

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 5, Number 419 (2016), 161 – 178

B. B. Teltayev

Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: bagdatbt@yahoo.com

**FRESH APPROACH TO LOW TEMPERATURE CRACKING
IN ASPHALT CONCRETE PAVEMENT**

Abstract. The paper 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 straines 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 simpliflicated 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.

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

УДК 625.7/8:691.16

Б. Б. Телтаев

Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Алматы, Казахстан

**НОВЫЙ ВЗГЛЯД
НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ
В АСФАЛЬТОБЕТОННОМ ПОКРЫТИИ**

Аннотация. Статья 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. Показано соблюдение принципа минимума производства энтропии в процессе самоорганизации Ю. Л. Климонтовича и универсального критерия эволюции открытых термодинамических систем П. Глендсдорфа – И. Пригожина.

Напряженно-деформированное состояние покрытия при длительном (30 часов) охлаждении определено методом конечных элементов. 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.

Ключевые слова: дорожное асфальтобетонное покрытие, температурная трещина, деформация, напряжение, энергия, энтропия.

Введение. Низкотемпературное растрескивание (рисунок 1) является одним из основных видов разрушения асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог в регионах с холодным климатом. Появление низкотемпературной трещины:

– во-первых, нарушает сплошность покрытия, из-за чего существенно уменьшается его распределяющая нагрузку от автомобилей способность на нижележащие слои конструкции дорожной одежды и грунт земляного полотна;

– во-вторых, является местом прохода влаги в конструкцию дорожной одежды и грунтовое земляное полотно, что уменьшает прочность и долговечность дорожной конструкции.



Рисунок 1 – Низкотемпературное растрескивание асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги

Figure 1 – Low-temperature cracking of asphalt concrete pavement of the road

Чтобы устранить отрицательное влияние низкотемпературных трещин, на практике дорожного дела обычно используется способ их заделки, включающий расщитие и заполнение полости трещины вязким битумом или специальной мастикой [1]. Заделка трещин представляет собой трудоемкий и маломеханизированный вид работы, требующий значительные затраты материала и времени.

Как показывает многолетняя практика эксплуатация автомобильных дорог, срок службы герметической заделки трещин является низким. Обычно после очередного зимнего периода большая часть заделанных трещин полностью или частично разгерметизируется и требуется ежегодная их перезаделка.

Заделка хорошего качества герметизирует полость трещины и предотвратит поступление влаги сверху дорожного покрытия вниз. Но она не восстанавливает сплошность (механическую целостность) дорожного покрытия. Дорожная конструкция с температурными трещинами (особенно при меньших расстояниях между ними) обладают меньшей прочностью и, следовательно, меньшей долговечностью.

Сказанное выше давно привлекало внимание ученых и специалистов-дорожников и низкотемпературное трещинообразование стало предметом их многолетних исследований. Так, начиная еще

с 50–60-х годов прошлого века, продолжают как теоретические, так и экспериментальные работы, направленные на изучение проблемы низкотемпературного растрескивания асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги [2–5].

Но само физическое явление, при появлении которого имеет место растрескивание дорожного асфальтобетонного покрытия до сих пор научно необъяснено. Чисто механические взгляды на процесс возникновения низкотемпературных трещин не дали убедительного ответа многим практически важным вопросам.

1. НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ.

Дорожное асфальтобетонное покрытие при понижении температуры (охлаждении воздуха) в области отрицательных температур является открытой термодинамической системой. В науке известно много примеров того, что в критических условиях в открытых термодинамических системах возникают диссипативные структуры (конвективные ячейки Бенара, эффект локализации тепла, реакция Белоусова–Жаботинского, лазер, солитоны, структуры в турбулентности и др.) как формы адаптации системы к внешним условиям [6]. Возникновение диссипативных структур объясняется явлением самоорганизации, в основе которой лежит явление коллективного поведения структурных элементов системы.

При понижении температуры (охлаждении) воздуха уменьшается подвижность структурных элементов битума в асфальтобетоне, что снижает способность релаксировать накапливаемое во времени напряжение в покрытии.

В покрытии при охлаждении воздуха возникает нереализованная температурная деформация ε_T , из-за которой появляется напряжение σ_T . Реализации температурной деформации препятствуют смежные участки покрытия. При продолжающемся охлаждении величина температурного напряжения непрерывно растет. Температура все время снижается, т.е. релаксирующая способность асфальтобетона все больше уменьшается. Из-за коллективного поведения весь объем асфальтобетона в покрытии совместно сопротивляется к внешнему воздействию. Иначе говоря, все структурные элементы асфальтобетона покрытия (атомы, молекулы, макромолекулы, надмолекулярные образования) сопротивляются предстоящему возможному разрушению (потере сплошности, целостности) коллективно (совместно).

При критическом значении управляющего параметра, которым является температура воздуха (температуры поверхности покрытия и воздуха в зимний период практически равны), асфальтобетонное покрытие как термодинамическая система достигает порога устойчивости, который характеризуется следующим условием:

$$\sigma_T = [\sigma_P], \quad (1)$$

где σ_T – температурное напряжение; $[\sigma_P]$ – предел прочности асфальтобетона при растяжении.

Вблизи критической температуры T_{cr} система находится очень далеко от положения равновесия и дальнейшее малое увеличение температуры приведет систему к разрушению. Если покрытие однородно, то вероятность разрушения в любой точке блока одинакова. Но система сама (его структурные элементы коллективно) принимает решение допустить растрескивание в одном (только в одном!) сечении. Это самый минимальный ущерб целостности системы – разделение одного целого на самое возможное минимальное количество частей, т.е. на две части.

Таким образом, критическая температура является точкой бифуркации, при достижении которой система разделяется на две части, т.е. начальный блок дорожного покрытия разделяется на два самостоятельных блока. В точке бифуркации у системы появляется выбор: в каком сечении растрескиваться? И структурные элементы системы коллективно «выбирают» «выгодное» для системы сечение.

Бифуркационная диаграмма растрескивания начального блока показана на рисунке 2.

