуры воздуха и поверхности асфальтобетонного покрытия близки к 0 °С, т.е. равны $-(1-2)$ °С и $-(3-5)$ °С соответственно;
- из-за суточного колебания температуры воздуха градиент температуры в асфальтобетонном

покрытия существенно изменяется и может изменяться даже его знак.

С учетом изложенного выше в настоящей работе принято распределение по глубине дорожной конструкции температуры в начальный момент времени как показано в таблице 2.

Таблица 2. Начальное распределение температуры в дорожной конструкции

Глубина, см	0	6	15	45	80
Температура, °С	-2,0	-5,2	-6,4	-7,7	-6,6
Глубина, см	115	150	185	220	-
Температура, °С	-5,5	-3,6	-1,8	0,1	-

На поверхности асфальтобетонного покрытия температура изменяется с течением времени, что задается как условие задачи. На глубине 220 см температура в течение отдельного охлаждения не изменяется и остается равной 0,1 °С.

Расчет охлаждения покрытия

Расчет изменения температуры в точках дорожной конструкции выполнен методом конечных элементов с помощью разработанной программы, реализующей методику, изложенную в работах [7, 8]. Характеристики материалов слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна участка с асфальтобетонным покрытием (км 76+030) автомобильной дороги «Астана-Бурабай» приведены в таблице 3.

В расчетах принято, что охлаждение воздуха начинается с температуры -2 °С со скоростью 1 °С/ч в течение 30 часов до температуры -32 °С. Принято, что в течение всего рассматриваемого времени температура поверхности асфальтобетонного покрытия равна температуре воздуха.

Таблица 3. Характеристики материалов слоев дорожной одежды и грунта

Материал, грунт	Толщина, см	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м ² ·°С)	Теплоемкость, Вт·с/(кг·°С)
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	6	2400	1,40	1650
Крупнозернистый пористый асфальтобетон	9	2300	1,25	1650
Черный щебень	12	2100	1,10	1400
Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом 7 %	18	1800	1,57	1000
Щебеночно-песчаная смесь	15	1800	1,57	1000
Песок (отсев дробления)	20	1950	1,91	1100
Суглинок тяжелый песчаный	-	2100	1,80	1350

На рисунках 13 и 14 представлены графики изменения температуры в точках дорожной конструкции в разные моменты времени, отсчитываемые от начала охлаждения. Видно, что с увеличением продолжительности охлаждения толщина верхней части дорожной одежды, в которой температура изменяется, увеличивается (рисунок 13). Понижение температуры на 30 °С привело к изменению температуры до глубины 45-50 см. Как следовало ожидать, наибольшие изменения температуры имеют место в асфальтобетонных слоях. При этом линейное изменение температуры на поверхности асфальтобетонного покрытия вызывает нелинейное изменение температуры с увеличением глубины (рисунок 14). Из рисунка 15 видно, что разница температур на верхней и нижней поверхностях асфальтобетонных слоев изменяется монотонно и нелинейно. В начале охлаждения разница температур была равна 4,5 °С, а в конце охлаждения она составила 15,1 °С.

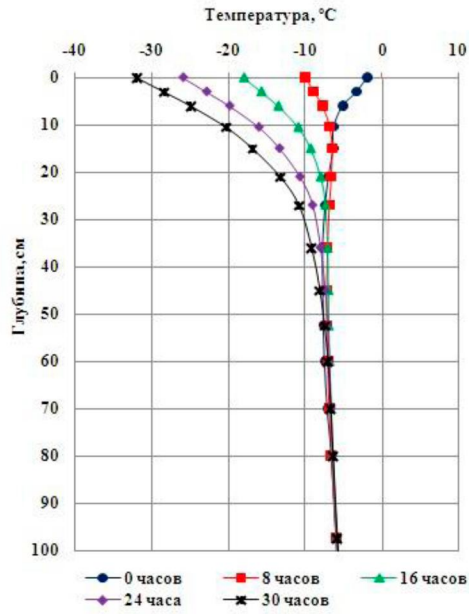


Рисунок 13. Изменение температуры по глубине дорожной конструкции в разные моменты времени охлаждения

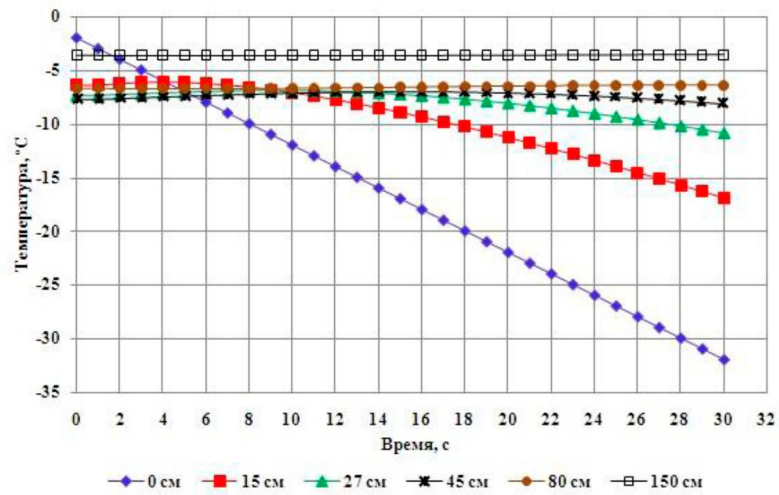


Рисунок 14. Изменение температуры в точках дорожной конструкции

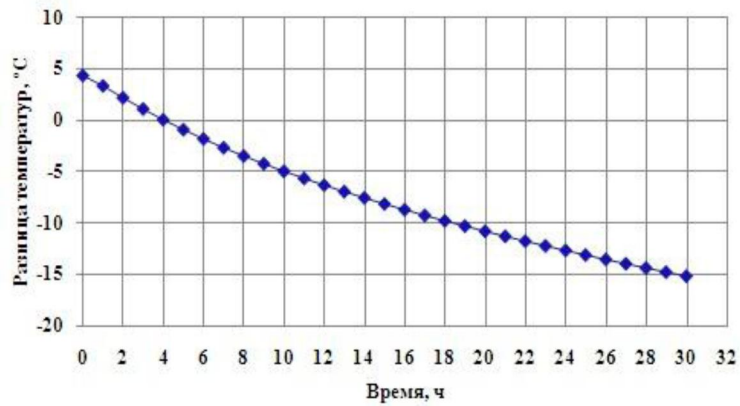


Рисунок 15. Изменение разницы температур в асфальтобетонных слоях в процессе охлаждения

ДЕФОРМАЦИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

Конечно-элементная дискретизация

Рассмотрим дорожное асфальтобетонное покрытие протяженностью 100 м между соседними температурными трещинами. В силу наличия симметрии, для расчетов принимается половина протяженности покрытия, которая разбивается на 100 плоских конечных элементов второго порядка с общим числом узлов 503 (рисунок 16). Ширина элементов равна 50 см. С учетом того, что в случае применения битума одной марки реологические свойства асфальтобетонов в области отрицательных температур не сильно отличаются, два асфальтобетонных слоя покрытия автомобильной дороги «Астана-Бурабай» рассматриваются как один и он наделен свойствами традиционно используемого в Казахстане мелкозернистого плотного асфальтобетона типа Б. Поэтому толщина элементов составляет 15 см.