Вблизи критической температуры система принимает решение высвободить некоторое количество накопленной внутренней энергии. Нижняя поверхность асфальтобетонного покрытия жестко связана с поверхностью слоя основания дорожной конструкции. Поэтому при растрески-

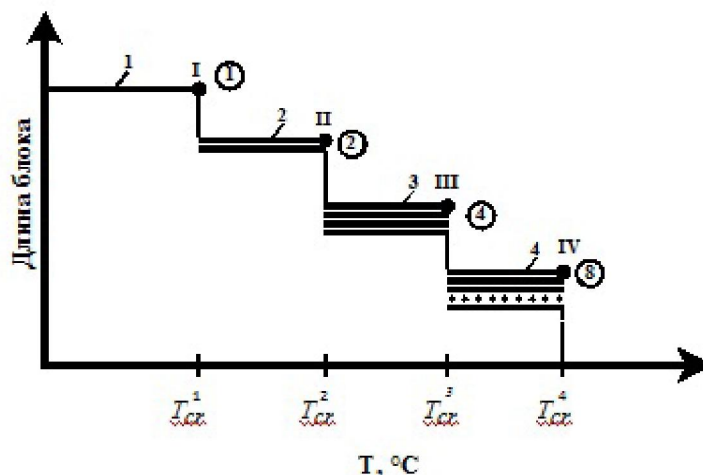


Рисунок 2 – Бифуркационная диаграмма: T – температура покрытия – параметр бифуркации (управляющий параметр);

$T_{cr}^1, T_{cr}^2, T_{cr}^3$ и T_{cr}^4 – критические значения параметра бифуркации; i – число блоков покрытия,

1, 2, 3 и 4 – термодинамические ветви; I, II, III и IV – точки бифуркации

Figure 2 – Bifurcation diagram: T – surface temperature – bifurcation parameter (control parameter);

$T_{cr}^1, T_{cr}^2, T_{cr}^3$ and T_{cr}^4 – critical values of the bifurcation parameter; i – number of covering units;

1, 2, 3 и 4 – thermodynamic branches; I, II, III and IV – bifurcation point

вании наибольшее сокращение имеют верхние слои асфальтобетонного покрытия, т.е. происходит высвобождение некоторого количества энергии. Другими словами, при растрескивании дорожного покрытия происходит диссипация энергии. Поэтому образованные после растрескивания блоки дорожного покрытия можно назвать специфическими диссипативными структурами, возникшими как формы адаптации системы к внешним условиям.

При первичном растрескивании начальный блок асфальтобетонного покрытия разделяется на два самостоятельных блока. При дальнейшем продолжении того же охлаждения или в других случаях охлаждения каждый из блоков, образованных после растрескивания начального блока, необходимо рассматривать как самостоятельную термодинамическую систему с начальным напряжением σ_{TO} . При охлаждении до следующей критической температуры снова происходит растрескивание блоков и т.д. (рисунок 2). **Можно предположить, что число температурных трещин на дорожном асфальтобетонном покрытии увеличивается пропорционально количеству последовательных критических температур.**

2. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМ ПОКРЫТИИ.

Далее на примере длительного охлаждения асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги «Астана-Бурабай» (км 76+30) показаны особенности изменения температуры, деформации и напряжения в дорожном покрытии до и после появления в нем низкотемпературной трещины.

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+30) автомобильной дороги «Астана-Бурабай» приведены в таблице.

В расчетах принято, что охлаждение воздуха начинается с температуры $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ в течение 30 часов до температуры $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Принято, что в течение всего рассматриваемого времени температура поверхности асфальтобетонного покрытия равна температуре воздуха.

Характеристики материалов слоев дорожной одежды и грунта
Descriptions of materials of layers of travelling clothing and soil

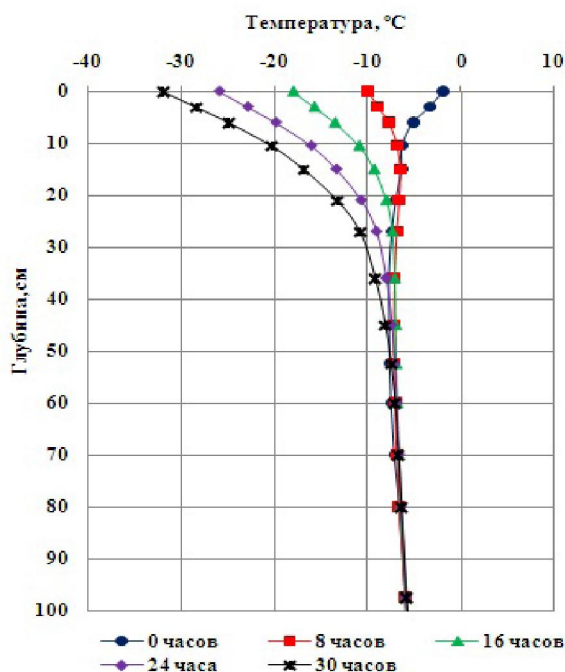
Материал, грунт	Толщина, см	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м ² ·°C)	Теплоемкость, Вт·с/(кг·°C)
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	6	2400	1,40	1650
Крупнозернистый пористый асфальтобетон	9	2300	1,25	1650
Черный щебень	12	2100	1,10	1400
Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом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

На рисунках 3 и 4 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 3). Понижение температуры на 30 °C 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 4). Из рисунка 5 видно, что разница температур на верхней и нижней поверхностях асфальтобетонных слоев изменяется монотонно и нелинейно. В начале охлаждения разница температур была равна 4,5 °C, а в конце охлаждения она составила 15,1 °C.