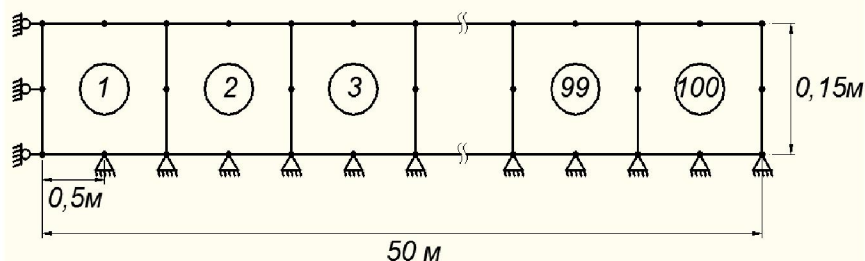


Рисунок 16. Конечно-элементная дискретизация асфальтобетонного покрытия

Напряжения и деформации в асфальтобетонном покрытии

По изложенной ранее процедуре, используя метод конечных элементов, вычислим изменение напряжения в асфальтобетонном покрытии при охлаждении воздуха от $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. График изменения нереализованной температурной деформации на поверхности покрытия во времени, вычисленной по формуле (1) показан на рисунке 17. В расчетах принято $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-5}$. А на рисунке 18 представлены графики изменения упругого и температурного напряжений в покрытии. При этом упругое напряжение вычислено по формуле:

$$\sigma_e(t) = E_0 \cdot \varepsilon_T(t), \quad (44)$$

где E_0 - мгновенный модуль упругости асфальтобетона, равный $26\,650\text{ МПа}$ [16].

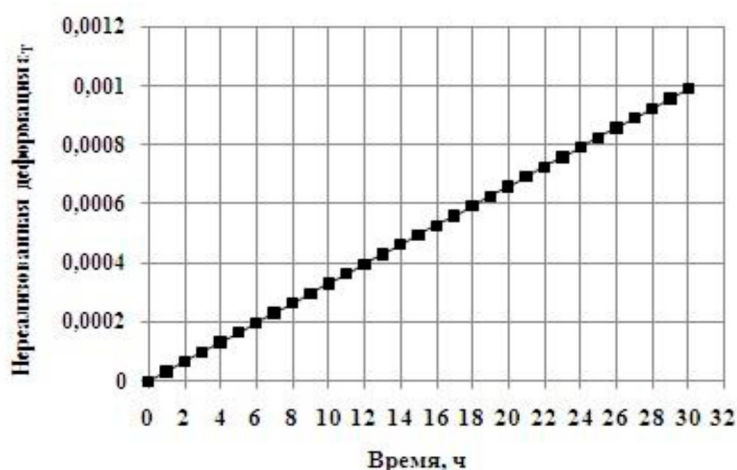


Рисунок 17. Изменение нереализованной температурной деформации в асфальтобетонном покрытии

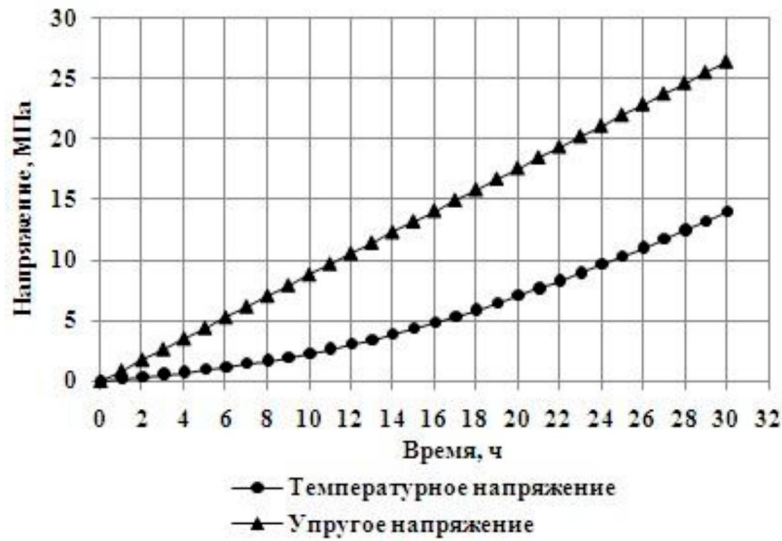


Рисунок 18. Изменение напряжений в асфальтобетонном покрытии

Из рисунков 17 и 18 видно, что с понижением температуры с постоянной скоростью нереализованная температурная деформация увеличивается также с постоянной скоростью, т.е. по линейной зависимости. Аналогичным образом изменяется и упругое напряжение в асфальтобетонном покрытии. Температурное напряжение в покрытии изменяется по нелинейной зависимости и его значения существенно меньше, чем упругое напряжение. Это объясняется тем, что из-за вязкоупругих свойств асфальтобетона происходит релаксация части напряжения, что обусловлено диссипацией энергии.

Энергии деформирования и диссипации

На рисунке 19 представлены графики изменения вязкоупругой и упругой энергий, энергии диссипации в асфальтобетонном покрытии при его длительном охлаждении продолжительностью 30 часов.