Деформации и напряжения в асфальтобетонном покрытии рассчитываются методом конечных элементов, используя вновь разработанный метод эффективного релаксационного модуля [9]. 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 6). 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 3 –
Изменение температуры
по глубине дорожной конструкции
в разные моменты времени охлаждения

Figure 3 – Change of temperature
in depth of the road structure
at different points in the cooling time



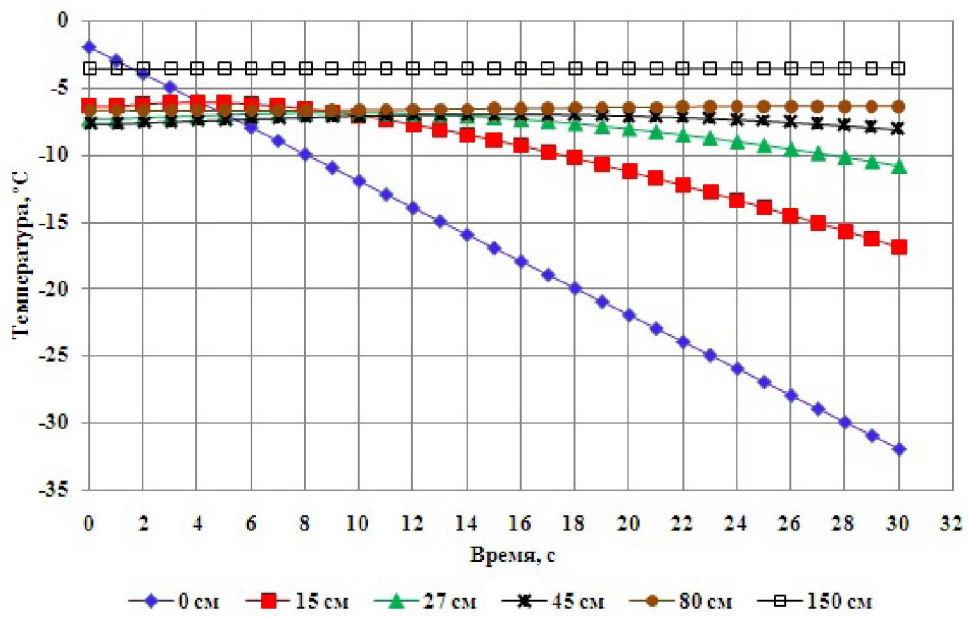


Рисунок 4 –Изменение температуры в точках дорожной конструкции

Figure 4 – Changing the temperature in the road construction points

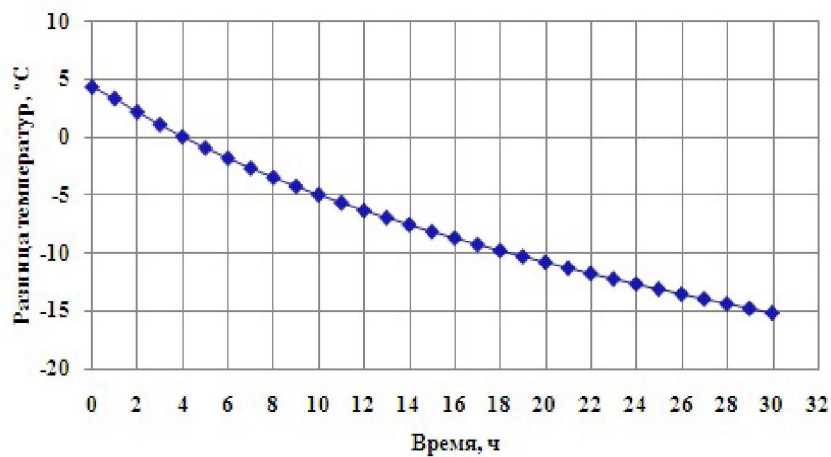


Рисунок 5 – Изменение разницы температур в асфальтобетонных слоях в процессе охлаждения

Figure 5 – Changing the temperature difference in the asphalt concrete layers during cooling

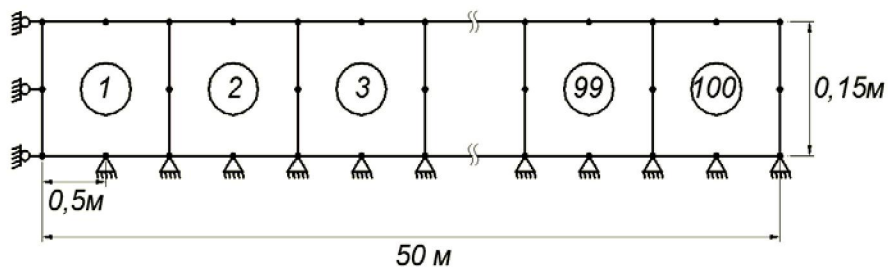


Рисунок 6 – Конечно-элементная дискретизация асфальтобетонного покрытия

Figure 6 – The finite element discretization of asphalt concrete pavement

В расчете принят часто используемый в Казахстане мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б марки I, приготовленный с применением битума (4,8 %) марки БНД-100/130, удовлетворяющий требованиям стандарта Казахстана СТ РК 1373-2013 [10]. Битум был произведен Павлодарским нефтехимическим заводом из сырой нефти Западной Сибири (Россия) способом прямого окисления.

Горячий плотный асфальтобетон по стандарту Казахстана СТ РК 1225-2013 [11] был приготовлен с использованием щебня фракций 5-10 мм (20 %), 10-15 мм (13 %), 15-20 мм (10 %) из Ново-Алексеевского карьера (Алматинская область), отсева дробления фракции 0-5 мм (50 %) из завода «Асфальтобетон-1» (г. Алматы) и активированного минерального порошка (7 %) из Кордайского карьера (Жамбылская область).

Прочность асфальтобетона при одноосном растяжении определяли путем испытания образцов в форме балки с размерами 40x40x160 мм в специальной испытательной системе TRAVIS, изготовленной компанией InfraTest (Германия). Испытания были выполнены в соответствии с требованиями стандарта EN 12697-46 [12] при температурах 20, 10, 0, -10, -20 и -30 °С. Образцы для испытания были изготовлены путем разрезания асфальтобетонных плит, приготовленных секторным уплотнителем по стандарту EN 12697-33 [13]. Во время испытания образец асфальтобетона деформировался с постоянной скоростью 1 мм/мин. Испытательная система фиксирует напряжение (прочность) и деформацию в момент разрушения образца. Зависимость прочности асфальтобетона при растяжении, определенная изложенным выше экспериментальным путем, представлена на рисунке 7. Зависимость имеет сложный характер.

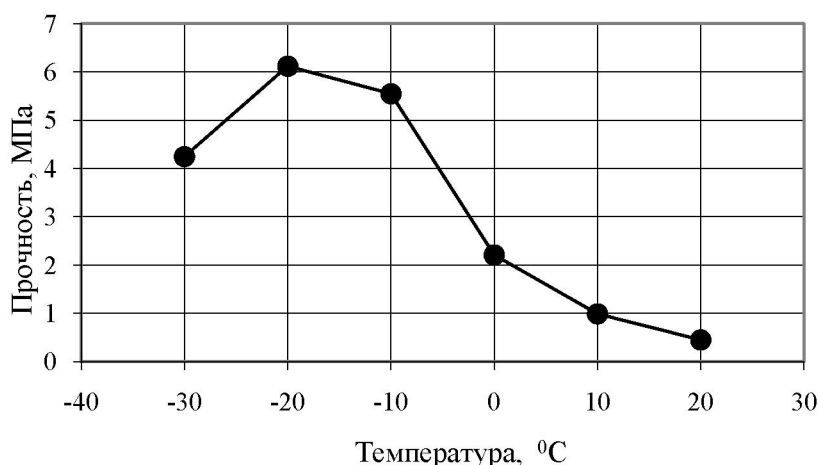


Рисунок 7 – Зависимость прочности асфальтобетона при растяжении от температуры

Figure 7 – Dependence of strength of asphalt concrete at tensile from the temperature

График изменения нереализованной температурной деформации на поверхности покрытия во времени показан на рисунке 8. В расчетах принято $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-5}$. А на рисунке 9 представлены графики изменения упругого и температурного напряжений в покрытии. При этом упругое напряжение вычислено по формуле:

$$\sigma_e(t) = E_0 \cdot \varepsilon_T(t), \quad (2)$$

где E_0 – мгновенный модуль упругости асфальтобетона, равный 26 650 МПа [51].

Из рисунков 8 и 9 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.

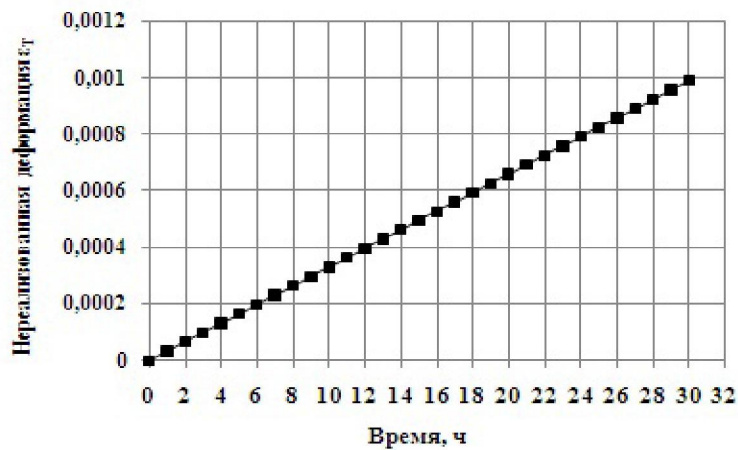


Рисунок 8 – Изменение нереализованной температурной деформации в асфальтобетонном покрытии

Figure 8 – Change in unrealized thermal deformation in asphalt concrete pavement

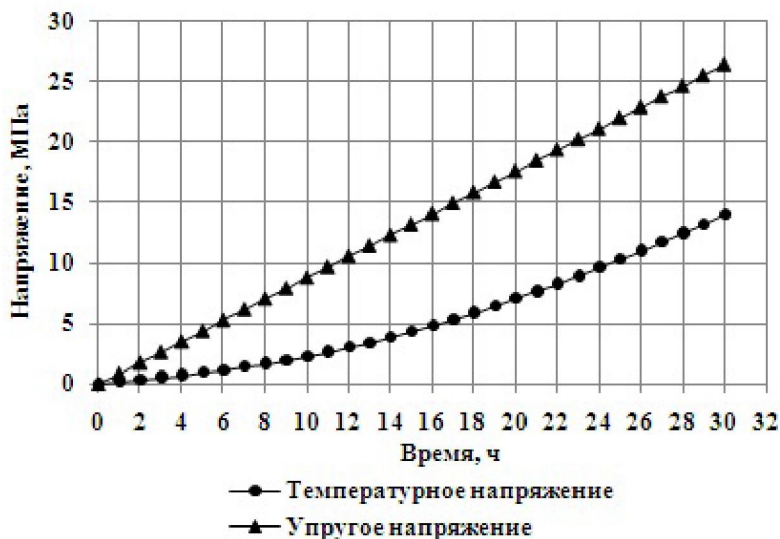


Рисунок 9 – Изменение напряжений в асфальтобетонном покрытии

Figure 9 – Change in stresses in asphalt concrete pavement

3. РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИЙ И ДИССИПАЦИЙ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМ ПОКРЫТИИ.

На рисунке 10 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:

$$W_e(t) = \sigma_e(t) \cdot \varepsilon_T(t); \quad (3)$$

$$W_T(t) = \sigma_t(t) \cdot \varepsilon_T(t). \quad (4)$$

Энергия диссипации найдена как разница между упругой и вязкоупругой энергиями:

$$W_d(t) = W_e(t) - W_T(t). \quad (5)$$

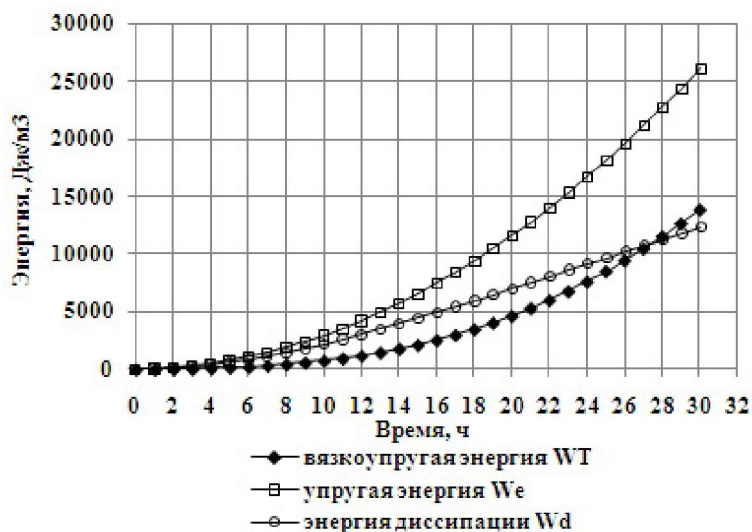


Рисунок 10 – Изменение энергий в асфальтобетонном покрытии

Figure 10 – Change in energy in asphalt concrete pavement

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.