Упругая и вязкоупругая энергии вычислены по выражениям:

$$W_e(t) = \sigma_e(t) \cdot \varepsilon_T(t); \quad (45)$$

$$W_T(t) = \sigma_t(t) \cdot \varepsilon_T(t). \quad (46)$$

Энергия диссипации найдена как разница между упругой и вязкоупругой энергиями:

$$W_d(t) = W_e(t) - W_T(t). \quad (47)$$

Как видно, все рассматриваемые виды энергии увеличиваются с ростом продолжительности охлаждения покрытия. При этом упругая энергия увеличивается по восходящей нелинейной зависимости. Вязкоупругая энергия также растет по нелинейно-восходящей зависимости, но её величина становится меньше из-за диссипации энергии, обусловленной вязкоупругими свойствами асфальтобетона. Здесь следует отметить, что от начала охлаждения диссипация энергии в асфальтобетонном покрытии увеличивается по нелинейной зависимости и, начиная с 12 часов до конца охлаждения, сохраняет постоянную скорость диссипации.

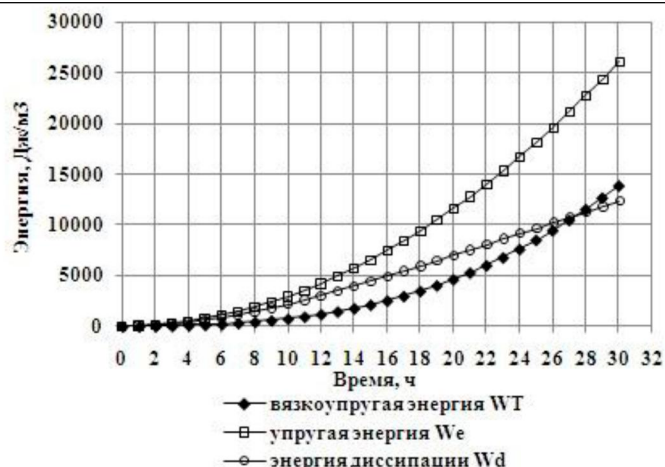


Рисунок 19. Изменение энергий в асфальтобетонном покрытии

Описанная выше картина изменения энергии в покрытии была бы справедлива до конца периода охлаждения, если бы температурное напряжение не достигло предела прочности асфальтобетона [6]. Из рисунка 20 видно, что при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурное напряжение в покрытии достигает предела прочности асфальтобетона, т.е. появляется поперечная температурная трещина в асфальтобетонном покрытии. Прочность асфальтобетона при разных температурах была определена в специальной испытательной системе TRAVIS в соответствии со стандартом Европы EN 12697-46 [29] и опубликована в работах [6, 13]. Будем считать, что температурная деформация появляется мгновенно по ширине и толщине асфальтобетонного покрытия. В момент появления трещины имеет место сжатие свободных поверхностей трещины в стороны середин вновь образованных блоков асфальтобетонного покрытия и с дальнейшим понижением температуры деформация поверхностей трещины увеличивается. На рисунке 21 даны графики изменения перемещений верхнего и среднего узлов на поверхности трещины (на правой грани на рисунке 16) в асфальтобетонном покрытии при его дальнейшем охлаждении. Оказалось, что при охлаждении поверхности покрытия с постоянной скоростью поверхности трещины деформируются также линейно. При этом, как следовало ожидать, кромка трещины (верхняя точка) имеет наибольшую деформацию.

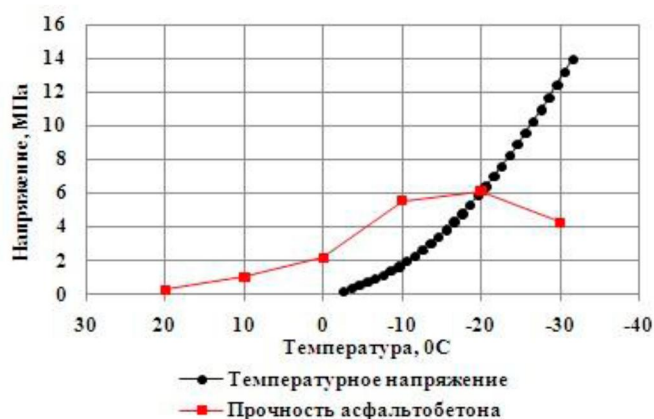


Рисунок 20. К определению момента времени растрескивания асфальтобетонного покрытия

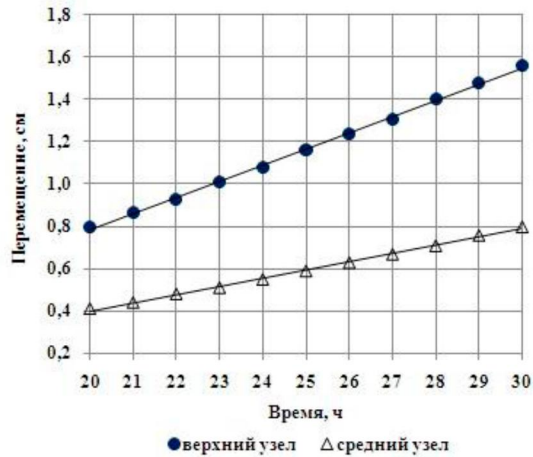


Рисунок 21. Изменение перемещений верхнего и среднего узлов на поверхности трещины при охлаждении асфальтобетонного покрытия

На рисунке 22 даны два графика, верхний из которых показывает изменение энергии вязкоупругой деформации асфальтобетонного покрытия в течение всего периода охлаждения, а нижний – изменение энергии деформирования трещины с момента её появления до конца процесса охлаждения. Подробный анализ напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия после его растрескивания показал, что покрытие после появления трещины диссипирует энергию меньшую и с меньшей скоростью, чем до растрескивания покрытия. К этому также надо добавить диссипацию энергии, реализуемую через деформацию свободной поверхности трещины. Таким образом, после растрескивания покрытие рассеивает суммарную энергию, состоящую из вязкоупругой энергии и энергии деформации трещины. Это положение отражено на рисунке 23, на котором видно, что в момент времени появления трещины имеется скачок в графике диссипации энергии.



Рисунок 22. Изменение энергий вязкоупругой диссипации асфальтобетона (W_d) и деформирования трещины (W_{cr})



Рисунок 23. Изменение энергий вязкоупругой диссипации до и после растрескивания покрытия, энергии деформирования трещины и суммарной энергии диссипации

ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ

В работе [13] дорожное асфальтобетонное покрытие при охлаждении в области отрицательных температур рассмотрено как открытая нелинейная термодинамическая система. Низкотемпературное растрескивание покрытия объясняется положениями синергетики как результат коллективного поведения (самоорганизации) структурных элементов асфальтобетона в критических условиях (при достижении критических температур). Образованные после растрескивания покрытия блоки предложено рассматривать как специфические диссипативные структуры, адаптированные к внешним условиям [30, 31].

Открытые системы могут обмениваться с окружающей средой и телами энергией и веществом и являются структурно сложными. Благодаря сложности открытых систем в них в критических условиях возникают различного рода структуры [32, 33]. В образовании этих структур конструктивную роль играет диссипация энергии. Чтобы подчеркнуть это И. Пригожин ввел термин «диссипативные структуры». Г. Хакен ввел термин «синергетика», чтобы подчеркнуть роль коллективного поведения подструктурных элементов в образовании диссипативных структур [34, 35].

Примеры диссипативных структур

Одним из ярких примеров образования диссипативных структур в открытой термодинамической системе является эффект Бенара [36, 38]. Он возникает при критической разности температур $\Delta T_{кр}$ нижней и верхней поверхностей тонкого слоя вязкой жидкости (например, в силиконовом масле) в подогреваемом снизу плоском сосуде. При достижении $\Delta T_{кр}$ поведение жидкости резко меняется — возникает конвекция и жидкость разбивается на гексагональные ячейки (рисунок 24). Новая структура создается совместным кооперативным движением молекул жидкости. Как видно из рисунка 25, при $\Delta T_{кр}$ происходит резкий излом зависимости скорости переноса тепла dQ/dt от разности температур ΔT и имеет место образование новой структуры. До $\Delta T_{кр}$ отток (экспорт) энтропии в точности компенсируется производством энтропии внутри жидкости, а при достижении $\Delta T_{кр}$ скорость переноса теплоты увеличивается включением конвективного механизма теплообмена.

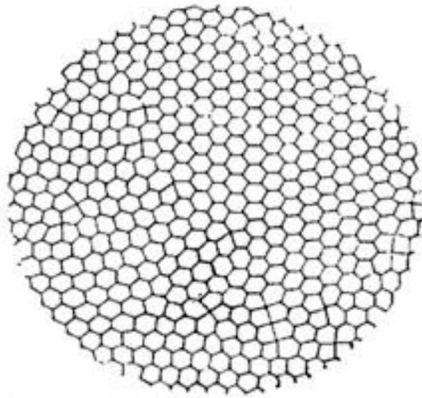


Рисунок 24. Эффект Бенара

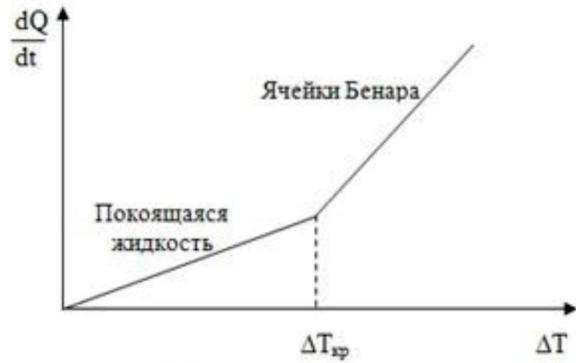


Рисунок 25. Зависимость скорости переноса теплоты от разности температур

Образование диссипативной структуры можно наблюдать и в случае лазера [36]. На рисунке 26 приведена схема рубинового лазера. При ограниченной накачке лазер действует как лампа – отдельные ионы излучаются несогласованно друг с другом. Но при критическом (пороговом) значении энергии разряда ксеноновой лампы (накачки) резко увеличивается мощность лазерного излучения – излучаемые ионы светятся согласованно, кооперативно. Из рисунка 27 видно, что график изменения мощности лучистой энергии подобен графику эффекта Бенара (рисунок 25).

Асфальтобетонное покрытие – диссипативная структура

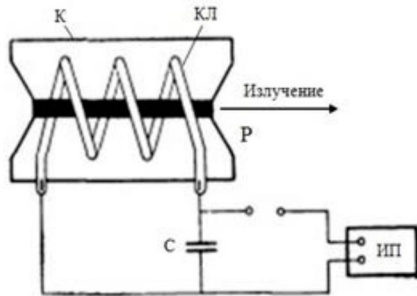


Рисунок 26. Схема рубинового лазера: Р – рубин; К – кожух; КЛ – ксеноновая лампа для накачки; С – конденсатор; ИП – источник постоянного напряжения

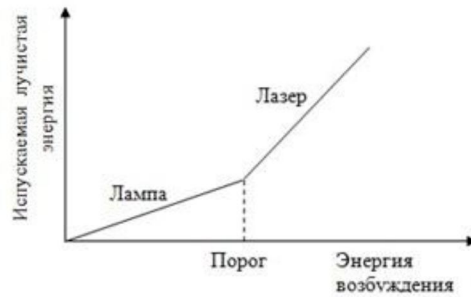


Рисунок 27. Зависимость испускаемой лучистой энергии от энергии возбуждения лазера

Как было показано выше, при продолжительном понижении температуры дорожное асфальтобетонное покрытие из-за способности деформироваться вязкоупруго рассеивает часть накапливаемой энергии, тем самым уменьшает напряжение, чтобы оно не достигло критического значения – предела прочности (рисунок 28). Но при продолжении охлаждения скорость накапливаемой в покрытии энергии становится больше, чем рассеиваемой энергии, что вызывает постепенное увеличение напряжения (рисунок 19). Как только величина напряжения достигает предела прочности асфальтобетона при растяжении (рисунок 20) появляется температурная трещина. В этот момент происходит скачкообразное высвобождение части накопленной в покрытии энергии из-за приобретения деформации свободной поверхности вновь образованной трещины (рисунок 23). При дальнейшем охлаждении асфальтобетонное покрытие рассеивает накапливаемую энергию через два механизма: продолжается рассеивание энергии по

релаксационному механизму и добавляется высвобождение части энергии из-за деформации свободной поверхности трещины. После появления трещины количество рассеиваемой по релаксационному механизму энергии становится меньше, чем до появления трещины.



Рисунок 28. Изменение температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии до и после растрескивания

На рисунке 29 представлен график изменения скорости диссипации энергии в асфальтобетонном покрытии в зависимости от температуры. Как у конвективных ячеек Бенара (рисунок 25) и рубинового лазера (рисунок 27), до растрескивания асфальтобетонное покрытие рассеивает энергию с линейно увеличивающейся скоростью. При достижении критической температуры T_{cr} в покрытии появляется температурная трещина и в этот момент времени происходит скачкообразное высвобождение части накопленной в покрытии энергии. С дальнейшим понижением температуры диссипация энергии происходит по указанному выше двойному механизму и суммарная диссипация энергии реализуется со скоростью, большей чем до растрескивания покрытия.