Описанная выше картина изменения энергий в покрытии была бы справедлива до конца периода охлаждения, если бы температурное напряжение не достигло предела прочности асфальтобетона [14]. Из рисунка 11 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. 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 12 даны графики изменения перемещений верхнего и среднего узлов на поверхности трещины (на правой грани на рисунке 6) в асфальтобетонном

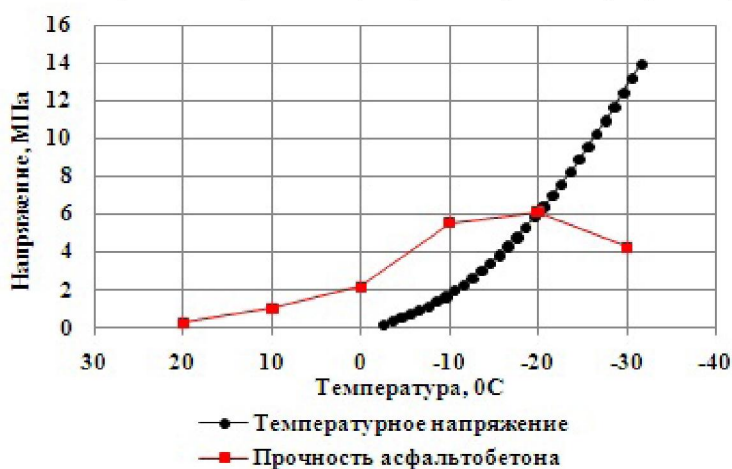


Рисунок 11 – К определению момента времени растрескивания асфальтобетонного покрытия

Figure 11 – To determination of the moment of time cracking of asphalt concrete pavement

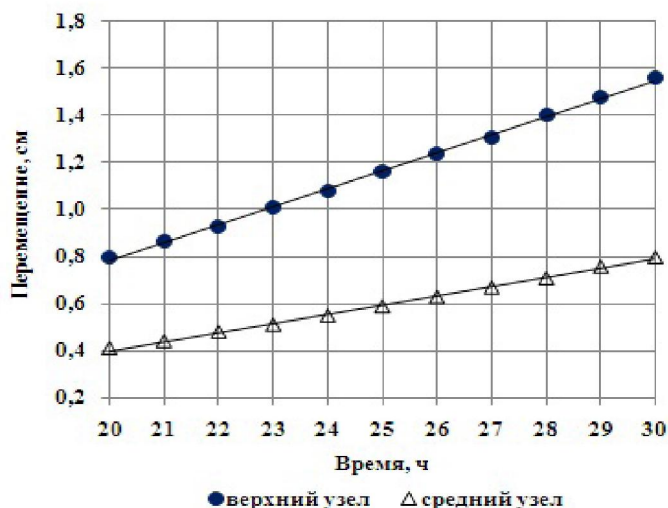


Рисунок 12 – Изменение перемещений верхнего и среднего узлов на поверхности трещины при охлаждении асфальтобетонного покрытия

Figure 12 – Change in movements of the upper and middle nodes on the surface of crack at cooling of asphalt concrete pavement

покрытия 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.

На рисунке 13 даны два графика, верхний из которых показывает изменение энергии вязкоупругой диссипации 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 по релаксационному механизму диссипирует энергию меньшую и с меньшей скоростью, чем до растрескивания покрытия. К этому также надо добавить диссипацию энергии, реализуемую через деформацию свободной поверхности трещины (механически). Таким образом, после растрескивания покрытие рассеивает суммарную энергию, состоящую из вязкоупругой энергии и энергии деформации трещины. Это положение отражено на рисунке 14, на котором видно, что в момент времени появления трещины имеется скачок в графике диссипации энергии.



Рисунок 13 – Изменение энергий вязкоупругой диссипации асфальтобетона (W_d) и деформирования трещины (W_{cr})

Figure 13 – Change in the energy of a viscoelastic dissipation of asphalt concrete (W_d) and deformation of the crack (W_{cr})



Рисунок 14 – Изменение энергий вязкоупругой диссипации до и после растрескивания покрытия, энергии деформирования трещины и суммарной энергии диссипации

Figure 14 – Change in the energy of viscoelastic dissipation before and after surface cracking, crack deformation energy and total dissipation energy

4. АСФАЛЬТОБЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ – ДИССИПАТИВНАЯ СТРУКТУРА.

В работе [15] 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 с трещинами предложено рассматривать как специфические диссипативные структуры, адаптированные к внешним условиям.

Открытые системы могут обмениваться с окружающими средой и телами энергией и веществом и являются структурно сложными. Благодаря сложности открытых систем в них в критических условиях возникают различного рода структуры [16-19]. 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 [20, 21].

4.1. Примеры диссипативных структур. Одним из ярких примеров образования диссипативных структур в открытой термодинамической системе является эффект Бенара [22-24]. 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 15). Новая структура создается совместным кооперативным движением молекул жидкости. Как видно из рисунка 16, 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.