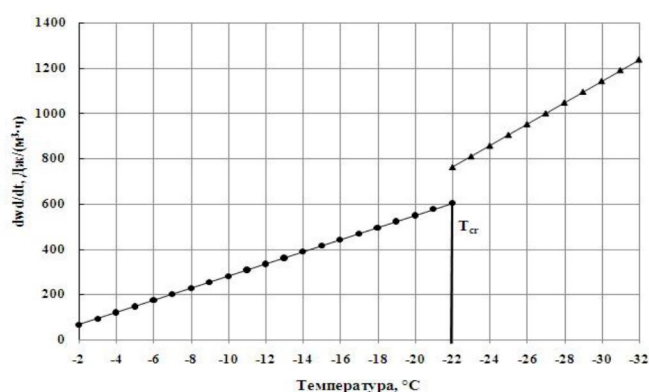


Рисунок 29. Зависимость скорости диссипации энергии в асфальтобетонном покрытии от температуры

Таким образом, становится ясным, что дорожное асфальтобетонное покрытие при охлаждении в области отрицательных температур является специфической диссипативной структурой и при растрескивании возникает дополнительный механизм рассеивания накопленной энергии.

Энтропия открытой системы и критерии эволюции

Пригожиным И. показано, что изменение энтропии ds открытой термодинамической системы можно рассматривать как сумму двух слагаемых [39-41]:

$$ds = d_e s + d_i s, \quad (48)$$

где $d_e s$ – изменение энтропии, связанное с ее притоком или оттоком;
 $d_i s$ – количество энтропии, производимое внутри системы.

Для краткости $d_i s$ называется просто «производство энтропии».

Составляющая $d_e s$ может иметь как положительный, так и отрицательный знак в зависимости от того, система получает или отдает энергию в результате взаимодействия с окружающей средой. Согласно второму закону термодинамики, производство энтропии $d_i s$ положительно или равно нулю:

$$d_i s \geq 0, \quad (49)$$

Равенство нулю производства энтропии, т.е. $d_i s=0$ будет иметь место только при условии равновесия.

В работе [42] был сформулирован «Принцип минимума производства энтропии в процессах самоорганизации», который состоит в следующем. Процесс самоорганизации представляется как фазовый переход (или последовательность фазовых переходов), в результате чего система переходит в более упорядоченное состояние. Принцип утверждает, что производство энтропии в новом – более упорядоченном состоянии, возникшем в результате очередного фазового перехода, меньше производства энтропии старого состояния, которое мысленно продолжено в неустойчивую область [38].

Как видно из рисунка 30, после растрескивания производство энтропии в асфальтобетонном покрытии становится существенно меньше, чем в мысленно продолженном старом состоянии, т.е. принцип минимума энтропии Ю.Л. Климонтовича соблюдается.

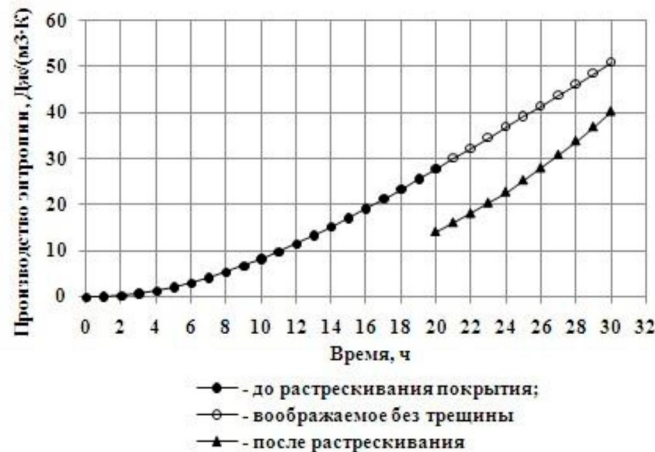


Рисунок 30. Изменение производства энтропии в асфальтобетонном покрытии до и после растрескивания

Отрицательная энтропия

В работе [44] одного из основоположников квантовой механики Э. Шредингера было высказано мнение о том, что живой организм, непрерывно увеличивающий свою энтропию при питании, избегает опасного состояния максимальной энтропии (смерть) путем извлечения из окружающей среды отрицательной энтропии. Питание отрицательной энтропией означает выделение большей энтропии, чем поступающая в организм, т.е. оно означает поддержание стационарного состояния организма посредством оттока энтропии [41]. Идеи Э. Шредингера сыграли большую роль в биологии.

При охлаждении дорожного покрытия возникает градиент температуры по его толщине, из-за наличия чего имеет место отток тепла, следовательно энтропии из покрытия в окружающий воздух. Другими словами, при охлаждении окружающая среда (воздух) отнимает энтропию у дорожного покрытия, т.е. оно получает отрицательную энтропию. По мере накопления отрицательной энтропии в покрытии увеличивается температурное напряжение. Чтобы уменьшить количество накапливаемой отрицательной энтропии, асфальтобетонное покрытие производит энтропию $d_i s$ (рассеивает энергию) по релаксационному механизму. По причине того, что производство энтропии $d_i s$ не может полностью компенсировать накапливаемое в покрытии по

мере продолжения охлаждения количество отрицательной энтропии $-d_e s$, разница $|-d_e s| - d_i s$ постепенно растет и при $T = T_{cr}$ появляется температурная трещина.

Таким образом, мы видим, что если в жизни живых организмов отрицательная энтропия играет положительную роль, то она при охлаждении дорожного асфальтобетонного покрытия в области отрицательных температур может привести к разрушению.

В работе [40] П. Гленсдорфом и И. Пригожиным предложен критерий эволюции для процессов самоорганизации в открытых сильно неравновесных термодинамических системах, который является обобщением принципа минимального производства энтропии на нелинейные процессы. Ввиду большой общности он называется универсальным критерием эволюции Гленсдорфа-Пригожина [43].

Критерий Гленсдорфа-Пригожина записывается в следующей форме:

$$\frac{d_x P}{dt} \leq 0, \quad (50)$$

где P – производство энтропии;

$\frac{d_x P}{dt}$ – скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил:

$$\frac{d_x P}{dt} = \int_V \sum_{i=1}^n I_i \frac{dx_i}{dt} dV, \quad (51)$$

где I_i , x_i – термодинамические потоки и силы соответственно;

V – объем системы (тела).

Применительно к рассматриваемой нами задаче имеем, что

$$\frac{d_x P}{dt} = I \frac{dx}{dt} = \frac{\sigma_T}{T} \frac{d\varepsilon_T(t)}{dt}. \quad (52)$$

$$\varepsilon_T(t) = |\alpha \cdot (T_0 - Kt)|. \quad (53)$$

$$\frac{d\varepsilon_T(t)}{dt} = \alpha K, \quad (54)$$

где K – скорость охлаждения, °С/ч.

Таким образом, с учетом (53) и (54) имеем:

$$\frac{d_x P}{dt} = \frac{\sigma_T \alpha K}{T}. \quad (55)$$

Согласно критерию Гленсдорфа-Пригожина, в любой неравновесной системе с фиксированными граничными условиями процессы идут так, что скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается.

Как видно из рисунка 31, скорость производства энтропии после появления трещины в асфальтобетонном покрытии заметно уменьшается.

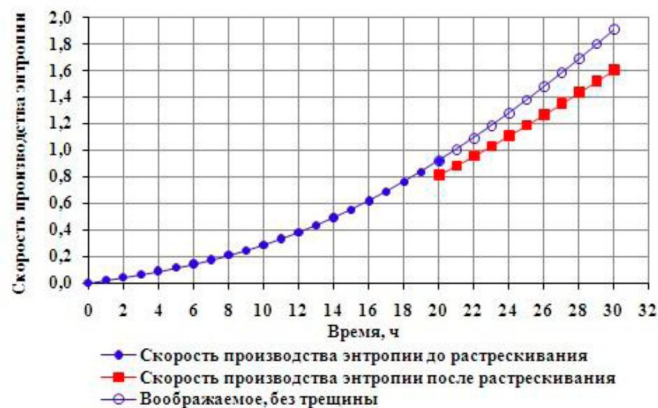


Рисунок 31. Изменение скорости производства энтропии до и после растрескивания асфальтобетонного покрытия

Таким образом, при низкотемпературном растрескивании дорожного асфальтобетонного покрытия удовлетворяется универсальный критерий Гленсдорфа-Пригожина для процессов самоорганизации в открытых сильно неравновесных термодинамических системах.

Заключение

1. Показано, что при длительных охлаждениях воздуха в зимний период понижения температуры удовлетворительно описываются линейной функцией от времени.

2. Разработан упрощенный метод определения напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия при длительном охлаждении, учитывающий термовязкоупругие свойства асфальтобетона и реализуемый методом конечных элементов.

3. При решении задачи о напряженно-деформированном состоянии покрытия использованы изопараметрические конечные элементы второго порядка, начальные и граничные условия заданы по данным определения температуры в точках конструкции дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги «Астана-Бурабай» с помощью разработанных специально датчиков.

4. Вычислены значения нереализованной деформации, напряжений, упругой, вязкоупругой энергий, энергии диссипации в покрытии в разные моменты времени от начала охлаждения.

5. Определен момент времени, когда появляется температурная трещина. Для этого использованы значения прочности асфальтобетона, определенные экспериментально в термокамере по схеме прямого растяжения.

6. Вычислены значения перемещений точек свободной поверхности температурной трещины при дальнейшем охлаждении покрытия. Построены графики энергий вязкоупругой диссипации и деформирования трещины, а также суммарной энергии диссипации.

7. В сравнении с коактивными ячейками Бенара и рубиновым лазером, показано повышение скорости суммарной (релаксационной и механической) диссипации энергии в покрытии после образования температурной трещины, и тем самым доказывается, что дорожное асфальтобетонное покрытие – диссипативная структура.

8. Высказано мнение об отрицательном эффекте отрицательной энтропии при охлаждении дорожного асфальтобетонного покрытия в области низких температур.

9. Показано соблюдение принципа минимума производства энтропии в процессах самоорганизации Ю.Л. Климонтовича и универсального критерия эволюции открытых термодинамических систем П. Гленсдорфа-И. Пригожина в явлении низкотемпературного растрескивания дорожного асфальтобетонного покрытия при длительном охлаждении в области отрицательных температур.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Телтаев Б.Б. Закономерности увеличения количества трещин на асфальтобетонном покрытии автомобильной дороги // Доклады НАН РК. № 5. 2015. С. 35-57.

[2] Highway construction costs. How does Illinois compare? Illinois economic policy institute. 2014.

[3] Hesp S.A.M., Soleimane A., Subramani S., Phillips T., Smith D., Marks P., Tam K.K. Asphalt pavement cracking analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario. International Journal of Pavement Engineering. 2008. P. 1-9.

[4] www.spb.pulsan.ru/products/remont_treghchin_vasfaltobetonnom_pokrytii_13908883

[5] www.multitender.ru/tender/detail/2215672

[2] Teltayev B. Evaluation of low temperature cracking indicators of hot mix asphalt pavement. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 7. No 5. 2014. – P. 343-351.

[7] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement. Geomechanics and Engineering. Vol. 8. No. 2. 2015. P. 133-152.

[8] Телтаев Б.Б., Айтбаев К.А. Нестационарное температурное поле в автомобильной дороге // Доклады НАН РК. № 3. 2015. – С. 55-66.

[9] Yoder, E.J., Witczak, M.W. Principles of pavement design. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 1975, 736 p.

[10] Дорожный асфальтобетон /Под ред. Л.Б. Гезенцева. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.

[11] Papagiannakis A., Masad E. Pavement design and materials. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2008.

[12] Золотарев В.А. Избранные труды. Том 3. Дорожные асфальтобетоны. – Санкт-Петербург: Издательский дом «Славутич», 2015. – 184 с.

[13] Телтаев Б.Б. Закономерности самоорганизации низкотемпературного растрескивания дорожного

асфальтобетонного покрытия // Доклады НАН РК. № 4. 2015. – С. 40-65.

[14]. ARA, Inc, ERES Concultans Division. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final report. NCHRP Project 1-37 A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2004.

[15] Christensen D.W., Bonaquist R.F. Improved Hirsch model for estimating the modulus of hot mix asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 84. 2015.

[16] Радковский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. – Алматы: «Білім» баспасы, 2013. – 152 с.

[17] Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Иностранная литература, 1963. – 536 с.

[18] Телтаев Б.Б. Деформации и напряжения в нежестких конструкциях дорожных одежд // Под ред. акад. Ш.М. Айталиева. – Алматы: КазАТК, 1999. – 217 с.

[19] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 544 с.