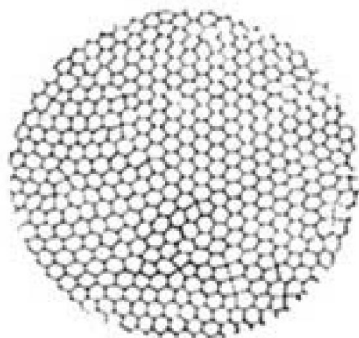


Рисунок 15 – Эффект Бенара

Figure 15 – Benard's effect

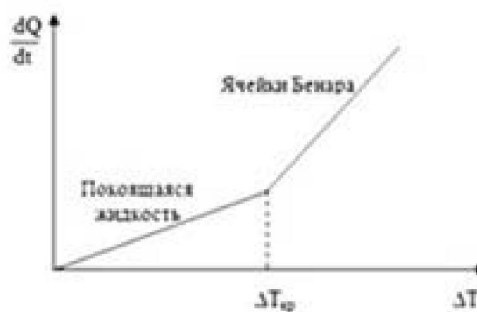


Рисунок 16 – Зависимость скорости переноса теплоты от разности температур

Figure 16 – The dependence of the heat transfer rate from the temperature difference

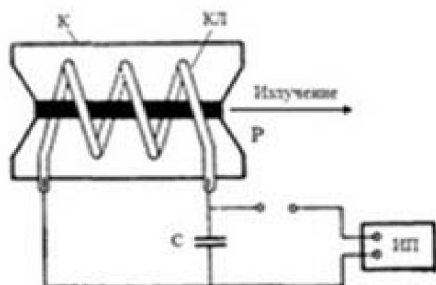


Рисунок 17 – Схема рубинового лазера:

Р – рубин; К – кожух;
КЛ – ксеноновая лампа для накачки; С – конденсатор;
ИП – источник постоянного напряжения

Figure 17 – Scheme of ruby laser:

Р – ruby; К – hood;
КЛ – Xenon bulb for pumping; С – capacitor;
ИП – DC power supply

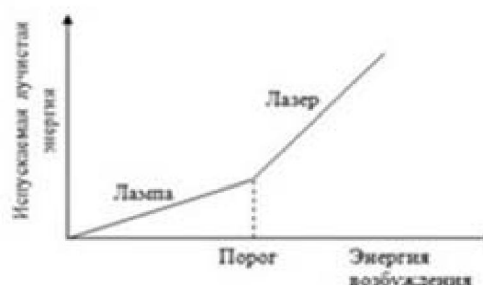


Рисунок 18 – Зависимость испускаемой лучистой энергии от энергии возбуждения лазера

Figure 18 – The dependence of the emitted radiant energy from the laser excitation energy

Образование диссипативной структуры можно наблюдать и в случае лазера [22]. На рисунке 17 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 18 видно, что график изменения мощности лучистой энергии подобен графику эффекта Бенара (рисунок 16).

4.2. Скорость диссипации энергии в асфальтобетонном покрытии. 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 19). Но при продолжении охлаждения скорость накапливаемой в покрытии энергии становится больше, чем рассеиваемая энергия, что вызывает постепенное увеличение напряжения (рисунок 10). Как только величина напряжения достигает предела прочности асфальтобетона при растяжении (рисунок 11) появляется температурная трещина. В этот момент происходит скачкообразное высвобождение части накопленной в покрытии энергии из-за приобретения деформации свободной поверхности вновь образованной трещины (рисунок 14). При дальнейшем охлаждении асфальтобетонное покрытие рассеивает накапливаемую энергию через два механизма: продолжается рассеивание энергии через релаксацию напряжения и добавляется высвобождение части



Рисунок 19 – Изменение температурного напряжения в асфальтобетонном покрытии до и после растрескивания

Figure 19 – Change in thermal stress in asphalt concrete pavement before and after cracking

энергии из-за деформации свободной поверхности трещины (механическая диссипация энергии). После появления трещины количество рассеиваемой по релаксационному механизму энергии становится меньше, чем до появления трещины.

На рисунке 20 представлен график изменения скорости диссипации энергии в асфальтобетонном покрытии в зависимости от температуры. Как у конвективных ячеек Бенара (рисунок 16) и рубинового лазера (рисунок 18), 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 (релаксационный и механический) и суммарная диссипация энергии реализуется со скоростью, большей чем до растрескивания покрытия.

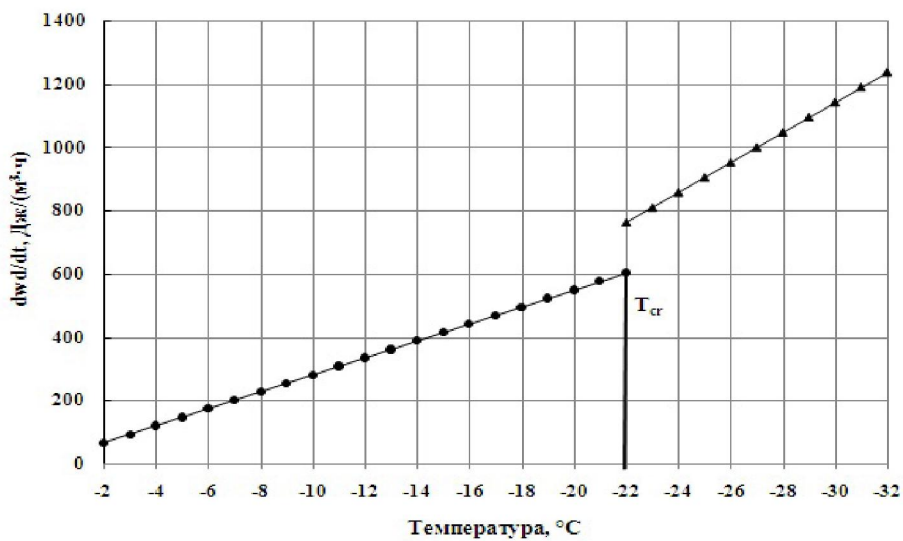


Рисунок 20 – Зависимость скорости диссипации энергии в асфальтобетонном покрытии от температуры

Figure 20 – The dependence of the energy dissipation speed in asphalt concrete pavement on temperature

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.

4.3. Энтропия и критерии эволюции. Пригожиным И. показано, что изменение энтропии ds открытой термодинамической системы можно рассматривать как сумму двух слагаемых [25-27]:

$$ds = d_e s + d_i s, \quad (6)$$

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:

$$d_i s \geq 0, \quad (7)$$

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

В работе [28] 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.

Как видно из рисунка 21, 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.

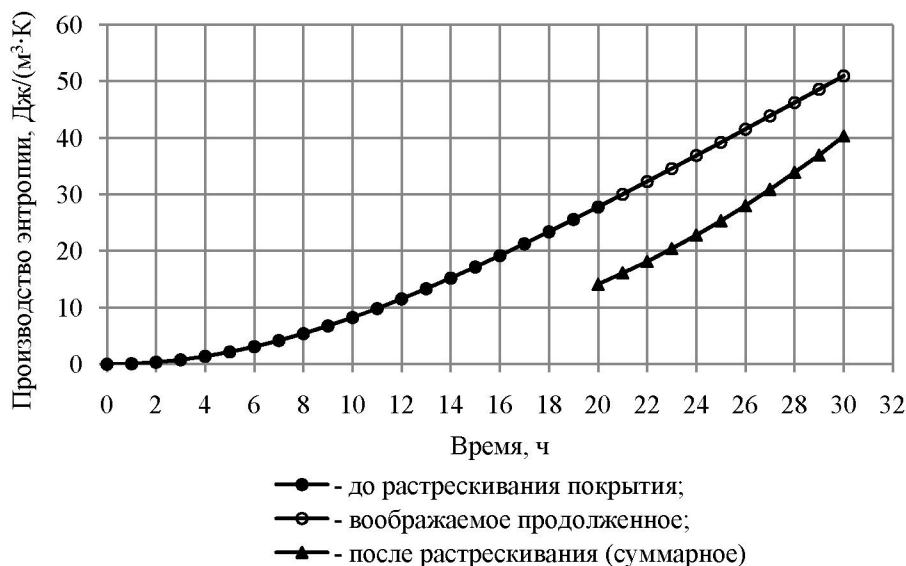


Рисунок 21 – Изменение производства энтропии в асфальтобетонном покрытии до и после растрескивания

Figure 21 – Change in entropy production in asphalt concrete pavement before and after cracking

В работе [29] 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. 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, а покрытие 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 [26] 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 [30].

Критерий Гленсдорфа-Пригожина записывается в следующей форме [31]:

$$\frac{d_x s_i}{dt} \leq 0, \quad (8)$$

где s_i – производство энтропии; $\frac{d_x s_i}{dt}$ – скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил:

$$\frac{d_x s_i}{dt} = \int_V \sum_{i=1}^n I_i \frac{dX_i}{dt} dV, \quad (9)$$

где I_i, X_i – термодинамические потоки и силы соответственно; V – объем системы (тела).

Применительно к рассматриваемой нами задаче имеем:

$$\frac{d_x s_i}{dt} = I \frac{dX}{dt} = \frac{\sigma_T}{T} \frac{d\varepsilon_T(t)}{dt}. \quad (10)$$

$$\varepsilon_T(t) = |\alpha \cdot (T_0 - Kt)|. \quad (11)$$

$$\frac{d\varepsilon_T(t)}{dt} = \alpha K, \quad (12)$$

где K – скорость охлаждения, °С/ч.

Таким образом, с учетом (11) и (12) имеем:

$$\frac{d_x s_i}{dt} = \frac{\sigma_T \alpha K}{T}. \quad (13)$$

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 22, скорость производства энтропии после появления трещины в асфальтобетонном покрытии заметно уменьшается.



Рисунок 22 – Изменение скорости производства энтропии до и после растрескивания асфальтобетонного покрытия

Figure 22 – Change in the rate of entropy production before and after cracking of asphalt concrete pavement

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ПР РК 218-29-03. Технические правила ремонта и содержания автомобильных дорог. – Астана, 2003. – 336 с.
- [2] Сюньи Г.К. О причинах образования температурных трещин на городских асфальтобетонных покрытиях и мерах их предупреждения. – Киев: Госстройиздат, 1955. – 23 с.
- [3] Сюньи Г.К. Дорожный асфальтобетон. – Киев: Госстройиздат, 1962. – 236 с.
- [4] Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E. Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete // Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. – 1965. – Vol. 34. – P. 248-285.
- [5] Hilles J.F., Brien D. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses // Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. – 1966. – Vol. 35. – P. 292-309.
- [6] Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
- [7] Teltayev V., Aitbaev K. Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement // Geomechanics and Engineering. – 2015. – Vol. 8, N 2. – P. 133-152.
- [8] Телтаев Б.Б., Айтбаев К.А. Нестационарное температурное поле в автомобильной дороге // Доклады НАН РК. – 2015. – № 3. – С. 55-66.
- [9] Телтаев Б.Б. Дорожное асфальтобетонное покрытие как диссипативная структура // Доклады НАН РК. – 2016. – № 2. – С. 11-37.
- [10] СТ РК 1373-2013. Битумы и битумные вяжущие. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. – Астана, 2013.
- [11] СТ РК 1225-2013. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. – Астана, 2013.
- [12] EN 12697-46. (Dart). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. – 2004.
- [13] EN 12697-33. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. – Part 33: Specimen prepared by roller compactor. – 2003.
- [14] Teltayev V. Evaluation of low temperature cracking indicators of hot mix asphalt pavement // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2014. – Vol. 7, N 5. – P. 343-351.
- [15] Телтаев Б.Б. Закономерности самоорганизации низкотемпературного растрескивания дорожного асфальтобетонного покрытия // Доклады НАН РК. – 2015. – № 4. – С. 40-65.
- [16] Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука, 1985.
- [17] Пригожин И. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 208 с.
- [18] Климонтович Ю.Л. Критерий относительной степени упорядоченности открытых систем // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1231-1243.