[20] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

[21] Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. – Алма-Ата: «Наука» КазССР, 1975. – 239 с.

[22] Инновационный патент РК. № 30157. Датчик температуры и влажности. Телтаев Б.Б., Андриади Ф.К. 18.06.2015.

[23] Инновационный патент РК. № 30272. Способ определения температуры и влажности дорожной конструкции и ее грунтового основания. Телтаев Б.Б., Андриади Ф.К. 20.07.2015.

[24] Телтаев Б.Б. Закономерности водно-теплого режима автомобильной дороги «Астана-Бурабай» // Вестник КаздорНИИ. № 3-4, 2011. – С. 36-54.

[25] Телтаев Б.Б. Водно-тепловой режим автомобильной дороги «Астана-Бурабай» // Дорожная техника. 2013. – С. 26-34.

[26] Teltayev B. B. Road soil basement temperature and moisture variations. Proceedings of the 5th International geotechnical symposium "Geotechnical engineering for disaster preventions and redaction, enviromentally sustainable development". Incheon, Korea. 2013, P. 493-500.

[27] Телтаев Б.Б., Байбатыров А.И., Такебаев А.К., Тлевлесов М.К. Закономерности водно-теплого режима автомобильных дорог «Астана-Бурабай» и «Усть-Каменогорск-Зырянск» / Сборник научных трудов Юбилейной международной научно-практической конференции «Автомобильные дороги и транспортная техника: проблемы и перспективы развития», посвященной 100-летию со дня рождения Л.Б. Гончарова. – Алматы, КАЗАДИ, 2014. – С. 116-121.

[28] Teltayev B. B., Baibatayrov A.I., Suppes E.A. Characteristics of highway subgrade frost penetration in regions of Kazakhstan. Proceedings of the 15th Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Fukuoka, Japan. 2015. P. 1-5.

[29]. EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. – 2004.

[30]. Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука, 1985.

[31]. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из Хаоса. Новый диалог с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.

[32]. Климонтович Ю.Л. Критерий относительной степени упорядоченности открытых систем // Успехи физических наук. 1996. Том 166. № 11. – С. 1231-1243.

[33]. Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. – М.: «Янус-К», 2002. – 284 с.

[34]. Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.

[35]. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 405 с.

[36]. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с.

[37]. Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем // Соросовский образовательный журнал. № 8. 1996. – С. 109-116.

[38]. Осипов А.И. Термодинамика вчера, сегодня, завтра. Часть 2. Неравновесная термодинамика // Соросовский образовательный журнал. № 5. 1999. – С. 91-97.

[39]. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: ИЛ, 1960. – 128 с.

[40]. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 281.

[41]. Пригожин И. Время, структура и флуктуации (Нобелевская лекция по химии 1977 года) // Успехи физических наук. 1980. Том 131. № 2. – С. 185-207.

[42]. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. – М.: Наука, 1990.

[43]. Базаров И.П. Термодинамика. – С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010. – 384 с.

[44]. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики? – М.: РИМИС, 2009. – 176 с.

REFERENCES

[1] Teltayev B. Regularities of increasing of temperature cracks number in asphalt pavement of highway// Reports of the national Academy of sciences of the republic of Kazakhstan. No 5. 2015. - P. 35-57. (in Russ.).

[2] Highway construction costs. How does Illinois compare? Illinois economic policy institute. 2014. (in Eng.).

[3] Hesp S.A.M., Soleimane A., Subramani S., Phillips T., Smith D., Marks P., Tam K.K. Asphalt pavement cracking analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario. International Journal of Pavement Engineering.