- [19] Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. – М.: «Янус-К», 2002. – 284 с.
- [20] Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.
- [21] Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 405 с.
- [22] Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с.
- [23] Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 8. – С. 109-116.
- [24] Осипов А.И. Термодинамика вчера, сегодня, завтра. Часть 2. Неравновесная термодинамика // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 5. – С. 91-97.
- [25] Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: ИЛ, 1960. – 128 с.
- [26] Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 281 с.
- [27] Пригожин И. Время, структура и флуктуации (Нобелевская лекция по химии 1977 года) // Успехи физических наук. – 1980. – Т. 131, № 2. – С. 185-207.
- [28] Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. – М.: Наука, 1990.
- [29] Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики? – М.: РИМИС, 2009. – 176 с.
- [30] Teltayev B., Kaganovich Ye., Amirbayev Ye. Evaluation of low temperature stability of bitumen and hot mix asphalt pavement. 12th International Society of Asphalt Pavement Conference on Asphalt Pavements. June 1-5, 2014. Program and Abstracts. – Raleigh, North Carolina, USA, 2014. – P. 52.
- [31] Базаров И.П. Термодинамика. – СПб.: Изд-во «Лань», 2010. – 384 с.

REFERENCES

- [1] PR RK 218-29-03. Technical specification on roads maintenance. Astana, 2003. 336 p. (in Russ.).
- [2] Syuni G.K. About reasons of temperature cracking on urban asphalt pavements and ways of its prevention. Kiev: Gosstroyizdat, 1955. 23 p. (in Russ.).
- [3] Syuni G.K. Road asphalt concrete. Kiev: Gosstroyizdat, 1962. 236 p. (in Russ.).
- [4] Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E. Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete. Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. 1965. Vol. 34. P. 248-285 (in Eng.).
- [5] Hilles J.F., Brien D. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses. Proceedings of the Asphalt Paving Technologists. 1966. Vol. 35. P. 292-309 (in Eng.).
- [6] Prigogine I., Stengers I. Order out of chaos: Man's new dialogue with nature. M.: Progress, 1986. 432 p. (in Russ.).
- [7] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement. Geomechanics and Engineering. 2015. Vol. 8, N 2. P. 133-152 (in Eng.).
- [8] Teltayev B., Aitbaev K. Transient temperature field in road // Reports of NAS RK. 2015. N 3. P. 55-66 (in Russ.).
- [9] Teltayev B. A road asphalt concrete pavement as a dissipative structure // Reports of NAS RK. 2016. N 2. P. 11-37 (in Russ.).
- [10] ST RK 1373-2013. Bitumens and bitumen binders. Oil road viscous bitumens. Technical specifications. Astana, 2005 (in Russ.).
- [11] ST RK 1225-2003. Hot mix asphalt for roads and airfields. Technical specifications. Astana, 2003 (in Russ.).
- [12] EN 12697-46. (Dartf). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. 2004 (in Eng.).
- [13] EN 12697-33. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. 2003 (in Eng.).
- [14] Teltayev B. Evaluation of low temperature cracking indicators of hot mix asphalt pavement. International Journal of Pavement Research and Technology. 2014. Vol. 7, N 5. P. 343-351 (in Eng.).
- [15] Teltayev B. Self-organization laws of road asphalt pavement low temperature cracking // Reports of the national Academy of sciences of the republic of Kazakhstan. 2015. N 4. P. 40-65 (in Russ.).
- [16] Prigogine I. From being to becoming. M.: Science, 1985 (in Russ.).
- [17] Prigogine I. End of certainty. Time, chaos and new courses of nature. Izhevsk: RDC "Regular and chaotic dynamics", 2000. 208 p. (in Russ.).
- [18] Klimontovich Yu. L. The Criterion of the relative degree of order of open systems // Successes of physical sciences. 1996. Vol. 166, N 11. P. 1231-1243 (in Russ.).
- [19] Klimontovich Y. L. Introduction to the physics of open systems. M.: "Yanus-K", 2002. 284 p. (in Russ.).
- [20] Haken H. Synergetics: the hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices. M.: Mir, 1985 (in Russ.).
- [21] Haken H. Synergetics. M.: Mir, 1980. 405 p. (in Russ.).
- [22] Wolkenstein M.V. Entropy and information. M.: Nauka, 1986. 192 p. (in Russ.).
- [23] Klimontovich Yu.L. Introduction to physics of open systems // Soros education journal. 1996. N 8. P. 109-116 (in Russ.).
- [24] Osipov A.I. Thermodynamics yesterday, today and tomorrow. Part 2. Nonequilibrium thermodynamics // Soros education journal. 1999. N 5. P. 91-97 (in Russ.).
- [25] Prigogine I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. M.: IL, 1960. 128 p. (in Russ.).
- [26] Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. M.: Mir, 1973. 281 p. (in Russ.).

[27] Prigogine I. Time, structure and fluctuations (Nobel lecture in chemistry of 1977 year) // Successes of physical sciences. 1980. Vol. 131, N 2. P. 185-207 (in Russ.).

[28] Klimontovich Yu.L. Turbulent motion and structure of chaos. M.: Nauka, 1990 (in Russ.).

[29] Schrodinger E. What is life? The physical aspect of the living cell. M.: РИМИС, 2009. 176 p. (in Russ.).

[30] Teltayev B., Kaganovich Ye., Amirbayev Ye. Evaluation of low temperature stability of bitumen and hot mix asphalt pavement. 12th International Society of Asphalt Pavement Conference on Asphalt Pavements. June 1-5, 2014. Program and Abstracts. Raleigh, North Carolina, USA, 2014. P. 52 (in Eng.).

[31] Bazarov I.P. Thermodynamics. SPb.: Publisher "Lan", 2010. 384 p. (in Russ.).

Б. Б. Телтаев

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

АСФАЛЬТБЕТОН ЖАМЫЛҒЫДА ТӨМЕНГІ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ЖАРЫҚТАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫНА ЖАҢА КӨЗҚАРАС

Аннотация. Мақала асфальтбетон жол жамылғысының төменгі температуралық жарылу құбылысын қайтпайтын үдерістер термодинамикасы мен синергетика қағидалары негізінде түсіндіруге арналған. Өз бетінше ұйымдасудың 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 ұйымдасу үдерістеріндегі энтропия өндірісінің минимумы принципін 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 ықшамдатылған 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.

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

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