2008. P. 1-9. (in Eng.).

- [4] www.spb.pulsan.ru/products/remont_tregchlin_vasfaltobetonnom_pokrytii_13908883 (in Russ.).
- [5] www.multitender.ru/tender/detail/2215672 (in Russ.).
- [6] Teltayev B. Evaluation of low temperature cracking indicators of hot mix asphalt pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Vol. 7. No 5. 2014. – P. 343-351. (in Eng.).
- [7] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 8. No. 2. 2015. P. 133-152. (in Eng.).
- [8] Teltayev B., Aitbayev K. Transient temperature field in road //Reports of the national Academy of sciences of the republic of Kazakhstan. No. 3 2015. – P. C. 55-66. (in Russ.).
- [9] Yoder, E.J., Witzcak, M.W. Principles of pavement design. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 1975, 736 p. (in Eng.).
- [10] Road asphalt concretes. Edited by. L. B. Gezentsvey. – M.:Transport, 1985. – 350 p. (in Russ.).
- [11] Papagiannakis A., Masad E. Pavement design and materials. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2008. (in Eng.).
- [12] Zolotarev V. A. Selected works. Volume 3. Road asphalt concretes. – St. Petersburg: Publishing house "Slavutich", 2015. – 184 p. (in Russ.).
- [13] Teltayev B. Self-organization laws of road asphalt pavement low temperature cracking // Reports of the national Academy of sciences of the republic of Kazakhstan. No. 4. 2015. – P. 40-65. (in Russ.).
- [14]. ARA, Inc, ERES Concultans Division. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final report. NCHRP Project 1-37 A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2004. (in Eng.).
- [15] Christensen D.W., Bonaquist R.F. Impoved Hirsch model for estimating the modulus of hot mix asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Vol. 84. 2015. (in Eng.).
- [16] Radovskiy B., Teltayev B. Visco-elastic properties of asphalts based on penetration and softening point. Almaty, Publisher «Bilim», 2013. 152 p. (in Russ.).
- [17] Ferry J. Viscoelastic properties of polymers. M.: Foreign literature, 1963. – 536 p. (in Russ.).
- [18] Teltayev B. B. Deformations and stresses in flexible pavement structures. Ed. by S. M. Aitaliyev. – Almaty: KazATC, 1999. – 217 p. (in Russ.).
- [19] Zienkevich O. Finite element method in engineering. – M.: Mir, 1975. – 544 p. (in Russ.).
- [20] Segerlind L. Application of the finite element method. – M.: Mir, 1979. – 392 p. (in Russ.).
- [21] Erzhanov Zh. S., Karimbaev T.D. Finite element method in problems of rock mechanics. – Alma-Ata: "Nauka" KazSSR, 1975. – 239 p. (in Russ.).
- [22] Innovative patent of RK. No. 30157. The sensor of temperature and moisture. Teltayev B. B., F. K. Andriadi. 18.06.2015. (in Russ.).
- [23] Innovative patent of RK. No. 30272. The method of determining the temperature and moisture of the road structure and the subgrade. Teltayev B. B., F. K. Andriadi. 20.07.2015. (in Russ.).
- [24] Teltayev B. B. Regularities of water-thermal regime of the "Astana-Burabai" highway //Bulletin of the Kazakhstan Highway Research Institute. 2011. No. 3-4. - P. 36-54. (in Russ.).
- [25] Teltayev B. B. Water-thermal regime of the road "Astana-Burabai" //Road engineering. 2013. – P. 26-34. (in Russ.).
- [26] Teltayev B. B. Road soil basement temperature and moisture variations. Proceedings of the 5th International geotechnical symposium "Geotechnical engineering for disaster preventions and redaction, enviromentally sustainable development". Incheon, Korea. 2013, P. 493-500. (in Eng.).
- [27] Teltayev B. B., Baibaturov A. I., Tekebaev A. K., Tleulesov M. K. Regularities of water-heat regime of roads "Astana-Burabai" and "Ust-Kamenogorsk-Zyryanovsk". Proceedings of the Jubilee international scientific-practical conference "Highways and transport equipment: problems and development prospects", dedicated to the 100th anniversary since the birth of the L. B. Goncharov. – Almaty, Kazadi, 2014. – P. 116-121. (in Russ.).
- [28] Teltayev B. B., Baibaturov A.I., Suppes E.A. Characteristics of highway subgrade frost penetration in regions of Kazakhstan. Proceedings of the 15th Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Fukuoka, Japan. 2015. P. 1-5. (in Eng.).
- [29]. EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tention tests. – 2004. (in Eng.).
- [30]. Prigogine I. From being to becoming. Moscow, Science, 1985. (in Russ.).
- [31]. Prigogine I. , Stengers I. Order out of chaos: Man’s new dialogue with nature. Moscow, Progress, 1986. – 432 p. (in Russ.).
- [32]. Klimontovich Yu. L. The Criterion of the relative degree of order of open systems //Successes of physical sciences. 1996. Volume 166. No. 11. – C. 1231-1243. (in Russ.).
- [33]. Klimontovich Y. L. Introduction to the physics of open systems. – M.: "Yanus-K", 2002. – 284 p. (in Russ.).
- [34]. Haken H. Synergetics: the hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices. – M.: Mir, 1985. (in Russ.).
- [35]. Haken H. Synergetics. – M.: Mir, 1980. – 405 p. (in Russ.).
- [36]. Wolkenstein M.V. Entropy and information. – M.: Nauka, 1986. – 192 p. (in Russ.).
- [37]. Klimontovich Yu.L. Introduction to physics of open systems //Soros education journal. No 8. 1996. – P. 109-116. (in Russ.).
- [38]. Osipov A.I. Thermodynamics yesterday, today and tomorrow. Part 2. Nonequilibrium thermodynamics //Soros education journal. No 5. 1999. – P. 91-97. (in Russ.).
- [39]. Prigogine I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. – M.: IL, 1960. – 128 p. (in Russ.).

- [40]. Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations . – М.: Mir, 1973. – 281 p. (in Russ.).
- [41]. Prigogine I. Time, structure and fluctuations (Nobel lecture in chemistry of 1977 year) //Successes of physical sciences. 1980. Volume 131. No. 2. – P. 185-207. (in Russ.).
- [42]. Klimontovich Yu. L. Turbulent motion and structure of chaos. – М.: Nauka, 1990. (in Russ.).
- [43]. Bazarov I.P. Thermodynamics. Saint-Petersburg, Publisher “Lan”, 2010. – 384 p. (in Russ.).
- [44]. Schrodinger E. What is life? The physical aspect of the living cell. – М.: РИМИС, 2009. –176 p. (in Russ.).

АСФАЛЬТБЕТОН ЖОЛ ЖАМЫЛҒЫСЫ – ДИССИПАТИВТІК ҚҰРЫЛЫМ

Б.Б.Телтаев

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты
Алматы, Қазақстан
bagdatbt@yahoo.com

Тірек сөздер: Асфальтбетон жол жамылғысы, суу, температуралық жарық, деформация, кернеу, энтропия, шектік элементтер әдісі, температура датчигі, ашық термодинамикалық жүйелер эволюциясының критеріі.

Аннотация: Бұл жұмыс ең алдымен асфальтбетон жол жамылғысының төменгі температуралық жарылу құбылысын қайтпайтын үдерістер термодинамикасы мен синергетика қағидалары негізінде түсіндіруге арналған. Өз бетінше ұымдасудың белгілі құбылыстары – Бенардың конвективтік ұшалары және рубин лазермен салыстыра отырып, асфальтбетон жол жамылғысында температураның теріс температуралар бөлігінде ұзақ төмендеу үдерісінде жарық пайда болғаннан кейін толық (релаксациялық және механикалық) энергияның жылдамдығының өсуі көрсетілді және осы арқылы асфальтбетон жол жамылғысының диссипативтік құрылым екені дәлелденді. Э. Шредингердің теріс энтропия туралы ойларын есепке ала отырып, асфальтбетон жамылғысының сууындағы теріс энтропияның кері әсері туралы пікір айтылды. Ю. Л. Климонтовичтің өз бетінше ұымдасу үдерістеріндегі энтропия өндірісінің минимумы принципінің және П. Гленсдорф пен И. Пригожиннің ашық термодинамикалық жүйелер эволюциясының әмбебап критеріінің орындалатындығы көрсетілген.

Жамылғының ұзақ (30 сағат) суудағы кернеу-деформациялық күйі екінші реттегі изопараметрлік элементтерді пайдаланумен шектік элементтер әдісі арқылы анықталды. Бұл үшін асфальтбетонның термотұтқырсерпімділік қасиеттерін есепке алатын ықпалдатылған әдіс жасалды. Есептің бастапқы және шекаралық шарттары “Астана-Бурабай” автомобиль жолының жол төсемесі құрылымы мен жер төсемесінің нүктелеріндегі температураны арнайы жасалған датчиктер көмегімен тәжірибелік анықтау деректері негізінде қойылды.

Сведения об авторе:

Телтаев Багдат Бурханбайұлы – доктор технических наук, профессор, президент АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт».

Адрес: Республика Казахстан, 050061,
г. Алматы, ул. Нурпеисова, 2а, АО «КаздорНИИ»
e-mail: bagdatbt@yahoo.com

Поступила 12.03.2016 г.